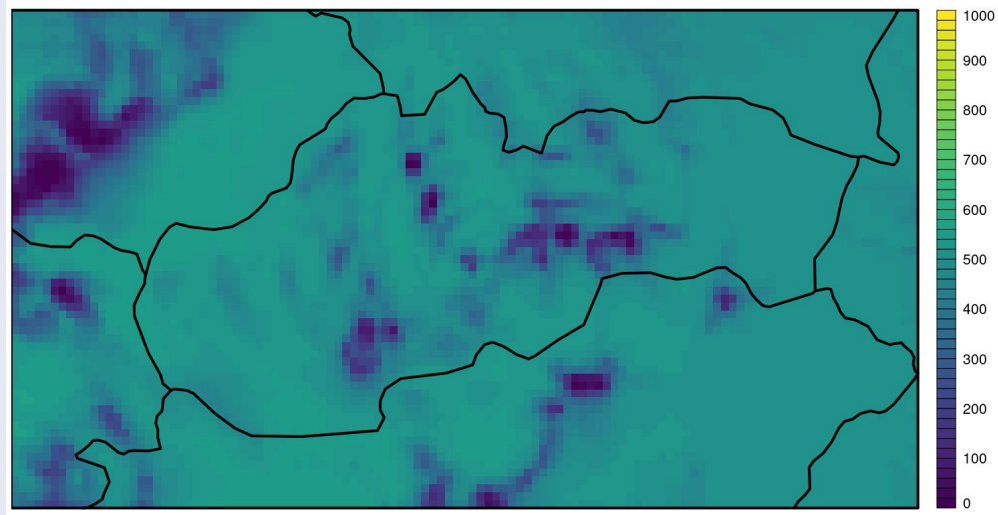


Nowcasting a veľmi krátkodobé predpovede slnečného žiarenia sú veľmi dôležité pre efektívne využitie fotovoltaických elektrární. Doterajšie predpovedné metódy oblačnosti a žiarenia na SHMÚ boli založené na fyzikálnych numerických modeloch ALADIN/SHMÚ a družicových dátach MSG (NWC SAF). Novšie systémy, ako napr. cyklus zrýchlenej aktualizácie dát RUC síce operujú vo vysokom priestorovom rozlíšení (1 km) a asimilujú najčerstvejšie pozorovania ale už aj v nowcastingovom období môžu lokálne produkovať veľké odchýlky od skutočnosti, najmä pri intenzívnom vývoji kopovitej oblačnosti v letnom období. Cieľom prebiehajúceho výskumu organizovaného vo vzájomnej spolupráci Slovenského hydrometeorologického ústavu a Fakulty elektrotechniky a informatiky STU je vyvinúť presnejší a výpočtovo nenáročný predpovedný systém zameraný na malých užívateľov. Systém bude predpovedať zmeny globálneho žiarenia v danej lokalite na niekoľko desiatok minút dopredu, predovšetkým na základe sekvencie snímok z All Sky kamery (záber 360 stupňov oblohy). Projekt sa začal uskutočňovať koncom roku 2025, tento poster predstavuje jeho súčasný koncept a metodiku riešenia. Aktuálny vývoj je zameraný na vylepšenie snímkovania a kalibrácie kamery na základe matematických modelov a kľúčových optických vlastností (matice vnútorných parametrov a vektora skreslenia), šachovnicových markerov a pod. Pracuje sa na optimalizácii umiestnenia kamery, implementácii pridružených senzorov teploty a vlhkosti vzduchu, ako aj na metódach odhadu výšky spodnej základne oblačnosti. Zároveň sa upresňujú konceptuálne modely vývoja oblačnosti (najmä s ohľadom na prenikavú konvekciu, čiaru konvergencie, orografiu a pod.) a výber komplementárnych meteorologických parametrov (globálne žiarenie, teplota, tlak vzduchu, vietor, relatívna vlhkosť, teplotné a vlhkosťné zvrstvenie atmosféry). Očakávame, že testovanie rôznych typov dát a metódy štatistickej analýzy prinesú nové poznatky o relevantnosti jednotlivých meteorologických parametrov a metód strojového učenia pre predpoveď globálneho žiarenia.

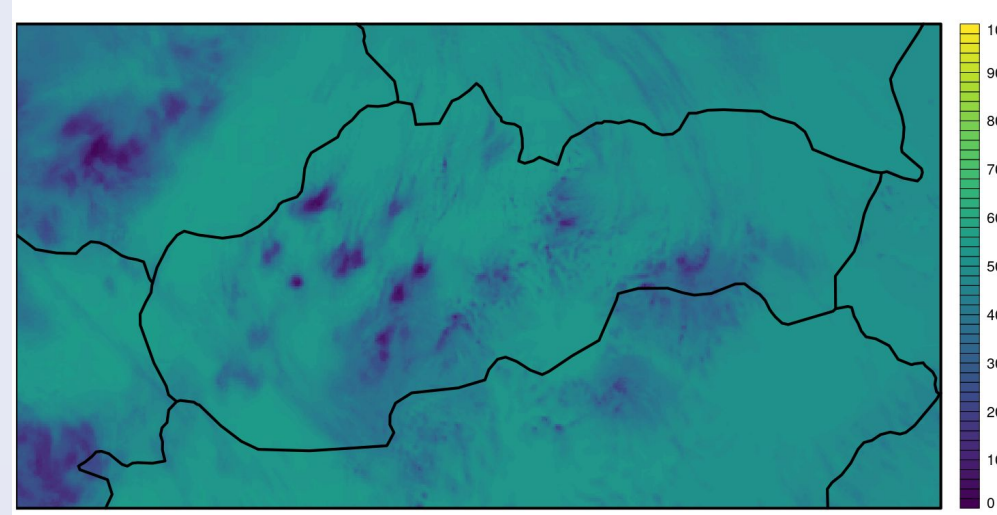
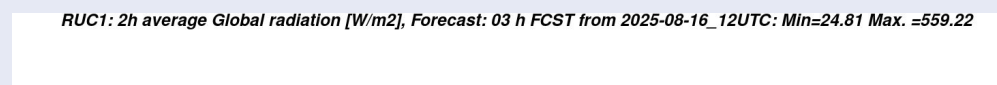
Predpoveď globálneho žiarenia z NWP modelov a systémov RUC

Numerické predpovedné modely poskytujú predpovede krátkovlnného a dlhovlnného žiarenia, ako aj ich zložiek v kumulovanom tvare. Tieto predpovede (na SHMÚ z modelu ALADIN/SHMÚ a systému RUC) sú však lokálne nepresné, najmä v situáciách s vývojom konvekčívnej oblačnosti. Výsledné žiarenie je kvôli dekulminácii zhladené a za jasného počasia môže byť výrazne podhodnotené oproti nameraným hodnotám.



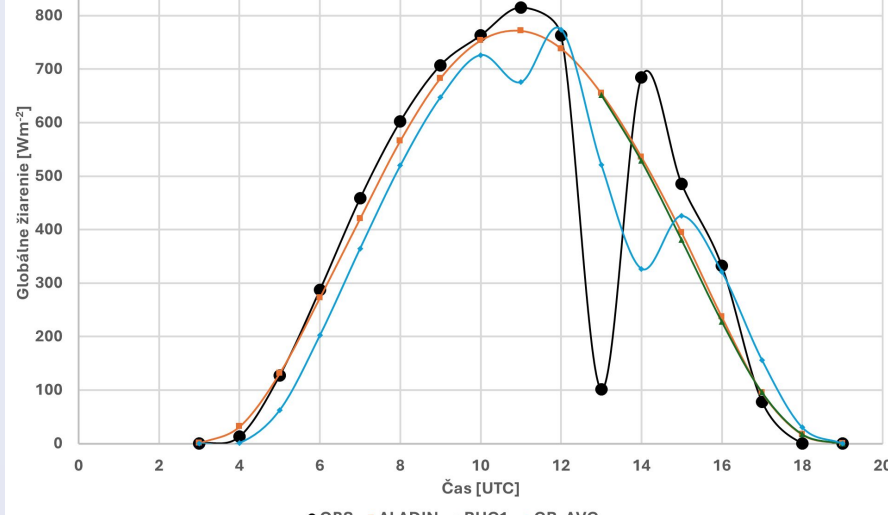
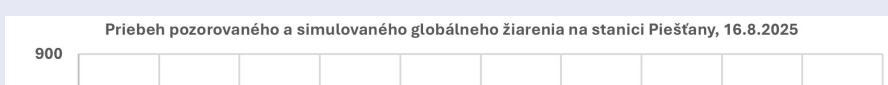
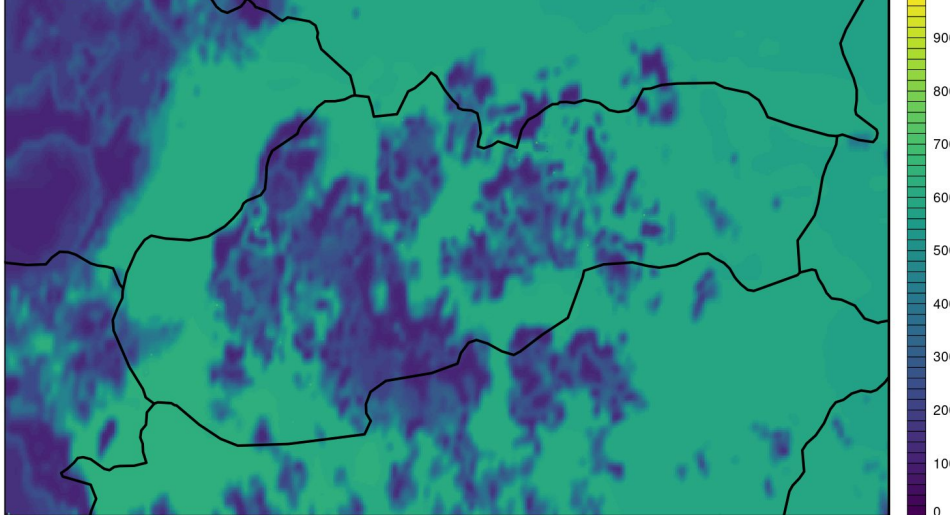
Predpoveď priemerného (2h priemer) krátkovlnného radiačného toku na 16.8.2025, okolo 14 UTC

- Vľavo: Z modelu ALADIN/SHMU, (beh z 00 UTC, priemer z predpovedného obdobia 13-15 h dopredu)
- Vpravo: Zo systému RUC1/SHMU, (beh z 12 UTC, priemer z predpovedného obdobia 1-3h dopredu).



Aplikácie na upresnenie analýz a nowcastingu globálneho žiarenia

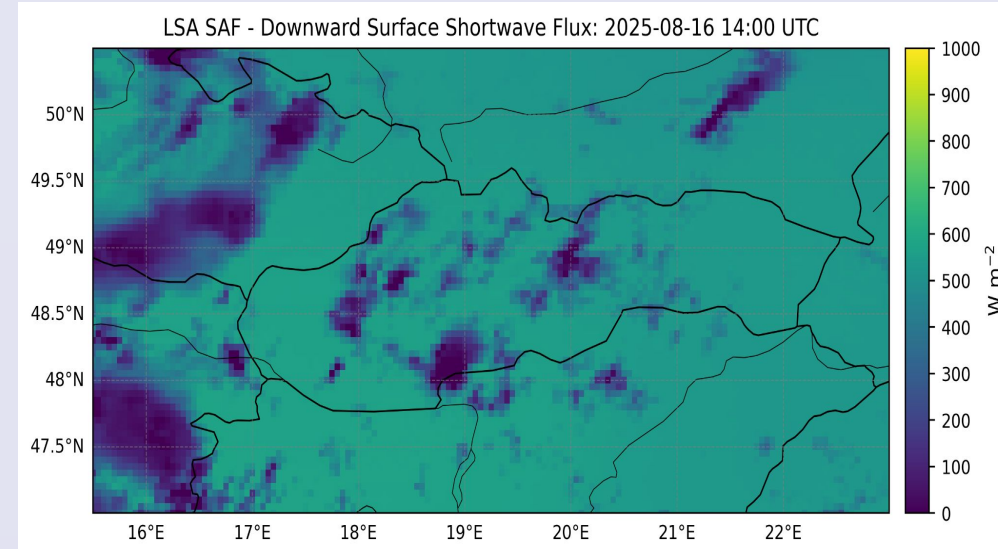
Kvôli nedostatkom vo výstupoch NWP modelov vznikla v roku 2016 na SHMÚ aplikácia “gr_avg” (autor Martin Dian, PhD.) ktorá upravila predpovede modelového krátkovlnného žiarenia pomocou výstupov zo satelitov (NWC SAF) a používa skutočne namerané hodnoty globálneho žiarenia v bodoch so staničnými pozorovaniami.



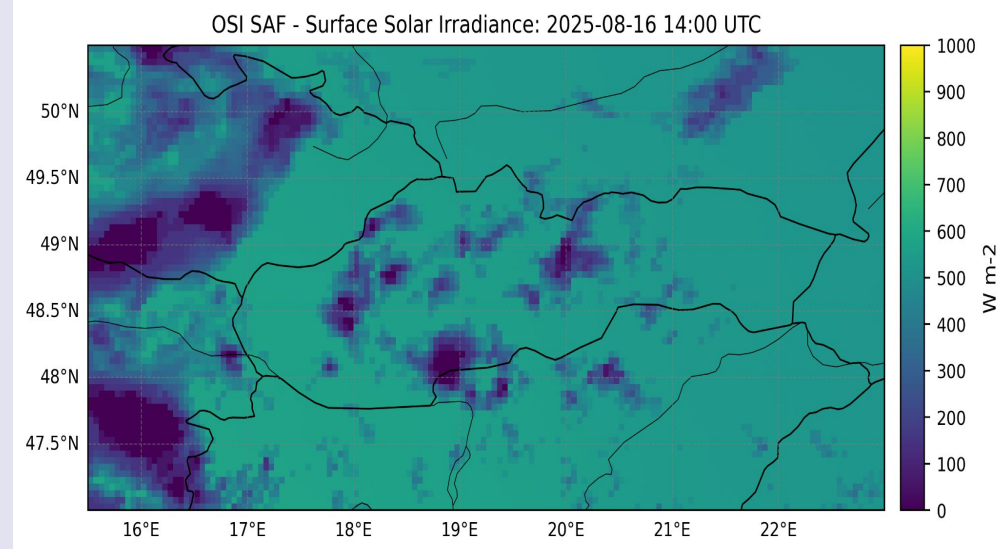
Analýza globálneho žiarenia na 16.8.2025, 14 UTC z aplikácie “gr_avg”. V porovnaní s modelovými výstupmi (vľavo) je zreteľný väčší kontrast medzi oblačnými a bezoblačnými oblasťami. Vpravo je časový priebeh simulovaného globálneho žiarenia zo všetkých aplikácií, v porovnaní s pozorovaniami zo stanice Piešťany.

Využitie družicových pozorovaní

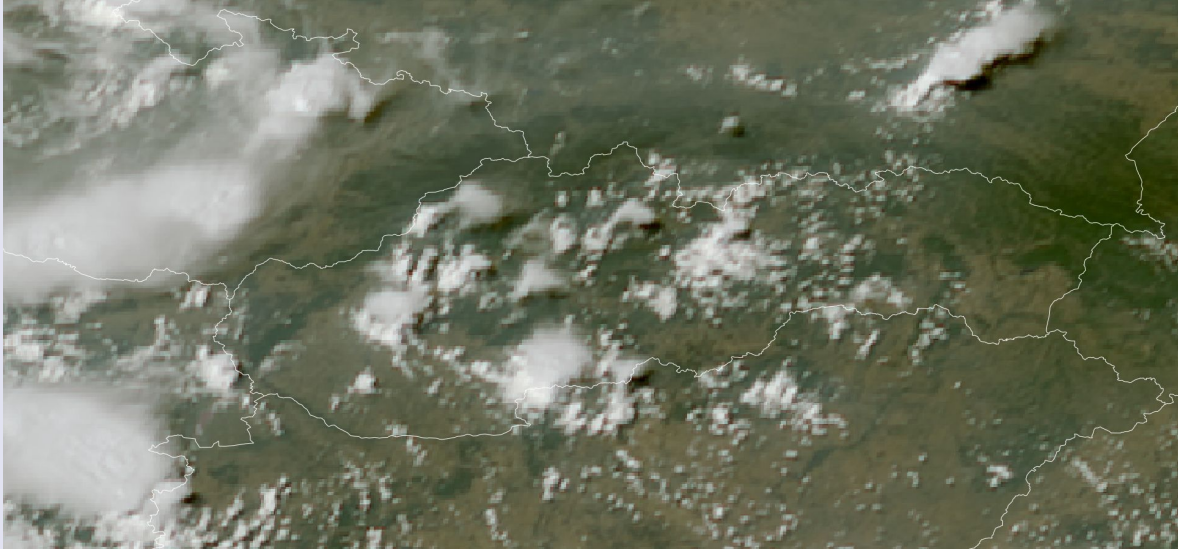
Satelitné dáta môžu byť v tomto projekte využité dvoma spôsobmi. Prvým spôsobom je vloženie surových družicových dát do modelu za účelom rozšírenia predpovede z priestorového hľadiska z lokálnej (založenej na all sky kamere) na regionálnu, respektíve za účelom rozšírenia predpovede z časového hľadiska, keďže družicové údaje poskytujú informáciu o širšom kontexte oblačnosti v porovnaní s all sky kamerou. Druhým spôsobom využitia družicových dát v projekte je validácia výstupov modelu na už existujúcich produktoch slnečného žiarenia. Na prvom obrázku zľava je vizualizovaný produkt z dielne LSA SAF-u Downward Surface Shortwave Flux (DSSF), ktorý je dostupný s 15 minútovým časovým krokom a priestorovým rozlíšením 0,05° x 0,05° (5,6 x 3,7 km pre Slovensko). Druhý obrázok zľava je produkt OSI SAF-u Surface Solar Irradiance s časovým krokom 1 hodina a rovnakým priestorovým rozlíšením ako DSSF. Ďalšie 2 obrázky sú RGB kompozity vytvorené z kanálov snímača FCI na družici MTG-I1 v rovnakom dátume ako modelové výstupy, 16.08.2026, 14:00 UTC. True Color produkt je vyrobený z kanálov vo viditeľnom spektre 0,6 µm, 0,5 µm, 0,4 µm. Produkt Cloud Type je zložený z vlnových dĺžok 1,3 µm, 0,6 µm, 1,6 µm a poskytuje nám informáciu o výške oblačnosti, jej optickej hrúbke a skupenstve oblačnosti.



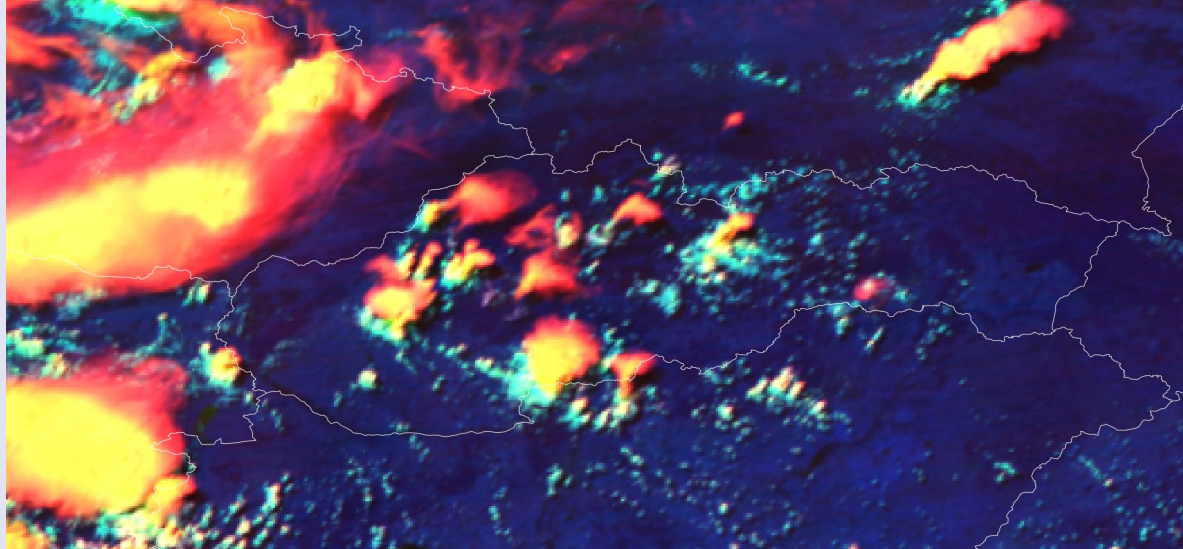
Zložka krátkovlnného žiarenia smerujúca k zemskému povrchu z produktu LSA SAF (analýza k 16.8.2025 14 UTC)



Intenzita slnečného žiarenia (W/m2) z produktu OSI SAF (analýza k 16.8.2025 14 UTC)



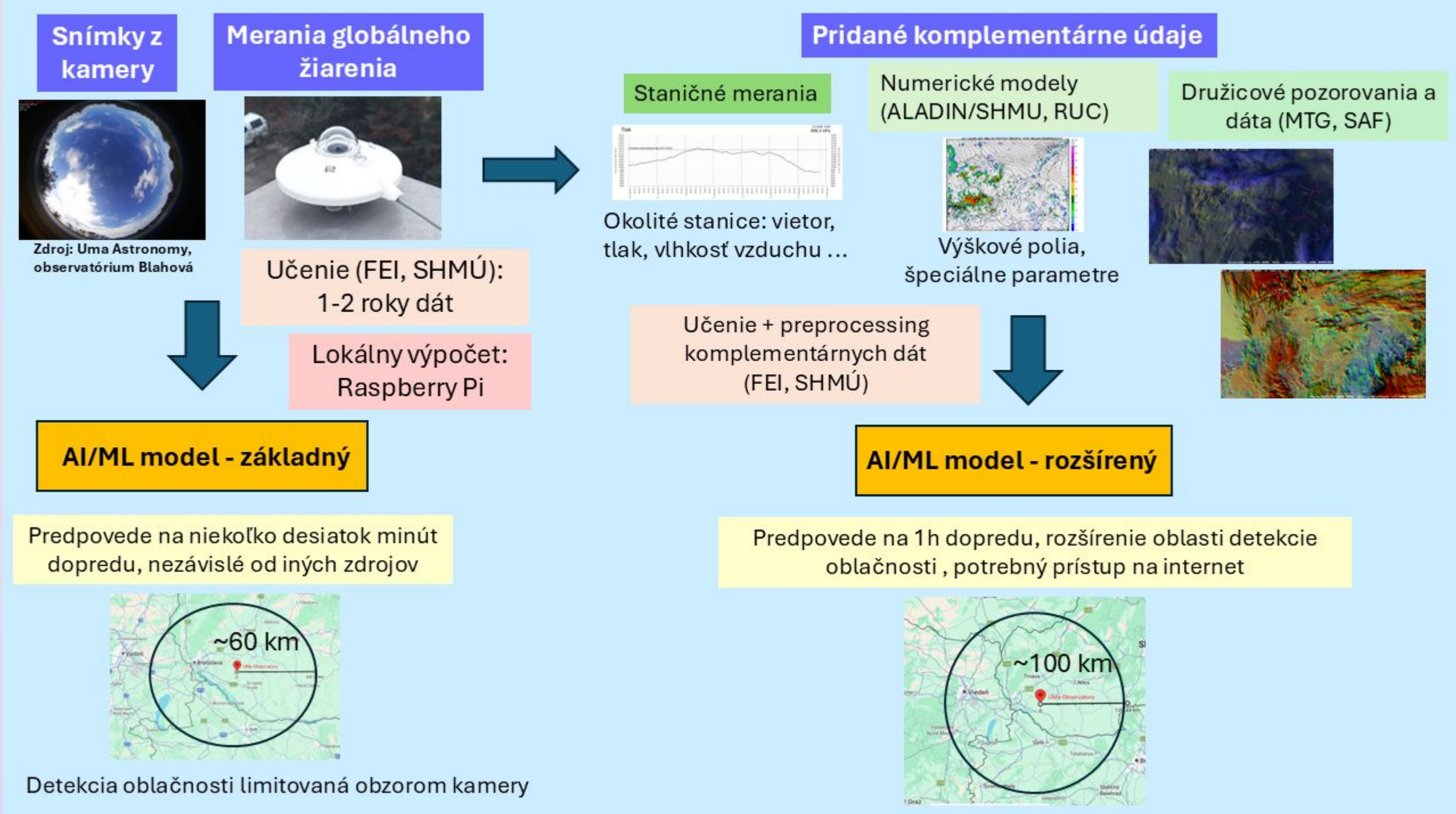
Produkt True Color z družice MTG (16.8.2025 14 UTC).



Produkt Cloud Type z družice MTG (16.8.2025 14 UTC).

Koncept lokálnej predpovede globálneho žiarenia

Vyššie spomenuté metódy majú z pohľadu lokálneho užívateľa rôzne nedostatky, predovšetkým nedokážu predpovedať veľmi malé štruktúry oblačnosti (v mierkach stovky metrov) a dáta z modelov i z družice sú dostupné len s časovým odstupom rádovalo minúty až desiatky minút. Projekt sa preto sústreďuje na analýzu oblačnosti zo snímok z kamery, čo by spolu so staničnými meraniami z pyranometra umožnilo nowcasting globálneho žiarenia pre vybranú lokalitu na obdobie niekoľko desiatok minút dopredu. Systém je autonómna jednotka založená na platforme Raspberry Pi, kde dedikovaný AI modul zabezpečuje okamžitú analýzu obrazu z pripojenej All Sky kamery. Predpoveď na dlhšiu dobu dopredu však už potrebuje komplexnejšie informácie o stave atmosféry a údaje o oblačnosti aj mimo obzor kamery. Komplementárne dáta vstupujúce do procesu učenia a výpočtu budú pochádzať z okolitých meteorologických staníc, zo satelitov a z numerických modelov a budú musieť byť predspracované kvôli rýchlejšiemu prenosu a výpočtu.

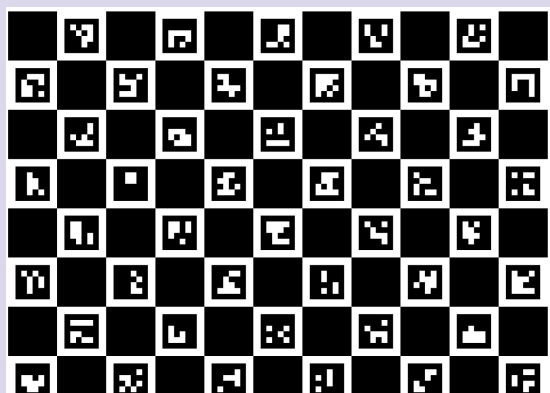


Metódy kalibrácie kamery

Kalibrácia kamery je potrebná kvôli rôznym optickým efektom a skresleniam objektívu a ochrannej kopuly, ktoré by mohli ovplyvniť detekciu oblačnosti a proces tréningovania. V prvom rade sa používa **matematický model kalibrácie**, ktorý vychádza z transformácie trojrozmerných bodov priestoru na dvojrozmernú rovinu snímača. Tento proces popisujú dva kľúčové prvky: matica K a vektor skreslenia D. Matica K (Intrinsic Matrix) definuje základnú geometriu kamery bez vplyvu skreslenia. Na interpretáciu vplyvu kopuly je použitý hybridný **šachovnicový marker** pre počítačové videnie, ktorý kombinuje výhody ako sú presné rohy klasických šachovnic a ArUco markerov (unikátne ID), čo umožňuje presnejšiu kalibráciu kamery a odhad 3D pozície aj keď je cieľ čiastočne zakrytý.

$$K = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Matica skreslenia: koeficienty f_x , f_y predstavujú ohniskovú vzdialenosť v pixeloch, c_x , c_y predstavujú optický stred, t.j. bod na snímači, cez ktorý prechádza optická os kolmo na rovinu čipu.



Šachovnicový marker ChArUco (Chessboard ArUco), ktorý je použitý na určenie vplyvu kopuly (skreslenie koeficientov ohniskovej vzdialenosti f_x , f_y)

Využitie metód strojového učenia

Vzhľadom na rôzne typy spracovávaných dát (obrazové, vektory-meteorologické dáta, ich postupnosti a fúzie) a súčasné poznatky budú ako vhodné modely použité rôzne typy neurónových sietí, resp. ich kombinácie. V oblasti spracovania obrázkov to budú konvolučné siete a transformery (visual), pre spracovanie vektorových resp. fúziou príznakov budú použité siete typu MLP. Pri spracovaní postupnosti sa uvažuje nad rekurentnými sieťami typu LSTM resp. GRU.

Podakovanie

Autori deklarujú, že výskum je podporený projektom Agencie na podporu výskumu a vývoja, APVV-24-0392, Krátkodobá predikcia solárneho žiarenia z pozorovania oblohy a meteorologických dát. Ďakujeme za podporu a pomoc aj našim kolegom, menovite Tiborovi Csörgeimu z SHMÚ.

Literatúra

Nipen, N. T., Haugen, H. H., Ingstad, M. S., Nordhagen, E. M., Salihi, A. F. S., Tedesco, P., Ambjarn Seierstad, I. A., Kristiansen, J., Lang, S., Alexe, M., Dramsch, J., Raoult, B., Mertes, G., Chantray, M., 2025: Regional data-driven weather modeling with a global stretched-grid, *Artif. i. earth syst.*, <https://doi.org/10.1176/AIES-D-25-0001.1>

Paziar, A., Šavil, M., Mlakar, P., Gabrovšek, B., Šmerkol, P., Muri, B., Meršič, J., and Bezec, E.: Nowcasting of downward surface shortwave flux over Slovenia by utilizing LSA SAF satellite products, EMS Annual Meeting 2025, Ljubljana, Slovenia, 7–12 Sep 2025, EMS2025-185, <https://doi.org/10.5194/ems2025-185>, 2025.

Simon, A., Belluš, M., Čattošová, K., Derková, M., Dian, M., Imrišek, M., Kaňák, J., Méri, L., Neštiak, M., Vívoda, J., 2021: Numerical simulations of June 7, 2020 convective precipitation over Slovakia using deterministic, probabilistic, and convection-permitting approaches. *Idojaras* 2021, 125, 571–607.

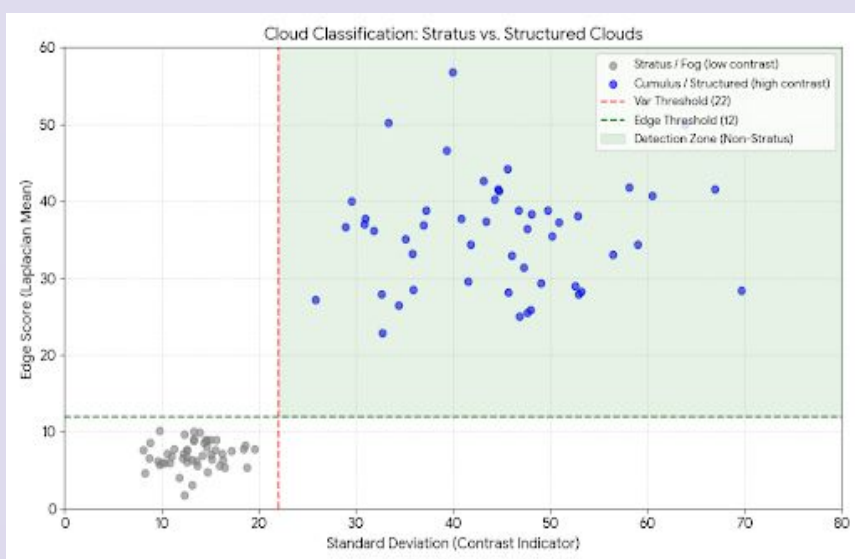
Termonia, P. et al., 2018: The ALADIN System and Its Canonical Model Configurations AROME CY41T1 and ALARO CY40T1. *GEOSCIENTIFIC MODEL DEVELOPMENT*, vol. 11, no. 1., pp. 257–81, doi:10.5194/gmd-11-257-2018.



Analýza a klasifikácia obrazu z Allsky kamery v reálnom čase na identifikáciu dynamických zmien oblohy.

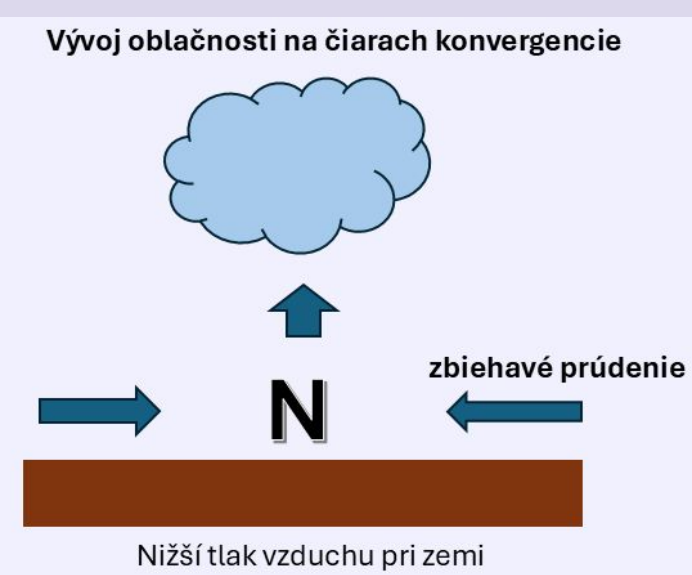
- Pokročilá analýza textúry
- Optimalizácia pre Edge Computing
- Adaptívne maskovanie

Využitie Laplaciánových filtrov a štatistickej variácie na odlišenie štruktúrovanej (kopovitej) oblačnosti od homogénnych vrstiev typu stratus a hmly.

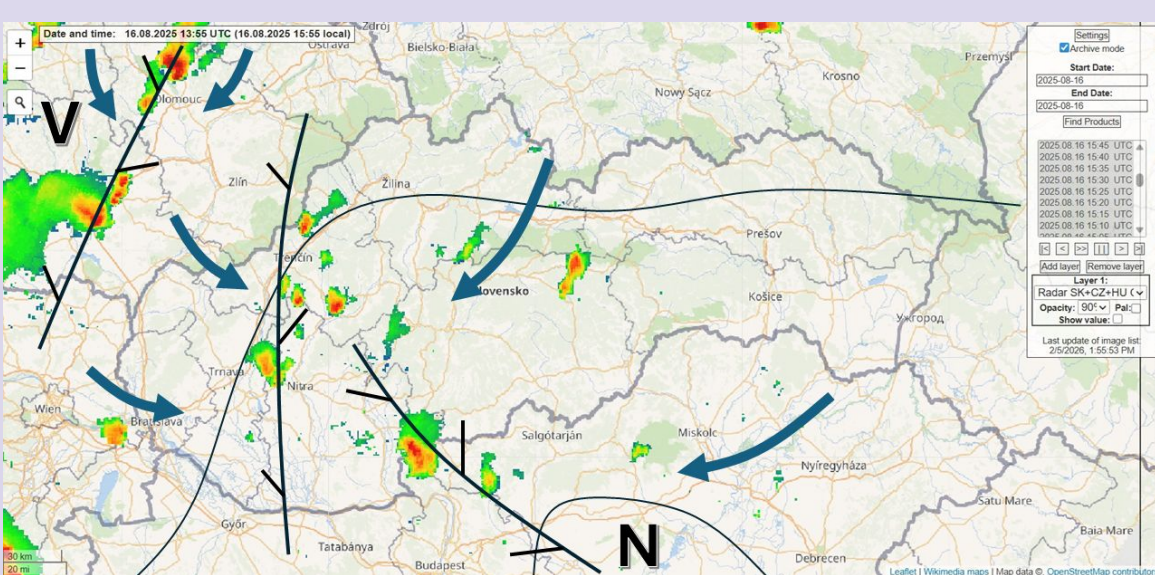


Konceptuálne modely vývoja oblačnosti

Pre efektívne tréningovanie AI/ML metód s komplementárnymi údajmi je dôležité vybrať vhodné meteorologické parametre, ktoré môžu popisovať tvorbu oblačnosti (najmä veľmi rýchlo sa vyvíjajúcich oblakov typu cumulus, v letnom období). Okrem parametrov vlhkosti a stability ovzdušia (napr. vertikálny gradient teploty) je podstatné určiť miesta iniciácie novej oblačnosti a podpory výstupných pohybov. Tieto sú z veľkej časti dané typom prúdenia (konvergencia, divergencia), tvarom poľa tlaku vzduchu a orografiou.



Konceptuálny model iniciácie tvorby kopovitej oblačnosti v dôsledku zbiehavosti prúdenia



Mezosynoptická analýza situácie zo 16.8.2025 o 14 UTC. Vývoj kopovitej oblačnosti (búrok) prebiehal prevažne pozdĺž čiar konvergenzie prúdenia, v brzdách nižšieho tlaku vzduchu.

Perspektíva do budúcnosti

Súčasný AI/ML predpovede počasia v mezomierke (napr. Nipen et al., 2025) používajú veľmi komplexný prístup a výpočtovo náročné tréningovanie s veľkým množstvom (87 až 108) parametrov. V projekte hľadáme metódy, ktoré by aj s menším počtom vstupných údajov dokázali produkovať dostatočne presné predpovede globálneho žiarenia pre malé fotovoltaické elektrárne. Pre užívateľa budú výhodou lacné a ľahko dostupné zdroje (kamera+raspberry pi počítač) a relatívne malé objemy dát, ktoré sa dajú rýchlo stiahnuť a spracovať.