

VODOHOSPODÁŘSKÉ TECHNICKO-EKONOMICKÉ INFORMACE

VTEI / 2022 / 1

4 / Automatické vymezení povodí na území Česka v ArcGIS Pro
25 / Možnosti využití spektroskopie pro hodnocení vlastností lesních půd
42 / Rozhovor s Ing. Lucií Orlíkovou, Ph.D., odbornou asistentkou
Katedry geoinformatiky na VŠB-TU v Ostravě

2. únor – světový den mokřadů

Mokřady patří mezi nejvýznamnější, ale současně i světově nejohroženější ekosystémy. Podílejí se na koloběhu vody v přírodě, udržují vodu v krajině, příznivě ovlivňují podnebí velkým výparem, pohlcují nadbytečný oxid uhličitý z ovzduší, jsou zdrojem potravy pro více než třetinu planety (rybolov, pěstování rýže). Rašeliniště jsou významným úložištěm uhlíku. Význam mokřadů je tedy i ve zmírňování klimatických změn. Zároveň jsou mokřady centry biodiverzity – jsou biotopem specifických společenstev a endemických nebo velmi vzácných druhů rostlin, živočichů, hub a mikroorganismů. Bohužel vlivem člověka mokřadů na Zemi stále ubývá.

Ramsarská úmluva je tak první celosvětová mezinárodní úmluva na ochranu a moudré využívání přírodních zdrojů a také jediná úmluva, jež chrání určitý typ biotopu. Úmluva o mokřadech majících mezinárodní význam především jako biotopy vodního ptactva, známá coby Ramsarská úmluva (The Ramsar Convention on Wetlands), byla prvními státy podepsána 2. února 1971 v iránském městě Ramsar. Tento den byl poté prohlášen světovým dnem mokřadů (World Wetlands Day).

Dosud k ní přistoupilo 169 států. Česká republika je smluvní stranou od roku 1990. Za naplňování podmínek úmluvy u nás zodpovídá Ministerstvo životního prostředí (MŽP). Funkci poradního orgánu ve věcech ochrany mokřadů vykonává Český ramsarský výbor (byl ustaven v roce 1993), složený ze zástupců MŽP, pracovníků státní ochrany přírody, pracovníků vědeckých a výzkumných pracovišť i nevládních organizací. Úmluva ukládá členským zemím povinnost vyhlásit na svém území minimálně jeden mokřad mezinárodního významu, který svými přírodními hodnotami odpovídá schváleným

kritériím, a zařadit ho do seznamu mokřadů mezinárodního významu. Stát se tím rovněž zavazuje, že zapsaným mokřadům bude věnovat zvýšenou péči a ochranu.

Víte, že Česká republika zařadila do seznamu Ramsarské úmluvy celkem 14 lokalit?

- Šumavská rašeliniště
- Třeboňské rybníky
- Novozámecký a Břežský rybník
- Lednické rybníky
- Litovelské Pomoraví
- Poodří
- Krkonošská rašeliniště
- Třeboňská rašeliniště
- Mokřady dolního Podyjí
- Mokřady Liběchovky a Pšovky
- Podzemní Punkva
- Krušnohorská rašeliniště
- Horní Jizera
- Pramenné vývěry a rašeliniště Slavkovského lesa

Mgr. Zuzana Řehořová
Odborná redaktorka VTEI



Obsah



3 Úvod

4 Automatické vymezení povodí na území Česka v ArcGIS Pro

Vít Štoviček

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

Libor Ducháček, Ondřej Ledvinka



25 Možnosti využití spektroskopie pro hodnocení vlastností lesních půd

Josef Kratina, Václava Maťašovská

32 Praktické příklady využití GIS v hydrologii v ČHMÚ

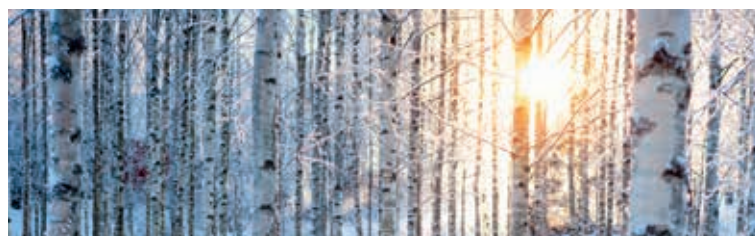
Petr Šercl, Radovan Tyl, Pavel Kukla, Martin Pecha



41 Autoři

42 Rozhovor s Ing. Lucií Orlíkovou, Ph.D., odbornou asistentkou Katedry geoinformatiky na Vysoké škole báňské – Technické univerzitě v Ostravě

Václava Maťašovská



44 Mezinárodní komise IAHS pro dálkový průzkum Země

Ondřej Ledvinka

47 GIS a kartografie ve VÚV TGM

Tomáš Fojtík, Lucie Jašíková, Jindra Kurfířtová, Marcela Makovcová, Václava Maťašovská, Pavel Mayer, Hana Nováková, Judita Zavřelová, Aleš Zbořil



Vážení čtenáři,

určitě máte stejný dojem jako já. Už to vypadalo, že zima bude konečně taková, na jakou jsme dlouho čekali. Začátek vypadal slibně, byl mráz, dokonce sněžilo i ve městech, a najednou se všechno zvrtilo a do nového roku jsme vstoupili s teplotními rekordy. Samozřejmě s těmi plusovými. V některých dnech byly zaznamenány nejvyšší teploty za celou dobu měření, trochu se jim přiblížily pouze teploty ze třicátých let minulého století. Obleva nás připravila o cenný sníh, takže musíme spoléhat na déšť a doufat, že bude dostatečný na vytvoření potřebných zásob vody pro období léta s opět očekávaným suchem. Zatím však nemáme zimu za sebou, a tak je předčasné dělat nějaké závěry. S určitou nadsázkou bude zajímavé sledovat, který z článků únorového čísla VTEI bude nakonec aktuálnější – jestli ten, co řeší nulovou izochionu, tedy sněhovou čáru, nebo zda zvítězí detekce mokřadů a podmáčených území.

Většina z vás určitě slyšela o sedmiletých klimatických cyklech. Byly založeny na empirických zkušenostech zemědělců již ve starověku, přičemž zmínku o symbolice v podobě sedmi tučných a hubených krav najdeme dokonce již ve Starém zákoně. Cykly nemusely být zrovna sedmileté, kolísaly mezi šesti a deseti lety, nicméně po staletí fungovaly. Máme tedy ještě naději, že se přehoupneme do vodného a studeného období, i když v situaci dramatického zdražování energií asi také není o co stát. Abych ale skončil pozitivně: stále je naděje, že všechny ty výkyvy počasí jsou součástí přirozeného procesu a my máme více času zvrátit klimatickou změnu, která – pokud už tady není – určitě přijde. Podobně jako nové varianty covidu, o němž jsem se však tentokrát vůbec nechtěl zmiňovat.

Všem přeji pevné zdraví a hodně úspěchů.



Ing. Tomáš Urban
ředitel VÚV TGM, v. v. i.

Automatické vymezení povodí na území Česka v ArcGIS Pro

VÍT ŠTOVÍČEK

Klíčová slova: automatická delineace – povodí – rozvodnice – GIS – ArcHydro

SOUHRN

Manuální vymezení povodí dle rozvodnic je tradičně prováděno analýzou topografické mapy a vrstevnic. S využitím digitálních modelů reliéfu probíhá delineace povodí a říční sítě automaticky, čímž se snižuje časová náročnost spjatá s manuálním vymezením. V tomto článku je představen samotný proces automatické delineace a nabízené modely v rámci balíčku nástrojů Arc Hydro Tools Pro, vytvořeného společností ESRI pro software ArcGIS Pro. Automatická delineace pomocí různých metod byla implementována na vybraná povodí v Česku lišící se rozlohou a nadmořskou výškou. Jako podklad sloužily digitální modely reliéfu s různým rozlišením, od velikosti buňky 2×2 m po 50×50 m. Takto vytvořená povodí byla následně porovnána s aktuální vrstvou rozvodnic 4. řádu, platnou k roku 2019. Výsledky automatické delineace u všech povodí, s výjimkou povodí v nížinách, ukazují na vysokou míru přesnosti. Automatickou delineaci lze uplatnit nejenom jako vstup do hydrologických modelů, ale i k navazujícím analýzám povodí, např. pomocí dalších nástrojů v ArcGIS Pro.

ÚVOD

Vymezení povodí je základem pro hydrologické modelování a analýzy. Tradičně je prováděno analýzou topografické mapy a vrstevnic, což je často zdoluhavý a náročný proces. S využitím digitálního modelu reliéfu (dále jen DMR), jenž reprezentuje reliéf zemského povrchu, lze provést celý proces automaticky, čímž se výrazně snižuje jeho časová náročnost. Techniky pro automatické vymezení povodí jsou dostupné již od poloviny 80. let a byly použity v několika geoinformačních systémech (GIS) a dalších aplikacích. Vývoj těchto technik, stejně jako vznik nových DMR s vyšším rozlišením, tvoří základ pro přesnou a rychlou analýzu. Dalším důležitým faktorem je vývoj počítačové techniky, který umožňuje výkonnější a komplexní operace, jež mají být provedeny lokálně a dostatečně rychle. S tím se postupně zvětšuje poptávka po automatizovaných systémech, u nichž jsou kladeny nároky na přesné a rychle dostupné výsledky [1–3].

ArcHydro je datový model – sada nástrojů a postupů, které byly vyvinuty v průběhu let a jež podporují specifické GIS implementace v oblasti vodních zdrojů. Od roku 2002 se rozšířil o více než 300 nových nástrojů z původních 30 a je hojně využíván v mnoha různých projektech celou škálou uživatelů od státních institucí přes soukromé firmy nebo školy až po běžného uživatele se zájmem o vodní zdroje [4].

Tento článek slouží jako představení procesu automatické delineace, kterou lze provést pomocí nástrojů v balíčku Arc Hydro Tools Pro, vytvořeného společností ESRI pro software ArcGIS Pro. Samotná automatická delineace byla poté

pomocí různých metod implementována na vybraná povodí v Česku lišící se rozlohou a nadmořskou výškou, aby se ověřila její přesnost a nedostatky v různém typu reliéfu.

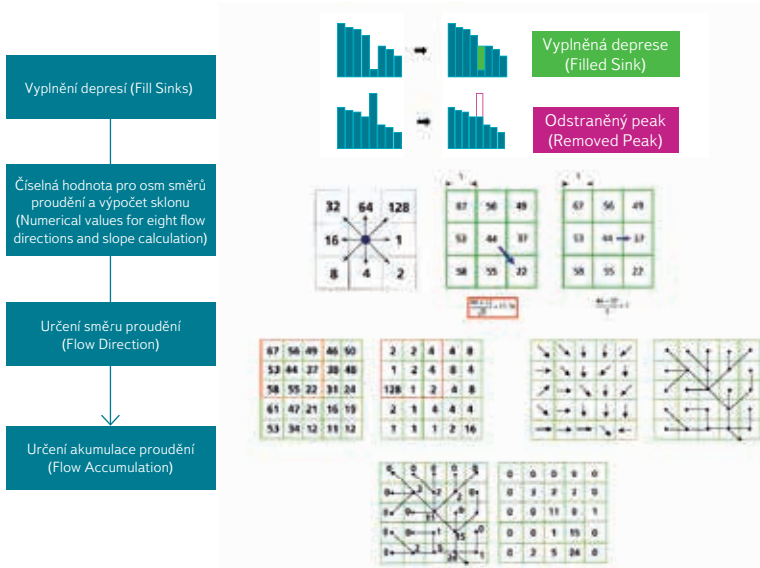
METODIKA

Základem ArcHydro je sada nástrojů (dále jen toolset) Hydrology, jenž je uložen v balíčku nástrojů (dále jen toolbox) Spatial analyst. Rozšíření o nové nástroje a vylepšení těch stávajících přinesl nový toolbox Arc Hydro Tools. Pro přechod na ArcGIS Pro vznikl dosud nejnovější toolbox Arc Hydro Tools Pro, který byl využit pro účely tohoto článku.

Základní proces delineace a vytvoření říční sítě pomocí toolsetu Terrain Preprocessing je částečně ilustrován na *obr. 1* a může být shrnut v několika bodech [6]:

1. Zarovnání DMR (funkce Level DEM) – přiřadí buňkám vstupního DMR stejnou hodnotu jako hodnoty v polygonech vložené vrstvy vodních útvarů.
2. Úprava DMR (DEM Reconditioning) – přetvoří reliéf „vypálením“ liniové vrstvy vodních toků pomocí metody AGREE [7], kdy je okolí vodního toku sníženo o zadané hodnoty. Tím se vytvoří zřetelnější příčný profil, který nemusí být zcela jasný u vstupního DMR z důvodu nedostatku dat o nadmořské výšce v okolí vodních toků.
3. Vyplnění depresí (Fill Sinks) – upravuje nerovnosti terénu zvýšením či snížením hodnoty buňky v závislosti na okolních buňkách tak, aby vygenerovaná říční síť byla kontinuální.
4. Určení směru proudění (Flow Direction) – pro každou buňku určí směr proudění podle největšího rozdílu hodnot (největší sklon) mezi sousedními buňkami a vytvoří rastr (metoda D8). Dále lze vybrat metody D-Infinity nebo Multiple Flow Direction.
5. Určení akumulace proudění (Flow Accumulation) – na základě rastru Flow Direction sečte počet buněk, z nichž přitéká voda do dané buňky, a tuto výslednou hodnotu jí přiřadí. Následně ze všech hodnot vytvoří rastr.

6. Vygenerování říční sítě (Stream Definition) – na základě Flow Accumulation a uživatelem zvolené prahové hodnoty (počet buněk, respektive minimální velikost povodí) vygeneruje říční síť. Všem buňkám nad prahovou hodnotou je následně přiřazena hodnota 1, pod hodnotou prázdná hodnota „Null“. Menší prahová hodnota vede k vytvoření hustší říční sítě a většímu počtu dílčích povodí.
7. Segmentace říční sítě (Stream Segmentation) – rozdělí vodní toky do jednotlivých úseků (k soutoku dvou vodních toků nebo mezi jednotlivými soutoky) a přiřadí jim jedinečný identifikátor. Všechny buňky v daném úseku tak lze jednoznačně rozeznat od jiných určitým kódem „Grid Code“.
8. Delineace povodí (Catchment Grid Delineation) – každé buňce přiřadí hodnotu shodující se s povodím, k němuž náleží. Tato hodnota je shodná s hodnotou jednotlivých úseků toku. Výsledný rastr se poté převede na polygonovou vrstvu pomocí funkce Catchment Polygon Processing.
9. Převod rastru říční sítě (Drainage line Processing) – převede vygenerovaný rastr říční sítě z kroku 6 do liniové vrstvy.

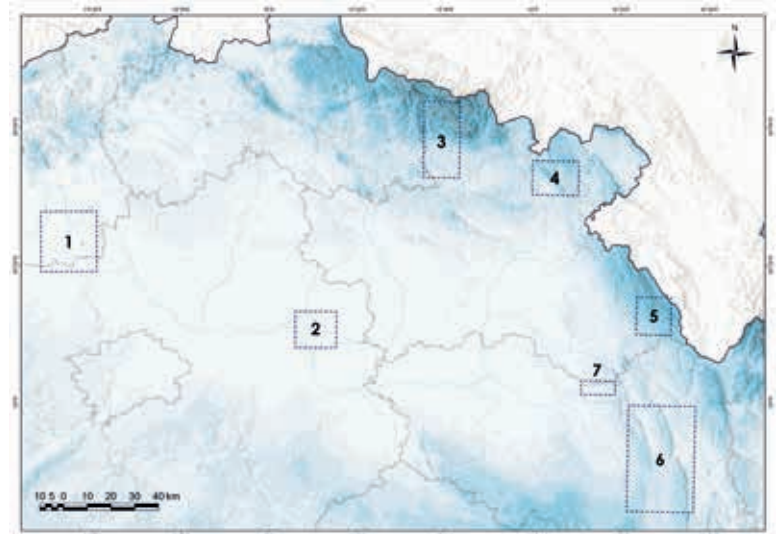


Obr. 1. Proces automatické delineaace povodí [5]
Fig. 1. Automatic watershed delineation process [5]

Body 1 a 2 vyžadují vstupní polygonovou (vodní plochy), respektive liniovou (vodní toky) vrstvu, díky kterým se v následujících krocích popsané funkce mohou lišit, celý proces však funguje i bez nich.

K urychlení celého procesu lze využít toolset Terrain Preprocessing Workflows [8], který obsahuje několik modelů, z nichž si uživatel vybírá na základě dostupných vstupních dat a typu říční sítě v daném reliéfu. Vstupní data se dělí do čtyř kategorií:

1. Uživatel má k dispozici pouze DMR bez vrstvy vodních toků a bez vymezených depresí,
2. DMR pouze s vymezenými depresemi,
3. DMR s vrstvou vodních toků i s vymezenými depresemi,
4. DMR pouze s vymezenými vodními toky.



Obr. 2. Mapa vybraných povodí: 1 – Čepel, 2 – Blatnice, 3 – Malé Labe, 4 – Jívka, 5 – Říčka, 6 – Třebovka, 7 – Sokořský potok (Zdroj: DIBAVOD, ArcČR 500 a DMR 5G)

Fig. 2. Map of selected watersheds: 1 – Čepel, 2 – Blatnice, 3 – Malé Labe, 4 – Jívka, 5 – Říčka, 6 – Třebovka, 7 – Sokořský potok (Source: DIBAVOD, ArcČR 500 and DMR 5G)

Typ říční sítě se poté dělí na tři kategorie: stromovitá (dendritická), asymetrická nebo kombinace obou.

K vytvoření rozvodnic pomocí automatické delineaace bylo vybráno šest povodí lišících se svou rozlohou a nadmořskou výškou a pro porovnání automatické delineaace nad DMR s různým rozlišením a skutečné vrstvy rozvodnic povodí Sokořského potoka (obr. 2). Konkrétně šlo o dvojice povodí, rozlohou vždy menší a větší, nacházející se v nížinách (Blatnice, Čepel), pahorkatinách (Jívka, Třebovka) a horách (Říčka, Malé Labe). Nejprve byly vytvořeny okolo všech povodí polygony (určitý rozsah, okno, z angl. „extent“, shodující se s obr. 2), v nichž byla provedena samotná delineaace. Pro ni byl pro všechna povodí použit jako podklad pouze DMR 5G. Jako první model byl zvolen typ pro stromovitou říční síť s DMR bez vrstvy vodních toků či vymezených depresí a následně druhý model s vrstvou vodních toků, jež byla vypálena do modelu reliéfu. Vrstva vodních toků byla použita z digitální báze DIBAVOD [9]. Pro znázornění odchylky mezi skutečnými a vygenerovanými rozvodnicemi byly vygenerovány polygony mezi těmito dvěma vrstvami. Podle velikosti jejich ploch se nakonec hodnotila přesnost celé delineaace. Aktuální vrstva rozvodnic je ke stažení na stránkách: <http://voda.chmi.cz/opv/stahnout.html>.

Pro porovnání automatické delineaace nad DMR s různým rozlišením a skutečné vrstvy rozvodnic v povodí Sokořského potoka bylo dohromady využito čtyř modelů reliéfu – DMR 5G, DMR 4G, DMÚ 25, dostupných ze stránek ČÚZK (<https://geoportal.cuzk.cz>) a ArcČR 500 dostupného ze stránek Arcdata Praha (<https://www.arcdata.cz/produkty/geograficka-data/arccr-4-0>) s velikostí pixelu 2, 10, 25 a 50 m. Jako model byl opět zvolen typ pro stromovitou říční síť s DMR bez vrstvy vodních toků či vymezených depresí.

VÝSLEDKY A DISKUZE

Prvním hodnoceným aspektem byl vliv rozlišení DMR na automatickou delineaaci povodí. Jako testovací území bylo vybráno povodí Sokořského potoka s rozlohou 17,1 km², průměrným sklonem 3,72 % a průměrnou nadmořskou výškou 361 m n. m. Z výsledných hodnot v tab. 1 je zřejmé, že se snižujícím se rozlišením DMR klesá i přesnost samotné delineaace. Zatímco při využití DMR 4G je odchylka od skutečné rozvodnice větší než 4 %, u rozlišení 25 × 25 m je více než dvojnásobná a u nejnižšího rozlišení 50 × 50 m dosahuje již 12,8 %.

Tab. 1. Výsledky automatické delineaace v povodí Skořenického potoka

Tab. 1. Results of the automatic delineation in the Skořenický potok watershed

Rozlišení DMR [m]	Rozdíl ploch [km ²]	Odchylka [%]*
DEM resolution [m]	Area difference [km ²]	Deviation [%]*
2 × 2	0,87	5,11
10 × 10	0,95	5,55
25 × 25	1,82	10,66
50 × 50	2,19	12,79

*Poměr rozdílů ploch ku celkové ploše povodí

*Ratio of area difference to total watershed area

Potvrzuje se tak, že přesná delineaace povodí závisí z velké části na kvalitě výchozího DMR, přesněji pak na jeho rozlišení [10–12]. Detailnější pohled na rozdíl mezi vygenerovanými rozvodnicemi nabízí obr. 3. Z něho je patrné, že při užití DMR s nižším rozlišením vznikají jakési „zuby“ dané velikostí pixelu, což zabraňuje detailní a přesné delineaaci.

Celková odchylka je však u tak malého povodí u všech typů DMR poměrně výrazná. V tomto případě je to zapříčiněno malou oblastí v západní části povodí s nízkým sklonem a komplikovanou říční sítí. Při automatické delineaaci nedošlo k vygenerování části vodního toku, a rozvodnice tak byla vedena jiným směrem. Především takovéto chybě se dá pomoci vypálením skutečných vodních toků do samotného reliéfu. Pokud bychom pro ilustraci použili terén s vypálenými toky u povodí Skořenického potoka, dostali bychom celkovou odchylku u DMR 5G mírně větší než 4 %.

Výsledky delineaace pro šest vybraných povodí znázorňuje tab. 2. Nejmenšího rozdílů bylo dosaženo u rozlohou největšího povodí Třebovky, kde odchylka (bez vypálených toků) činila pouhých 0,89 %. Nepatrně více měla obě horská povodí Říčka a Malé Labe, s odchylkami 1,34 a 1,85 %, další pahorkatinné

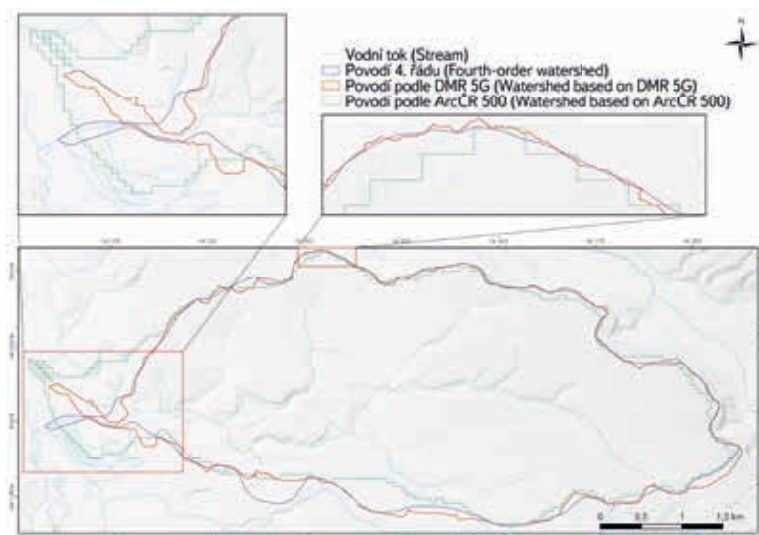
Tab. 2. Výsledky automatické delineaace v jednotlivých povodích

Tab. 2. Results of automatic delineation in the individual watersheds

Název povodí Name of watershed	Průměrná nadmořská výška [m n. m.] Average altitude [m a. s. l.]	Průměrný sklon [%] Average slope [%]	Rozloha [km ²] Area [km ²]	Rozdíl ploch [km ²] Area difference [km ²]		Odchylka [%]* Deviation [%]*	
				Model bez vypálených vodních toků Model without burnt streams	Model s vypálenými vodními toky Model with burnt streams	Model bez vypálených vodních toků Model without burnt streams	Model s vypálenými vodními toky Model with burnt streams
Říčka	740,35	10,76	33,52	0,45	0,45	1,34	1,34
Malé Labe	689,51	12,17	73,36	1,36	1,21	1,85	1,65
Blatnice	193,32	1,47	33,55	2,53	1,32	7,55	3,95
Čepel	226,88	2,72	98,97	9,04	10,83	9,13	10,94
Jívka	555,5	11,82	27,96	0,66	0,62	2,35	2,20
Třebovka	476,18	6,14	195,85	1,74	1,73	0,89	0,88

*Poměr rozdílů ploch ku celkové ploše povodí

*Ratio of area difference to total watershed area

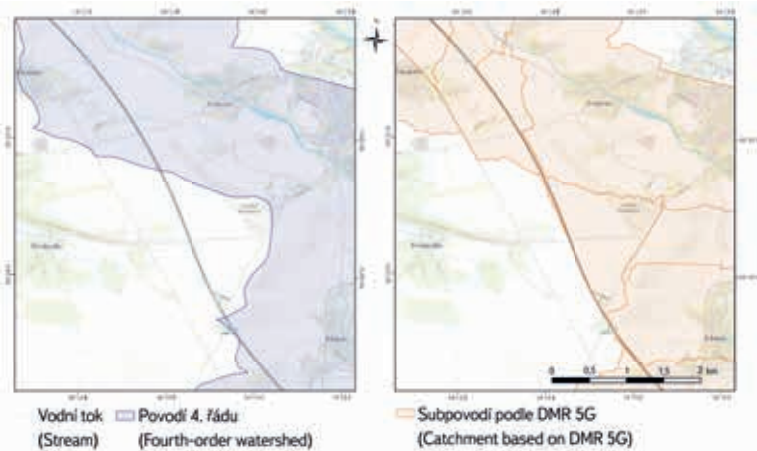


Obr. 3. Vygenerovaná povodí Skořenického potoka při využití různých digitálních modelů reliéfu

Fig. 3. Delineated watersheds of Skořenický potok using different digital elevation models

povodí Jívka mělo stále malou odchylku 2,35 %. Nejméně přesně byla vygenerována nížinná povodí. U povodí Blatnice dosahovala odchylka 7,55 % a u většího povodí Čepel vysokých 9,13 %.

Terén s vypálenou vrstvou vodních toků snížil odchylku u všech povodí kromě Čepel, kde naopak došlo k nárůstu o téměř 2 %. Vysoké odchylky u povodí Čepel, stejně jako u jiných nížinných povodí, mohou být zapříčiněny tím, že danou oblastí prochází liniový prvek (především dálnice a železniční tratě), který výrazně zasahuje do jinak rovinného terénu. Pokud je pak nadmořská výška daného prvku výrazněji pod nebo nad úrovní okolního terénu, může ji model vyhodnotit jako rozvodnici, případně jako samotný vodní tok, který tím zásadně mění průběh povodí, jako je tomu u povodí Čepel (obr. 4).



Obr. 4. Vliv dálnice na automatickou delineaaci povodí a subpovodí Čepel (Podkladová mapa: Esri World Topographic Map)

Fig. 4. Impact of a motorway on the automatic delineation of the Čepel watershed and catchments (Source map: Esri World Topographic Map)

Literatura [13] mimo jiné uvádí, že prvky jako umělé vodní toky, nízké hráze či velká jezera mohou tvořit významné deprese v terénu, jež mají vliv na přesnost výsledků, a to především v nížinných oblastech, říčních nivách. To má za následek vygenerování nereálné říční sítě, což je navíc limitováno rozlišením použitého DMR. K odstranění depresí se využívá funkce Fill Sinks, ovšem je otázkou, do jaké míry daný reliéf vyhladit. Na jednu stranu je určité vyhlazení potřeba, neboť se tím odstraní nepřesnosti vstupního DMR a lze tak dosáhnout realističtějšího povrchu se zachováním topografických charakteristik, na stranu druhou příliš velké vyhlazení může změnit či odstranit skutečné (přírodní) deprese, důležité pro přesný popis reliéfu. Správné vyhlazení DMR tak v tomto případě vede přes dobře zvolenou prahovou hodnotu pro snížení či zvýšení depresí. Ovšem jediná zvolená hodnota nemůže ve výsledku odpovídat celému zkoumanému území, a proto je potřeba brát v úvahu záměr a rozsah celé studie [14, 15].

Ačkoli u ostatních povodí došlo vypálením vodních toků do terénu ke snížení odchylky, jednalo se ve všech případech pouze o nepatrnou změnu v řádech desetin, či dokonce setin procent, s výjimkou povodí Blatnice, kde došlo ke zpřesnění o 3,6 %. Výsledky tak mohou napovídat, že vypálení vodních toků do terénu postrádá u některých povodí smysl, ovšem při detailnějším zkoumání výsledných rozvodnic vychází najevo, že zpřesnění se projevuje především v jednotlivých subpovodích (angl. catchments), nikoli v celém vybraném povodí (angl. watershed). Vypálení vodních toků v tomto případě nemá vliv na výslednou přesnost, nicméně mohlo by ovlivnit následné analýzy povodí, respektive subpovodí. Použití vrstev vodních toků tak může výrazně zvýšit přesnost při vymežování povodí, především v rovinných nížinných oblastech [16, 17].

Mezi další zpřesňující faktory lze zařadit využití vrstvy vodních ploch, čímž se zajistí propojení říční sítě s jezery, pobřežními lagunami nebo estuáry [18]. Pro tyto účely lze například použít volně dostupnou vrstvu SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) Water Body Dataset od USGS s rozlišením 30 × 30 m (<https://earthexplorer.usgs.gov>). Metody pro automatickou delineaaci v bezdotokových oblastech při použití SRTM DEM (Digital Elevation Model) představuje např. Liu [10].

V neposlední řadě může hrát roli nastavení prahové hodnoty pro vygenerování říční sítě. V modelech využitých pro tuto studii je tato hodnota defaultní (automaticky vyhodnocena modelem na základě DMR). Zvolením nižší hodnoty, čímž se zahustí říční síť, však může dojít ke zpřesnění delineaace [19].

Ačkoli je v celém článku porovnávána „přesnost“ vymezení povodí, nelze brát vrstvu skutečných rozvodnic jako podklad prostý jakýchkoli chyb. Jde o vrstvu, která je pravidelně aktualizována, avšak obsahuje velké množství ploch, kde vedení rozvodnic není zcela jednoznačné. Automatická delineaace

naopak přesně respektuje daný reliéf a pro každý pixel jasně určí směr proudění. Na druhou stranu nedokáže správně vyhodnotit určitá specifika, jako jsou vodní toky vedené pod povrchem či uměle vybudované kanály, jež se berou v potaz při manuální tvorbě rozvodnic. Výsledky je tak potřeba brát s určitou rezervou a nahlížet na ně jako na možnosti využití nástrojů ArcHydro Pro v nejnovějším zobrazení reliéfu Česka. Do budoucna by bylo vhodné udělat analýzu většího počtu povodí s různou rozlohou, na jinak členitějším reliéfu a zjistit, jaké prahové hodnoty (pro vyplnění/úpravu depresí či hustotu říční sítě) by ve výsledku nejlépe popsaly daný terén a daly tak základ pro co neefektivnější automatickou delineaaci. Zároveň je potřeba věnovat větší pozornost povodím v nížinných, v oblastech s rovným terénem, kde podle provedených studií dochází k největším odchylkám od skutečných rozvodnic. K vyhodnocení přesnosti delineaace by následně bylo vhodné použít více hodnotících kritérií založených na tvarových či délkových charakteristikách rozvodnic. Pro ilustraci lze uvést délky rozvodnic v povodí Skořenického potoka (obr. 3). Délka skutečné rozvodnice zde činí 21,2 km, vygenerované podle DMR s rozlišením 25 × 25 m necelých 27 km a s rozlišením 2 × 2 m téměř 31 km, což na první pohled neodpovídá mapě ani výsledným odchylkám. Díky vysokému rozlišení u DMR 5G totiž na vygenerované rozvodnici vzniká mnoho malých „zubů“, které zvyšují její celkovou délku. Pokud bychom chtěli hodnotit dle tohoto kritéria, museli bychom nejdříve zvolit co nejhodnější míru generalizace rozvodnice. Kdybychom např. tuto rozvodnici vyhladili dle funkce Smooth Line s tolerancí 100 m, byla by její výsledná délka 22,1 km, tedy jen o necelý kilometr více než délka skutečné rozvodnice.

VYUŽITÍ

Automatickou delineaaci povodí lze uplatnit především jako vstup do hydrologických modelů, např. SWAT, HBV, HEC-GeoHMS či ILWIS. Vytvořené studie se zaměřují spíše na porovnání různých metod a postupů při delineaaci než na rozdíly v přesnosti mezi modely, tudíž nelze jednoznačně říci, který model je vhodnější. Obecně se však jejich závěry shodují s výstupy této studie, a to zejména v tom, že největší rozdíly při delineaaci se tvoří v oblastech nížin s rovným terénem (případně příbřežních oblastech) a přesnost delineaace vysoce záleží na rozlišení vstupního DMR [20, 16, 17]. Využití ve větším měřítku lze nalézt například v Panevropské databázi řek a povodí [18], která obsahuje data o říční síti, jezerech a hranicích povodí v celé Evropě. Ta jsou vytvořena na základě DMR s rozlišením 100 m, čímž vznikají podmínky pro modelování ve středním a malém měřítku. Jako další vstupní data pro delineaaci povodí a vygenerování říční sítě sloužila výšková data SRTM, odvozená vrstva pobřežní linie a vybrané přírodní deprese. V nezbytných případech, ve velmi rovném terénu, kdy nebylo možné jednoznačně určit průběh vodního toku podle DMR, byla využita referenční síť vodních toků. Síť vodních toků a na ni navazující povodí byla generována dle klasické metody D8 pro určení směru proudění a algoritmu dle Soilla a Gratina [21] pro určení akumulace proudění. Pro řešení problémů proudění toků v rovinatém terénu byly použity tři nové algoritmy [22] a část terénu ve směru proudění u umělých depresí byla vyříznuta, namísto aby byla samotná deprese vyplněna, čímž se zamezilo dalšímu rozšíření rovinatého terénu. Na podobné nebo další metody a algoritmy pro optimální odstranění depresí se zaměřují studie [23, 24], jež by zároveň mohly být návodem, jak zpřesnit delineaaci, a daly by se aplikovat na území vybraná v této studii.

V ČHMÚ momentálně probíhá aktualizace rozvodnic nad DMR 5G. Editace probíhá manuálně v aplikaci ArcGIS Pro s vrstvou vodních toků ZABAGED a s využitím automaticky generovaných vrstevnic a vrstevnic odvozených a poskytnutých z ČÚZK [25]. Zároveň mohou editoři využít toolbox HydroDEM, podle něhož se vygenerují rozvodnice automaticky. Automatická delineaace se tak v tomto případě využívá především jako pomocný nástroj, a to zejména v rovinných oblastech nížin, kde není vedení rozvodnic tak jasné jako u povodí s větším sklonem.

ZÁVĚR

V tomto článku byla představena možnost automatické delineaace povodí a říční sítě pomocí nástrojů v balíčku Arc Hydro Tool Pro v prostředí ArcGIS Pro. Byl popsán samotný proces automatické delineaace a v rámci zhodnocení její funkčnosti a přesnosti byla aplikována na vybraná povodí v České republice. Nejpresněji byla vygenerována povodí v horských a pahorkatinných oblastech (odchylna velikosti povodí od skutečných rozvodnic do max. 2,4 %), nejméně pak v oblasti nížin. Výsledky korespondují s dosavadními výsledky dalších studií, u nichž k největším odchylkám dochází také v nížinných oblastech s rovným terénem. Dále byla potvrzena i snižující se přesnost delineaace s nižším rozlišením vstupního DMR. Byly diskutovány možné způsoby úprav DMR a změny v postupu vygenerování rozvodnic za účelem zpřesnění delineaace. V rámci dalšího výzkumu bylo navrženo aplikovat automatickou delineaaci na větší počet povodí se zaměřením na nížinné oblasti. Výslednou přesnost by mohla ovlivnit zejména úprava DMR – jak vstupní vrstvou vodních ploch, tak i různými možnostmi úpravy depresí. Automatickou delineaaci pomocí nástrojů v balíčku Arc Hydro Tool Pro společně s DMR o dostatečně vysokém rozlišení pro daný účel studie tak lze doporučit jako výkonný a dostatečně přesný nástroj.

Literatura

- [1] DJOKIC, D., YE, Z. DEM Preprocessing for Efficient Watershed Delineation [on-line]. In: *Proceedings of the 19th Esri Users Conference, San Diego, CA, 1999*. Dostupné z: <https://proceedings.esri.com/library/userconf/proc99/proceed/papers/pap676/p676.htm>
- [2] GARBRECHT, J., MARTZ L. W. Digital Elevation Model Issues in Water Resources Modeling [on-line]. In: *Proceedings of the 19th Esri Users Conference, San Diego, CA, 1999*. Dostupné z: <https://proceedings.esri.com/library/userconf/proc99/proceed/papers/pap866/p866.htm>
- [3] MERWADE, V. *Terrain Processing Using ArcHydro/GeoHMS* [on-line]. School of Civil Engineering, Purdue University, 2019. Dostupné z: https://web.ics.purdue.edu/~vmerwade/education/terrain_processing.pdf
- [4] DJOKIC, D. Arc Hydro in ArcGIS Pro: The Next Generation of Tools for Water Resources, In: *Esri Federal GIS Conference Proceedings*, Washington D. C. 2020. Dostupné z: <https://www.esri.com/content/dam/esrisites/en-us/events/conferences/2020/federal-gis/archydro-in-arcgis-pro-the-next-generation-of-tools-for-water-resources.pdf>
- [5] MAIDMENT, D. R. *Arc Hydro: GIS for Water Resources*. Redlands, Calif.: ASRI Press, 2002. ISBN 1589480341.
- [6] *ESRI. Arc Hydro Tools v2.0 – Tutorial* [on-line]. 2011, s. 184. Dostupné z: <http://downloads.esri.com/archydro/archydro/Tutorial>
- [7] FERDI, H. *AGREE – DEM Surface Reconditioning System* [on-line]. 1997. Dostupné z: <https://www.ce.utexas.edu/prof/maidment/GISHYDRO/ferdi/research/agree/agree.html>
- [8] *ESRI. Arc Hydro: Overview of Terrain Preprocessing Workflows* [on-line]. 2019, s. 18. Dostupné z: <https://www.esri.com/content/dam/esrisites/en-us/media/whitepaper/archydro-overviewofterrainprocesssingworkflows.pdf>
- [9] *DIBAVOD – Digitální báze vodohospodářských dat* [on-line]. Dostupné z: <http://www.dibavod.cz>
- [10] LIU, K., SONG, CH., KE, L., JIANG, L., MA, R. Automatic Watershed Delineation in the Tibetan Endorheic Basin. A Lake-Oriented Approach Based on Digital Elevation Models. *Geomorphology* [on-line]. 2020, č. 358. ISSN 0169555X. Dostupné z: doi: 10.1016/j.geomorph.2020.107127
- [11] WILSON, J. P. Digital Terrain Modeling. *Geomorphology* [on-line]. 2012, 137(1), s. 107–121. ISSN 0169555X. Dostupné z: doi: 10.1016/j.geomorph.2011.03.012
- [12] ALCARAZ, S. A., SANNIER, CH. C. T., VITORINO, A., DANIEL, O. Comparison of Methodologies for Automatic Generation of Limits and Drainage Networks for Hydrographic Basins. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* [on-line]. 2009, 13(4), s. 369–375. ISSN 1415-4366. Dostupné z: doi: 10.1590/S1415-43662009000400001
- [13] LI, L., YANG, J., WU, J. A Method of Watershed Delineation for Flat Terrain Using Sentinel-2A Imagery and DEM: A Case Study of the Taihu Basin. *ISPRS International Journal of Geo-Information* [on-line]. 2019, 8(12). ISSN 2220-9964. Dostupné z: doi: 10.3390/ijgi8120528
- [14] LI, S., MACMILLAN, R. A., LOBB, D. A., MCCONKEY, B. G., MOULIN, A., FRASER, W. R. Lidar DEM Error Analyses and Topographic Depression Identification in a Hummocky Landscape in the Prairie Region of Canada. *Geomorphology* [on-line]. 2011, 129(3–4), s. 263–275. ISSN 0169555X. Dostupné z: doi: 10.1016/j.geomorph.2011.02.020
- [15] GRIMALDI, S., NARDI, F., Di BENEDETTO, F., ISTANBULLUOGLU, E., BRAS, R. L. A Physically-Based Method for Removing Pits in Digital Elevation Models. *Advances in Water Resources* [on-line]. 2007, 30(10), s. 2151–2158. ISSN 03091708. Dostupné z: doi: 10.1016/j.advwatres.2006.11.016

[16] RAY, L. K. Limitation of Automatic Watershed Delineation Tools in Coastal Region. *Annals of GIS* [on-line]. 2018, 24(4), s. 261–274. ISSN 1947-5683. Dostupné z: doi: 10.1080/19475683.2018.1526212

[17] BAKER, M. E., WELLER, D. E., JORDAN, T. E. Comparison of Automated Watershed Delineations: Effects on Land Cover Areas, Percentages, and Relationships to Nutrient Discharge. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 2006, 72, s. 159–168.

[18] VOGT, J., SOILLE, P., DE JAGER, A., RIMAVICIUTE, E., MEHL, W., FOISNEAU, S., BODIS, K., DUSART, J., PARACCHINI, M., HAASTRUP, P., BAMP, C. A *Pan-European River and Catchment Database*. EUR 22920 EN. Luxembourg (Luxembourg): OPOCE, 2007. JRC40291

[19] LI, Z. Watershed Modeling Using Arc Hydro Based on DEMs: A Case Study in Jackpine Watershed. *Environmental Systems Research* [on-line]. 2014, 3(1). ISSN 2193-2697. Dostupné z: doi: 10.1186/2193-2697-3-11

[20] BALASUBRAMANI, K., SARAVANABAVAN, V., KANNADSAN, K. A *Comparison of Approaches for Automated Watershed Delineation: A Case Study of NagalAr Watershed*. [on-line]. 2012. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/267601581_A_Comparison_of_Approaches_for_Automated_Watershed_Delineation_A_Case_study_of_NagalAr_Watershed

[21] SOILLE, P., GRATIN, C. An Efficient Algorithm for Drainage Network Extraction on DEMs. *Journal of Visual Communication and Image Representation*. 1994, 5, s. 181–189.

[22] SOILLE, P. *Morphological Image Analysis*. 2nd Edition. Berlin, Heidelberg, New York: Springer 2003.

[23] WANG, Y., QIN, CH., ZHU, A. Review on Algorithms of Dealing with Depressions in Grid DEM. *Annals of GIS* [on-line]. 2019, 25(2), s. 83–97. ISSN 1947-5683. Dostupné z: doi: 10.1080/19475683.2019.1604571

[24] JACKSON, S. *Designing an Optimal Pit Removal Tool for Digital Elevation Models* [on-line]. 2012, s. 11. Dostupné z: <https://www.caee.utexas.edu/prof/maidment/giswr2012/TermPaper/Jackson.pdf>

[25] MATULOVÁ, J., TYL, R. *Aktualizace rozvodnic ČR nad digitálním modelem reliéfu 5G* [on-line]. Dostupné z: <https://storymaps.arcgis.com/stories>

Autor

Bc. Vít Šťovíček

✉ vit.stovicek@chmi.cz

ORCID: 0000-0002-4997-8056

Český hydrometeorologický ústav, Oddělení hydrofondu a bilancí, Praha

Příspěvek prošel lektorským řízením.

DOI: 10.46555/VTEI.2021.11.002

AUTOMATIC WATERSHED DELINEATION IN CZECH REPUBLIC USING ARCGIS PRO

ŠTOVÍČEK, V.

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

Keywords: automatic delineation – watershed –
watershed divide – GIS – ArcHydro

Manual watershed delineation by watershed divides is traditionally performed by analysis of topographic maps and contour lines. With the availability of digital elevation models, watershed and stream delineation is performed automatically, which reduces the time spent on manual delineation. In this study, we introduce the process of automatic delineation and available models within the toolbox Arc Hydro Tool Pro, created by ESRI for ArcGIS Pro software. Automatic delineation was implemented by different methods on selected watersheds in Czech Republic, varying in area and altitude. Digital elevation models with different resolutions, from pixel size of 2×2 m to 50×50 m, were used as the input layer. Next, these delineated watersheds were compared with the current layer of fourth-order watershed divides, valid to 2019. Results of automatic delineation in each watershed, except those in lowlands, show a high overall accuracy. Automatic delineation can be applied not only as the input to hydrological models but also to consequent watershed analysis, for example, with the use of other tools in ArcGIS Pro.



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

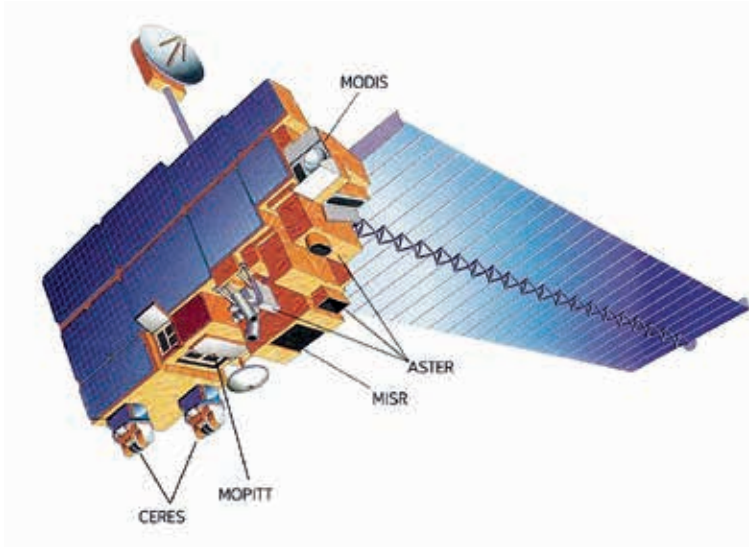
oblastí Česka. Právě hledání korelací a dalších vazeb, které se dají ze sledované řady vypočítat, jsou nosným tématem následujícího textu. Jednou ze stěžejních oblastí studia je kvantifikace míry závislosti variability průměrné nadmořské výšky nulové izochiony na terénních charakteristikách geomorfologických 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 zmírnění 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

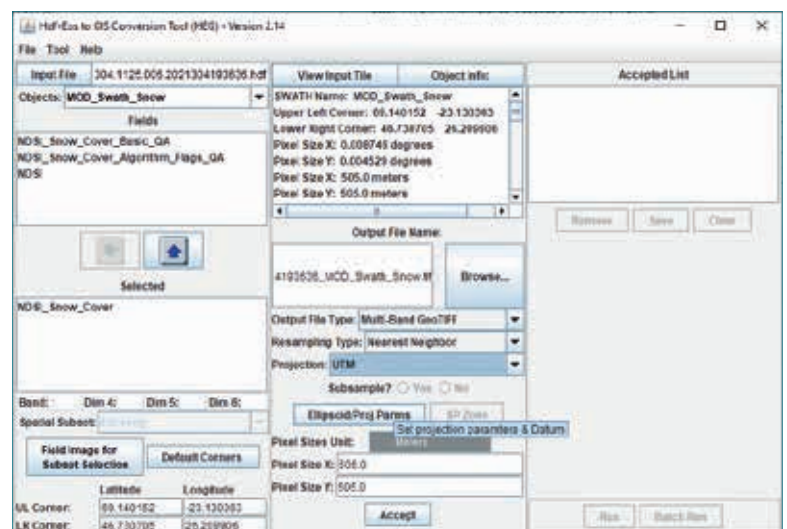
250: oblačnost

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

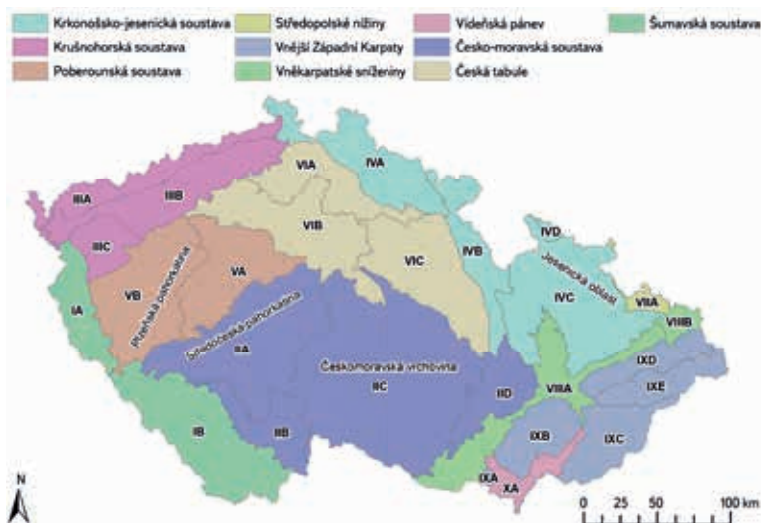
Zpracování snímků v prostředí ArcGIS Desktop lze rozdělit do několika fází, přičemž použití jednotlivých nástrojů se přizpůsobuje možnostem licence ArcGIS Desktop v rámci ČHMÚ a do budoucna lze též předpokládat adaptaci na novější verze a produkty:

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

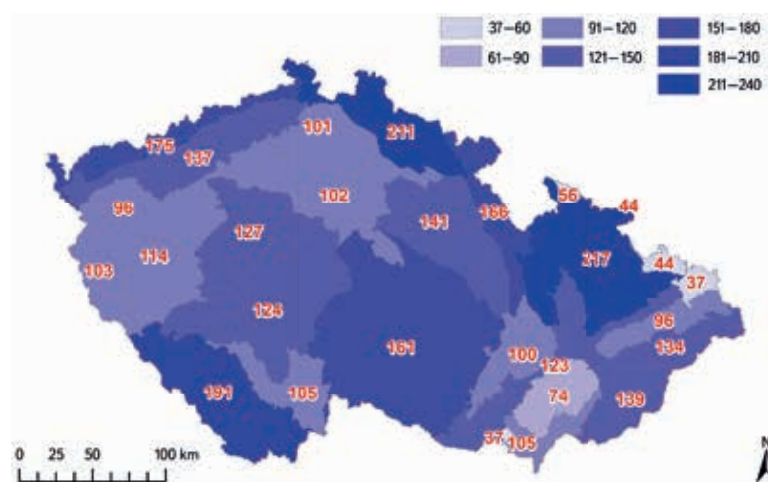
a převzorkován právě do tohoto systému (přesněji pouze pásma 33). Stejně tak byla i geometrie vrstvy polygonů geomorfologických oblastí transformována do systému UTM zone 33N.

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 *mnimput* 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.

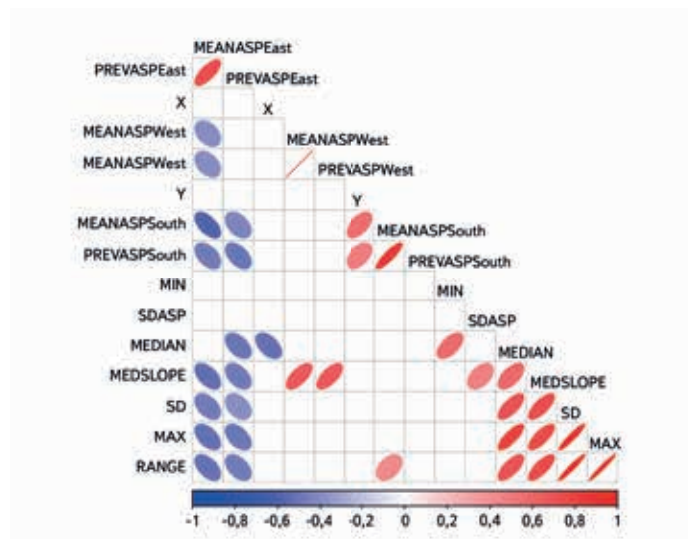
Z několika důvodů, mezi něž patřilo i množství získaných dat determinované počtem geomorfologických oblastí, byl pro samotnou regresní analýzu nakonec vybrán lineární model (vícezměrný aditivní s odhadem parametrů pomocí metody obyčejných nejmenších čtverců) a model náhodných lesů. Terénní vysvětlující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



Obr. 5. Pearsonovy korelace mezi vybranými terénními vysvětlujícími proměnnými (elipsami a barvami znázorněny pouze korelace významné na hladině 0,05)

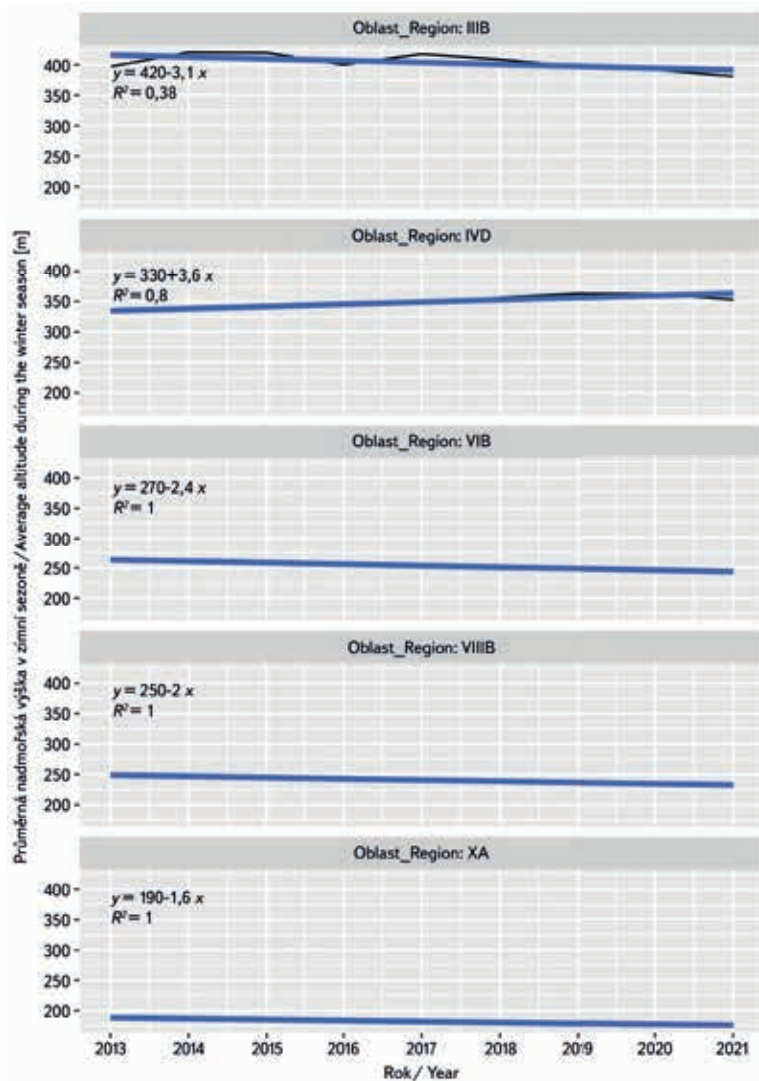
Fig. 5. Pearson's correlations between selected explanatory variables related to terrain (by ellipses and colours depicted only correlations significant at the 0.05 level)

Ke zjištění, zda lze v nadmořské výšce nulové izochiony pozorovat významný meziroční monotónní trend, byl pro jednotlivé geomorfologické oblasti aplikován neparametrický Mannův–Kendallův test. Vzhledem k tomu, že tento test je i přes svůj neparametrický charakter citlivý na autokorelovanost v časové řadě, byla pro řadu období KOMPLET (2013–2021) zvolena modifikace TFPW (trend-free pre-whitening) implementovaná v R balíčku zyp [30]. Teoretické základy této modifikace testu lze studovat v publikacích [31–33]. Ostatní části zimních období nemohly být takto studovány, protože získané časové řady jsou zatím velmi krátké.

VÝSLEDKY A DISKUZE

Obr. 4 ukazuje, kolik hodnot nadmořských výšek nulové izochiony se celkem podařilo ze snímků MODIS odvodit pro každou z 27 geomorfologických oblastí používaných v praxi hydrologie ČHMÚ. Celkově bylo tedy za období prosinec 2012 až květen 2021 k dispozici 3 216 takových hodnot, což z možného celkového množství denních hodnot (při uvážení všech zimních období obsažených v době od listopadu 2012 do května 2021, tj. 51 570 hodnot) činí zhruba 6,24 %. Není to způsobeno jen tím, že se hydrologové ČHMÚ tradičně soustředí pouze na získání jedné hodnoty týdně pro každou oblast, ale také tím, že některé oblasti postihuje oblačnost mnohem častěji než jiné. Zároveň je třeba podotknout, že u nížinných oblastí je pravděpodobnost zasněžení mnohem menší než u oblastí vyznačujících se spíše horským reliéfem. Na obr. 4 je tento fakt zdůrazněn metodou nepřávního kartogramu, kde jsou geomorfologické oblasti zařazeny do jednotlivých tříd, které se vyznačují různou intenzitou modré barvy. Rozdíl, jenž je zcela jistě způsoben typickou nadmořskou výškou nebo členitostí uvnitř regionů, je velmi dobře patrný. Kromě výše uvedeného je nutné zohlednit i fakt, že vzhledem k plošnému výskytu i době setrvání sněhové pokrývky lze zimy v předešlých pěti letech hodnotit spíše jako podprůměrné, což lze názorně sledovat na průběžných statistikách [2].

V tab. 4 jsou výsledky týkající se extrakce vybraných terénních proměnných, u kterých bylo předpokládáno, že mohou vysvětlit prostorovou variabilitu nadmořské výšky nulové izochiony, a mohou být tedy významné pro sestavení regresních modelů. Seznam proměnných, jež lze takto odvodit z DMR, není jistě vyčerpávající, ale předpokládalo se, že reprezentuje alespoň ty nejdůležitější faktory související se zeměpisnou šířkou, délkou a střední, minimální



Obr. 6. Průběh ročních řad průměrné nadmořské výšky nulové izochiony (2013–2021) v pěti geomorfologických oblastech Česka, u kterých byl nalezen statisticky významný monotónní trend na hladině 0,01 (černá čára: konkrétní hodnoty výšky; modrá přímka: lineární trend získaný metodou obyčejných nejmenších čtverců)

Fig. 6. Course of the annual series of average zero isochion altitude (2013–2021) in five geomorphological units in Czechia for which a statistically significant monotonic trend was found at the 0.01 level (black line: specific altitude values; blue line: linear trend obtained by the ordinary least squares method)

i maximální nadmořskou výškou, členitostí a sklonitostí terénu, stejně jako i s orientací svahů. Zvláštní postavení zde zaujímají charakteristiky týkající se variability nadmořské výšky, ale též orientace svahů vůči světovým stranám. Ukazatele spojené s orientací svahů bylo možné vyjádřit v úhlech, ale nakonec bylo rozhodnuto, že do regresních modelů vstoupí jako kategorické proměnné vzniklé reklasifikací, neboť v takových modelech není jednoduché počítat s úhlovými veličinami a tak jako tak je doporučována jejich transformace, přičemž jsou zpravidla aplikovány goniometrické funkce.

Tab. 5 poskytuje alespoň základní představu o tom, jaké jsou dlouhodobé (lépe řečeno dlouhodobější) hodnoty nadmořské výšky nulové izochiony na území jednotlivých geomorfologických oblastí Česka. Kromě toho je v tab. 5 ukázáno, jak se tyto dlouhodobé charakteristiky liší podle jednotlivých etap zimní sezony (tj. období akumulace, tání a prostřední období, kdy akumulaci či tání nelze rozlišit), a to alespoň pro roky 2018–2021. Je třeba poznamenat, že

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 nejdlejší 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 současná 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 spjata 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)

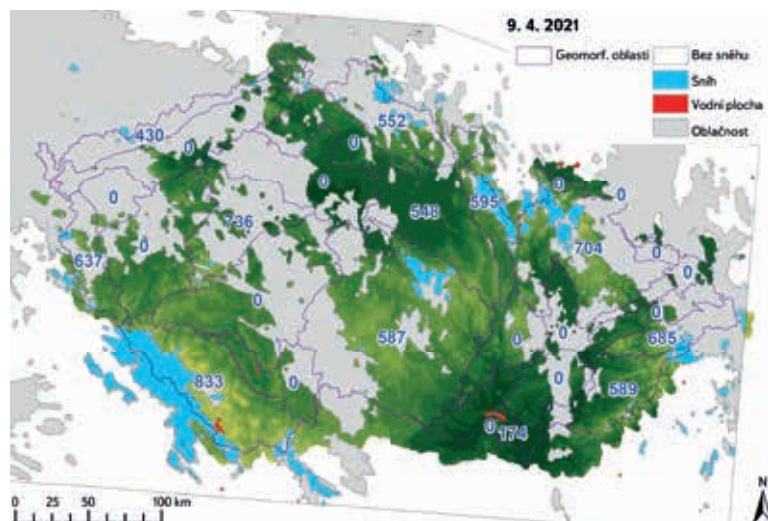
Oblast/Region	Kendalovo tau/ Kendall's tau	p-hodnota/ p-value	Senova směrnice/ Sen's slope	Absolutní člen/ Intercept	Grafické vyjádření trendu/ Graphical trend expression
IA	0,43	0,17	3,74	598,18	–
IB	0,14	0,71	4,06	782,19	–
IIA	-0,36	0,27	-1,01	456,15	–
IIB	-0,36	0,27	-0,25	439,8	–
IIC	-0,14	0,71	0,34	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	IIIV	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																				
IIIV	-41	151	-205	-212	-118	-202	37	-245	11	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 vypočítat 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.

Možnosti využití spektroskopie pro hodnocení vlastností lesních půd

JOSEF KRATINA, VÁCLAVA MAŤAŠOVSKÁ

Klíčová slova: lesní půda – VNIR spektroskopie – predikce půdních vlastností

SOUHRN

Cílem práce bylo objektivní zhodnocení použitelnosti VNIR spektroskopie (spektroskopie ve viditelné a blízké infračervené části elektromagnetického spektra) pro predikci vlastností lesních půd. Pro každou půdní vlastnost byly hledány nejvhodnější kombinace metod statistického předzpracování (bez předzpracování, continuum removal, 1. a 2. derivace) a zpracování (PLSR – regrese částečných nejmenších čtverců, PCR – regrese hlavních komponent, SVM – support vector machines) v určitých spektrálních pásmech. Jako všeobecně nejúspěšnější se ukázala kombinace metod 1. derivace a SVM v celém VNIR spektrálním pásmu (400–2 500 nm). V některých případech (různé formy hořčíku, manganu, železa či hliníku) se však osvědčily modely jiné. Mezi nejlépe predikovatelné vlastnosti ($R^2 > 0,6$) patří pH (půdní reakce), obsah oxidovatelného uhlíku, obsahy hliníku, železa, křemíku nebo vápníku (ve vyšších koncentracích). Nepříliš vysoká úspěšnost predikce ($R^2 < 0,3$) byla zjištěna u ukazatelů, které nabývají nízkých hodnot (obsah sodíku, manganu nebo dvojmocné komplexy hliníku). Výsledky ukazují, že VNIR spektroskopie je použitelnou metodou pro predikci vlastností lesních půd. Nemůže zcela nahradit klasickou analýzu, ale může ji velice dobře doplňovat, a to především v praxi. Například při půdním mapování umí pomoci zahustit síť údajů a zpřesnit informace lépe než při použití jiných metod prostorového odhadu. Je použitelná v případech, kdy je zapotřebí získat značné množství údajů v krátkém časovém horizontu a s minimálními náklady. Je vhodná pro sledování trendů v čase nebo pro rychlý průzkum určité oblasti.

ÚVOD

Informace o půdních vlastnostech jsou vyžadovány pro různé účely, například pro precizní zemědělství či lesnictví, pro hodnocení kvality půdy, pro její mapování nebo ochranu. Při zkoumání půd je zapotřebí získat velké množství analytických dat. Odebírání a následné analyzování půdních vzorků tradičními metodami je časově náročné a finančně nákladné [1, 2]. Stále častěji se proto využívá nepřímých měření a predikcí půdních vlastností pomocí matematických modelů. Některé studie prokázaly, že spektroskopie ve viditelné (VIS) a blízké infračervené (NIR) části elektromagnetického spektra je vhodnou metodou pro hodnocení půdních vlastností. Doposud uveřejněné modely nejsou univerzální, jsou relevantní jen za specifických podmínek a pro určité skupiny půd. Cílem této studie je posouzení použitelnosti spektroskopie při hodnocení vlastností lesních půd v České republice na základě vztahů spektrálních znaků a půdních vlastností, stanovených tradičními laboratorními metodami. Pro toto hodnocení bylo použito více než 4 500 vzorků odebraných z celých půdních profilů. Pro tvorbu prediktivních modelů byly testovány vhodné kombinace

metod přípravy dat (1. a 2. derivace [3], continuum removal) a statistických technik partial least squares regression (PLSR), support vector machines (SVM) a principal component regression (PCR).

METODIKA

Při zpracování studie bylo použito 4 680 vzorků odebraných z celých půdních profilů pomocí sondýrky nebo z kopaných půdních sond. Část půdních vzorků pochází ze zdrojů Katedry pedologie a ochrany půd (ČZU v Praze), ostatní vzorky byly zapůjčeny z jiných pracovišť. Místa odběrů byla zvolena tak, aby pokryla celé území ČR a aby se do zkoumání zahrnuly různé lesní půdní typy. Odběrová stanoviště byla umístěna v různých nadmořských výškách a v lesích s různou druhovou skladbou. Studie se nezabývala měřením v terénu, byly používány pouze vysušené vzorky upravené na jemnozem I (velikosti frakce < 2 mm) [4]. Tímto byl eliminován vliv vlhkosti půdy, který je pro průběh spektrálních křivek zásadní a značně znesnadňuje terénní použití metody. Na půdních vzorcích byly provedeny vybrané analýzy konvenčními metodami (tab. 1).

Měření spekter bylo prováděno na vzorcích upravených na jemnozem I v Petriho miskách spektrometrem FieldSpec 3 (ASD Inc., USA) s High Intensity Contact Probe (obr. 1). Rozsah spektrometru je 350–2 500 nm.



Obr. 1. Spektrometr FieldSpec 3 (foto: Josef Kratina)

Fig. 1. FieldSpec 3 spectrometer

Tab. 1. Použité metody konvenční analýzy
Tab. 1. Used methods of conventional analysis

Vlastnost	Jednotky	Popis analýzy
pH _{H₂O}	–	Aktivní půdní reakce (H ₂ O) [4]
pH _{CaCl₂}	–	Výměnná půdní reakce ve výluhu CaCl ₂ [5]
pH _{KCl}	–	Výměnná půdní reakce ve výluhu KCl [6]
Cox	%	Obsah oxidovatelného uhlíku modifikovanou Tjurinovou metodou [4]
KVK	mmol.100 g ⁻¹	Kationtová výměnná kapacita podle Bowera [4]
BS	mmol.100 g ⁻¹	Stupeň nasycení sorpčního komplexu bazickými kationty [4]
N	mg.kg ⁻¹	NIR spektroskopické stanovení [7]
P_M3	mg.kg ⁻¹	Fosfor extrahovaný roztokem Mehlich III [4]
P_AR	mg.kg ⁻¹	Fosfor extrahovaný lučavkou královskou [8]
K_M3	mg.kg ⁻¹	Draslík extrahovaný roztokem Mehlich III [4]
K_AR	mg.kg ⁻¹	Draslík extrahovaný lučavkou královskou [8]
K_BaCl ₂	mg.kg ⁻¹	Výměnné kationty (draslík), výluh BaCl ₂ [9]
Ca_M3	mg.kg ⁻¹	Vápník extrahovaný roztokem Mehlich III [4]
Ca_AR	mg.kg ⁻¹	Vápník extrahovaný lučavkou královskou [8]
Ca_BaCl ₂	mg.kg ⁻¹	Výměnné kationty (vápník), výluh BaCl ₂ [9]
Mg_M3	mg.kg ⁻¹	Hořčík extrahovaný roztokem Mehlich III [4]
Mg_AR	mg.kg ⁻¹	Hořčík extrahovaný lučavkou královskou [8]
Mg_BaCl ₂	mg.kg ⁻¹	Výměnné kationty (hořčík), výluh BaCl ₂ [9]
Na_AR	mg.kg ⁻¹	Sodík extrahovaný lučavkou královskou [8]
Na_BaCl ₂	mg.kg ⁻¹	Výměnné kationty (sodík), výluh BaCl ₂ [9]
Mn_BaCl ₂	mg.kg ⁻¹	Výměnné kationty (mangan), výluh BaCl ₂ [9]
Mn_AR	mg.kg ⁻¹	Mangan extrahovaný lučavkou královskou [8]
Mn_KCl	mg.kg ⁻¹	Mangan extrahovaný roztokem KCl [10]
Mn_ox	mg.kg ⁻¹	Mangan extrahovaný šťavelanem [11]
Mn_dit	mg.kg ⁻¹	Mangan extrahovaný dithioničnanem [12]
Fe_BaCl ₂	mg.kg ⁻¹	Výměnné kationty (železo), výluh BaCl ₂ [9]
Fe_AR	mg.kg ⁻¹	Železo extrahované lučavkou královskou [8]
Fe_KCl	mg.kg ⁻¹	Železo extrahované roztokem KCl [10]
Fe_ox	mg.kg ⁻¹	Železo extrahované šťavelanem [11]
Fe_dit	mg.kg ⁻¹	Železo extrahované dithioničnanem [12]
Al_BaCl ₂	mg.kg ⁻¹	Výměnné kationty (hliník), výluh BaCl ₂ [9]
Al_AR	mg.kg ⁻¹	Hliník extrahovaný lučavkou královskou [8]
Al_KCl	mg.kg ⁻¹	Hliník extrahovaný roztokem KCl [10]

Vlastnost	Jednotky	Popis analýzy
Al_ox	mg.kg ⁻¹	Hliník extrahovaný šťavelanem [11]
Al_dit	mg.kg ⁻¹	Hliník extrahovaný dithioničnanem [12]
Al (X) 1+	mg.kg ⁻¹	Formy hliníku ve výluhu KCl [10]
Al (Y) 2+	mg.kg ⁻¹	Formy hliníku ve výluhu KCl [10]
Al 3+	mg.kg ⁻¹	Formy hliníku ve výluhu KCl [10]
VA	mmol.kg ⁻¹	Výměnná acidita Al+H [6]
Si_ox	mg.kg ⁻¹	Křemík extrahovaný šťavelanem [11]
Si_dit	mg.kg ⁻¹	Křemík extrahovaný dithioničnanem [12]

Ke stanovení základních statistických popisných charakteristik byl použit program Statistica 12 (StatSoft). K předzpracování spektrálních dat, konkrétně k vyhlazení spektrálních křivek (splice correction), byl používán program ViewSpec Pro 6.0 (ASD Inc.). Program R (R Core Team) byl využit pro úpravu spekter pomocí continuum removal. Pro jejich kalibraci (partial least squares regression – regrese metodou částečných nejmenších čtverců, support vector machines, principal components regression) sloužily programy Unscrambler X 10.3 (CAMO Software) a R (R Core Team).

Byl statisticky hodnocen vztah spektrálních znaků a půdních vlastností, které byly získány tradičními laboratorními metodami. Byla testována vhodnost použití různých metod přípravy dat, jako je 1. a 2. derivace nebo continuum removal (sjednocení průběhu spektrálních křivek, jež jsou získány různými přístroji nebo za různých světelných podmínek). Publikované modely pro predikci půdních charakteristik ze spektrálních znaků byly testovány, upraveny jejich parametry, případně byly tvořeny nové modely pomocí statistických metod PLSR, PCR a SVM. Pro statistické hodnocení byla používána nejen všechna data dohromady, ale rovněž dělená do podsouborů podle oblastí odběrů a podle horizontů, aby bylo možno popsat nevhodnější způsob zadávání dat pro úspěšnou predikci. Dále byl testován vliv použitého spektrálního pásma na úspěšnost předpovědi. Některé vlastnosti jsou lépe predikovatelné při použití celého VNIR spektra, pro jiné je vhodnější použití pouze určitého vybraného spektrálního pásma, které je vybíráno buď pokusně, nebo na základě literatury [13–16].

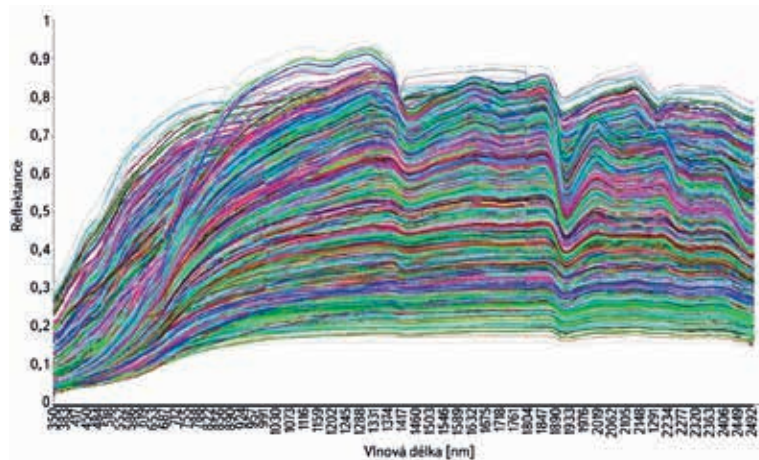
Nové modely byly ověřovány (validovány). Uváděné předpovědi vyjádřené hodnotami R² (koeficient determinace) a RMSE (střední kvadratická chyba) jsou výsledkem cross validace, při níž se soubor dat rozdělí na více podsouborů, jeden (10 % z celku) se vyjme a zbylé se použijí pro kalibraci modelu. Poté je model aplikován na soubor, který byl předtím vyjmut, jsou srovnány hodnoty predikované modelem a změřeny v laboratoři. To se opakuje pro všechny podsoubory. Následně jsou spočítány parametry R² a RMSE. Pro takto vzniklé skupiny byl kalibrován model. Posléze byly nové modely ještě podrobeny externí validaci, při níž byl model aplikován na jiný soubor dat a zjišťována úspěšnost predikce.

VÝSLEDKY A DISKUZE

Úspěšnost metody při predikci půdních vlastností je vysoce závislá na vhodném způsobu zadávání vstupních dat a jejich statistickém předzpracování a vyhodnocování. Cílem práce bylo nalezení nevhodnější kombinace způsobu zadávání, statistického předzpracování a zpracování spektrálních dat pro dosažení nejlepších výsledků předpovědi půdních vlastností.

Celý datový soubor a jeho rozdělení podle horizontů a oblastí

Jako první byl statisticky hodnocen souhrnný datový soubor bez ohledu na příslušnost k oblasti odběru či horizontu. Byla použita spektra bez předzpracování v celém rozsahu 350–2 500 nm. Statistickou metodou byla – v literatuře často doporučovaná – regrese částečných nejmenších čtverců (PLSR). Na obr. 2, který znázorňuje všechna spektra dohromady, vidíme velkou variabilitu jejich průběhu. Ta může být způsobena různými půdními vlastnostmi, např. rozdílným množstvím půdní organické hmoty v minerálních a organických horizontech.



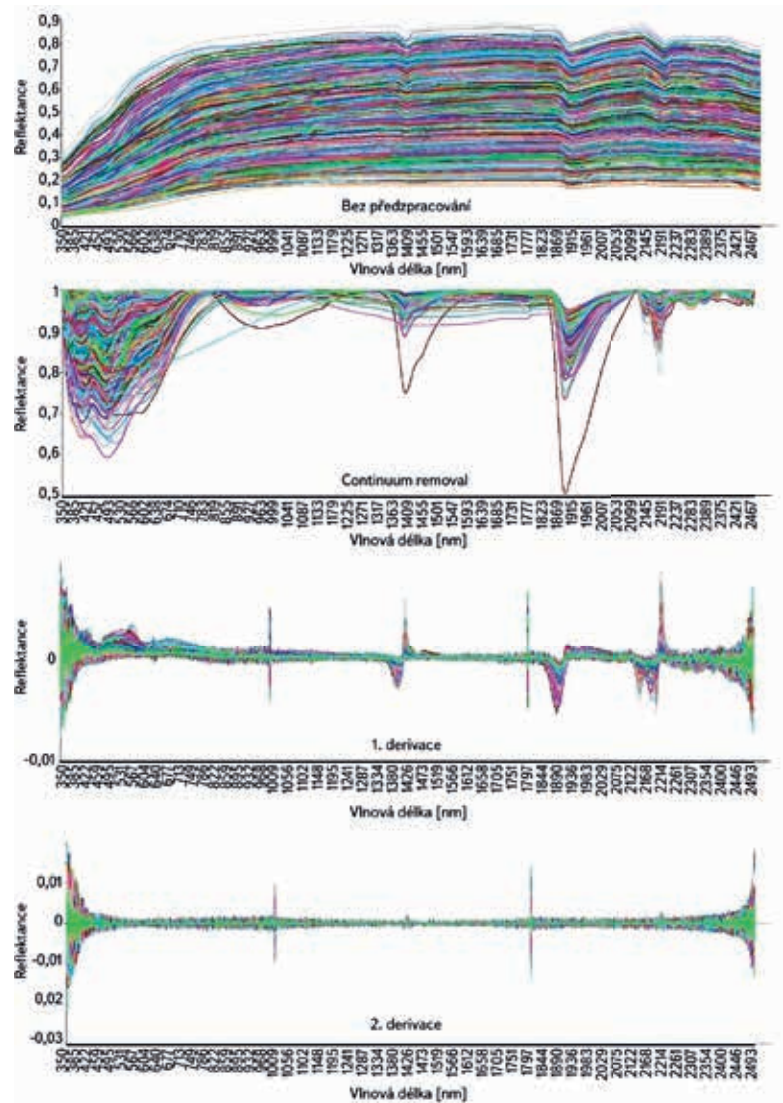
Obr. 2. Znáznornění spekter – souhrnný soubor dat
Fig. 2. Spectra representation – the summary data set

Byly hledány vlastnosti společné pro co největší množství měřených vzorků. Konkrétně šlo o množství oxidovatelného uhlíku – Cox, celkový obsah dusíku a výměnnou půdní reakci – pH_CaCl₂. Výsledky se zdají být velice dobré (Cox – R² = 0,92, obsah dusíku – R² = 0,77, pH_CaCl₂ – R² = 0,51), jejich publikace by však byla správná jen v případě výměnné reakce. Dle rozdělení četností dat jednotlivých vlastností je normální rozdělení pouze v případě výměnné půdní reakce. Výsledky obsahu oxidovatelného uhlíku a dusíku tvoří dva shluky. Ty poskytují při proložení regresní přímkou vysokou hodnotu koeficientu determinace. Výsledky jsou ovšem zkreslené, nelze je správně interpretovat. Predikce výměnné reakce je i přes nižší hodnotu koeficientu determinace úspěšnější. Jelikož pro uplatnění PLSR je normální rozdělení dat podmínkou, bylo třeba soubor podrobit jinému statistickému zpracování.

V tab. 2 jsou znázorněny výsledky predikce výměnné půdní reakce a obsahu dusíku při použití celého souboru i při jeho rozdělení na organické a minerální horizonty. Z výsledků je patrné, že na rozdíl od předchozích výsledků vykazuje celý soubor vyšší hodnotu koeficientu R², avšak spolu s ním roste i střední kvadratická chyba (RMSE), jež by měla v ideálním případě naopak klesat.

Tab. 2. Úspěšnost predikce podle horizontů
Tab. 2. Predictions according to horizons

	R ²	RMSE
pH_CaCl ₂ – celý soubor	0,51	0,46
N [mg.kg ⁻¹] – celý soubor	0,77	0,31
pH_CaCl ₂ – minerální horizonty	0,32	0,44
pH_CaCl ₂ – organické horizonty	0,64	0,44
N [mg.kg ⁻¹] – minerální horizonty	0,44	0,11
N [mg.kg ⁻¹] – organické horizonty	0,37	0,25



Obr. 3. Průběh spektrálních křivek – různé způsoby předzpracování
Fig. 3. The course of spectral curves – various pre-processing methods

Z průběžných výsledků je patrné, že rozdělování datového souboru podle oblastí odběru vzorků nezvyšuje vždy prokazatelně úspěšnost predikce půdních vlastností, a nelze tedy tento způsob přípravy dat jednoznačně doporučit. V otázce dělení dat podle příslušnosti k půdnímu horizontu je závěr komplikovanější. V některých případech se takové rozdělení jeví jako výhodnější, v jiných je úspěšnost předpovědi vyjádřená koeficientem determinace výrazně lepší ve prospěch neděleného souboru. V takové situaci je však třeba sledovat i další veličinu popisující úspěšnost predikce, střední kvadratickou chybu, která by měla na rozdíl od koeficientu determinace klesat, k čemuž však ve výše uvedených případech nedošlo.

Organické a minerální horizonty mají zásadně odlišný charakter a většinou se u nich laboratorně stanovují rozdílné vlastnosti. Pokud jsou některé vlastnosti společně stanoveny pro horizonty celého půdního profilu, pak jsou na nich jasně patrné rozdíly. Data nemají normální rozdělení (je bimodální) a výsledky nelze správně interpretovat. Tento průběžný závěr byl dále ověřen použitím metody SVM, jež není tak zásadně citlivá na rozdělení dat jako regresní (lineární) metody.

Tab. 3. Nejlepší predikce podle metody a pásma – shrnutí
 Tab. 3. The best prediction by method and band – summary

Vlastnost	Horizont (oblast)	Předzpracování	Statistická metoda	Spektrální pásmo [nm]	R ² validační	RMSE validační
pH_H ₂ O	min. hor.	1. derivace	SVM	400–2 500	0,46	0,40
pH_CaCl ₂	min. hor.	1. derivace	SVM	400–2 500	0,45	0,40
pH_CaCl ₂	org. hor.	1. derivace, CR	SVM	400–2 500	0,72	0,39
pH_KCl	A horizonty	1. derivace	SVM	400–2 500	0,55	0,12
Cox	min. hor.	1. derivace	SVM	400–2 500	0,68	1,85
Cox	org. hor.	1. derivace	SVM	400–2 500	0,84	3,71
Cox	A horizonty	1. derivace	SVM	400–2 500	0,48	1,63
KVK	A horizonty	Žádné	PLSR	400–2 500	0,37	14,37
KVK	min. hor.	1. derivace	SVM	400–2 500	0,64	22,52
BS	min. hor.	1. derivace	SVM	400–2 500	0,44	20,65
N	min. hor.	1. derivace	SVM	400–2 500	0,57	0,10
N	org. hor.	1. derivace	SVM	400–2 500	0,62	0,19
P_M3	min. hor.	1. derivace	SVM	400–2 500	0,10	26,68
P_AR	org. hor.	1. derivace	SVM	400–2 500	0,34	243,91
K_M3	min. hor.	1. derivace	SVM	400–2 500	0,31	54,00
K_AR	org. hor.	1. derivace	SVM	400–2 500	0,57	657,13
K_BaCl ₂	min. hor.	1. derivace	SVM	400–2 500	0,51	20,29
K_BaCl ₂	A horizonty	1. derivace	SVM	750–2 500	0,42	0,87
Ca_M3	min. hor.	CR	PLSR	1 100–2 500	0,36	687,14
Ca_AR	org. hor.	1. derivace	SVM	400–2 500	0,76	2 198,70
Ca_BaCl ₂	A horizonty	Žádné	PLSR	1 100–2 500	0,33	0,19
Ca_BaCl ₂	min. hor.	1. derivace	SVM	400–2 500	0,27	13,33
Mg_M3	min. hor.	CR	PLSR	1100–2 500	0,32	146,92
Mg_AR	org. hor.	1. derivace	SVM	400–2 500	0,43	1 303,50
Mg_BaCl ₂	A horizonty	1. derivace	PLSR	400–2 500	0,43	15,18
Mg_BaCl ₂	min. hor.	1. derivace	SVM	400–2 500	0,32	3,00
Na_AR	org. hor.	1. derivace	SVM	400–2 500	0,23	40,40
Na_BaCl ₂	min. hor.	1. derivace	SVM	400–2 500	0,35	0,18
Na_BaCl ₂	A horizonty	1. derivace	SVM	400–2 500	0,16	7,93
Mn_BaCl ₂	min. hor.	1. derivace	SVM	400–2 500	0,28	1,49
Mn_BaCl ₂	A horizonty	1. derivace	SVM	400–2 500	0,51	32,22
Mn_AR	org. hor.	1. derivace	SVM	400–2 500	0,51	1 141,80
Mn_KCl	A horizonty	1. derivace	SVM	400–2 500	0,48	58,28
Mn_ox	A horizonty	CR	PLSR	400–2 500	0,56	107,65

Vlastnost	Horizont (oblast)	Předzpracování	Statistická metoda	Spektrální pásmo [nm]	R ² validační	RMSE validační
Mn_dit	A horizonty	1. derivace	SVM	400–750	0,55	121,04
Fe_BaCl ₂	min. hor.	1. derivace	SVM	400–2 500	0,38	1,38
Fe_BaCl ₂	A horizonty	Žádné	PLSR	400–2 500	0,65	44,59
Fe_AR	org. hor.	1. derivace	SVM	400–2 500	0,51	5 757,50
Fe_KCl	A horizonty	Žádné	PCR	400–2 500	0,67	68,64
Fe_ox	A horizonty	Žádné	PLSR	1 100–2 500	0,68	2 033,40
Fe_dit	A horizonty	Žádné	PLSR	750–2 500	0,69	2 370,50
Al_BaCl ₂	min. hor.	1. derivace	SVM	400–2 500	0,59	14,99
Al_BaCl ₂	A horizonty	Žádné	PLSR	400–800	0,58	120,53
Al_AR	org. hor.	1. derivace	SVM	400–2 500	0,70	2 395,20
Al_KCl	A horizonty	Žádné	PCR	400–2 500	0,62	106,41
Al_ox	A horizonty	Žádné	PLSR	400–2 500	0,63	617,01
Al_dit	A horizonty	1. derivace	SVM	400–2 500	0,45	824,18
Al (X) 1+	A horizonty	Žádné	PCR	600–800	0,63	15,56
Al (Y) 2+	A horizonty	1. derivace	SVM	1 100–2 500	0,44	19,21
Al 3+	A horizonty	Žádné	PCR	400–2 500	0,58	91,29
VA	min. hor.	1. derivace	SVM	400–2 500	0,58	16,58
VA	A horizonty	Žádné	PCR	400–2 500	0,49	16,64
Si_ox	A horizonty	1. derivace	SVM	400–2 500	0,35	120,40
Si_dit	A horizonty	2. derivace	SVM	400–750	0,59	979,57

Vliv použité statistické metody na úspěšnost predikce

Dále byla data podrobena různým kombinacím předzpracování (bez předzpracování, 1. a 2. derivace, continuum removal) a statistických metod (PLSR, PCR, SVM). Příklad změny průběhu spektrálních křivek podle použitého způsobu předzpracování je znázorněn na obr. 3. Takto byly pro každou vlastnost vždy vybrány dvě neúčinnější kombinace, které byly jednotlivě precizovány.

Viscarra Rossel a Behrens ve své práci [17] určili jako dvě neúspěšnější metody SVM a PLSR. Výsledky této práce to potvrzují, především ve prospěch SVM, a přinášejí další informace díky kombinaci těchto metod s různými způsoby předzpracování. Ve většině případů byla zjištěna nejvyšší úspěšnost predikce při kombinaci 1. derivace spektrálních dat a metody SVM, dále pak PLSR na datech bez předzpracování a SVM po provedení continuum removal. Další úspěšnou kombinací bylo v některých případech použití 2. derivace a SVM. Naopak regresní metody uplatněné na datech předzpracovaných 2. derivací byly jednoznačně nejméně úspěšné. Regresní metody PLSR a PCR poskytují velmi podobné výsledky, většinou v mírný prospěch PLSR.

Predikce jednotlivých vlastností

Na základě literatury [13, 14, 16] a výše uvedených poznatků byly hledány nejlepší kombinace použitého typu předzpracování, statistické metody a nově i vybraného spektrálního pásma. Pro každou vlastnost byly vybrány nejúspěšnější kombinace metod podle předchozích zjištění, které byly podrobeny dalšímu testování. Pro všechny vlastnosti byla společná úprava spekter ořiznutím pásma 350–400 nm, jež je na rozhraní UV a viditelného záření výrazně rušeno šumem. Jako všeobecně nejlepší se ukazuje kombinace metody předzpracování spektrálních dat pomocí 1. derivace a statistické metody support vector machine při použití celého VNIR spektrálního pásma (400–2 500 nm). Existují ale případy, kdy se jako nejvhodnější ukázaly být jiné kombinace metod a jiná, užší spektrální pásma. Například vápník a hořčík stanovené ve výluhu lučavky královské byly nejlépe predikovatelné metodou PLSR aplikovanou na spektrální data upravená funkcí continuum removal v blízké infračervené části spektra 1 100–2 500 nm. Pro prvky stanovené v oxalátu byla místo SVM ve většině případů nejlepší metoda PLSR (Mg, Mn, Fe, Al). Rozmanitost modelů byla sledována především v případě predikce železa a hliníku, tedy dvou velmi sledovaných prvků v lesních půdách. Značně rozdílná je spektrální detekovatelnost jednotlivých forem hliníku. Nejméně úspěšně predikovatelná dvojmocná forma, která se váže na organickou hmotu, avšak je obsažena v extrémně malých množstvích, se může alternativně predikovat odečtením obsahu

Tab. 4. Nejlepší univerzální statistické modely pro predikci jednotlivých vlastností
 Tab. 4. The best universal statistical models for the prediction of individual properties

Vlastnost	Předzpracování	Statistická metoda	Spektrální pásmo [nm]
pH_H ₂ O	1. derivace	SVM	400–2 500
pH_CaCl ₂	1. derivace	SVM	400–2 500
pH_KCl	1. derivace	SVM	400–2 500
Cox	1. derivace	SVM	400–2 500
KVK	1. derivace	SVM	400–2 500
BS	1. derivace	SVM	400–2 500
N	1. derivace	SVM	400–2 500
P	1. derivace	SVM	400–2 500
K	1. derivace	SVM	400–2 500
Ca	1. derivace	SVM	400–2 500
Mg_M3	continuum removal	PLSR	1 100–2 500
Mg_AR	1. derivace	SVM	400–2 500
Mg_vym (BaCl ₂)	1. derivace	SVM	400–2 500
Na	1. derivace	SVM	400–2 500
Mn_AR, KCl	1. derivace	SVM	400–2 500
Mn_ox	continuum removal	PLSR	400–2 500
Mn_dit	1. derivace	SVM	400–750
Fe_vym (BaCl ₂)	1. derivace	SVM	400–2 500
Fe_AR	1. derivace	SVM	400–2 500
Fe_KCl	1. derivace	SVM	400–2 500
Fe_ox	Bez předzpracování	PLSR	1 100–2 500
Fe_dit	Bez předzpracování	PLSR	750–2 500
Al_vym (BaCl ₂)	1. derivace	SVM	400–2 500
Al_AR	1. derivace	SVM	400–2 500
Al_KCl	Bez předzpracování	PLSR	400–2 500
Al_ox	Bez předzpracování	PLSR	400–2 500
Al_dit	1. derivace	SVM	400–2 500
Al (X) 1+	Bez předzpracování	PCR	600–800
Al (Y) 2+	2. derivace	SVM	1 100–2 500
Al 3+	Bez předzpracování	PLSR	400–2 500
VA	1. derivace	SVM	400–2 500
Si	1. derivace	SVM	400–2 500

jednomocných a trojmocných komplexů od celkového obsahu stanoveného ve společném výluhu, v tomto případě výluhu KCl. V tab. 3 jsou znázorněny nejlepší modely pro predikci jednotlivých půdních vlastností, včetně validačního R² a RMSE. Soubor je rozdělen podle příslušnosti k půdnímu horizontu nebo skupině horizontů.

Testování a úprava nalezených modelů

Dále byly nalezené modely aplikovány na nezávislé soubory dat. Byly porovnávány úspěšnosti predikcí jednotlivých vlastností před a po aplikaci modelů. Data použitá jako ta „před aplikací modelu“ byla podrobena standardnímu statistickému zpracování, tedy metodě PLSR v celém VNIR pásmu na nepředzpracovaných spektrech. Modely, které zlepšily výsledky predikce, byly uznány za vhodné a univerzální. Pokud úspěšnost predikce vzrostla jen velmi málo, zůstala beze změny, nebo dokonce klesla, byly hledány jiné modely na základě dosavadních znalostí.

V tab. 4 jsou znázorněny vítězné modely pro predikci vlastností lesních půd. Kromě úspěšnosti predikce byl kladen důraz i na univerzálnost použitých daných modelů. V případě, že byla určitá vlastnost stanovena různými způsoby, avšak model je pro všechny tyto způsoby společný, je v tabulce označena pouze daná vlastnost. Pokud způsob stanovení měl vliv na spektrální detekovatelnost, a vyžadoval tedy použití jiného modelu, jsou vlastnosti jednotlivě popsány i se způsobem stanovení.

ZÁVĚR

Cílem studie bylo objektivní zhodnocení použitelnosti spektroskopie ve viditelné a blízké infračervené části spektra pro predikci vlastností lesních půd. Tyto půdy se od zemědělských zásadně liší svým vzhledem, vývojem, fyzikálními i chemickými procesy, přítomností organických horizontů atd. Také se u nich obvykle sledují jiné vlastnosti. Bylo zjištěno, že dělení datového souboru podle oblastí odběru vzorku není významným vstupním kritériem, podstatnější je rozložení dat. Z důvodů velké rozdílnosti mezi organickými a minerálními horizonty se na základě výsledků doporučuje zkoumání těchto horizontů zvlášť.

Jelikož bylo k dispozici velké množství dat, bylo možno tato data rozdělit na větší soubor trénovací, na němž byly postupně důkladně trénovány jednotlivé modely, a soubor testovací, na kterém byly tyto modely testovány a na základě výsledků dále případně upravovány. Takto byly pro každou půdní vlastnost nalezeny nejhodnější kombinace metod statistického předzpracování a zpracování v určitých spektrálních pásmech. Jako všeobecně nejúspěšnější se ukazuje kombinace metod 1. derivace a support vector machine v celém VNIR spektrálním pásmu (400–2 500 nm). V některých případech se však osvědčily modely jiné. Mezi nejlépe predikovatelné vlastnosti (R² > 0,6) patří pH (půdní reakce), obsah oxidovatelného uhlíku, obsahy hliníku, železa, křemíku nebo vápníku (ve vyšších koncentracích). Nepříliš vysoká úspěšnost predikce (R² < 0,3) byla zjištěna u ukazatelů, jež nabývají nízkých hodnot (obsah sodíku, manganu nebo dvojmocné komplexy hliníku).

Výsledky ukazují, že VNIR spektroskopie je použitelnou metodou pro predikci vlastností lesních půd. Není schopna zcela nahradit klasickou analýzu, ale může ji doplňovat. Například při půdním mapování pomůže zahustit síť údajů a zpřesnit informace lépe než při použití jiných metod prostorového odhadu. Je použitelná v případech, kdy je zapotřebí získat velké množství údajů v krátkém časovém horizontu a s minimálními náklady. Vhodná je pro sledování trendů v čase nebo pro rychlý průzkum vzorků z určité oblasti.

Poděkování

Autoři děkují Katedře pedologie a ochrany půd České zemědělské univerzity v Praze za poskytnutí technického vybavení a pomoc při zpracování této studie, která byla prováděna v rámci doktorského studia.

Literatura

- [1] KOOISTRA, L., WEHRENS, R., LEUVEN, R. S. E. W., BUYDENS, L. M. C. Possibilities of Visible-Near-Infrared Spectroscopy for the Assessment of Soil Contamination in River Floodplains. *Analytica Chimica Acta*. 2001, 446, s. 97–105.
- [2] JIANG, Q. et al. Estimation of Soil Organic Carbon and Total Nitrogen in Different Soil Layers Using VNIR Spectroscopy: Effects of Spiking on Model Applicability. *Geoderma*. 2017, 293, s. 54–63.
- [3] MARTENS, H., NAES, T. *Multivariate Calibration*, 2nd ed. Chichester, UK: John Wiley and Sons Ltd, 1989. 419 s.
- [4] ZBÍRAL, J. *Analýza půd I*. Brno: Ústřední kontrolní a zkušební ústav zemědělský, 2002. 197 s.
- [5] WHITE, R. E. On the Measurement of Soil pH. *Journal of the Australian Institute of Agricultural Science*. 1969, 35, s. 3–14.
- [6] GILLMAN, G. P., SUMPTER, M. E. Modification of the Compulsive Exchange Method for Measuring Exchange Characteristics of Soils. *Australian Journal of Soil Research*. 1986, 17, s. 61–66.
- [7] SHEPHERD, K. D., WALSH, M. G. Development of Reflectance Spectral Libraries for Characterization of Soil Properties. *Soil Science Society of America Journal*. 2002, 66, s. 988–998.
- [8] ISO 11466:1995. *Soil Quality — Extraction of Trace Elements Soluble in Aqua Regia. ISO/TC 190/SC 3 Chemical and Physical Characterization*. 1995-03.
- [9] BERNHARDT, C. *Particle Size Analysis – Classification and Sedimentation Methods*. London: Springer, 1994. 428 s.
- [10] DRÁBEK, O., BORŮVKA, L., MLÁDKOVÁ, L., KOČÁREK, M. Possible Method of Aluminium Speciation in Forest Soils. *Journal of Inorganic Biochemistry*. 2003, 97, s. 8–15.
- [11] COURCHESNE, F., TURMEL, M. C. Extractable Al, Fe, Mn and Si. In: CARTER, M. R., GREGORICH, E. G. (eds.), *Soil Sampling and Methods of Analysis*. 2nd ed. B. m.: Society of Soil Science. CRC Press, 2008, s. 307–315.
- [12] McKEAGUE, J. A., BRYDON, J. E., MILES, N. M. Differentiation of Forms of Extractable Ion and Aluminium in Soils. *Soil Science Society of America Journal*. 1971, 35, s. 33–38.
- [13] VISCARRA ROSSEL, R. A., WALVOORT, D. J. J., MCBRATNEY, A. B., JANIK, L. J., SKJEMSTAD, J. O. Visible, Near Infrared, Mid Infrared or Combined Diffuse Reflectance Spectroscopy for Simultaneous Assessment of Various Soil Properties. *Geoderma*. 2006, 131, s. 59–75.
- [14] BROWN, D. J., SHEPHERD, K. D., WALSH, M. G., MAYS, M. D., REINSCH, T. G. Global Soil Characterization with VNIR Diffuse Reflectance Spectroscopy. *Geoderma*. 2006, 132, s. 273–290.
- [15] BILGILI, A. V., van ES, H. M., AKBAS, F., DURAK, A., HIVELY, W. D. Visible-Near Infrared Reflectance Spectroscopy for Assessment of Soil Properties in a Semi-Arid Area of Turkey. *Journal of Arid Environments*. 2010, 74, s. 229–238.
- [16] GHOLIZADEH, A. et al. Soil Organic Carbon Estimation Using VNIR–SWIR Spectroscopy. The Effect of Multiple Sensors and Scanning Conditions. *Soil and Tillage Research*. 2021, 211. ISSN 0167-1987.
- [17] VISCARRA ROSSEL, R. A., BEHRENS, T. Using Data Mining to Model and Interpret Soil Diffuse Reflectance Spectra. *Geoderma*. 2010, 158, s. 46–54.

Autoři

Ing. Josef Kratina, Ph.D.

✉ josef.kratina@vuv.cz

ORCID: 0000-0001-6095-586X

Ing. Bc. Václava Maťašovská

✉ vaclava.matasovska@vuv.cz

ORCID: 0000-0001-9229-463X

Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, Praha

Příspěvek prošel lektorským řízením.

DOI: 10.46555/VTEI.2021.11.003

POSSIBILITIES OF USING SPECTROSCOPY FOR EVALUATION OF FOREST SOIL PROPERTIES

KRATINA, J.; MAŤAŠOVSKÁ, V.

T. G. Masaryk Water Research Institute, Prague

Keywords: forest soil – VNIR spectroscopy – prediction of soil properties

The aim of this study was an objective assessment of application of VNIR spectroscopy for predicting properties of forest soils. For each soil property were found the most appropriate combination of statistical methods for pre-processing (continuum removal, 1. derivation, 2. derivation) and processing (PLSR, PCR, SVM) of certain spectral bands. As generally successful shows a combination of methods 1. derivation and support vector machine throughout the VNIR spectral range (400–2 500 nm). In some cases, however, they proved to other models. Among the best predictable features include pH, content of oxidizable carbon, aluminum, iron, silicon, or calcium (at higher concentrations). Not very high success rate prediction was found in indicators that take low values (sodium, manganese, aluminum or ferrous complexes). The results show that VNIR spectroscopy method is applicable for predicting properties of forest soils. It can not completely replace traditional analysis, but it can very well complement, especially in practice. For example, when the soil mapping can help thicken network data and refine the information better than other methods of spatial estimation. It is applicable in cases where it is required large amounts of data in a short timeframe and at minimal cost. It is suitable for monitoring trends over time, or for a quick survey of an area.

Praktické příklady využití GIS v hydrologii v ČHMÚ

PETR ŠERCL, RADOVAN TYL, PAVEL KUKLA, MARTIN PECHA

Klíčová slova: GIS – hydrologie – rozvodnice – fyzikogeografické charakteristiky – přívalové povodně

SOUHRN

Technologie geografických informačních systémů (GIS) jsou v úseku hydrologie Českého hydrometeorologického ústavu (ČHMÚ) velmi široce používány. Zpracování geoprostorových dat, jež se v hydrologii používají při analytických úlohách, a rozvoj technologií GIS v posledních dvou dekáдах přispěly k rozšíření GIS v praxi ČHMÚ. Využití nástrojů GIS je ukázáno na čtyřech příkladech.

První z nich je zaměřen na vytváření dat GIS. Jedním ze základních podkladů pro analytické práce v hydrologii je polygonová vrstva rozvodnic povodí 4. řádu. Od roku 2018 probíhá aktualizace, respektive nové vytvoření těchto dat, a to na podkladě *Digitálního modelu reliéfu 5. generace* (DMR 5G) a aktualizované liniové vrstvy vodních toků ZABAGED (Základní báze geografických dat), jejíž geometrie a atributy jsou harmonizovány ve spolupráci se správci vodních toků, Zeměměřickým úřadem a Výzkumným ústavem vodohospodářským T. G. Masaryka (VÚV TGM).

Druhý příklad se týká přípravy vstupních podkladů pro odvození hydrologických charakteristik *M*-denních průtoků, které patří dle ČSN 75 1400. *Hydrologické údaje povrchových vod* mezi základní hydrologické údaje. V příkladu je popsán postup odvození rastrové vrstvy dlouhodobého ročního odtoku za referenční období 1981–2010, kde byl využit regresní vztah mezi průměrnou roční odtokovou výškou, průměrným ročním úhrnem srážek a průměrnou roční velikostí potenciální evapotranspirace v daném období.

Třetí příklad popisuje využití GIS při zpracování hydrologických posudků dle výše uvedené normy ČSN 75 1400, jejichž výsledkem jsou zpravidla *M*-denní či *N*-leté průtoky ve specifikovaném profilu určitého toku. Pro tyto účely byla vyvinuta speciální aplikace, která umožňuje odvodit nejen základní fyzikogeografické charakteristiky povodí z digitálního modelu reliéfu (sklon povodí, délka a sklon údolnice), ale určit i další potřebné charakteristiky, např. podíl určitého druhu využívání území v povodí či průměrné hodnoty dalších prvků v povodí (srážky, čísla odtokové křivky CN atd.).

Čtvrtý příklad se věnuje využití GIS v operativní hydrologické službě, konkrétně ve vývoji tzv. indikátoru přívalových povodní, jež stanovuje míru rizika vzniku či výskytu přívalové povodně na základě aktuální nasycenosti půdy a radarových odhadů srážek. V jeho rámci jsou zmíněny možnosti skriptovacích a vývojových nástrojů, které GIS nabízí.

ÚVOD

Vzhledem k tomu, že data poskytovaná ČHMÚ mají svoji prostorovou složku, nelze si v dnešní době pracovní postupy v ČHMÚ bez uplatnění technologie GIS představit. GIS již dávno neslouží „jen“ k tvorbě jednoduchých statických mapových výstupů, ale zejména jako nástroj pro zpracování dat a jejich analýzu.

Od statických map na webových stránkách ČHMÚ a v publikacích, jež pochoitelně zůstávají standardní součástí využití technologie GIS, je trend přecházet na dynamické webové mapy, které mají přidanou hodnotu ve formě např. zobrazování doplňkových informací k mapovým prvkům, vyhledávání podle adres či jiných atributů, nástrojů „zoom“ a případně i dalších nástrojů začleněných do webových mapových aplikací.

Využití technologie GIS v hydrologii ČHMÚ je demonstrováno na čtyřech konkrétních příkladech v samostatných kapitolách. Příklady zahrnují sofistikované pořizování dat ve víceuživatelské databázi, odvozování rastrových dat z bodových pozorování, přípravu dat pro hydrologické modelování a zpracování hydrologických posudků a ukázkou využití skriptovacích nástrojů pro vytváření automaticky spouštěných úloh, které zahrnují proces od načtení dat přes jejich následné zpracování až po publikaci výsledků ve webovém prostředí.

To, že cesta k výše uvedenému byla poměrně trnitá a zdoluhavá, je popsáno v následující kapitole věnované historii.

HISTORIE VYUŽÍVÁNÍ GIS V HYDROLOGII ČHMÚ

Technologie GIS se v ČHMÚ objevila koncem 1. poloviny 90. let minulého století, a to na základě mezinárodního projektu „*Monitoring and information resources management*“ financovaného U.S. Environmental Protection Agency (dále EPA) v období 1993–1997. V rámci projektu úsek hydrologie ČHMÚ obdržel bezplatně pracovní stanici AV 400 a softwarové licence ArcView a ARC/INFO (platforma UNIX), včetně systémové podpory a možností školení. Pracovníci ČHMÚ měli rovněž příležitost navštívit pracoviště EPA v USA.

V počátečním období, tj. v letech 1993–1995, byl GIS v hydrologii ČHMÚ záležitostí pouze okrajovou, neboť byl soustředěn na jediném pracovišti a nebyla ještě vybudována celoustavní počítačová síť, která by data zpřístupnila více pracovníkům.

Podstatné zlepšení situace nastalo v období 1996–1997, kdy byla dobudována celoustavní počítačová síť a nákup dalších licencí ArcView spolu s nezbytným vylepšením hardware vedlo k rozšíření uživatelů GIS nejen na centrálním pracovišti hydrologie v Praze, ale i na vybraných pobočkách. Tato další pracoviště GIS, která byla v tomto období postupně vybudována, byla již založena na PC-platformě (ArcView, Windows 95 nebo Windows NT). Jak je tedy z výše uvedeného zřejmé, technologie GIS, jež se v hydrologii ČHMÚ využívala od samého počátku, byla technologie firmy ESRI.

Pro práci s GIS jsou samozřejmě nezbytné datové vrstvy, ať již vektorové, nebo rastrové. Ve srovnání s dnešní dobou byla o data využitelná v GIS nouze, zejména o ta podrobná, která by umožňovala sofistikované analýzy.

V roce 1994 za prostředky grantu Ministerstva životního prostředí ČR byly v rámci smlouvy s tehdejší Vojenským topografickým ústavem

(VTOPIÚ)¹ v Dobrušce (dnes Vojenský geografický a hydrometeorologický úřad Dobruška–VGHMÚř Dobruška) pořízeny datové vrstvy DMÚ200 (vektorová data 1 : 200 000: vodstvo, komunikace, energovody, administrativní členění atd.) a DMR-2 (digitální model reliéfu, rastr 100 × 100 m). Rovněž v rámci smlouvy s VTOPIÚ Dobruška byl získán digitální ekvivalent topografických map (DETM) ve formě TIF-souborů, a sice v měřítkách 1 : 50 000, 1 : 500 000, 1 : 1 000 000, 1 : 2 000 000. Získání těchto dat bylo sice významné, ale stupeň jejich rozlišení neumožňoval provádět významnější analýzy.

Proto od roku 1997 započalo pořizování datových vrstev GIS v rámci pracovních kapacit ČHMÚ. Šlo zejména o bodové vrstvy pozorovacích objektů povrchových a podzemních vod a srážkoměrných pozorování. Nejrozsáhlejší práce probíhaly při pořizování polygonové vrstvy rozvodnic základních povodí² (měřítko 1 : 25 000, plocha polygonu od 5 km²), na které se podílela rovněž pobočková pracoviště ČHMÚ, kdy bylo nutné průběh rozvodnic napřed zakreslit do papírových vojenských topografických map 1 : 25 000 a následně je digitalizovat.

Po zpracování vrstvy rozvodnic bylo již možné provádět podrobnější analýzy a pomocí programovacího jazyku Avenue, který byl součástí ArcView GIS verze 3.x, také vytvářet první aplikace. Jednou z nich byla interpolace bodových měření (srážek) se zpracováním jejich regresní závislosti na nadmořské výšce (využití extenze ArcView Spatial Analyst), a tudíž první vytváření vlastních odvozených rastrových dat, která bylo možné dále analyzovat, např. aplikovat zonální statistiku na ploše povodí.

Základním zlomem bylo získání digitální verze vojenských topografických map s názvem DMÚ25 (digitální model území v měřítku 1 : 25 000) v roce 2001. Tato verze obsahovala vektorové vrstvy polohopisných objektů, ale i výškopis ve formě vrstevnic. S využitím liniové vrstvy vrstevnic bylo možné nejen zpřesnit vrstvu rozvodnic základních povodí, ale na jejím základě též odvodit rastrovou vrstvu nadmořských výšek terénu s rozlišením 25 × 25 m. Tento podrobnější model terénu (DMR) již umožňoval provádět jeho analýzy a zejména odvození fyzikogeografických charakteristik povodí, mezi něž patří průměrný sklon povodí, sklon a délka údolnice a ostatní důležité vstupy pro hydrologické výpočty.

Dalším zásadním milníkem při získávání GIS dat byly výzkumné projekty QD1368 „Verifikace metod odvození hydrologických podkladů pro posuzování bezpečnosti vodních děl za povodní“ (2001–2004) a VaV 1D/1/5/05 „Vývoj metod predikce stavů sucha a povodňových situací na základě infiltračních a retenčních vlastností půdního pokryvu ČR“ probíhající v letech 2004–2007. V rámci projektu QD1368 byly ve spolupráci hydrologů a oddělení klimatologie ČHMÚ odvozeny rastrové vrstvy *N*-letých maximálních srážek v délce trvání 1, 2 a 3 dní. Spolupráci s Výzkumným ústavem meliorací a ochrany půdy na Zbraslavi (VÚMOP) se podařilo v rámci zmíněných výzkumných projektů získat další velmi důležitá data pro hydrologické modelování, a sice vektorové vrstvy infiltrační schopnosti a retenční vodní kapacity půd (rozlišení 1 × 1 km), z čehož vznikla vrstva tzv. hydrologických skupin půd. V kombinaci s aktualizovanou vektorovou vrstvou využívání území z evropského projektu CORINE (Corine Land Cover) bylo možno odvodit rastrovou vrstvu hodnot CN (Curve Number = číslo odtokové křivky), což je klíčový parametr pro stanovování výšky odtoku ze spadlých srážek [1]. Získáním zmíněných dat byla umožněna plnohodnotná příprava vstupů do hydrologického srážkoodtokového modelování a zpracování hydrologických posudků, čemuž se věnuje samostatná kapitola. SW ArcView GIS 3.x byl na konci první dekády 21. století postupně nahrazován modernějším ArcGIS Desktop.

Od ledna 2013 se stala základními digitálními GIS podklady data ZABAGED, z nichž – nebo spíše nad nimi – byly odvozeny či aktualizovány nové vrstvy DMR a rozvodnic základních povodí. Souběžně s vydáváním aktualizovaných vrstev Corine Land Cover byly rovněž aktualizovány rastrové vrstvy hodnot CN. Rozvodnice nad daty ZABAGED byly využity při přípravě tzv. katastru *M*-denních průtoků.

Aktuálně (listopad 2021) probíhá zpřesňování vrstvy rozvodnic základních povodí, kde jako podklad slouží digitální model reliéfu 5. generace (DMR 5G) a verifikovaná vrstva vodstva, tj. linie vodních toků a polygony vodních ploch ze Zeměměřického úřadu.

Při nasazení GIS v ČHMÚ nezůstala stranou ani technologie tzv. webového GIS. Pro publikaci dynamických mapových výstupů pro veřejnost je využíván produkt ArcGIS Online a pro sdílení GIS dat uvnitř ČHMÚ byl pořízen ArcGIS Enterprise, verze Standard.

SPRÁVA DATOVÉ SADY ROZVODNIC POVODÍ 4. ŘÁDU

Plocha povodí je v ČHMÚ základním a nezbytným podkladem při odvozování standardních i nestandardních hydrologických údajů dle normy ČSN 75 1400. *Hydrologické údaje povrchových vod*. Plocha povodí je ohraničena rozvodnicí, což je pomyslná hranice oddělující dvě sousední povodí, respektive orograficky vymezené území, z něhož odtéká voda do příslušného závěrečného profilu.

První členění vodních toků podle hydrologického pořadí bylo provedeno v rámci zpracování Hydrologických poměrů ČSSR v roce 1965. Zde byly vyčleněny toky s vlastním vyvinutým korytem a plochou povodí větší než 5 km² [2]. Hydrologické členění je uvedeno v tabulkovém přehledu publikace a v příložených mapách v měřítku 1 : 200 000 (viz obr. 1). Součástí přehledu základních ploch povodí jsou dále informace o názvu toku, řádu toku, délce toku, tvaru povodí, lesnatosti a také informace, zda se jedná o levostranný, nebo pravostranný přítok. Číslo hydrologického pořadí mělo v té době formát osmi číslic (1-22-33-444), které určovaly příslušnost daného toku k evropskému rozvodí (Labe, Dunaj, Visla, Odra) a dále k podrobnějším dílčím povodím. Tím bylo zároveň definováno dělení hydrologického pořadí vodních toků na jednotlivé řády (tzv. povodí 1. až 4. řádu).



Obr. 1. Mapa rozvodnic v publikaci Hydrologické poměry [2]

Fig. 1. Map of watershed in Hydrologické poměry book [2]

Od té doby proběhly tři velké aktualizace datové sady rozvodnic. Nejprve to byla digitalizace rozvodnic v měřítku 1 : 25 000 z vojenských topografických map současně s rozšířením čísla hydrologického pořadí o jednu číslici na devět pozic (1-22-33-4444). Druhá aktualizace proběhla v letech 2008–2012, kdy byla pro referenční měřítko 1 : 10 000 využita struktura vodních toků DIBAVOD (Digitální báze vodohospodářských dat) a kde bylo zároveň číslo hydrologického pořadí

rozšířeno na současných 14 číslic (1-22-33-4444-5-66-77), což umožnilo strukturovat dělení povodí k profilům hrází vodních děl, mimoúrovňovým křížením a k profilům vodoměrných stanic. Aktualizace probíhala nad rozšířenou sadou povodí 4. řádu, z níž se rozvodnice povodí nižších řádů následně generují podle primárního klíče, což je číslo hydrologického pořadí (ČHP).

Poslední aktualizace datové sady rozvodnic začala po dokončení DMR 5G a zpřesnění vrstvy vodních toků na základě leteckého laserového skenování v Českém úřadu zeměměřičkém a katastrálním (ČÚZK) začátkem roku 2018. Pro aktualizaci rozvodnic byla využita platforma ESRI se všemi jejími součástmi a vazbami databáze – desktopová aplikace – server.

Samotná editace/aktualizace rozvodnic probíhá prostřednictvím desktopové aplikace ArcGIS Pro, licence Advanced na odděleních hydrologie poboček ČHMÚ a rovněž na oddělení povrchových vod centrálního pracoviště ČHMÚ. V databázi Oracle s nadstavbou ESRI SDE jsou uložena a prostřednictvím ArcGIS Enterprise sdílána veškerá potřebná podkladová data. Jejich využívání prostřednictvím SDE databáze či ArcGIS Enterprise zajišťuje aktuálnost a jednotnost dat napříč všemi zpracovateli. Odpadá potřeba vrstvy rozvodnic rozdělovat na jednotlivé části s ohledem na územní působnost poboček a po aktualizaci ji zase spojovat dohromady. Editace probíhá nad jednou celistvou vrstvou. Nad datovou sadou rozvodnic v databázi SDE jsou nastavena topologická pravidla zajišťující homogenitu editovaných dat. Zároveň jsou využívány letecké snímky a základní mapa 1 : 10 000 poskytované jako služby ArcGIS Serveru ČÚZK. Pro jednotný postup prací aktualizace datové sady rozvodnic povodí 4. řádu napříč pobočkami byl vytvořen závazný pracovní návod. Veškerá data jsou převedena a používána v souřadnicovém systému WGS 1984 UTM 33N.

Primárním zdrojem pro aktualizaci rozvodnic povodí 4. řádu je digitální model reliéfu 5. generace (DMR 5G) Zeměměřičkého úřadu (ZÚ) s rozlišením rastru 2 × 2 m. Dalšími nezbytnými podklady jsou informace o strukturálním a geometrickém uspořádání vodních toků. Geometrie vodních toků je přebírána z dat státního mapového díla ZABAGED, struktura páteřních vodních toků je určena také datovou sadou vodních toků ZABAGED s tím, že rozdíl mezi datovou sadou vodních toků CEVT (Centrální evidence vodních toků) využívanou správci vodních toků (státní podniky Povodí, Lesy ČR) a vrstvou vodních toků ze ZABAGED jsou řešeny v rámci Harmonizace páteřních vodních toků v projektu „*ISVS Voda*“. Odsouhlasené změny jsou následně ve zhruba půlročních cyklech zapracovány do datové sady vodních toků ZABAGED.

Nezbytnými podklady jsou další vrstvy ZABAGED, například vodní plochy, propustky nebo bodová vrstva s názvem „Uzlový bod říční sítě“, kde jsou v atributech obsaženy informace o křížení, soutocích, pramenech či pseudouzlech (fiktivních soutocích či křížení) vodních toků. Současně se využívají další datové zdroje poskytované v rámci Harmonizace vodních toků projektu „*ISVS Voda*“, zejména zahraniční vodní toky zprostředkované od ZÚ a datová sada hlavních odvodňovacích zařízení (HOZ) od Státního pozemkového úřadu (SPÚ).

Na území hlavního města Prahy jsou k aktualizaci rozvodnic dále využívána data o dešťové kanalizační síti a přilehlých odvodňovacích plochách Pražské vodohospodářské společnosti (PVS) a data o podrobných vodních tocích, jež spravuje Odbor ochrany prostředí Magistrátu hlavního města Prahy.

Jedním z hlavních a nejdůležitějších podkladů pro tvorbu rozvodnic jsou vrstevnice. Jelikož v současné době nejsou k dispozici pro celé území ČR vrstevnice odvozené z DMR 5G od ČÚZK, jsou rozvodnice aktualizovány nad vrstevnicemi generovanými „on the fly“ se stejnými parametry na všech pobočkách pomocí rastrového nástroje „Contour“ v aplikaci ArcGIS Pro. Jedná se de facto o rastrovou vrstvu, která se překresluje dynamicky podle velikosti měřítka mapy. Základní měřítka pro aktualizaci rozvodnic bylo na základě analýz stanoveno na velikost 1 : 1 000 tak, aby odpovídalo přesnosti digitálního modelu reliéfu a současně vyhovovalo dalšímu zpracování hydrologických údajů. Přesto je při aktualizaci rozvodnic v určitých územích třeba provádět editaci ve větším rozlišení, než je stanovené měřítka.

Druhým nezbytným podkladem pro aktualizaci rozvodnic je stínovaný reliéf dynamicky generovaný stejně jako vrstevnice nad DMR 5G pomocí rastrové analýzy „Hillshade“.

Sada nástrojů hydrologické rastrové analýzy využívá vybraného digitálního modelu reliéfu pro výpočet a stanovení hydrologických prvků povodí – mj. říční sítě a rozvodnic. Některé rovinaté oblasti ČR jsou náročné na určení korektního vedení rozvodnic, proto bylo v oddělení povrchových vod vyvinuto a do ArcGIS Pro zakomponováno rozšíření v podobě nástroje (toolboxu) s názvem HydroDEM. Tento nástroj umožňuje automaticky generovat rozvodnice s využitím rastrových analýz DMR 5G při definování okrajových podmínek (parametry a použité vrstvy). Automaticky generovaná rozvodnice je však odvozena čistě nad digitálním modelem reliéfu a nezohledňuje antropogenní zásahy do vodních toků, jako jsou např. umělé náhony, mimoúrovňová křížení, podzemní úseky či propustky, které odvádějí vodu pod vyvýšenými silnicemi. Proto automaticky generovaná rozvodnice slouží jako pomocný nástroj při samotné aktualizaci vrstvy rozvodnic.

Proces aktualizace datové sady rozvodnic s využitím DMR 5G je financován v rámci institucionální podpory dlouhodobého koncepčního rozvoje a bude pokračovat i v roce 2022. Dokončení aktualizace se předpokládá na konci roku 2022. V následném období očekáváme, že zhruba v ročním cyklu bude probíhat aktualizace datové sady rozvodnic zapracováním změn týkajících se změny struktury vodních toků s dopadem na strukturu rozvodnic.

PŘÍPRAVA VSTUPNÍCH PODKLADŮ PRO ODVOZENÍ M-DENNÍCH PRŮTOKŮ

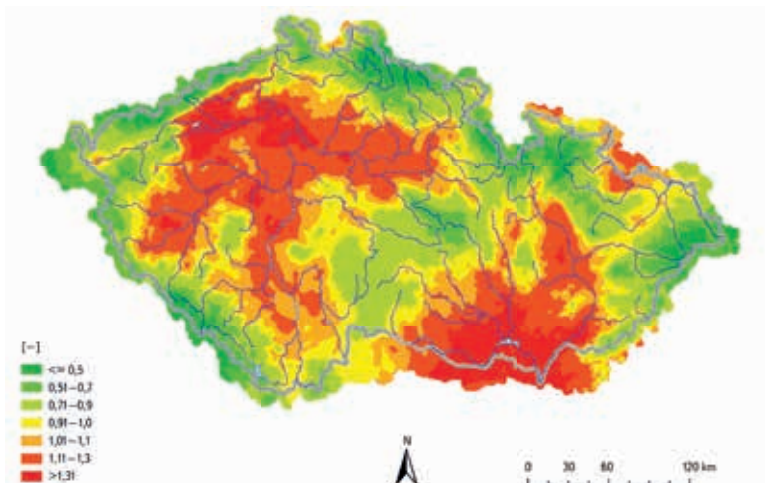
M-denní průtoky patří podle ČSN 75 1400. *Hydrologické údaje povrchových vod* mezi základní hydrologické údaje, jež jsou poskytovány pro libovolný profil říční sítě. Jsou vždy stanovovány pro určité referenční období.

Výpočtům hydrologických charakteristik M-denních průtoků za referenční období 1981–2010 předcházelo odvození několika klimatologických charakteristik. Primárním klimatickým faktorem, který má největší vliv na odtokové poměry, jsou srážky. Dlouhodobá roční výška srážek na povodí je množství vody ze srážek spadlých na povrch daného území za daný časový interval. Je vyjádřena výškou vrstvy vody (v milimetrech) rovnoměrně rozložené po ploše tohoto území.

Dlouhodobá roční výška srážek na povodí patří mezi základní klimatologicko-hydrologické charakteristiky určující dlouhodobou hydrologickou bilanci povodí. Lze ji určit pomocí nástrojů GIS, a to pomocí překryvu polygonové vrstvy rozvodnic přes rastrovou vrstvu srážek, jež byla odvozena z pozorování ve srážkoměrných stanicích.

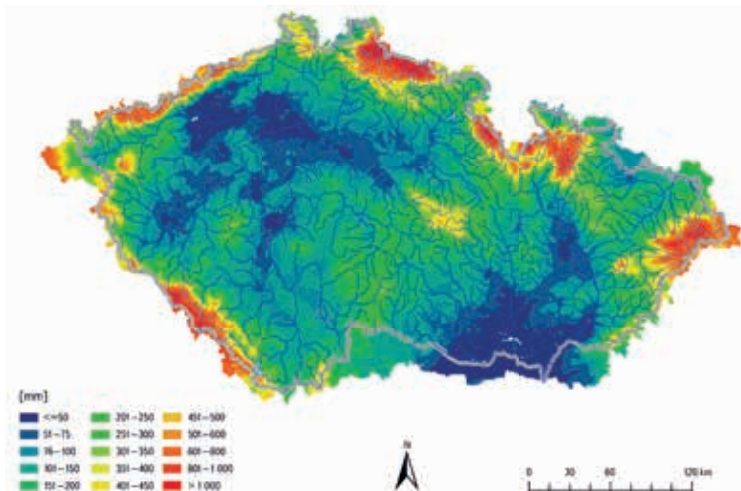
Odvození rastru dlouhodobých ročních úhrnů srážek s využitím maxima dostupných údajů bylo proto jedním z hlavních cílů zpracování. Metodika odvození průměrných ročních srážkových úhrnů za referenční období ve srážkoměrných stanicích je podrobně popsána v publikaci [3].

Bodová data dlouhodobých ročních úhrnů byla interpolována do rastrové vrstvy metodou orografické interpolace, která byla vyvinuta v ČHMÚ [4]. Jako podklad byl použit rastr nadmořských výšek terénu v kroku 1 × 1 km shlazený³ v okolí 3 × 3 km. Mezi přednosti použité metody patří jednoduchost použití a zjišťování regresních vztahů v lokálním (regionálním) měřítku, nevýhodou je odvozování čistě lineárních regresních vztahů, kde velikost srážky závisí pouze na jediné veličině. Použitím shlazeného terénu je však tato nevýhoda částečně eliminována, neboť stanice o stejné nadmořské výšce, ale reprezentující zcela odlišné klimatické poměry, např. Milešovka a Pec pod Sněžkou, se shlazením terénu dostávají do jiných „relativních“ nadmořských výšek vzhledem k průměrnému převýšení vůči svému okolí.



Obr. 2. Index aridity za období 1981–2010

Fig. 2. Aridity index for the period 1981–2010



Obr. 3. Velikost dlouhodobého ročního odtoku za období 1981–2010 odvozená regresními vztahy z dlouhodobého průměrného ročního srážkového úhrnu a dlouhodobé roční potenciální evapotranspirace

Fig. 3. Long-term annual runoff for the period 1981–2010 obtained from regression relationships between long-term mean annual precipitation totals and long-term annual potential evapotranspiration

Velkým přínosem pro odvození rastrové vrstvy dlouhodobé roční výšky srážek bylo využití dat ze zahraničních zdrojů, které pomohlo zpřesnit údaje v příhraničních oblastech, zejména v oblasti Šumavy a Krušných hor, a dále v zahraničních územích, kde leží významná část povodí našich řek (např. Ohře, Dyje).

Kombinací dlouhodobé roční výšky srážek a hodnoty dlouhodobé roční potenciální evapotranspirace lze vypočítat tzv. index aridity (viz obr. 2), což je poměr roční potenciální evapotranspirace a roční srážky. Tento index je základem pro odhad dlouhodobé výšky odtoku na nepozorovaných povodích.

Pro odvození rastru roční potenciální evapotranspirace za období 1981–2010 byla využita data z 234 klimatologických stanic, které měly délku pozorování alespoň osm let. Nejprve byly vypočteny hodnoty měsíční potenciální evapotranspirace a odvozeny roční sumy. Kratší řady byly doplněny metodou lineární regrese pomocí analogonu (stanice s úplnou řadou pozorování) s nejvyšším koeficientem determinace.

Pomocí orografické interpolace [4] byl v prostředí GIS odvozen pro každý rok z období 1981–2010 rastr roční potenciální evapotranspirace a vypočten rastr průměrných hodnot za období 1981–2010.

Metodika odvození dlouhodobého ročního odtoku za období 1981–2010 pomocí regresních vztahů z dlouhodobého průměrného ročního srážkového úhrnu a dlouhodobé roční potenciální evapotranspirace je popsána v publikaci [3]. Při odvození byly využity funkce mapové algebry aplikované na výše zmíněné rastrové vrstvy klimatologických prvků. Výsledná mapa dlouhodobé roční výšky odtoku je zobrazena na obr. 3.

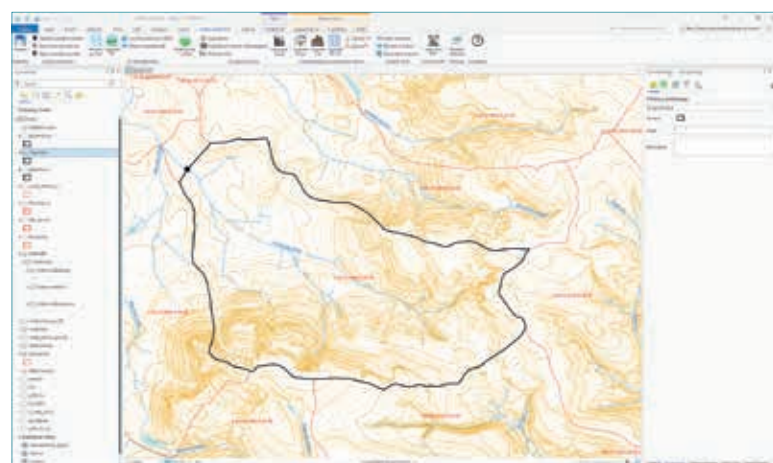
ZPRACOVÁNÍ HYDROLOGICKÝCH POSUDKŮ

Hydrologickými posudky nazýváme poskytování standardních hydrologických údajů podle ČSN 75 1400. *Hydrologické údaje povrchových vod*. Ke standardním hydrologickým údajům mimo jiné patří kromě časových řad hydrologických veličin pozorovaných ve vodoměrných stanicích již dříve zmíněné *M*-denní průtoky, *N*-leté průtoky a rovněž i průběhy teoretických povodňových vln (TPV) s kulminacním průtokem dané doby opakování. Na rozdíl od časových řad jsou hodnoty *M*-denních a *N*-letých průtoků a průběhy TPV poskytovány pro libovolný profil říční sítě. Tento fakt vedl k nasazení technologie GIS pro odvozování fyzickogeografických charakteristik povodí a dalších veličin, jež slouží jako podklad při stanovení standardních hydrologických údajů v nepozorovaných profilech.

K těmto účelům slouží již třetí generace aplikace, která se postupně nazývala AVPosudek (pro ArcView GIS 3.x), AGPosudek (pro ArcGIS Desktop) a AGPosudek Pro (pro ArcGIS Pro), přičemž funkcionality jednotlivých verzí aplikací se dle potřeby upravovala a rozvíjela. Další popis bude věnován poslední generaci této aplikace, a sice AGPosudek Pro.

AGPosudek Pro je aplikace ve formě doplňku pro ArcGIS Pro vyvinutého ve VB.NET s využitím ArcGIS Pro SDK for Microsoft.NET. Vytváření doplňků usnadňuje integrace SDK do Microsoft Visual Studio a šablony jednotlivých objektů, z nichž se aplikace skládá (dialogová okna a jiné ovládací prvky). K dispozici je na stránkách <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/sdk/> (ověřeno 5. listopadu 2021), včetně velkého množství příkladů, které jsou však napsány v C#. Pro VB.NET existuje konvertor z C#, dostupný na <https://codeconverter.icsharpcode.net/> (ověřeno 5. listopadu 2021).

Na obr. 4 je znázorněn výřez okna z aplikace ArcGIS Pro s načteným doplňkem AGPosudek Pro. V okně je zobrazena mapa s vrstvou rozvodnic posuzovaného povodí k profilu znázorněnému bodem a dále jsou zobrazeny podrobné rozvodnice základních povodí, vrstevnice ZABAGED a vodní toky ZABAGED. Pás karet s jednotlivými nástroji aplikace je na obr. 5.



Obr. 4. Okno ArcGIS Pro s mapou, která zachycuje posuzované povodí, vrstevnice a vodní toky

Fig. 4. ArcGIS Pro window with map that captures assessed catchment, contours and watercourses



Obr. 5. Pás karet aplikace AGPosudek Pro

Fig. 5. AGPosudek Pro application ribbon bar

Vytvoření plnohodnotné verze aplikace pro ArcGIS Pro bylo možné až ve verzi 2.6, jež umožnila zakreslování uživatelské grafiky (bodů, linií a polygonů) do grafické vrstvy v mapě.

Funkcionalitu AGPosudek Pro lze stručně rozepsat do následujících bodů:

- Uložení vybraného polygonu povodí: Uživatel vybere z vrstvy rozvodnic základních povodí polygon povodí, ve kterém bude zpracovávat posudek, a ten uloží do samostatného souboru shapefile.
- Určení rozvodnice: Na základě souřadnic (zpravidla v S-JTSK) uživatel zakreslí v grafické vrstvě profil na toku ve formě bodu do mapy a v grafické vrstvě zakreslí linii rozvodnice, jež daným bodem prochází. Poté pomocí nástroje „Stanovení rozvodnice“ rozdělí polygon v shapefile vybraného povodí. Část povodí níže po toku (pod profilem) může smazat a dále pracuje jen s polygonem povodí k posuzovanému profilu. Všechny výsledky níže uvedených nástrojů jsou zapisovány do atributové tabulky vrstvy vybraného povodí.
- Výpočet plochy povodí: Dojde k přepočtu plochy polygonu povodí z projekce mapy do plochojevné projekce ETRS89 / LAEA Europe (kód 3035).
- Výpočet fyzikogeografických charakteristik: Nástroj vypočítá průměrný sklon povodí na základě zvolené vrstvy DMR, a pokud je graficky zakreslena linie údolnice, spočítá rovněž její délku a sklon. Nástroj mimo jiné využívá funkci GIS „Slope“.
- Odvození linie údolnice z DMR: Na základě zvolené vrstvy DMR je odvozena linie, která spojuje závěrový profil a hydraulicky nejvzdálenější místo v daném povodí. Nástroj využívá tzv. hydrologické funkce GIS (Flow Direction, Flow Accumulation, Flow Length atd.) a funkci CostPath, viz obr. 6⁴. Vypočítána je zároveň délka a sklon linie údolnice. Výsledky jsou kromě zápisu do atributové tabulky zobrazovány v dialogových oknech, odkud si je uživatel může zkopírovat do libovolného dokumentu.



Obr. 6. Ručně nakreslená (černé šipky) a výpočtem odvozená (zelená čára) linie údolnice

Fig. 6. Hand-drawn (black arrows) and computed-derived (green line) line of the valley

- Výpočet podílu prvku v ploše: Na základě vrstvy Corine Land Cover nástroj vypočítá podíl plochy zvoleného krajinného pokryvu vůči celkové ploše povodí. Nejčastěji se používá pro výpočet podílu plochy lesů. V nástroji je využita funkce GIS „Tabulate Area“.
- Dále je v aplikaci využívána funkce zonální statistiky na základě zvolené rastrové vrstvy, a to např. pro výpočet průměrných hodnot na povodí. Jde o průměrnou dlouhodobou roční výšku srážek, výšku N -letých maximálních srážek daného trvání, hodnotu CN atd.
- Další funkce aplikace slouží již k odvození konkrétních hydrologických charakteristik, např. hodnot 100letého průtoku pomocí různých metod. K tomuto účelu je využíváno výsledků předchozích nástrojů, které odvozují fyzikogeografické charakteristiky, průměrné hodnoty N -letých srážek, hodnoty CN, podíl lesnatosti atd.

Aplikace AGPosudek a nově AGPosudek Pro jsou využívány hydrology-posudkáři na pobočkových pracovištích ČHMÚ.

INDIKÁTOR PŘÍVALOVÝCH POVODNÍ

Operativní hydrologická služba, zvaná Hlásná a předpovědní povodňová služba (HPPS), vytváří důležité výstupy pro širokou veřejnost. Jsou k dispozici na webových stránkách <https://hydro.chmi.cz/hpps/> (ověřeno 7. listopadu 2021).

Povodňový jev, který je zároveň potenciálně nebezpečný i obtížně predikovatelný, je přívalová povodeň. Nelze přesně stanovit ani dobu ani místo výskytu přívalové povodně, protože jsou obtížně předpověditelné místo a čas výskytu příčinného faktoru, jimiž jsou přívalové srážky. I přes tyto obtíže je možné sledovat a vyhodnocovat v reálném čase určité parametry a jevy, ze kterých se dá posoudit míra rizika vzniku či výskytu přívalové povodně, případně lokálních záplav.

Jedním z těchto jevů je úroveň aktuálního nasycení půdy. Je-li půda více nasycená, pojme méně vody a zároveň se zmenšují její infiltrační schopnosti. V oblastech s vyšším nasycením půdy je proto riziko přívalové povodně v případě výskytu přívalových srážek podstatně vyšší. Pomocí srážkoodtokového modelování lze určit přibližné množství srážek, které, pokud by spadlo za určitou dobu, by potenciálně způsobilo významnější povrchový odtok.

Přívalové srážky jsou jedním z potenciálně nebezpečných doprovodných průvodních jevů u konvektivních bouří. Výskyt konvektivních bouří v čase a prostoru je monitorován pomocí meteorologických radarů. Radar neměří přímo srážky, ale tzv. odrazivost. Na základě vztahu mezi odrazivostí a hodinovou intenzitou srážek lze přibližně odhadnout, jaké množství srážek nad určitým územím spadlo nebo na základě krátkodobé předpovědi, tzv. nowcastingu [5], případně ještě spadne. Pomocí kombinace srážkoměrných pozorování a radarových měření lze odhady srážek významně zpřesnit. S využitím srážkoodtokového modelování je poté možné přibližně určit velikost odtokové odezvy, a tudíž i míru rizika vzniku či výskytu přívalové povodně.

Na výše uvedených skutečnostech je založen vývoj tzv. indikátoru přívalových povodní (FFI), jenž započal v rámci projektu VaV SP/1c4/16/07 „Výzkum a implementace nových nástrojů pro předpovědi povodní a odtoku v rámci zabezpečení Hlásné a předpovědní povodňové služby v ČR“ (2007–2011) a byl inspirován systémem „Flash Flood Guidance“ provozovaným Národní povětrnostní službou (NWS) USA [6].

Tab. 1. Matice pro odvození souhrnného rizika přívalové povodně pro ORP podle rizika přívalové povodně a rizika lokálního zatopení

Tab. 1. Matrix for the derivation of the general risk for the municipalities with extended powers (MEP) according to the flash flood risk and the local flooding risk

		Riziko přívalové povodně			
Úroveň rizika		žádné riziko	střední riziko	vysoké riziko	velmi vysoké riziko
Riziko lokálního zatopení	žádné riziko	žádné riziko	střední riziko	střední riziko	vysoké riziko
	střední riziko	střední riziko	střední riziko	střední riziko	vysoké riziko
	vysoké riziko	střední riziko	vysoké riziko	vysoké riziko	vysoké riziko
	velmi vysoké riziko	vysoké riziko	velmi vysoké riziko	velmi vysoké riziko	velmi vysoké riziko

Systém FFI byl do roku 2016 v experimentálním provozu a postupně byl zdokonalován. Výstupy za období 2017–2019 byly podrobně vyhodnoceny a od roku 2020 je FFI součástí předpovědní služby ČHMÚ. Systém je v provozu cca od poloviny dubna do poloviny října, což je období s výskytem konvektivních srážek. Podrobně je popsán v příspěvku [7], v současné době (listopad 2021) byl dokončen překlad tohoto příspěvku do angličtiny, společně s velkou aktualizací jeho obsahu [8].

Vývoj FFI začal na platformě ArcView GIS 3.x v programovacím jazyce Avenue a během roku 2011 byl převeden pod systém ArcGIS Desktop a přeprogramován do Pythonu. Jednotlivé nástroje mohou být spouštěny interaktivně (z GIS prostředí) nebo automaticky s využitím systémového plánovače úloh, a to buď v denním kroku, nebo v definovaném kratším kroku.

Pro konfiguraci běhu procedur jsou k dispozici konfigurační soubory obsahující mnoho parametrů. Je možné zadat cesty ke vstupním datům, adresáře nebo geodatabáze pro ukládání výsledků, interval časového kroku vstupních dat srážek v minutách, délku časového úseku v minutách pro spadlé srážky i pro nowcasting, prahové hodnoty pro stanovení jednotlivých úrovní rizika atd.

V denním kroku jsou základním vstupem tato data:

- Rastr 24hodinových sum srážek jako kombinace radarových měření a srážkoměrných pozorování, tzv. MERGE, viz [9].
- Bodové hodnoty aktuální evapotranspirace, které jsou interpolovány metodou IDW (Inverse Distance Weighing = vážené inverzní vzdálenosti) do rastru.

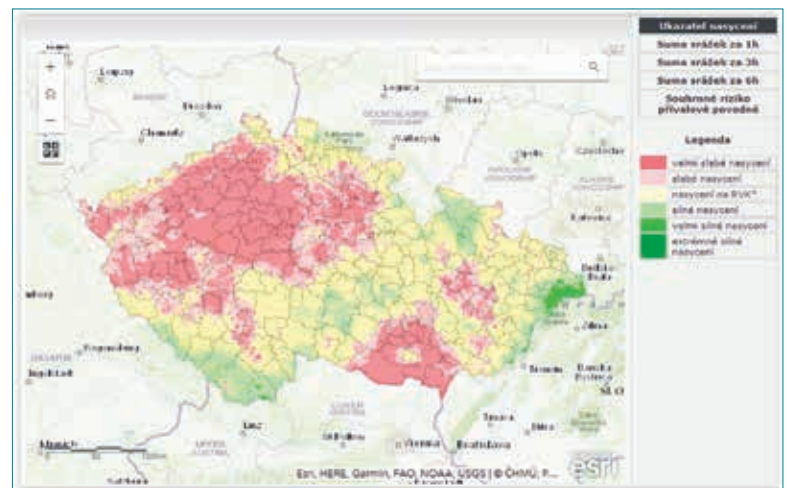
Výstupem procedur v denním kroku je:

- Rastr aktuálních hodnot nasycení půdy reprezentovaných hodnotami CN v rozlišení 1 × 1 km, odvozený z bilance srážek a evapotranspirace. Vztahem aktuálních hodnot CN ke krajním (limitním) hodnotám CN je definován tzv. ukazatel nasycení.
- Polygonová vrstva s úhrny tzv. potenciálně rizikových srážek o době trvání 1, 3 a 6 hodin pro území velikosti 3 × 3 km.

Výpočty v denním kroku jsou spouštěny během dne několikrát, čímž vzniká prostor na někdy nutnou úpravu vstupních dat a přepočítání výstupů.

Hlavním vstupem do procedur, jež jsou spouštěny v kratším kroku (v roce 2021 každých 20 minut), jsou 15minutové sumy radarových odhadů srážek, které jsou adjustovány na základě srážkoměrných pozorování. Do roku 2021 byla odvozována jediná hodnota adjustačního koeficientu pro celé území ČR, od roku 2022 se předpokládá využití plošně proměnlivého adjustačního koeficientu a rovněž využití produktu MERGE v časových intervalech, v nichž bude tento produkt již k dispozici. Úprava způsobu výpočtu adjustačního koeficientu byla řešena v rámci výzkumného projektu V120192021166 „Hydrometeorologická rizika v České republice – změny rizik a zlepšení jejich predikcí“ (2019–2021) a je podrobně popsána v článku [10].

Výpočet rizika vzniku nebo výskytu přívalové povodně je počítán v síti hydrologicky propojených prvků povodí a říčních úseků, v nichž základní podkladovou vrstvou je polygonová vrstva základních povodí, kde jsou pro každé povodí spočítány fyzickogeografické charakteristiky (sklon povodí, sklon a délka údolnice, aktuální hodnota CN atd.). Tyto propojené prvky tvoří hydrologický model, ve kterém je počítána hydrologická odezva na spadlé srážky a rovněž na srážky očekávané, jež jsou predikovány pomocí nowcastingu. Riziko vzniku či výskytu přívalové povodně je počítáno v závěrovém profilu každého povodí.

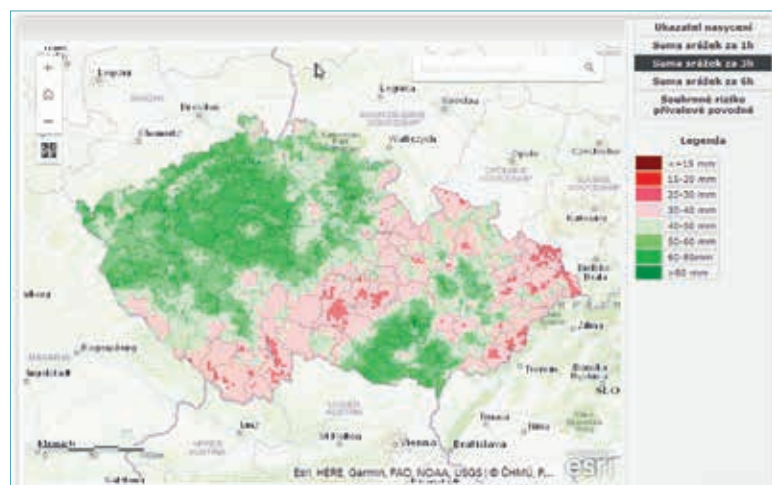


Obr. 7. Ukazatel nasycení platný pro 30. červen 2020 v 6:00 UTC na webových stránkách ČHMÚ, viz legenda v tab. 2

Fig. 7. Soil saturation indicator valid for June 30, 2020 at 6:00 UTC as seen on the CHMI website, see legend in Tab. 2

Tab. 2. Legenda vrstvy ukazatele nasycení
Tab. 2. Legend of the soil saturation layer

Description
very low saturation
low saturation
saturation at field capacity
strong saturation
very strong saturation
extremely strong saturation



Obr. 8. Mapa potenciálně rizikových srážek o délce trvání 3 hodin platných pro 30. červen 2020 v 6:00 UTC na webových stránkách ČHMÚ

Fig. 8. Map of potential risk rainfall amounts with the duration of 3 hours valid for June 30, 2020 at 6:00 UTC as seen on the CHMI website

V polygonové vrstvě o velikosti polygonu 3×3 km je počítáno tzv. riziko lokálního zatopení, a to na základě dvouhodinové sumy již spadlých srážek, případně jednodinové sumy spadlých srážek a jednodinové sumy srážek z nowcastingu. Každý polygon má obdobně jako všechna povodí odvozené fyzickogeografické charakteristiky včetně aktuální hodnoty CN.

Pro riziko přívalové povodně, počítané v hydrologickém modelu propojených povodí a říčních úseků, i pro riziko lokálního zatopení určované pro polygony konstantní velikosti, jsou nastaveny celkem tři prahové hodnoty, jež jsou navázány k teoretické hodnotě specifického 100letého průtoku. Tyto prahové hodnoty je možné v konfiguračních souborech změnit.

Hlavním výsledkem je stanovení rizika přívalové povodně a lokálního zatopení pro obce s rozšířenou působností (ORP), pro které je také určeno tzv. souhrnné riziko přívalové povodně dle tab. 1.

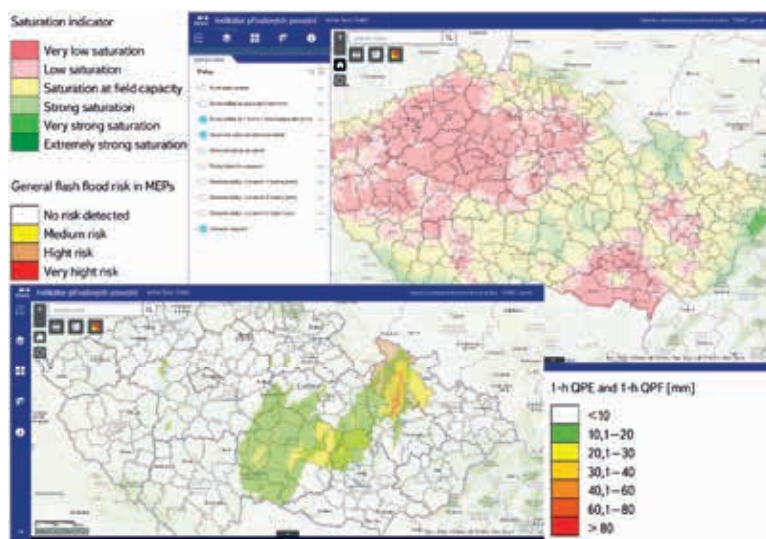
Pro potřeby HPPS je generovaný XML soubor s informací o riziku přívalové povodně nebo lokálního zatopení pro každou ORP a zároveň je tento výstup využíván i v mobilní aplikaci ČHMÚ.

Všechny výstupy jsou rovněž ukládány v ESRI souborových geodatabázích ve formě rastrových a vektorových vrstev, případně tabulek. Vybraná data jsou přenášena do cloudového úložiště na ArcGIS Online a zobrazována ve formě webových map a interaktivních webových aplikací.

Obr. 7 a 8 představují webové mapy, které jsou vloženy do stránek HPPS. Na obr. 7 je zobrazen ukazatel nasycení, na obr. 8 jsou znázorněny úhrny potenciálně rizikových srážek o délce trvání 3 hodin. Obě mapy jsou plně interaktivní.

Na obr. 9 je okno webové mapové aplikace, v níž je možné zobrazit všechny důležité a aktuální výstupy ze systému FFI:

- ukazatel nasycení,
- potenciálně rizikové srážky s trváním 1, 3 a 6 hodin,
- riziko lokálního zatopení pro ORP,
- riziko přívalové povodně pro ORP,
- souhrnné riziko přívalové povodně jako kombinace rizik lokálního zatopení a přívalové povodně (viz výše),
- suma adjustovaných radarových odhadů srážek v polygonech 3×3 km za předchozí 2 hodiny, pokud suma byla vyšší než 10 mm nebo tato suma představovala riziko lokálního zatopení,
- suma adjustovaných radarových odhadů srážek v polygonech 3×3 km za předchozí 1 hodinu plus za 1 hodinu nowcastingu, pokud suma byla vyšší než 10 mm nebo tato suma představovala riziko lokálního zatopení,



Obr. 9. Výstupy z webové mapové aplikace „Indikátor přívalových povodní“, která běží na platformě ArcGIS Online. Zobrazuje vrstvu ukazatele nasycení (vpravo nahoře), úhrn srážek ≥ 10 mm/2 h a aktuální souhrnné riziko přívalové povodně (vlevo dole) pro ORP Fig. 9. The outputs from web map application ‘Flash Flood Indicator’ running on the ArcGIS Online platform. It depicts the soil saturation indicator layer (upper-right), radar precipitation estimates (QPE and QPF) ≥ 10 mm/2 h and actual general flash flood risk (bottom left) in MEPs

- riziko přívalové povodně v systému povodí, kde je možné použít filtr pro ta povodí, v nichž by měl být teprve dosažen kulminační průtok.

Aplikace běží v současné době na ArcGIS Online ve dvou verzích. Starší z nich je založena na šabloně Web Application Builder, novější na šabloně Experience Builder, která má pokročilejší možnosti ve vztahu k optimalizaci zobrazení pro různá zařízení (PC, tablety, mobilní telefony).

Indikátor přívalových povodní představuje komplexní systém založený na GIS platformě technologie ESRI. Je tvořen poměrně rozsáhlými skripty v jazyce Python, v nichž je využito mnoha funkcí GIS od interpolací přes mapovou algebru a pokročilých geoprocessingových funkcí (překryvy či průniky vrstev) až po publikaci datových vrstev do webového prostředí. Především je využíváno knihovny „arcpy“, která je licencovaná s produkty ArcGIS Desktop, případně ArcGIS Pro, a knihovny „arccgis“, což je volně dostupná knihovna pro práci s GIS vrstvami publikovanými na webu.

ZÁVĚR

Tento příspěvek ukazuje na konkrétních příkladech využití technologie GIS při řešení různých úloh v oboru hydrologie v ČHMÚ. Je zřejmé, že GIS již dlouhou dobu neslouží jen k vytváření kartogramů či kartodiagramů, ale jde o komplexní nástroj, který zahrnuje vytváření a správu dat ve víceuživatelských geodatabázích, zpracování a analýzy geoprostorových dat, možnost vytváření uživatelských a na míru šitých aplikací či vytváření skriptů pro řešení složitých úloh.

Ačkoli těžiště práce v GIS pravděpodobně zůstane i v budoucnu v práci s daty v prostředí tzv. těžkého klienta, publikace výsledků se přesouvá od statických map k dynamickým mapám a mapovým aplikacím ve webovém prostředí, jež jsou přístupné z běžného webového prohlížeče. To umožní rozšířit využívání technologií GIS i pro uživatele, kteří běžně s technologií GIS nepracují, a zároveň je to příležitost pro organizace (v tomto případě ČHMÚ) k efektivní publikaci dat a výsledků práce svých zaměstnanců.

Poznámky

1. Dnes Vojenský geografický a hydrometeorologický úřad Dobruška (VGHMÚř Dobruška)
2. Myšlena jsou povodí 4. řádu a povodí k dalším důležitým profilům (hráze nádrží, vodoměrné stanice atd.).
3. Byla využita funkce „Aggregate“, pomocí níž byly vypočteny průměrné hodnoty původního rastru 100 × 100 m v rozlišení 1 × 1 km, a následně byla aplikována funkce „Block Statistics“ pro vytvoření rastru průměrných hodnot v okruhu 3 × 3 km při zachování rozlišení rastru 1 × 1 km.
4. Rozdíly mezi automaticky odvozenou údolnicí a údolnicí stanovenou „ručně“ jsou dány jednak rozlišením podkladového DMR, jednak volbou uživatele -hydrologa, jenž při stanovení údolnice zpravidla respektuje skutečný průběh linie vodních toků.

Literatura

- [1] JANEČEK, M. *Použití metody čísel odtokových křivek CN k navrhování protierozních opatření*. Praha, VÚMOP 1998. s. 1–35.
- [2] Kolektiv pracovníků Hydrologické služby HMÚ. *Hydrologické poměry Československé socialistické republiky. Díl I. Text*. Josef ZÍTEK (ed.). Praha 1965. 414 s.
- [3] BUDÍK, L., ŠERCL, P., KUKLA, P., LETT, P., PECHA, M. Odvození základních hydrologických údajů za referenční období 1981–2010. In: *Sborník prací Českého hydrometeorologického ústavu*, 65, 2018, s. 60.
- [4] ŠERCL, P. Hodnocení metod odhadu plošných srážek. *Meteorologické zprávy*. 2008, 61(2), s. 33–43.
- [5] NOVÁK, P. The Czech Hydrometeorological Institute's Severe Storm Nowcasting System. *Atmospheric Research*. 2007, 83, s. 450–457.
- [6] SWEENEY L. T. *Modernized Areal Flash Flood Guidance*. Office of Hydrology, Silver Spring, Md. NOAA Technical Memorandum NWS HYDRO 44, Silver Spring, MD, 1992 dostupné z <https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/13498>
- [7] ŠERCL, P. Indikátor přívalových povodní. Možnosti predikce přívalových povodní v podmínkách České republiky. In: *Sborník prací Českého hydrometeorologického ústavu*. 2015, 60, s. 10–28, ISBN 9788087577271.
- [8] ŠERCL, P., PECHA, M., NOVÁK, P., KYZVAROVÁ, H., SVOBODA, V., LEDVINKA, O., DAŇHELKA, J. *Flash Flood Indicator*. Praha, ČHMÚ, předpokládaný rok vydání 2022.
- [9] NOVÁK, P., KYZVAROVÁ, H. Progress in Operational Quantitative Precipitation Estimation in the Czech Republic. In: *Proceedings of 8th European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology (ERAD2014)*, Garmisch-Partenkirchen, Germany, 1–5 September 2014. Dostupné z: http://www.pa.op.dlr.de/erad2014/programme/ExtendedAbstracts/067_Novak.pdf
- [10] NOVÁK, P., KYZVAROVÁ, H., PECHA, M., ŠERCL, P., SVOBODA, V., LEDVINKA, O. Utilization of Weather Radar Data for the Flash Flood Indicator Application in the Czech Republic. *Remote Sensing*. 2021, 13(16), 3184. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/rs13163184>

Autoři

Ing. Petr Šercl, Ph.D.

✉ petr.sercl@chmi.cz

ORCID: 0000-0003-1581-961X

Ing. Radovan Tyl, Ph.D.

✉ radovan.tyl@chmi.cz

ORCID: 0000-0002-5270-3248

RNDr. Pavel Kukla

✉ pavel.kukla@chmi.cz

Mgr. Martin Pecha

✉ martin.pecha@chmi.cz

ORCID: 0000-0003-0294-8981

Český hydrometeorologický ústav, Praha

Příspěvek prošel lektorským řízením.

DOI: 10.46555/VTEI.2021.11.001

PRACTICAL EXAMPLES OF USE OF GIS IN HYDROLOGY AT THE CZECH HYDROMETEOROLOGICAL INSTITUTE

ŠERCL, P.; TYL, R.; KUKLA, P.; PECHA, M.

Czech Hydrometeorological Institute, Prague

Keywords: GIS – hydrology – catchment divide – physio-geographical characteristics – flash floods

GIS technology is very widely used in hydrology at CHMI. This is due both to its massive development, particularly in the last two decades, and to the geospatial data used in hydrology for analytical tasks and the results, which are provided to the public. The use of GIS is shown in four examples.

The first example focuses on creating GIS data. One of the basic GIS data for analytical work in hydrology is the polygon layer of the 4th order catchment divides. From 2019 onwards, an update or re-creation of these data is taking place, based on DMR 5G and an updated polyline layer of river network, whose geometry and attributes are harmonised in cooperation with Water Board River authorities, national Survey Authority and the T. G. Masaryk Water Research Institute.

The second example concerns the preparation of input data for the derivation of M-day discharges, which are among the basic hydrological data according to ČSN 75 1400. *Hydrological data of surface water*. The example describes the process of deriving a raster layer of long-term annual runoff over the reference period 1981–2010, where the regression relationship between the mean annual runoff height, the mean annual total precipitation and the mean annual size of the potential evapotranspiration in the given period was used.

The third example describes the use of GIS in the processing of design hydrological data according to the above standard ČSN 75 1400, which mainly results in the derivation of M-day discharges or N-year discharges in the specified river profile. For these purposes, a special application has been developed which allows to derive not only the basic physical and geographical characteristics of a catchment from a digital relief model (catchment slope, valley slope length and slope) but also to identify other necessary characteristics, such as the proportion of a certain type of land use in a basin or the average values of other elements in a river basin (rainfall, CN numbers, etc.).

The fourth example deals with the use of GIS in an operational hydrological service, specifically in the development of the so-called flash flood indicator, which determines the level of flash flood risk based on current soil saturation and radar precipitation estimates. In particular, the example mentions the options for scripting and development tools that GIS offers.



Autoři VTEI

Mgr. Libor Ducháček

Český hydrometeorologický ústav, Jablonec nad Nisou

✉ libor.duchacek@chmi.cz
www.chmi.cz



Mgr. Libor Ducháček vystudoval na Přírodovědecké fakultě Univerzity Karlovy v Praze obor Fyzická geografie a geoekologie. V roce 2008 nastoupil jako hydrolog do regionálního pracoviště ČHMÚ v Jablonci nad Nisou, které se stará o sedm experimentálních povodí v Jizerských horách. K pravidelnému sběru hydrologických dat v terénu (hydrometrování, měření vodní hodnoty sněhu) se postupně přidalo testování nových metod k měření průtoku. Od roku 2016 je hlavním metodikem pro měření průtoku na ČHMÚ a od roku 2020 je součástí expertní skupiny pro hydrometrování v rámci WMO.

Ing. Josef Kratina, Ph.D.

VÚV TGM, v. v. i., Praha

✉ josef.kratina@vuv.cz
www.vuv.cz



Vystudoval magisterský program Hodnocení a ochrana půdy a doktorský program Využití a ochrana přírodních zdrojů na ČZU v Praze. Disertační práci obhájil v roce 2015. Je členem České pedologické společnosti. Mezi lety 2015 a 2016 byl zaměstnán jako specialista hodnocení životního prostředí (příroda, krajina, lesy, zemědělství) v České informační agentuře životního prostředí (CENIA). Od roku 2018 je zaměstnancem VÚV TGM, v. v. i., jako výzkumný pracovník v Oddělení hydrochemie, kde se kromě hydrochemie zaměřuje také na pedologii a problematiku nakládání s čistírenskými kaly. Jako hlavní řešitel nebo spoluřešitel se podílí na několika výzkumných projektech, věnuje se rovněž publikační činnosti.

Ing. Petr Šercl, Ph.D.

Český hydrometeorologický ústav, Praha

✉ petr.sercl@chmi.cz
www.chmi.cz



Petr Šercl pracuje jako hydrolog v ČHMÚ od roku 1989, nyní v pozici vedoucího oddělení povrchových vod. Vystudoval obor Vodní hospodářství a vodní stavby na Fakultě stavební ČVUT a v roce 2007 ukončil doktorský studijní program Fyzická geografie a geoekologie na Katedře fyzické geografie Přírodovědecké fakulty Univerzity Karlovy v Praze. Specializuje se na využití GIS v hydrologii, na srážkoodtokové modelování a extrémní hydrologické jevy, zejména přívalové povodně.

Bc. Vít Štoviček

Český hydrometeorologický ústav, Praha

✉ vit.stovicek@chmi.cz
www.chmi.cz



Bc. Vít Štoviček je zaměstnancem ČHMÚ, oddělení hydrofondu a bilancí, od roku 2021. Je absolventem bakalářského studia oboru Geografie a kartografie na Přírodovědecké fakultě Univerzity Karlovy v Praze a od roku 2019 studuje magisterský obor Hydrologie a hydrogeologie. V současné době se v ČHMÚ podílí na řešení projektu „Vodní systémy a vodní hospodářství v ČR v podmínkách změny klimatu“ (2020–2026). V rámci výzkumné činnosti se zabývá hydrologií sněhu, GIS analýzami a hydrologickým modelováním.

Rozhovor s Ing. Lucií Orlíkovou, Ph.D., odbornou asistentkou Katedry geoinformatiky na Vysoké škole báňské – Technické univerzitě v Ostravě

Všeobecně by se dalo říci, že obor geoinformatiky je relativně nový a GIS komunita v České republice stále ještě poměrně malá. První otázka tedy zřejmě nebude příliš originální, nicméně se na úvod přímo nabízí – co vás přivedlo k tomuto oboru?

Již od studia na gymnáziu jsem inklinovala ke geografii a práci s mapami. V té době jsem ovšem neměla tušení o existenci geografických informačních systémů, takže původní představa byla jít po maturitě studovat fyzickou geografii. Zúčastnila jsem se však dne otevřených dveří na naší fakultě a tam mě zcela nadchl kolega docent Petr Rapant a jeho představení geoinformatiky. V té době bylo spojení informačních technologií a geografie velmi neobvyklé. Ten den rozhodl o mé budoucí kariéře. Po dokončení doktorského studia jsem na katedře zůstala na pozici akademického pracovníka, a mohla tak skloubit vášeň pro geoinformatiku s možností předávat získané znalosti studentům.

Již od roku 2007 působíte na Katedře geoinformatiky na Vysoké škole báňské v Ostravě, kde vyučujete některé ze stěžejních odborných předmětů. Jak hodnotíte vývoj situace ve vzdělávacím systému oboru GIS za uplynulých deset let? Lze říci, že se podmínky pro výuku změnily?

Vývoj v oblasti geoinformatiky za posledních deset let je překotný. Naše studium i struktura předmětů procházejí poměrně často změnami a aktualizací, jelikož je nutné neustále reflektovat aktuální vývoj a požadavky zaměstnavatelů na naše absolventy. Zároveň je nutné, abychom i my zaměstnanci drželi krok, tudíž se snažíme trvale se vzdělávat, navštěvovat kurzy, konference, studovat zahraniční literaturu a získané poznatky dále předávat studentům. Zároveň i samotné podmínky pro výuku prošly velkými změnami. V této době je zcela běžné, že studenti mají vlastní, velmi kvalitní technické vybavení, k dispozici je řada on-line podpůrných materiálů, takže v tomto směru je výuka rozhodně jednodušší.

Zde bych se ještě chtěla zastavit u témat závěrečných prací. I tady je v rámci rozvoje oboru patrná časová dynamika, co se týče náročnosti zpracování, použitých technologií nebo trendů. Máte pocit, že jsou v současné době při jejich zadávání dostatečně reflektovány aktuální požadavky společnosti a možnost uplatnění získaných výsledků?

Závěrečné práce se vždy snažíme zaměřovat na aktuální problematiku a velmi často jsou tyto práce zpracovávány na základě požadavků vycházejících z praxe. Studenti pak úzce spolupracují na jejich řešení nejen s představiteli státní správy, ale i s konkrétními subjekty soukromé sféry. V současnosti je mnoho prací zaměřeno na environmentální problémy typu kůrovcová kalamita, monitorování pohybu ledovců, využívání půdy, mapování záplav z družicových snímků, použití bezpilotních leteckých prostředků pro vyhledávání podpovrchových drenážních sítí a podobně. Zároveň jsme se pokusili reagovat i na situaci s pandemií covid-19 a některé práce jsou zaměřeny i tímto směrem.

Jak již bylo řečeno, zajišťujete výuku několika předmětů od základů geoinformatiky po dálkový průzkum Země. Mohla byste prozradit, které z mnoha odvětví GIS je vám osobně nejbližší?

Pro mě osobně je to oblast dálkového průzkumu Země. Samotná planeta Země fascinuje lidi od nepaměti a dnes, v době družic, internetu a moderních technologií, je pro ně její zkoumání mnohem snazší.

V minulosti jste se v rámci své činnosti mimo jiné věnovala i problematice týkající se vodního hospodářství, konkrétně projektům „TRANSCAT“ nebo „Výzkum a vývoj modulového systému pro tvorbu aplikací využitelných v oblasti integrovaného vodního hospodářství“. Mohla byste nám o nich prozradit více?

Cílem projektu „TRANSCAT“ bylo vytvoření operativního a integrovaného komplexního *Systému podpory rozhodování (Decision Support System)* v zájmu optimálního řízení vodního hospodářství v povodí příhraničních regionů v kontextu uplatňování Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2000/60/ES (*Water Framework Directive*). Zároveň bylo cílem předcházení rozsáhlé kontaminaci kolektorů, zlepšení kvality podzemních vod a omezení rizika záplav.

Čím konkrétně se zabýváte v současné době?

Nyní se odborně vzdělávám v oblasti strojového učení a jeho využívání, především při zpracování družicových snímků. V letošním roce jsem absolvovala semináře *Machine learning* a studium na University Lausanne u profesora Kanevského. Sama bych se ráda věnovala problematice aplikací ve vodním hospodářství, například stanovení vodní a hydrologické bilance krajiny či monitoringu povodní jak z optických, tak radarových dat. Na katedře máme k dispozici kvalitní vybavení, nově rovněž bezpilotní letecké prostředky s hyperspektrální kamerou, takže jsme schopni poměrně rychle získat velmi podrobná a kvalitní data.

Vidíte za současných podmínek, tedy při dostupnosti satelitních i referenčních dat, možnostech automatizace a integrace pokročilých modelovacích technik do GIS nástrojů i rozvoji algoritmů strojového učení, reálný potenciál ve využívání satelitních dat v oblasti vodního hospodářství?

Dostupnost a především neustále se zvyšující počet družic nám poskytuje v podstatě nepřetržitý pohled na planetu Zemi. Strojové učení, umělá inteligence a další související technologie se ve vědě uplatňují stále častěji a jejich význam ještě rozhodně poroste – a to i v mnoha konzervativních oborech. Máme k dispozici unikátní datovou sadu o obrovských objemech, kterou je nutné zpracovat. Můžeme tak dlouhodobě sledovat jevy na zemském povrchu, studovat kvalitu vod, hledat nové vodní zdroje, studovat mořské proudy, odtokové poměry v krajině, lépe plánovat ochranu krajiny při povodních, a využít tak tyto technologie pro náš prospěch a ke zlepšení neustále se zhoršující situace v oblasti životního prostředí.

To zní jako zajímavá pobídka k potenciální spolupráci, která může přinést pozoruhodné příležitosti i výsledky a rozhodně stojí za zvážení. Moc děkuji za to, že jste tomuto rozhovoru věnovala čas, přeji hodně úspěchů ve vaší výzkumné i pedagogické činnosti a těším se na případný další, týkající se například řešení společných projektů.

Ing. Bc. Václava Maťašovská

Ing. Lucie Orlíková, Ph.D.



Ing. Lucie Orlíková, Ph.D., je zaměstnankyní katedry geoinformatiky na Hornicko-geologické fakultě od roku 2007. V roce 2012 ukončila doktorské studium oboru Geoinformatika na Hornicko-geologické fakultě Vysoké školy báňské – Technické univerzitě v Ostravě. V letech 2017–2021 byla hlavní řešitelkou a spoluřešitelkou projektů TA ČR a GA ČR i zahraničních projektů, např. „Výzkum a vývoj modulového systému pro tvorbu aplikací využitelných v oblasti integrovaného vodního hospodářství“ nebo „Využití geoinformačních technologií pro zpřesňování srážkoodtokových vztahů“. Zaměřuje se na aplikace metod strojového učení v oblasti dálkového průzkumu Země ve vodním hospodářství a lesnictví.

Mezinárodní komise IAHS pro dálkový průzkum Země

Mezinárodní komise pro dálkový průzkum Země (International Commission on Remote Sensing, ICRS) coby jedna ze současných deseti vědeckých komisí figurujících pod hlavičkou Mezinárodní asociace hydrologických věd (International Association of Hydrological Sciences, IAHS; [1]) logicky vznikla jako odpověď na dostupnost prostorových dat souvisejících s vypuštěním prvních družic v 70. letech 20. století, jež měly za úkol pozorovat krajinou sféru Země z vesmíru, a poskytovat tak zcela nový pohled, v němž hrál hlavní roli prostorový rozsah sledovaného území. V podstatě již od těchto počátků hydrologové spatřovali v takových datech velký potenciál, neboť jim umožňovala zpřesňovat jejich představu o hydrologickém cyklu včetně jeho komponent, z nichž některé se dosud na povrchu Země jinak měří z nejrůznějších důvodů velmi obtížně. Navíc to umocňuje fakt, že pozemní pozorování pravděpodobně nikdy neposkytne pro jeden časový okamžik tak komplexní vzhled do probíhajícího procesu z hlediska zachyceného velkého území. Velmi často jsou začátky využívání produktů dálkového průzkumu Země (DPZ) v hydrologii a vodním hospodářství spojovány se získáváním informací o kryosféře, což by jinak ani nebylo možné, pokud bychom byli závislí pouze na pozorování pozemním, které – je-li v těchto krajinách vůbec někde v provozu – je zákonitě zatíženo celou řadou chyb a nejistot, a někdy dokonce pravidelnými výpadky v sezonách takovému pozorování nepřejících. Není tedy divu, že o potřebě vzniku předchůdce ICRS se vážně hovoří již od přelomu 70. a 80. let 20. století, kdy hlavně hydrologové zkoumající zasněžené a zaledněné oblasti volají po potřebě využití dat DPZ. Jako příklad uvedme tehdejší perspektivu sesterské Mezinárodní komise pro hydrologii sněhu a ledu (International Commission on Snow and Ice Hydrology, ICSIH), jež se týkala velkoměřítkových studií o sněhu a stavěla právě na potenciálu produktů DPZ (viz článek [2], jehož autor byl i prezidentem ICRS). Stejně tak se o využívání produktů DPZ v rámci ICSIH zmiňuje retrospektivní článek [3], obecněji v rámci potřeb celé IAHS pak [4].

Příspěvek, který vznikl u příležitosti oslav 90. výročí IAHS, přesněji datuje počátky ICRS do roku 1979, kdy se v australské Canbeře konalo 17. valné shromáždění Mezinárodní unie geodetické a geofyzikální (International Union of Geodesy and Geophysics, IUGG), jejíž součástí je právě IAHS. Tehdy byl ustanoven výbor, který poprvé zasedal v roce 1981 v Denveru ve státě Colorado [5]. V dubnu roku 1983 proběhlo Sympozium o aplikacích dálkového průzkumu Země a datových přenosů v hydrologii. Vše se odehrálo v německém Hamburku v rámci tehdy již 18. valného shromáždění IUGG. Jedním z výstupů tohoto sympozia byla kniha [6], v jejímž úvodníku se již hovoří o skutečnosti, že symposium bylo organizováno Mezinárodní komisí pro dálkový průzkum Země a datové přenosy (International Commission on Remote Sensing and Data Transmission, ICRS), tedy právě předchůdcem dnešní ICRS. Samotní představitelé ICRS však uznávají jako první samostatné setkání komise až Mezinárodní workshop aplikací vesmírných technologií v hydrologii, který se uskutečnil v Cocoa Beach ve státě Florida v srpnu 1985 [7] a jehož výstupem byla publikace [8]. Z názvu ICRSDT lze odvodit, jak důležitý byl tehdy pro hydrology datový transfer nezbytný v oblasti operativní hydrologie. Dokonce již první setkání ICRSDT proběhla za přítomnosti představitelů Světové meteorologické organizace (World Meteorological Organization, WMO) a jiných organizací spadajících do systému OSN (např. UNESCO). Tento fakt svědčí o předpokladu hydrologů, že právě produkty DPZ (nejen radary, ale i družice) pomohou zlepšit hydrologické předpovědi díky precizované představě o prostorové diferenciaci krajiny tvořící povodí. To mělo za následek další vývoj softwarového vybavení mikropočítačů pro zpracování takových dat (např. geografických informačních systémů, GIS) a rovněž tak vývoj i adaptaci hydrologických modelů, jak dobře odhadl Askew z WMO [9] (viz též příspěvek [10], jehož autoři rozvíjejí své myšlenky v knize [11]).

Než se uskutečnilo druhé samostatné setkání ICRS, uběhlo dlouhých 15 let. Jak úvodník publikace [7] popisuje, neznamenal to ale, že by členové a přívrženci ICRS nebyli v tomto období činní. Naopak bylo zorganizováno několik společných symposií (tj. s dalšími komisemi IAHS) v rámci shromáždění IUGG a také vědeckých shromáždění IAHS, která se za normálních okolností konají zpravidla dva roky po shromážděních IUGG. Rozhodně nemá smysl zde vyjmenovávat všechna tato setkání. Mnohem rozumnější je zájemce o hlubší studium odkázat rovnou na webové stránky, odkud lze stahovat jednotlivé příspěvky zveřejněné v tzv. „červených knihách“ IAHS, mimochodem velice bohatých na detailní informace [12]. Jako příklad tu uvedme alespoň knihu vycházející z Mezinárodního sympozia o integrovaných metodách v hydrologii povodí, jež se uskutečnilo v britském Birminghamu v červnu 1999, kde se právě odehrávalo 22. valné shromáždění IUGG. Tato společná sympozia jen zdůrazňují význam přesahů aplikací DPZ do nejrůznějších oblastí hydrologie, ale i vodního hospodářství. Příspěvek [5] rovněž uvádí, že v roce 1998 došlo k transformaci ICRS, která, soudě alespoň dle změny názvu, v té době patrně ztrácí zájem o datové přenosy, jelikož ty se stávají předmětem zájmu jiných expertních skupin.

Třetí setkání ICRS, a to i tentokrát se statutem sympozia se zaměřením na DPZ v hydrologii, se odehrálo v Jackson Hole ve státě Wyoming na konci září 2010 [13]. Mezitím však byla vytipována řada problémů, jež si vynutily samostatné mezinárodní konference či opět sympozia zařazená do programu shromáždění IUGG, nebo vědeckých shromáždění IAHS. Do popředí zájmu se tak posunuly aplikace GIS v hydrologii pro účely předpovědi povodní, simulace odtoku, (integrovaného) vodního hospodářství a modelování životního prostředí [14, 15]. Ruku v ruce s posledním jmenovaným postoupilo na přední příčky také detekování změn prostřednictvím dat DPZ, a to jak v hydrologickém pojetí, tak obecně s ohledem na veškeré složky životního prostředí a na potřeby lidské společnosti [14–16]. Na těchto setkáních ne zcela poprvé předvedli své dovednosti také hydrogeologové, kteří se sdružují pod hlavičkou Mezinárodní asociace hydrogeologů (International Association of Hydrogeologists, IAH), jež je samostatným tělesem vedle IAHS, přestože netvoří IUGG. Hydrogeologové mimochodem rovněž zdůraznili význam hydroinformatiky pro celou hydrologii, tedy i pro zpracování dat DPZ. Hydroinformatika se do hydrologie dostávala postupně prostřednictvím hydrauliky, což vyústilo ve vznik Spojeného výboru pro hydroinformatiku v Cardiffu v červenci 2002 [17]. Samotné symposium ICRS v Jackson Hole pak naznačilo pokračování odhadů následujících hydrologických parametrů pomocí DPZ: vlhkost půdy, evapotranspirace, povrchová teplota, rozprostření a charakteristiky vegetace (též kulturních plodin a invazních druhů) a vlastnosti sněhové pokrývky. Pro tyto účely bylo zdůrazněno kombinované využití přístrojů připevněných na satelitech a letadlech. Dále bylo zjištěno, že zmíněné hydrologické parametry lze dobře získat, pokud se k tomu navíc využijí lidarové snímky pořízené z letadel a ze země. V neposlední řadě byl zmíněn pokrok v pochopení a v modelování hydrologického cyklu s příchodem měření toků povrchové energetické bilance scintilometry a eddy kovariančními systémy [13].

Současná ICRS (aktuálně úřadující představitelé uvádí [18]) má dvě sekce – jednu pro DPZ a druhou pro GIS [5]. Odborníci obou sekcí poprvé spojili svá sympozia a konference, které byly původně zaměřené buď více na DPZ, nebo na GIS, do jedné události v roce 2014 v Guangzhou v Číně. Účelem této sloučené akce, nebo jinak řečeno dvou akcí konaných na jednom místě, bylo přezkoumat a informovat o pokroku v technologiích GIS a DPZ i jejich využití v hydrologii, vodním hospodářství a životním prostředí a dále sdílet zkušenosti vědců,

inženýrů, nevládních organizací a tvůrců politik na celém světě v oblastech meteorologie, hydrologie, vodního hospodářství, životního prostředí, předpovědi povodní a jejich řízení, GIS a DPZ [19].

Zatím poslední samostatné sympozium s názvem „DPZ a hydrologie“ (Remote Sensing and Hydrology Symposium, RSHS) bylo zorganizováno ve španělské Cordobě v květnu 2018. Zde byl zdůrazněn potenciál zisku již poměrně dlouhých časových řad pomocí DPZ. K dosažení tohoto cíle je ovšem třeba počítat se slučováním dat pocházejících z různých přístrojů s různou přesností, a to i z těch umístěných na zemském povrchu. Sympozium bylo rozděleno do několika tematických oblastí:

1. současné a budoucí mise pro pozorování vodního cyklu,
2. pozorování složek vodního cyklu,
3. nálezy a datové produkty pozorování Země spjaté s vodním cyklem,
4. aplikace dat DPZ ve vodním hospodářství,
5. řízení závlah kulturních plodin prostřednictvím DPZ,
6. vyhodnocení kvality vody a půdního pokryvu z dat DPZ.

V průběhu celého sympozia byl kladen důraz na integrované vodní hospodářství a management povodí s uvážením možných změn prostředí [20]. Do budoucna je potřeba počítat s tím, že se bude zvětšovat především prostorové rozlišení produktů DPZ, čehož lze s výhodou využít i v hydrologii. Má-li však být konečná informace získaná z dat relevantní, je nutné na tato data adaptovat zažitě přístupů a metody a zároveň si být vědom faktů, že delší časové řady sestavené z produktů DPZ mohou být v jednotlivých úsecích zatíženy různou nejistotou.

Již nyní se můžeme těšit na představení dalších aktivit a výstupů odborníků hlásících se k ICERS. Jsou např. připravována další sympozia pro 11. vědecké shromáždění IAHS, jež má proběhnout na přelomu května a června 2022 ve francouzském Montpellieru a zároveň se během něj oslaví již 100 let existence IAHS (srov. např. s [4]). Dosavadní program prokazuje, že zájem světových hydrologů o technologie a metody DPZ neutuchá [21]. Autor tohoto informativního článku tedy pevně doufá, že čeští hydrologové či vodohospodáři pozadu nezůstanou, a bude rovněž velmi rád, pokud tento příspěvek zaujme i ty, kteří doposud o činnostech ICERS nevěděli.

Literatura

- [1] IAHS. *International Association of Hydrological Sciences* [on-line]. 20. říjen 2021 [vid. 28. listopad 2021]. Dostupné z: <https://iahs.info/>
- [2] RANGO, A. An International Perspective on Large-Scale Snow Studies. *Hydrological Sciences Journal* [on-line]. 1985, 30(2), s. 225–238. ISSN 0262-6667, 2150-3435. Dostupné z: doi:10.1080/02626668509490986
- [3] RADOK, U. The International Commission on Snow and Ice (ICSI) and its Precursors, 1894–1994. *Hydrological Sciences Journal* [on-line]. 1997, 42(2), s. 131–140. ISSN 0262-6667, 2150-3435. Dostupné z: doi:10.1080/02626669709492015
- [4] ROSBJERG, D., RODDA, J. IAHS. A Brief History of Hydrology. *History of Geo- and Space Sciences* [on-line]. 2019, 10(1), s. 109–118. ISSN 2190-5029. Dostupné z: doi:10.5194/hgss-10-109-2019
- [5] NEALE, Ch. Remote Sensing and Hydrology. In: *Celebrating 90 Years of International Scientific Cooperation and Activity* [on-line]. Delft: International Association of Hydrological Sciences, 2012, s. 6–7. Dostupné z: <https://iahs.info/uploads/IAHS%2090th%20Anniversary%20screen-res.pdf>
- [6] GOODISON, B. E. (ed.). *Hydrological Applications of Remote Sensing and Remote Data Transmission*. Wallingford, Oxfordshire, UK: IAHS Press, 1985. IAHS Red Book 145. ISBN 978-0-947571-10-8.
- [7] OWE, M., BRUBAKER, K., RITCHIE, J., RANGO, A. (eds.). *Remote Sensing and Hydrology 2000. A Selection of Papers Presented at the Conference on Remote Sensing and Hydrology 2000 Held at Santa Fe, New Mexico, USA, April 2000*. Wallingford, Oxfordshire, UK: IAHS Press, 2001. IAHS Red Book 267. ISBN 978-1-901502-46-6.

[8] JOHNSON, A. I. (ed.). *Hydrologic Applications of Space Technology: Proceedings of an International Workshop on Hydrologic Applications of Space Technology Held in Cocoa Beach, Florida, USA, 19–23 August 1985*. Wallingford, Oxfordshire, UK: IAHS Press, 1986. IAHS Red Book 160. ISBN 978-0-947571-85-6.

[9] ASKEW, A. J. Closing Discussion. In: JOHNSON, A. I. (ed.). *Hydrologic Applications of Space Technology: Proceedings of an International Workshop on Hydrologic Applications of Space Technology Held in Cocoa Beach, Florida, USA, 19–23 August 1985*. Wallingford, Oxfordshire, UK: IAHS Press, 1986. IAHS Red Book 160, s. 485–488. ISBN 978-0-947571-85-6.

[10] SCHULTZ, G. A., ENGMAN, E. T. Present Use and Future Perspectives of Remote Sensing in Hydrology and Water Management. In: OWE, M., BRUBAKER, K., RITCHIE, J., RANGO, A. (eds.). *Remote Sensing and Hydrology 2000. A Selection of Papers Presented at the Conference on Remote Sensing and Hydrology 2000, Held at Santa Fe, New Mexico, USA, April 2000*. Wallingford, Oxfordshire, UK: IAHS Press, 2001. IAHS Red Book 267, s. 545–551. ISBN 978-1-901502-46-6.

[11] SCHULTZ, G. A., ENGMAN, E. T. (eds.). *Remote Sensing in Hydrology and Water Management*. Berlin: Springer, 2000. ISBN 978-3-642-64036-0.

[12] IAHS. International Association of Hydrological Sciences. Publications [on-line]. 20. říjen 2021 [vid. 30. listopad 2021]. Dostupné z: <https://iahs.info/Publications-News/>

[13] NEALE, Ch. M. U., COSH, M. H. (eds.). *Remote Sensing and Hydrology: Proceedings of a Symposium Organized by the International Commission on Remote Sensing of IAHS, Held at Jackson Hole, Wyoming, USA, 27–30 September 2010*. Wallingford, Oxfordshire, UK: IAHS Press, 2012. IAHS Red Book 352. ISBN 978-1-907161-27-8.

[14] CHEN, Y., TAKARA, K., CLUCKIE, I. D., DE SMEDT, F. H. (eds.). *GIS and Remote Sensing in Hydrology, Water Resources and Environment*. Wallingford, Oxfordshire, UK: IAHS Press, 2004. IAHS Red Book 289. ISBN 978-1-901502-72-5.

[15] BLÖSCHL, G., VAN DE GIESEN, N., MURALIDHARAN, D., REN, L., SEYLER, F., SHARMA, U., VRBA, J. (eds.). *Improving Integrated Surface and Groundwater Resources Management in a Vulnerable and Changing World. Proceedings of Symposium JS.3 at the Joint Convention of the International Association of Hydrological Sciences (IAHS) and the International Association of Hydrogeologists (IAH) Held in Hyderabad, India, 6–12 September 2009*. Wallingford, Oxfordshire, UK: IAHS Press, 2009. IAHS Red Book 330. ISBN 978-1-907161-01-8.

[16] OWE, M., NEALE, Ch. (eds.). *Remote Sensing for Environmental Monitoring and Change Detection. A Compilation of Papers Presented at the IAHS Symposium on Remote Sensing for Environmental Monitoring and Change Detection, in Perugia, as Part of the 24th IUGG General Assembly, 2007*. Wallingford, Oxfordshire, UK: IAHS Press, 2007. IAHS Red Book 316. ISBN 978-1-901502-24-4.

[17] CLUCKIE, I. D., CHEN, Y., BABOVIC, B., KONIKOW, L., MYNETT, A., DEMUTH, S., SAVIC, D. A. (eds.). *Hydroinformatics in Hydrology, Hydrogeology and Water Resources. Proceedings of Symposium JS.4 at the Joint Convention of the International Association of Hydrological Sciences (IAHS) and the International Association of Hydrogeologists (IAH) Held in Hyderabad, India, 6–12 September 2009*. Wallingford, Oxfordshire, UK: IAHS Press, 2009. IAHS Red Book 331. ISBN 978-1-907161-02-5.

[18] IAHS. International Association of Hydrological Sciences. ICERS | Remote Sensing International Commission [on-line]. 20. říjen 2021 [vid. 30. listopad 2021]. Dostupné z: <https://iahs.info/Commissions-W-Groups/ICERS-Remote-Sensing.do>

[19] CHEN, Y., NEALE, Ch., CLUCKIE, I., SU, Z., ZHOU, J., HUANG, Q., XU, Z. (eds.). *Remote Sensing and GIS for Hydrology and Water Resources* [on-line]. Wallingford, Oxfordshire, UK: IAHS Press, 2015. IAHS Red Book 368. ISBN 978-1-907161-46-9. Dostupné z: <https://piahs.copernicus.org/articles/368/index.html>

[20] GONZÁLEZ-DUGO, M. P., NEALE, C., ANDREU, A., PIMENTEL, R., POLO, M. J. (eds.). *Earth Observation for Integrated Water and Basin Management: New Possibilities and Challenges for Adaptation to a Changing Environment* [on-line]. Wallingford, Oxfordshire, UK: IAHS Press, 2018. IAHS Red Book 380. ISBN 978-1-5108-8294-2. Dostupné z: <https://piahs.copernicus.org/articles/380/index.html>

[21] IM2E. IAHS 2022 Montpellier [on-line]. 2020 [vid. 30. listopad 2021]. Dostupné z: <http://www.iahs2022.org/index.asp>

Autor

Mgr. Ondřej Ledvinka, Ph.D.

✉ ondrej.ledvinka@chmi.cz

ORCID: 0000-0002-0203-7064

Český hydrometeorologický ústav, Praha



GIS a kartografie ve VÚV TGM

Klíčová slova: GIS – geografické informační systémy – kartografie – DIBAVOD – informační systém – prostorová data – analýzy – webová mapová aplikace – VÚV TGM

OD HISTORIE PO SOUČASNOST

Geografické informační systémy (GIS), zpracování, vyhodnocení a interpretace dat, jsou v současné době nezbytnou a nedílnou součástí výzkumu. Většinu informací lze totiž vztáhnout k určitému místu na zemském povrchu. Oddělení GIS a kartografie ve Výzkumném ústavu vodohospodářském T. G. Masaryka (dále VÚV TGM) se zabývá řešením výzkumných i komerčních projektů prostřednictvím aplikace GIS prostředků. Nejde však o pouhé použití specializovaného softwaru, nezbytná jsou i validní data a kvalifikovaní lidé, kteří dokážou své znalosti správně aplikovat. Oddělení GIS a kartografie působí ve VÚV TGM již dlouhá léta. V 90. letech minulého století existoval útvar kartografie a dálkového průzkumu Země, který byl součástí úseku hospodaření s vodou. Útvar zajišťoval nejen mapové podklady a data pro výkon státní správy (tyto činnosti jsou po transformaci na vědeckou výzkumnou instituci řešeny v rámci projektu „Podpora výkonu státní správy v oblasti voda“ – PVSS), ale i aktualizaci a tisk Základní vodohospodářské mapy 1 : 50 000 (ZVM 50). V rámci své výzkumné aktivity se později oddělení podílelo na projektech „Vyhodnocení povodňové situace v červenci 1997“ v rámci dílčího úkolu „Geodetická dokumentace pro vyhodnocení povodně a vytvoření digitálního modelu říčního systému v postižených oblastech“ a „Integrace informací o skládkách, zařízeních a starých zátěžích, hodnocení jejich rizikovitosti a vlivu na životní prostředí“ [1]. Potřeba kvalitních a dostupných dat vyústila ve vznik Digitální báze vodohospodářských dat (DIBAVOD) jako zdroje geodat pro oblast vodního hospodářství a ochranu vod [2]. Pracovníci oddělení se následně podíleli na řešení výzkumného záměru, konkrétně na jeho dílčí části „Vývoj a aplikace postupů s využitím technologií geografických informačních systémů ve vazbě na digitální bázi vodohospodářských dat“. V současné době je činnost oddělení GIS a kartografie velice různorodá. Řeší národní i mezinárodní výzkumné projekty, spravuje a aktualizuje data pro státní správu, vyvíjí webové mapové aplikace, analytické nástroje a postupy, připravuje kartografické výstupy a spolupracuje se všemi ostatními odbory v rámci VÚV TGM, pro které také spravuje datový sklad a GIS prostředky. V neposlední řadě poskytuje odbornou podporu v oblasti geografických informačních systémů a kartografie. A i přes tuto rozsáhlou paletu činností se snaží držet dramaticky se rozvíjejících trendů v oblasti GIS, jež následně aplikuje do praxe.

OCHUTNÁVKA NAŠÍ ČINNOSTI

Základní vodohospodářská mapa ČR

Toto jedinečné kartografické dílo Základní vodohospodářská mapa ČR v měřítku 1 : 50 000 (ZVM 50) je nejpodrobnější celostátní vodohospodářskou mapou. Byla zpracovávána jako součást Směrného vodohospodářského plánu a vydávána Českým úřadem zeměměřičkým a katastrálním jako tematické státní mapové

dílo pro Ministerstvo životního prostředí ČR. Gestorem tematického obsahu a jeho aktualizace je VÚV TGM. Území ČR pokrývá 211 mapových listů v kladu listů základních map středních měřítek.

První systematické tematické mapování v oboru vodního hospodářství v rozsahu území našeho státu bylo provedeno v rámci Státního vodohospodářského plánu ČSR (1. vydání SVP) v letech 1949–1954. Počátky vývoje ZVM 50 spadají do roku 1961, kdy byla Ministerstvem zemědělství, lesního a vodního hospodářství (čj. 35.847/70) pověřena Ředitelství vodohospodářského rozvoje v Praze a Bratislavě ve spolupráci s ostatními vodohospodářskými organizacemi sestavením Základní vodohospodářské mapy ČSSR (vydání k roku 1964). V letech 1971–1976 byl autorsky, kartograficky i reprodukčně znovu vypracován soubor Základní vodohospodářské mapy ČSSR na podkladě Základní mapy ČSSR 1 : 50 000. Tento soubor je v historii tvorby a aktualizace ZVM 50 označován za první vydání. Druhé aktualizované vydání ZVM ČSSR bylo vydáno v letech 1980–1988. Poslední, třetí aktualizované vydání Základní vodohospodářské mapy ČR vyšlo v letech 1989–1999. Další vývoj ZVM 50 se od roku 1999 ubíral směrem k transformaci analogové mapy do digitální podoby ve formě referenční geografické databáze DIBAVOD. Proces digitalizace ZVM 50 probíhal ve VÚV TGM vektorizací objektů z naskenovaných listů ZVM 50. Stejným způsobem je Zeměměřičkým úřadem od roku 1995 digitalizována ZM 10 do vrstev Základní báze geografických dat (ZABAGED*) [3]. Ze ZABAGED* byl získán aktuální průběh vodotečí a rozvodnic po jednotlivých listech. Vodní toky a rozvodnice byly postupně topologicky zpracovány do podoby strukturálního modelu povodí a vodních toků ČR. Poté byly vrstvy vodních toků a rozvodnic začleněny do DIBAVOD, která byla následně zdrojem tematického obsahu aktualizovaného vydání ZVM 50 [4].

V roce 2008 bylo vydáno osm testovacích listů. Byl přepracován katalog mapových značek a značkový klíč se stal součástí mapového listu (obr. 1). Vzhledem k nedostatku finančních prostředků a různorodému gestorství tematických vrstev byla pouze nastavena a vyzkoušena technologická linka tisku ve spolupráci se Zeměměřičkým úřadem v Sedlčanech.

Původní tištěná Základní vodohospodářská mapa 1 : 50 000 je v současné době distribuována pouze v digitální rastrové podobě vzniklé skenováním původních tištěných map (formát TIFF s komprimací LZW, rozlišení 400 DPI). Více informací je k dispozici na <https://www.dibavod.cz/63/puvodni-tistena-zakladni-vodohospodarska-mapa-1:50-000.html>.

Digitální báze vodohospodářských dat

Z potřeby jednotné základny prostorových dat pro vodní hospodářství a ochranu vod vznikla významná databáze, známá pod zkratkou DIBAVOD, a to jako tematická nadstavba ZABAGED*. Je mimo jiné určena pro tvorbu tematických kartografických výstupů zaměřených na vodní hospodářství a ochranu vod nad Základní mapou ČR 1 : 10 000, resp. 1 : 50 000. První zmínka o DIBAVOD



Obr. 1. Testovací list ZVM 50

se objevila v rámci řešení projektu VaV 650/8/01 „Metodika tvorby kartografických výstupů z digitálních podkladů“. V rámci něho byl nadefinován Katalog objektů DIBAVOD, který je tvořen seznamem typů objektů kategorie vodstvo a souborem katalogových listů, z nichž každý je věnován jednomu typu objektu. Kromě jiného byl vytvořen návrh dokumentu „Instrukce pro tvorbu, obnovu a vydávání Vodohospodářské mapy ČR 1 : 50 000“ s katalogem mapových značek ZVM 50 a vzorovým listem ZVM 50 (15-32). Obdobný materiál vznikl i pro Mapu záplavových území „Instrukce pro tvorbu, obnovu a vydávání Mapy záplavových území ČR 1 : 10 000“ s katalogem mapových značek MZÚ 10 a vzorovým listem MZÚ 10 (15-32-20). Technologické řešení bylo poplatné své době a jednalo se o prostředí Intergraph MGE. Snahou bylo udržet všechny nadefinované objekty (datové sady) aktuální a ideálně volně dostupné široké veřejnosti. Tento cíl nemohl být realizován, protože odpovědnost za data nese současně několik resortů a také některé subjekty soukromé sféry. V současné době není zajištěno stabilní financování aktualizace databáze v celém rozsahu. Z těchto důvodů jsou některé objekty nedostupné a některé již delší dobu neaktualizované. I tak lze věřit, že se situace změní a všechna data budou aktuální, garantovaná a dostupná všem a že se podaří obnovit tvorbu kartografické vizualizace ZVM 50.

Data nejen pro státní správu

Jak již bylo zmíněno, kvalitní a garantovaná data jsou základním stavebním kamenem každé úspěšné a zodpovědné výzkumné činnosti. Totéž platí i pro výkon státní správy a další navazující agendy. Oddělení GIS a kartografie i celý VÚV TGM jsou hrdým partnerem podílejícím se na správě, aktualizaci i publikaci vybraných prostorových dat využívaných státní a veřejnou správou. Malá ochutnávka dat a činností je uvedena v následujících odstavcích.

Datová sada vodních toků je jedna ze stěžejních v oblasti ochrany vod a vodního hospodářství. Je proto nezbytně nutné, aby tato data byla v pořádku a v nejlepší shodě se skutečností. Protože jsou agendy vázané na vodní toky rozděleny mezi více subjektů z různých resortů, vzniklo v průběhu let několik vzájemně odlišných datových sad vodních toků. Pro nápravu tohoto nesouladu byla vytvořena pracovní skupina napříč resorty, která od roku 2019 řeší tzv. „harmonizaci říční sítě v ČR“. V součinnosti resortů Ministerstva životního prostředí (VÚV TGM, ČHMÚ), Ministerstva zemědělství (podniky Povodí, Lesy ČR, Státní pozemkový úřad) a Zeměměřického úřadu probíhá kontrola pramenů, ústí a případně i průběhu páteřních toků ve všech více než devíti tisících povodí 4. řádu.

Výsledkem by měla být jediná garantovaná síť vodních toků, jež bude mít dohodnutou strukturu, bude obsahovat všechny relevantní informace a případně bude přes vazební identifikátory propojitelná s tematickými databázemi zainteresovaných subjektů. Tato datová sada by měla být spravována Zeměměřickým úřadem v rámci ZABAGED* jako jednotný zdroj informací.

Další důležitou činností je aktualizace databáze ochranných pásem vodních zdrojů v ČR (OPVZ), které se oddělení GIS a kartografie věnuje s několika přestávkami již zhruba 20 let. V letech 2015–2017 byla v rámci projektu „Podpora výkonu státní správy“ v gesci MŽP zpracována komplexní revize databáze. Ta nyní obsahuje více než 17 tisíc polygonů ochranných pásem. Téměř 15 tisíc z nich má ověřenou platnost u příslušného vodoprávního úřadu obce s rozšířenou působností a je k němu připojen dokument o stanovení OPVZ v digitální podobě. Zbýlé dva tisíce tvoří pásma již neplatná anebo pásma, jejichž platnost se nepodařilo ověřit u příslušného VPÚ. V současné době probíhají aktualizací práce v ročním intervalu [5]. Za účelem snadné vizualizace databáze OPVZ byla pro uživatele vytvořena uživatelsky přívětivá webová mapová aplikace, dostupná na adrese <https://www.dibavod.cz/ochranna-pasma> (obr. 2). Na přelomu roku je vždy databáze zaktualizována a pomocí webových služeb dostupná k prohlížení i ke stažení na portálech DIBAVOD a HEIS [6] a na Národním geoportálu INSPIRE [7].



Obr. 2. Webová mapová aplikace zobrazující aktuální stav OPVZ

INSPIRE je evropská směrnice, která zjednodušeně říká, jaká má být podoba prostorových dat, jak mají být popsána a jak má vypadat jejich sdílení tak, aby byla použitelná pro všechny uživatele [8]. I když se evropské směrnice nemusejí vždy těšit velké oblibě, je minimálně zajímavou výzvou vytvořit jednotné datové modely napříč evropskými zeměmi tak, aby si spolu všichni uživatelé „rozuměli“ a mohli si vzájemně sdílet, srovnávat a harmonizovat data. Proto je tato směrnice dobrým prvopočátkem tohoto snažení. VÚV TGM je pověřeným subjektem pro několik datových sad podléhajících této směrnici. K těmto datům jsou tak poskytována metadata a uživatelé si je mohou prohlédnout či stáhnout pomocí webových mapových služeb.

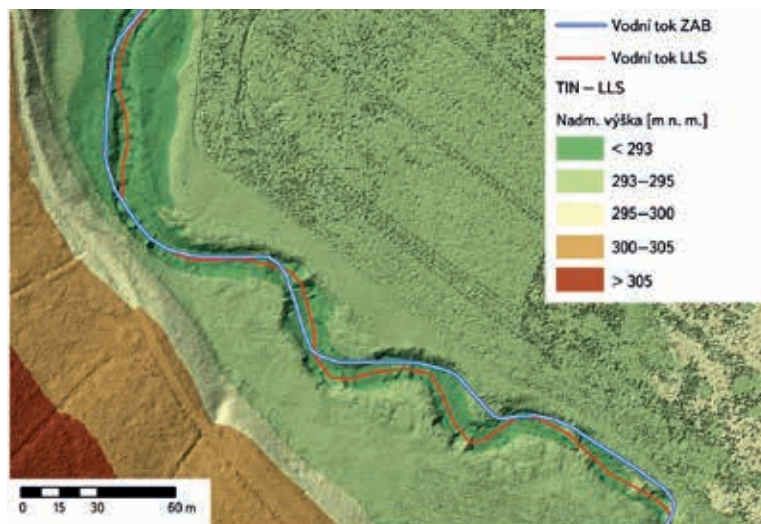
VÚV TGM je také klíčovým hráčem v mezinárodní spolupráci v oblasti ochrany vod a klade velký důraz na korektní a harmonizovaná data sbíraná, aktualizovaná a sdílená s tuzemskými i zahraničními uživateli. Ústav je rovněž významným partnerem pro zahraniční subjekty nejen v činnostech souvisejících s prostorovými daty. Jedním z hlavních partnerů, jak již bylo zmíněno, je samotná Evropská komise a její organizace, kterým se reportují prostorová data a informace podle příslušných evropských směrnic [9–12]. Dalšími významnými partnery jsou Mezinárodní komise pro ochranu Labe, Dunaje a Odry [13–15]. S těmito komisemi a jejich partnery spolupracuje na tvorbě strategických klíčových dokumentů a sdílí s nimi vzájemně důležitá data s vazbou na vodní hospodářství a ochranu vod.

Využití metod dálkového průzkumu Země pro monitoring koupacích míst v České republice

V období let 2019 až 2021 byl realizován projekt TJ02000091 „Využití metod dálkového průzkumu Země pro monitoring koupacích míst v České republice“, který byl financován ze zdrojů Technologické agentury České republiky, konkrétně z programu Zéta II. pro podporu začínajících výzkumníků v inovačních aktivitách. Primárním cílem projektu bylo nalezení relevantního vztahu mezi výsledky hodnot vybraných ukazatelů stavu a jakosti koupacích vod, které vzešly z terénních šetření a následných laboratorních prací, a hodnotami ze zpracovaných satelitních dat programu Copernicus (Sentinel-2). Za využití GIS nástrojů a moderních statistických technik bylo zkonstruováno šest prediktivních modelů, které byly aplikovány na 40 vybraných lokalit s koupacími vodami (obr. 3). Mezi nejzákladnější výstupy řešeného projektu se řadí webová mapová aplikace „Ukazatele stavu a kvality koupacích vod České republiky“ a tištěná publikace „Atlas koupacích vod České republiky“. Informace o dosažených výsledcích a dalších parametrech projektu jsou uvedeny na stránkách <https://www.dibavod.cz/201/vyuziti-metod-dalkoveho-pruzkumu-zeme-pro-monitoring-stavu-a-kvality-koupacich-mist-v-ceske-republice.html>. Výsledky a poznatky dosažené v průběhu řešení projektu potvrdily počáteční hypotézu o tom, že satelitní data mohou představovat významnou podporu a zefektivnění stávajícího monitoringu [16].

Výzkum s využitím výškopisných dat

V minulosti bylo oddělením GIS a kartografie řešeno několik významných projektů využívajících tehdy nový produkt Digitální model reliéfu České republiky 5. generace (DMR 5G) [17]. Šlo o velmi podrobná data pořízená Zeměměřickým úřadem ve spolupráci s dalšími organizacemi metodou leteckého laserového skenování. V rámci Výzkumného záměru VZ 0002071101 byl v době jeho řešení nový detailní model reliéfu využit k identifikaci příčných překážek v korytech malých vodních toků a pro revizi datových sad rozvodnic a vodních toků. Bezpečnostní výzkum VG20102014010 Ministerstva vnitra umožnil v letech 2010–2014 testování moderního DMR 5G v oblasti přesnosti vymezení záplavových území (obr. 4).



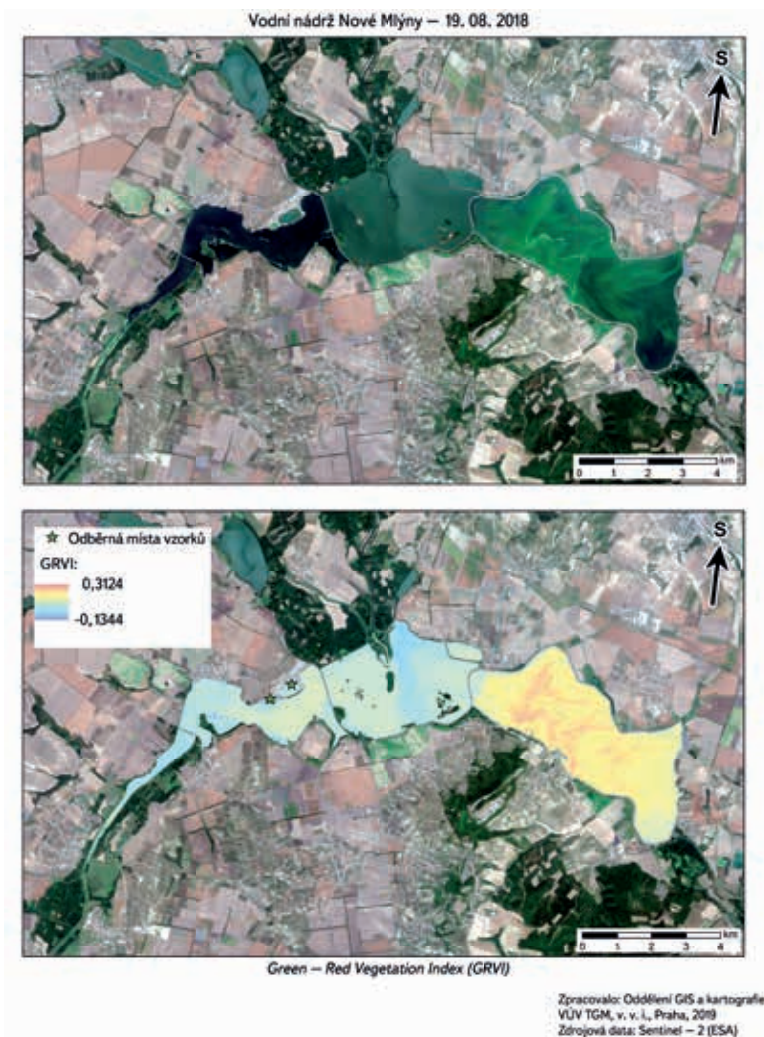
Obr. 4. Testování využití DMR 5G ve vazbě na vodní hospodářství a ochranu vod

Typová opatření pro omezení sucha – webová mapová aplikace

Webová mapová aplikace „Typová opatření pro omezení sucha“ byla vytvořena s cílem zpřístupnit široké veřejnosti informace o možnostech řešení adaptace zájmového území na probíhající klimatickou změnu a s ní související častější projevy sucha. Je dostupná na adrese <https://www.dibavod.cz/typova-opatreni-sucho> (obr. 5). Možné návrhy řešení jsou představeny pomocí vybraných vzorových lokalit, v nichž byla již některá opatření na zmírnění negativních dopadů sucha realizována. Prohlédnout si lze jak samotná konkrétní opatření, tak prostřednictvím informačního listu i celý soubor realizovaných opatření s popisem předpokládaného vlivu na sucha. Aplikace je postavena na kombinaci programovacího jazyka R (včetně rozšiřujících balíčků) a technologií HTML 5, CSS a Javascript. Součástí aplikace je i přehledná nápověda a podrobný manuál pro uživatele.

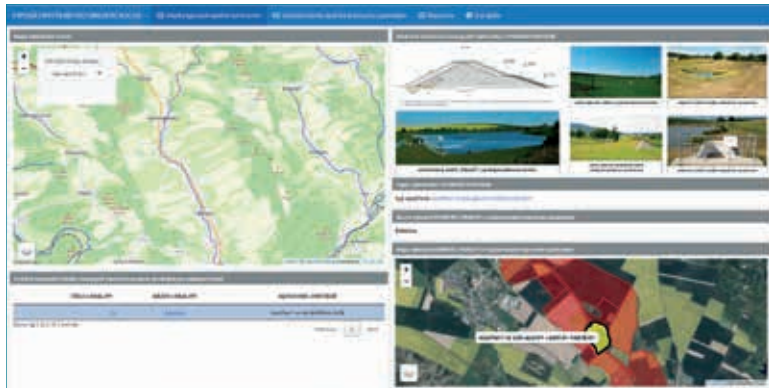
Pól růstu I a II

V letech 2018 až 2020 byl v rámci projektu „Možnosti vodní rekreace na území hlavního města Prahy (od historie po současnost), Praha – pól růstu II“ prováděn průzkum potenciálních možností rozšíření míst ke koupání a rekreace u vody na území hlavního města Prahy. Z cca 150 nalezených lokalit bylo vybráno 57, u nichž byla monitorována jakost vody a hodnocen jejich stav a potenciál. Hlavními výstupy projektu byly databáze, soubor map (<https://koupanivpraze.vuv.cz/>) a webová mapová aplikace (<https://www.dibavod.cz/vodni-rekreace-praha>),



Obr. 3. Ukázka vyhodnocení dat z DPZ

kteří přehledným způsobem prezentují výsledky projektu a vedou ke zvýšení informovanosti veřejnosti o aktuálních možnostech rekreace u vody na území Prahy (obr. 6) [18].



Obr. 5. Webová mapová aplikace „Typová opatření pro omezení sucha“



Obr. 6. Ukázka koupacího místa

Udržitelná recyklace plastů v Mongolsku

Cílem projektu je přispět k ekonomické prosperitě a snížení chudoby a rovněž podpořit rozvoj zelené ekonomiky i přechod na nízkouhlíkové, zdrojově efektivní a oběhové hospodářství v Mongolsku. Nakládání s odpady je v Mongolsku klíčovou otázkou kvůli urbanizaci, industrializaci a rostoucí spotřebě balených produktů. Plastový odpad je obzvláště závažným problémem, protože způsobuje rozsáhlé znečištění a je také často nezákonně ukládán jak občany, tak společnostmi. Projekt financovaný Evropskou unií (program SWITCH-Asia) zastřešuje Charita Česká republika a VÚV TGM je spoluřešitelem společně s dalšími třemi institucemi. Hlavními řešiteli v rámci ústavu jsou odborníci z Centra pro hospodaření s odpady. Oddělení GIS a kartografie zajišťuje v rámci projektu především datové analýzy a publikaci výsledků pomocí kartografických výstupů a webových mapových aplikací [19].

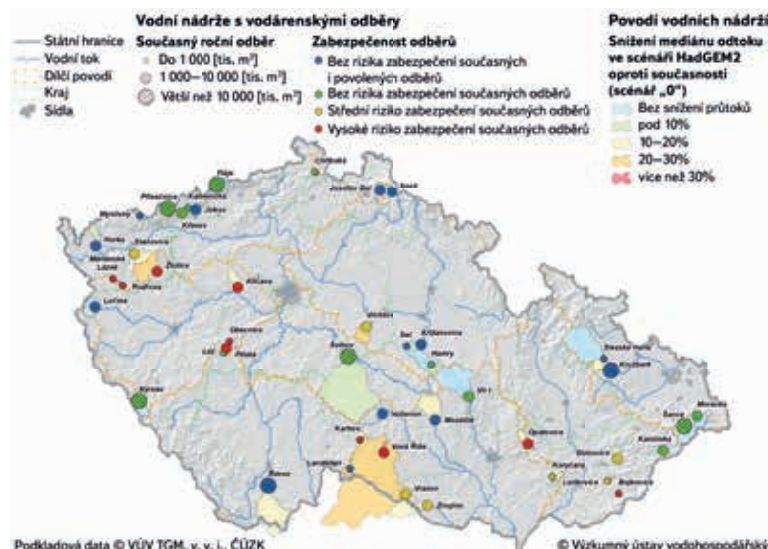
CO PRO VÁS (JEŠTĚ) MŮŽE ODDĚLENÍ GIS A KARTOGRAFIE UDĚLAT?

Dálkový průzkum Země

Popularita satelitních dat, tedy výsledků nekonvenčních metod dálkového průzkumu Země, v současné době neustále stoupá. Důvodem rostoucího zájmu jsou nejen jejich charakteristické vlastnosti, ale zejména skutečnost, že v poslední době provozovatelé některých družicových systémů uvolňují svá data do tzv. open source režimu, tedy k volnému využití. Zde je namísto upozornit, že díky velmi časté frekvenci a velkému rozsahu snímání zemského povrchu lze snadno vytvářet poměrně husté časové řady a získat tak relativně ucelený obraz o vývoji sledovaného objektu či jevu. Z tohoto důvodu je na satelitní data všeobecně pohlíženo jako na nástroj vhodný ke zvýšení efektivity, ale i ke snížení nákladů na některé činnosti. Relevanci výsledků dosažených z dat dálkového průzkumu Země zajišťuje nezbytně nutná kalibrace a následná validace s daty pozemními (získanými *in situ*). Na oddělení GIS a kartografie probíhá od roku 2018 testování konkrétních úloh s optickými daty Evropské kosmické agentury (ESA), a to jak v nízkém prostorovém rozlišení (*Sentinel-3*), tak i v prostorovém rozlišení velmi vysokém (*Sentinel-2*). Rovněž je zde věnována pozornost datům snímaným v termálním pásmu elektromagnetického spektra (*Landsat 7,8* a družicový systém *TERRA*). A nelze opomenout ani data radarová (*Sentinel-1*). Konkrétními aplikacemi jsou například monitoring některých ukazatelů stavu a jakosti koupacích vod, detekce sněhové pokrývky, monitoring půdní vlhkosti, určení povrchové teploty krajiny a hladiny vodních ploch.

Kartografické výstupy

Výstupem mnoha výzkumných i komerčních projektů jsou mapová díla, popřípadě přehledové mapy (obr. 7). Oddělení GIS a kartografie zajišťuje úroveň mapových výstupů tak, aby splňovaly základní kartografická pravidla, byly srozumitelné a vhodně prezentovaly výsledky projektů. Kromě „klasických“ analogových map se věnuje i webové kartografii.



Obr. 7. Ilustrace mapového výstupu

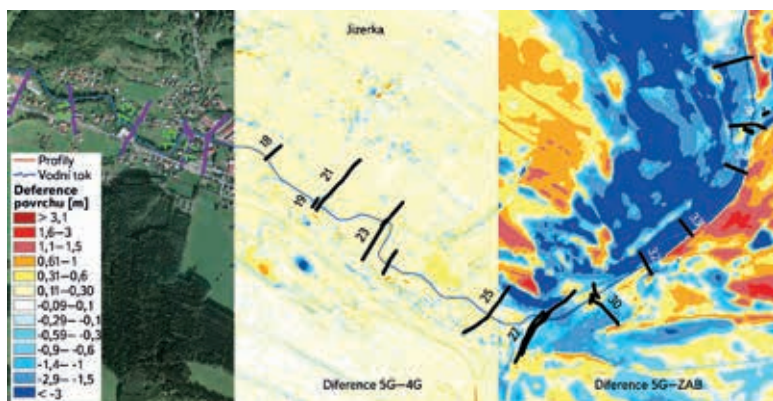
Webové mapové aplikace

Webová mapová aplikace je přehledným interaktivním nástrojem pro publikaci dat a služeb s on-line přístupem přes webový prohlížeč. Je nedílnou součástí moderního sdílení výstupů jednotlivých projektů se širokou veřejností či zájmovými subjekty. Může obsahovat rastrové i vektorové datové sady (linie, body, polygony) s atributovou tabulkou doplněné dalšími informacemi (např. fotografií, grafem, animací, webovou stránkou). V rámci aplikace lze také využívat analytické i publikační nástroje. Některé odkazy na webové mapové aplikace vytvořené ve VÚV TGM byly již uvedeny v textu tohoto článku. Zde je několik dalších:

- „Možnosti vodní rekreace na území hlavního města Prahy“ (od historie po současnost) (<https://www.dibavod.cz/vodni-rekreace-praha>)
- „Ukazatele stavu a kvality vybraných koupacích vod České republiky“ (<https://geoportal.vuv.cz/aplikace/dpz-koupaci-vody-zeta/>)
- „Vodní rekreace – koupání v přírodních koupalištích a dalších povrchových vodách“ (<https://www.dibavod.cz/koupaci-vody>)

Datové analýzy, dostupnost dat a podpora uživatelů

Síla geografických informačních systémů je především v rozmanitých možnostech jejich analytických nástrojů, pomocí kterých lze získat mnohé informace ze zkoumaných dat. I když se to nemusí na první pohled zdát, GIS a jeho analýzy lze využít téměř pro jakákoli data, neboť drtivou většinu informací lze lokalizovat v místě nebo v čase. Analyzovat je možné jak vektorová (body, linie, polygony), tak rastrová data či jejich kombinace (obr. 8). Výsledky analýz nemohou být kvalitní, pokud nejsou prováděny na podkladě aktuálních a garantovaných dat a nejsou správně interpretovány. I toto je výzva pro oddělení GIS a kartografie, které se snaží zajistit jednotné a aktuální datové sady a garantované zdroje dat v rámci instituce i mimo ni. Neméně důležitá je i komunikace s řešiteli projektů a jejich edukace, aby si mohli ověřit, že geografické informační systémy jim mohou jejich práci ulehčit, pomoci jim ze zkoumaných dat získat co nejvíce informací a jejich výsledky elegantně vizualizovat.



Obr. 8. Analýza rastrových dat v kombinaci s daty vektorovými

CO ŘÍCI NA ZÁVĚR?

Jak je patrné z výše uvedeného (stručného) přehledu, záběr oddělení GIS a kartografie je velmi široký. Díky využití geografických informačních systémů, geoinformatiky, kartografie a dalších podobných disciplín řeší výzkumné i komerční projekty, a to jak v národním, tak i mezinárodním měřítku. Je důležitým článkem v rámci podpory výkonu státní správy především pro našeho zřizovatele – Ministerstvo životního prostředí. Tyto činnosti realizuje jak samostatně,

jako hlavní řešitel, tak i ve spolupráci s odborníky z rozličných oborů lidské činnosti. Má tak jedinečnou možnost aplikovat GIS a své znalosti v rozmanitých a zajímavých projektech (obr. 9). Mimo to se snaží zajistit pro ostatní pracovníky VÚV TGM kvalitní datovou základnu, aktuální a funkční software a především uživatelskou podporu v jejich každodenní práci. Práce oddělení tak vyžaduje nejen dokonalou znalost softwaru, ale také znalost odborných dat a souvislostí. V budoucnu by pracovníci oddělení tyto činnosti rádi rozvíjeli a rozšířili je využitím dalších dynamicky se rozvíjejících analytických, vizualizačních i publikačních nástrojů a aplikací. Jsou totiž přesvědčeni, že GIS není jen nepochopený náklad, ale především cenná investice s vysokou návratností.



Obr. 9. Odkaz na webové stránky oddělení GIS a kartografie VÚV TGM

Literatura

- [1] KULT, A. a kol. *Sto let činnosti Výzkumného ústavu vodohospodářského od jeho založení v roce 1919*. Praha: VÚV TGM, v. v. i. 2020, s. 198–199. ISBN 978-80-87402-74-0.
- [2] VÚV TGM. *Digitální báze vodohospodářských dat (DIBAVOD)* [on-line]. Dostupné z: <http://www.dibavod.cz>
- [3] ČÚZK. *Základní báze geografických dat České republiky (ZABAGED®)* [on-line]. Dostupné z: [https://geoportal.cuzk.cz/\(S\(d4gf3q3ih23q2ldznuevgfal\)\)/default.aspx?lng=CZ&mode=TextMeta&text=dSady_zabaged&side=zabaged&menu=24&head_tab=sekce-02-gp](https://geoportal.cuzk.cz/(S(d4gf3q3ih23q2ldznuevgfal))/default.aspx?lng=CZ&mode=TextMeta&text=dSady_zabaged&side=zabaged&menu=24&head_tab=sekce-02-gp)
- [4] ZBOŘIL, A., FOJTÍK, T., KURFÍRTOVÁ, J. *Vývoj aplikací pro tvorbu kartografických výstupů ve vodním hospodářství – Historie a analýza současného stavu, Závěrečná zpráva*. 2018.
- [5] NOVÁKOVÁ, H., FOJTÍK, T., ZBOŘIL, A. *Databáze ochranných pásem vodních zdrojů v České republice. Vodohospodářské technicko-ekonomické informace*. 2019, 61(2), s. 12–19. ISSN 0322-8916.
- [6] VÚV TGM. *Hydroekologický informační systém VÚV TGM (HEIS VÚV)* [on-line]. Dostupné z: <https://heis.vuv.cz>
- [7] CENIA. *Národní geoportál INSPIRE* [on-line]. Dostupné z: <https://geoportal.gov.cz>
- [8] *Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2007/2/ES o zřízení Infrastruktury pro prostorové informace v Evropském společenství (INSPIRE)*
- [9] *Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2000/60/EC ustavující rámec pro činnost Společenství v oblasti vodní politiky*
- [10] *Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2007/60/ES o vyhodnocování a zvládnání povodňových rizik*
- [11] *Směrnice Rady 91/676/EEC o ochraně vod před znečištěním dusičnany ze zemědělských zdrojů*
- [12] *Směrnice Rady 91/271/EEC o čištění městských odpadních vod*
- [13] MKOL. *Mezinárodní komise pro ochranu Labe* [on-line]. Dostupné z: <https://www.ikse-mkol.org/cz/>
- [14] MKOOpZ. *Mezinárodní komise pro ochranu Odry před znečištěním* [on-line]. Dostupné z: <http://www.mkoo.pl/index.php?lang=CZ>
- [15] MKOD. *Mezinárodní komise pro ochranu Dunaje* [on-line]. Dostupné z: <https://www.icpdr.org/main/>
- [16] MAŤAŠOVSKÁ, V., KOTHAN, F., LEDVINKA, O., PUMANN, P., FOJTÍK, T., MAKOVCOVÁ, M., BENDA KOVSKÁ, L. *Využití metod dálkového průzkumu Země pro monitoring stavu koupacích míst. Vodohospodářské technicko-ekonomické informace*. 2021, 63(1), s. 37–45. ISSN 0322-8916.
- [17] ČÚZK. *Digitální model reliéfu České republiky 5. generace (DMR 5G)* [on-line]. Dostupné z: [https://geoportal.cuzk.cz/\(S\(qadwqsinfyoginq0zbwzu3p\)\)/Default.aspx?lng=CZ&mode=TextMeta&side=vyskopis&metadatalD=CZ-CUZK-DMR5G-V&mapid=8&menu=302](https://geoportal.cuzk.cz/(S(qadwqsinfyoginq0zbwzu3p))/Default.aspx?lng=CZ&mode=TextMeta&side=vyskopis&metadatalD=CZ-CUZK-DMR5G-V&mapid=8&menu=302)
- [18] MLEJNKOVÁ, H., JAŠKOVÁ, L., FOJTÍK, T., MAKOVCOVÁ, M., JURANOVÁ, E., PUMANN, P. *Vodní rekreace v Praze od historie po současnost. Vodohospodářské technicko-ekonomické informace*. 2019, 61(5), s. 12–21. ISSN 0322-8916.
- [19] Caritas Czech Republic. *Sustainable Plastic Recycling in Mongolia* [on-line]. Dostupné z: <https://mongolia.charita.cz/what-we-do/Ongoing%20projects/sustainable-plastic-recycling-in-mongolia/>

Autoři

Ing. Tomáš Fojtik

✉ tomas.fojtik@vuv.cz

ORCID: 0000-0001-6480-3900

Mgr. Lucie Jašíková, Ph.D.

✉ lucie.jasikova@vuv.cz

ORCID: 0000-0001-5209-406X

Jindra Kurfířtová

✉ jindra.kurfirtova@vuv.cz

Ing. Marcela Makovcová

✉ marcela.makovcova@vuv.cz

ORCID: 0000-0002-1060-4188

Ing. Bc. Václava Maťašovská

✉ vaclava.matasovska@vuv.cz

ORCID: 0000-0001-9229-463X

RNDr. Pavel Mayer

✉ pavel.mayer@vuv.cz

Ing. Hana Nováková, Ph.D.

✉ hana.novakova@vuv.cz

ORCID: 0000-0002-5946-4796

Judita Zavřelová

✉ judita.zavrelova@vuv.cz

Mgr. Aleš Zbořil

✉ ales.zboril@vuv.cz

ORCID: 0000-0001-8202-3879

VTEI/2022/1

Od roku 1959

**VODOHOSPODÁŘSKÉ
TECHNICKO-EKONOMICKÉ INFORMACE
WATER MANAGEMENT
TECHNICAL AND ECONOMICAL INFORMATION**

Odborný dvouměsíčník specializovaný na výzkum v oblasti vodního hospodářství. Je uveden v Seznamu recenzovaných neimpaktovaných periodik vydávaných v ČR.

Ročník 64



VTEI.cz

Vydává: Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, veřejná výzkumná instituce, Podbabská 2582/30, 160 00 Praha 6

Redakční rada:

RNDr. Jan Daňhelka, Ph.D., doc. Ing. Michaela Danáčková, Ph.D., doc. Dr. Ing. Pavel Fošumpaur, doc. Ing. Silvie Heviánková, Ph.D., Mgr. Róbert Chriašteľ, Mgr. Vít Kodeš, Ph.D., Ing. Jiří Kučera, Ing. Martin Pavel, Ing. Jana Poórová, Ph.D., Mgr. Hana Sezimová, Ph.D., Dr. Ing. Antonín Tůma, Mgr. Lukáš Záruba, Ing. Marcela Zrubková, Ph.D.

Vědecká rada:

doc. Ing. Martin Hanel, Ph.D., prof. RNDr. Bohumír Janský, CSc., prof. Ing. Radka Kodešová, CSc., RNDr. Petr Kubala, Ing. Tomáš Mičaník, Ph.D., Ing. Michael Trnka, CSc., Dr. rer. nat. Slavomír Vosika

Šéfredaktor:

Ing. Josef Nistler (josef.nistler@vuv.cz)

Odborné redaktorky:

Mgr. Zuzana Řehořová (zuzana.rehorova@vuv.cz)
Mgr. Hana Beránková (web) (hana.berankova@vuv.cz)

Zdroje fotografií tohoto čísla:

VÚV, Shutterstock.com, 123RF.com

Grafická úprava, sazba, tisk:

ABALON s. r. o., www.abalon.cz

Náklad 700 ks

Časopis VTEI vychází od roku 2022 v anglické mutaci, která je k dispozici na <https://www.vtei.cz/en/>

Příští číslo časopisu vyjde v dubnu.

Pokyny autorům časopisu jsou uvedeny na www.vtei.cz

ISSN 0322-8916

ISSN 1805-6555 (on-line)

MK ČR E 6365



PRAMEN ŠTĚSTÍ

Vodopád na Kachním potoce, přezdíváný Pramen štěstí, se nachází poblíž přístaviště, kde lze započít plavbu na lodičkách Divokou soutěskou říčky Kamenice v Národním parku České Švýcarsko. Podobně jako na jiných turisticky oblíbených místech bývá i jezírko pod vodopádem plné mincí. Pískovcové skály, které je obklopují, obsahují až 15 procent vody, jež jimi vlivem gravitace prostupuje převážně shora dolů. Vršky skal jsou proto v létě velmi suché a dolní partie soutěsek mokré, plné stékajících pramínků. Kachní potok se jako typický malý vodní tok uprostřed pískovcových skal objevuje jen po déletrvajících deštích.

Text a fotografie dodal Václav Sojka, www.vaclavsojka.cz.

**VÝZKUMNÝ ÚSTAV
VODOHOSPODÁŘSKÝ
T.G. MASARYKA**

veřejná výzkumná instituce

VTEI.cz