

Pokrok ve vývoji systémů pro předpověď stavu a teploty na silničních komunikacích

Progress in the development of road condition and temperature forecasting systems

Petr Zacharov

Ústav fyziky atmosféry AV ČR
Boční II/1401
141 31 Praha 4
✉ petas@ufa.cas.cz

Vojtěch Blížňák

Ústav fyziky atmosféry AV ČR
Boční II/1401
141 31 Praha 4

Forecasting the road surface condition is a key forecast for road maintenance to take action in time when dangerous winter phenomena occur. The Institute of Atmospheric Physics of the Czech Academy of Sciences in close cooperation with the Czech Hydrometeorological Institute have developed in several joint projects the forecast of road surface temperature and condition of Czech roads both in the form of point forecasts at the locations of road weather stations on the Czech road network and in the form of line forecasts of road surface temperature and condition of selected roads in Prague (ICEWARN system) and most of the Czech motorways (FROST system). The line forecasts use unique information about objects in the close vicinity of the motorway to calculate the potential shading of the road surface from the sun's rays. In the FROST system, for the first three hours, the time extrapolation of satellite cloud cover measurements is used instead of cloud cover forecasted by the ALADIN numerical weather prediction model. All outputs of these forecasts are operatively available at the central forecasting office of the Czech Hydrometeorological Institute.

KLÍČOVÁ SLOVA: meteorologie silniční – družice meteorologická – systém předpovědní

KEYWORDS: road meteorology – meteorological satellite – forecasting system

1. Úvod

Včasný zásah údržby silnic dokáže v zimním období předejít mnoha dopravním nehodám s velkými škodami na majetku, nebo dokonce na lidských životech. Takový zásah je ale nutné plánovat včas dopředu díky kvalitní předpovědi počasí a také

díky předpovědi teploty a stavu povrchu silnic. Ústav fyziky atmosféry AV ČR v. v. i. ve spolupráci s Českým hydrometeorologickým ústavem použil v roce 2012 kanadský model METRo (Model of the Environment and Temperature of Roads; Crevier a Delage 2001; Sokol et al. 2014; Sokol et al. 2017) na predikci stavu a povrchu vozovky v bodech silničních meteorologických měření. Model METRo, založený na řešení rovnice vedení tepla vozovkou a energetické bilance na povrchu vozovky, využívá pro předpověď aktuální data měření na silničních stanicích a operativní výstupy numerického modelu předpovědi počasí ALADIN. Původní model METRo se v různých úpravách používá i v zahraničí (např. Karanko et al. 201; Kršmanc et al. 2012)

Prizpůsobení původního modelu METRo na české podmínky METRo-CZ si časem vyžádalo zásadní změny přepsáním kódu, doplněním vlivu zastínění apod. takové míry, že je současný model používán s označením FORTE (Forecast Of Road TEMperature and condition). V návazném projektu ICEWARN byl výpočet modelu rozšířen na liniovou předpověď pro hlavní pražské komunikace s využitím zastínění povrchu před přímým slunečním zářením. V projektu bylo zjištěno, že významnou chybou předpovědi teploty povrchu silnic způsobuje častá chyba v předpovědi zejména nízké oblačnosti numerickým předpovědním (NWP) modelem ALADIN. V navazujícím projektu FROST byla tedy předpověď doplněna o využití časové extrapolace družicových měření oblačnosti na několik hodin dopředu, která se využívá místo prvních hodin předpovědi množství oblačnosti modelem ALADIN.

V předkládaném článku představíme nejdříve model FORTE, dále předpovědní systém ICEWARN a vliv zastínění na teplotu vybrané pražské vozovky, a nakonec předpovědní systém FROST s využitím časové extrapolace družicových měření oblačnosti pro předpověď stavu a teploty povrchu českých dálnic.

2. Model FORTE a popis vstupních dat

Model FORTE patří do skupiny 1D fyzikálních modelů počítajících předpověď stavu a teploty povrchu vozovky na základě řešení rovnice přenosu tepla a energetické bilance a skládá se ze tří hlavních kroků: (i) inicializace, při níž se vypočítá počáteční teplotní profil vozovky; (ii) coupling, který umožňuje modelu FORTE přizpůsobit předpověď NWP modelu skutečným pozorováním na silničních meteorologických stanicích; a (iii) volná předpověď teploty a stavu povrchu vozovky. Pro přípravu počátečních a okrajových podmínek využívá model dvojí typ vstupních dat – měření na silničních meteorologických stanicích a prognostické údaje získané integrací NWP modelu ALADIN.

Silniční meteorologické stanice rovnoměrně pokrývají hlavní silniční komunikace v České republice a jejich měření zahrnují teplotu a vlhkost vzduchu ve výšce 2 m (v reálných podmínkách kvůli znečištění vlivem silničního provozu měření často ve 3–4 m), rychlost větru ve výšce 10 m, teplotu a stav povrchu vozovky a tzv. prognózní stanice i teploty v hloubce 5 a/nebo 30 cm pod povrchem vozovky. Frekvence zasílání naměřených údajů se na jednotlivých stanicích liší a obvykle se pohybuje mezi 1 a 30 minutami. Po přijetí naměřených dat probíhá před vlastním spuštěním modelu standardní korekční procedura, jejímž cílem je kontrola a případná oprava naměřených dat dle údajů změřených na sousedních silničních stanicích. Pokud nejsou v době startu modelu FORTE k dispozici naměřené údaje o teplotě vzduchu, vlhkosti nebo větru, odhadují se jejich hodnoty interpolací prognostických údajů ALADIN v čase (lineární interpolace) a prostoru (bilinéární interpolace).

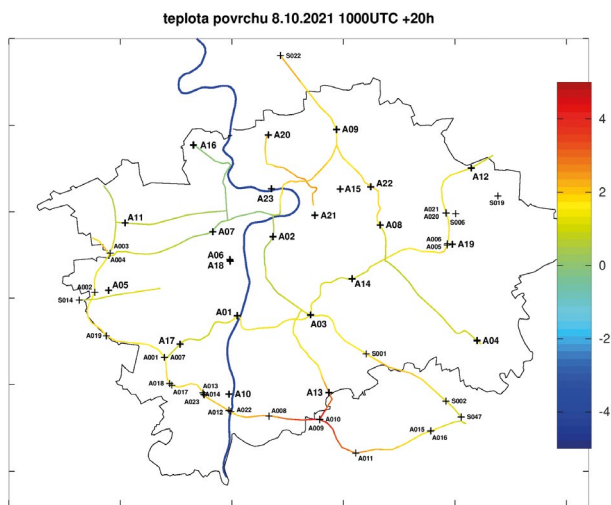
NWP model ALADIN je nehydrostatický model, který je integrován čtyřikrát denně (00:00, 06:00, 12:00 a 18:00 UTC) s horizontálním rozlišením přibližně 2,3 km a 87 vertikálními hladinami (Brožková a kol. 2019). Doba předpovědi modelu je 72 hodin (pro start předpovědi v 18:00 UTC je délka předpovědi pouze 54 h), ovšem pro účely předpovědi povrchové teploty a stavu vozovky je modelem FORTE využíváno pouze prvních 30 hodin. Následující prognostické proměnné představují vstupní data do silničního modelu: teplota a relativní vlhkost vzduchu ve výšce 2 m, rychlost větru ve výšce 10 m, tlak

v modelové orografii, pokrytí oblohy oblaky a množství a typ srážek. Předpovědi NWP modelu jsou kvůli couplingu zpožděny o 6 až 11 hodin v době startu silničního modelu a hodnoty prognostických proměnných jsou interpolovány ze sítě NWP modelu ALADIN do míst silničních stanic.

3. ICEWARN

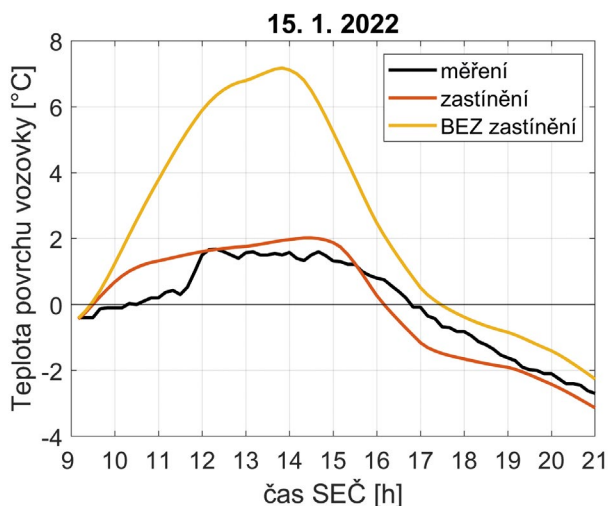
Předpovědní systém ICEWARN byl vyvinut v rámci projektu Operačního programu Praha – pól růstu (OPPPR) – Předpověď teploty a stavu povrchu silnic na území Prahy pro zimní období. Systém vytváří liniovou předpověď stavu a teploty povrchu vybraných pražských komunikací s nejvyšší prioritou zimní údržby. Do systému vstupují data z pražských i blízkých mimopražských silničních meteorologických stanic a tato měření jsou interpolována do sítě bodů pokrývajících vybrané vozovky. Systém je navržen tak, že v případě výpadku části měření využívá k interpolaci měření pouze dostupné stanice a je tedy schopen překlenout i výpadky několika měřících stanic. V případě výpadku všech stanic přiřazených vybrané komunikaci samozřejmě výpočet předpovědi pro danou komunikaci neproběhne. Jednotlivé body výpočtu se pak od sebe liší vypočteným zastíněním pro azimut a výšku Slunce během celého výpočetního období. Do každého výpočetního bodu je následně interpolovaná předpověď počasí modelem ALADIN. Dalším krokem je výpočet předpovědi modelem FORTE a vykreslení map předpovědi stavu a teploty povrchu na jednu až dvacet čtyři hodin dopředu (viz obrázek 1).

Zastínění povrchu vozovky může hrát ve dne zásadní roli ve vývoji teploty povrchu, a tedy v návaznosti i stavu povrchu. Přínos využití zastínění je zřetelný z obrázku 2, kde se chyby v předpovědi teploty povrchu vozovky v poledních hodinách



Obr. 1 Příklad termínové předpovědi teploty povrchu vybraných pražských silnic z 8. 10. 2021, start předpovědi v 10:00 UTC, délka předpovědi +20 h (čas předpovědi tedy 9. 10. 2021 06:00 UTC). Černá čára představuje hranici Prahy, tlustá modrá křivka je Vltava a teplota povrchu silnic ve stupních Celsia je zobrazena v legendě. Černé křížky představují využití silniční meteorologické stanice pro výpočet předpovědi (malé křížky jsou stanice ředitelství silnic a dálnic ČR, velké křížky jsou meteostanice Technické správy komunikací hl. m. Prahy).

Fig. 1. Example of a term forecast of the surface temperature of selected Prague roads from October 8, 2021, forecast start at 10:00 UTC, forecast lead time +20 h (forecast time is 06:00 UTC on October 9, 2021). The black line represents the border of Prague, the thick blue curve is the Vltava River and the road surface temperature in degrees Celsius is shown in the legend. The black crosses represent the road weather stations used to calculate the forecast (small crosses are the stations of the Directorate of Roads and Motorways of the Czech Republic, large crosses are the weather stations of the Technical Administration of Communications of the Capital City of Prague).



Obr. 2 Vliv využití zastínění na teplotu povrchu vozovky na stanici P029 v termínu 15. 1. 2022 a starty předpovědi 08:00–15:00 UTC. Tlustá černá křivka (viz legenda) znázorňuje měření teploty povrchu, oranžová čára představuje výpočet bez využití zastínění s polední odchylkou od měření okolo 4 °C, pro červenou křivku vidíme při využití zastínění značný pokles chyby na hodnotu okolo 0,5 °C.

Fig. 2. Effect of shading usage on road surface temperature at the P029 station on 15 January 2022 and forecast starts 08:00–15:00 UTC. The thick black curve (see legend) shows the surface temperature measurement, the orange line represents the calculation without shading with a noontime error of about 4 °C, for the red curve we see a significant decrease in error to about 0.5 °C when shading is used.

pohybují okolo čtyř stupňů Celsia, kdežto při využití zastínění se chyby předpovědi v téže situaci snížily na 0.5 °C. Zahnutí zastínění může zpřesnit i odhad času poklesu teploty pod bod mrazu. I když se nejedná o pražskou silniční stanici, je stanice P029 na 129. km dálnice D5 v zimě při nízké výšce Slunce z jižní strany významně zastíněna jehličnatým porostem na mírném návrší.

4. FROST

Předpovědní systém FROST počítá předpověď stavu a teploty povrchu českých dálnic obdobně, jako systém ICEWARN předpověď pro pražské silnice s tou výjimkou, že do systému FROST vstupuje navíc krátkodobá předpověď pokrytí oblohy oblačností získaná z časové extrapolace satelitního měření oblačnosti. Systém FROST počítá předpověď pro většinu českých dálnic tam, kde jsou dostupná data měření ze silničních meteorologických stanic. Stejně jako systém ICEWARN počítá předpověď v linii podél dálnice a jednotlivé body se od sebe odlišují informací o zastínění. Příklad předpovědi systému FROST je uveden na obrázku 3, kde je možné spatřit postupné chladnutí dálnic od západu a nebezpečí mrznoucího deště při přecházející studené frontě ze dne 18. 1. 2024.

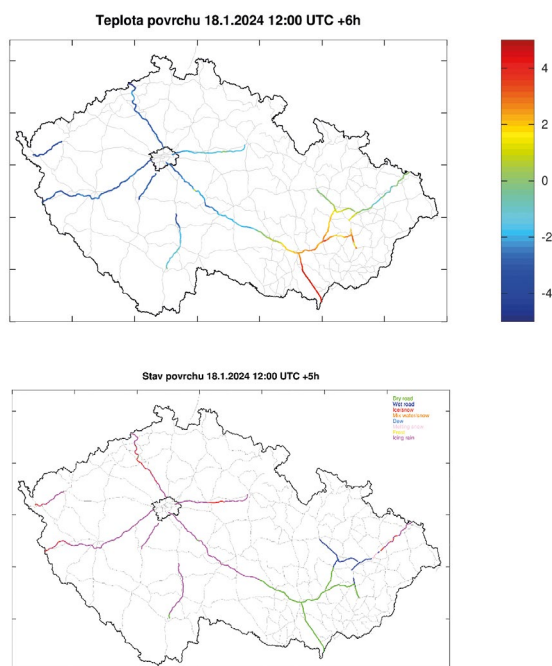
Extrapolované pokrytí oblohy oblaky využívané systémem FROST je odvozené z družicových měření meteorologické geostacionární družice Meteosat-11 (Meteosat druhé generace (MSG, z angl. Meteosat Second Generation)). Data MSG

jsou k dispozici každých 15 minut ve 12 spektrálních kanálech od viditelné po infračervenou část elektromagnetického spektra a jejich horizontální rozlišení nad Českou republikou je přibližně 4×6 km. Vyhodnocení, zda je daný gridový bod oblačný nebo bezoblačný, se zjišťuje pomocí algoritmu Cloud Mask (CMA), který je součástí softwaru NWC SAF (Satellite Application Facility on Support to Nowcasting & Very Short Range Forecasting) představujícího balík algoritmů pro výpočet odvozených družicových produktů z MSG, případně jiných družicových systémů. Detekce oblačnosti se provádí pomocí multispektrální prahové metody využívající kromě družicových dat i data z NWP modelu ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts). Pozorované hodnoty v jednotlivých spektrálních kanálech a jejich rozdíly jsou porovnávány s prahovými hodnotami, které vymezují jasové teploty/odrazivost pixelů bez oblačnosti od pixelů, které oblačnost obsahují. Tyto informace jsou pak extrapolovány pomocí produktu EXIM (Extrapolated Imagery), který na základě pohybového pole extrapoluje CMA (nebo jiný vybraný produkt) na předem definovanou dobu předpovědi. Celkové množství oblačnosti se pak vypočítá jako poměr počtu oblačných a bezoblačných pixelů ze čtverce 10×10 gridových bodů se středem nad uvažovaným pixelem.

Vliv extrapolovaného pokrytí oblohy oblaky na předpovídání povrchovou teplotu vozovek byl experimentálně analyzován na dvouměsíčním období (prosinec 2021 – leden 2022) v místech měření silničních meteorologických stanic lokalizovaných na 4 českých dálnicích (D3, D5, D8 a D11). Předpovídané hodnoty povrchové teploty vozovek byly vyhodnoceny zvlášť pro modelový běh využívající množství oblačnosti odvozené z NWP modelu ALADIN a zvlášť pro běh využívající extrapolované množství oblačnosti z družicových měření pomocí střední chyby (ME) a střední kvadratické chyby (RMSE). Výsledky jsou prezentovány ve formě verifikačních matic (obr. 4), které zobrazují ME a RMSE zvlášť pro každý start modelového běhu (svíslá osa) a pro každou dobu předpovědi (vodorovná osa).

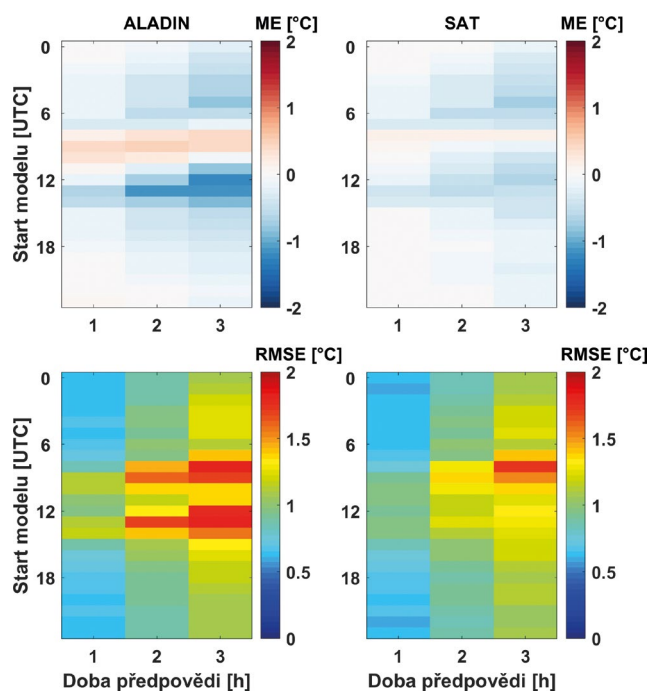
Z verifikačních matic vyplývá, že vliv extrapolované oblačnosti na přesnost předpovídané povrchové teploty je nejvíce patrný během dne (tj. mezi 08:00 a 16:00 UTC) a zejména pro 2. a 3. předpovídanou hodinu, kdy zlepšení předpovědi z hlediska RMSE dosahuje téměř 30 % a z hlediska ME přesahuje 50 %. Verifikační matice zobrazující chyby modelového běhu využívajícího množství oblačnosti z NWP modelu ALADIN ukazuje dvě problematická období v rámci denního cyklu. Prvním jsou ranní modelové starty mezi 08:00 a 10:00 UTC a dobou předpovědi 2–3 hodiny, kdy model nadhodnocuje předpovídané hodnoty povrchové teploty, druhým jsou pak odpolední časy startů modelu mezi 12:00 a 14:00 UTC a dobou předpovědi 2–3 hodiny, kdy zpravidla dochází k podhodnocení předpovědi.

Jedním z důvodů kladných hodnot odchylek z ranních startů může být absence vlivu zastínění v silničním modelu. Tento důvod však plně nevysvětluje skutečnost, že odpolední předpovědi, kdy stále převládá dopadající krátkovlnné záření, jsou podhodnoceny. Rozdíly jsou pravděpodobně způsobeny nesprávnými informacemi o budoucím pokrytí oblohy oblaky, protože běh modelu s využitím extrapolované předpovědi oblačnosti tyto chyby snižuje a předpovídané hodnoty povrchových teplot se blíží pozorování jak v ranních, tak odpoledních hodinách. Jako příklad lze uvést běh modelu startující ve 12:00 UTC a dobou předpovědi 3 hodiny, kdy modelový běh s pokrytím oblohy oblaky z modelu ALADIN předpovídá v prů-



Obr. 3 Příklad termínové předpovědi teploty povrchu českých dálnic z 18. 1. 2024, start předpovědi ve 12:00 UTC, délka předpovědi +5 h (čas předpovědi tedy 18. 1. 2024 17:00 UTC). V horní části je barevně vyznačena teplota povrchu českých dálnic (viz legenda), v dolní části je uvedena předpověď stavu povrchu dálnic.

Fig. 3. Example of the Czech highway surface temperature forecast from 18 January 2024, forecast start at 12:00 UTC, forecast length +5 h (forecast time is 18 January 2024 17:00 UTC). In the upper part the surface temperature of Czech motorways is indicated in colour (see legend), in the lower part the forecast of the motorway surface condition is given.



Obr. 4 Průměrná chyba (horní řádek) a střední kvadratická chyba (spodní řádek) předpovědi povrchové teploty zprůměrované přes všechny stanice umístěné na vybraných dálnicích v období od prosince 2021 do ledna 2022. Levý sloupec představuje běh modelu využívající množství oblačnosti z NWP modelu (ALADIN), pravý sloupec pak množství oblačnosti odvozené z extrapolovaného družicového měření (SAT). Vertikální osa značí čas startu modelového běhu [UTC] a horizontální osa dobu předpovědi [h]. Střední chyba byla vypočtena jako předpověď – pozorování. Převzato z práce Bližňáka a kol. (2023).

Fig. 4. Mean Error (top row) and Root Mean Square Error (bottom row) of forecasted road surface temperature averaged over all stations located on selected motorways between December 2021 and January 2022. The left column represents a model run using cloud coverage from the NWP model (ALADIN), and the right column represents cloud coverage derived from extrapolated satellite measurements (SAT). The vertical axis denotes the model run start time [UTC] and the horizontal axis denotes the lead time [h]. The mean error was calculated as forecast – observation. Adapted from Bližňák et al. (2023).

měru o 1,18 °C méně než pozorování, zatímco model využívající extrapolované pokrytí oblohy oblaky z družicových měření jen o 0,66 °C.

Naproti tomu nejpřesnější hodnoty povrchových teplot jsou předpovídány modelovými běhy startující ve večerních hodinách (tj. 18:00–00:00 UTC), kdy povrch vozovky již není ovlivňován slunečním zářením a hlavním energetickým tokem je dlouhodobné vyzařování povrchu (Kršmanc et al. 2013). V nočních hodinách (tj. 00:00–06:00 UTC) jsou předpovědi povrchových teplot u obou modelových běhů velmi blízké (rozdíl RMSE je do 5 %), přičemž zcela převažuje jejich podhodnocení.

5. Závěr

V úzké spolupráci s ČHMÚ jsme vyvinuli předpovědní systém pro výpočet teploty a stavu povrchu českých vozovek v zimním období, který jednak zohledňuje možné zastínění povrchu před slunečními paprsky, a také využívá extrapolované družicové měření pro krátkodobou předpověď oblačnosti na

stanicích. Všechny výstupy předpovědi, tzn. bodové výstupy z modelu FORTE v některých stanicích silniční sítě i liniové předpovědi ze systému ICEWARN a nově i FROST, jsou k dispozici meteorologům v předpovědním centru ČHMÚ, a jsou tedy operativně využitelné pro předpověď stavu povrchu vozovek v zimním období pro silniční údržbu. Vybrané obrázky z aktuálních předpovědí jsou a další informace o projektech silniční meteorologie na ÚFA jsou dostupné na webových stránkách: <https://www.ufa.cas.cz/silnicni-meteorologie/>.

Poděkování:

Autoři článku děkují kolektivu spolupracovníků z ÚFA, tj. Zbyňku Sokolovi, Pavlu Sedlákov, Petru Pešice a Jiřímu Hoškovi, a kolektivu spolupracovníků z ČHMÚ, tj. Martinovi Tomášovi, Jindřichu Štáskovi, Janu Šedivkovi a Janu Sulanovi, za práci na společných projektech, ze kterých vyústil tento přehledový článek. Děkujeme Technické správě komunikací Hl. m. Prahy a.s. a Ředitelství silnic a dálnic ČR za poskytnutá data. V neposlední řadě děkujeme Martinu Novákovi, Janu Sulanovi a Ondřeji Vlčkovi za přínosnou recenzi textu.

Literatura:

- BLIŽŇÁK, V., ZACHAROV, P., SOKOL, Z., PEŠICE, P., ŠTÁSTKA, J., SEDLÁK, P., 2023. Impact of satellite-derived cloud cover on road weather forecasts. *Atmospheric Research*, Vol. **292**, 106887. ISSN 0169-8095. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2023.106887>.
- BROŽKOVÁ, R., BUČÁNEK, A., MAŠEK, J., SMOLÍKOVÁ, P., TROJÁKOVÁ, A., 2019. Nová provozní konfigurace modelu ALADIN ve vysokém rozlišení. *Meteorologické zprávy*, Vol. **72**, s. 129–139. ISSN 0026-1173.
- CREVIER, L.-P., DELAGE, Y., 2001. METRo. A new model for road-condition forecasting in Canada. *Journal of Applied Meteorology*, Vol. **40**, S. 2026–2037. Dostupné z: [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2001\)040<2026:MANMFR>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2001)040<2026:MANMFR>2.0.CO;2).
- KARANKO, S., ALANKO, I., MANNINEN, M., 2012. Integrating METRo into a winter maintenance weather forecast system covering Finland, Sweden and Russia. *Proceedings of SIRWEC 2012*, Helsinki, 23-25 May 2012. Dostupné na: <http://sirwec.org/wp-content/uploads/2022/04/Helsinki-51.pdf>.
- KRŠMANC, R., SLAK, A. Š., CARMAN, S., KOROŠEC, M., 2012. METRo model testing at Slovenian road weather stations and suggestions for further improvements. *Proceedings of SIRWEC 2012*, Helsinki, 23-25 May 2012. Dostupné na: <http://sirwec.org/wp-content/uploads/2022/04/Helsinki-54.pdf>.
- KRŠMANC, R., SLAK, A. Š., DEMŠAR, J., 2013. Statistical approach for forecasting road surface temperature. *Meteorological Applications*, Vol. **20**, s. 439–446. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/met.1305>.
- SOKOL, Z., ZACHAROV, P., SEDLÁK, P., HOŠEK, J., BLIŽŇÁK, V. et al., 2014. First experience with the application of the METRo model in the Czech Republic. *Atmospheric Research*, Vol. **143**, s. 1–16. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2014.01.017>.
- SOKOL, Z., BLIŽŇÁK, V., SEDLÁK, P., ZACHAROV, P., PEŠICE, P., ŠKUTHAN, M., 2017. Ensemble forecasts of road surface temperatures. *Atmospheric Research*, Vol. **187**, s. 33–41. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.12.010>.

Recenzenti (Reviewers):

Mgr. Martin Novák, RNDr. Jan Sulan, Mgr. Ondřej Vlček