

Meteorologické zprávy

ROČNÍK
73–2020

3

- 65 Dlouhodobé charakteristiky konvektivních bouří z pohledu radarových dat a dat detekce blesků**
Petr Novák – Hana Kyznarová
- 78 Zpřesnění operativních map PM_{10} zahrnutím výstupu modelu CAMx, dalších doplňkových dat a využitím krigingu**
Jana Ďoubalová – Ondřej Vlček – Jan Horálek
- 87 Zpráva Světové meteorologické organizace o stavu počasí a podnebí ve světě v roce 2019 – část I.**

Meteorological
Bulletin

Český
hydrometeorologický
ústav



65 Long-term characteristics of convective storms in terms of radar data and lightning detection data

Petr Novák – Hana Kyznarová

78 Improvement of near real-time PM₁₀ maps through inclusion of CAMx model output, other supplementary data, and the use of kriging

Jana Ďoubalová – Ondřej Vlček – Jan Horálek

87 WMO Statement on the Status of the Global Climate in 2019 – part I.

Rozšiřuje – Free booking:

Český hydrometeorologický ústav, tiskové a informační oddělení
Na Šabatce 2050/17, 143 06 Praha 4-Komořany, tel.: 244 032 722, 244 032 724

Czech Hydrometeorological Institute, Press and Information Department
Na Šabatce 2050/17, 143 06 Praha 4, Czech Republic, Phones: (+420) 244 032 722, (+420) 244 032 724

nakladatelstvi@chmi.cz

casmz.chmi.cz

Dlouhodobé charakteristiky konvektivních bouří z pohledu radarových dat a dat detekce blesků

Long-term characteristics of convective storms in terms of radar data and lightning detection data

Petr Novák, Hana Kyznarová

Český hydrometeorologický ústav
oddělení radarové
Generála Šišky 942, 143 00 Praha 4
✉ petr.novak@chmi.cz
✉ hana.kyznarova@chmi.cz

Since the 90's, the Czech Hydrometeorological Institute (CHMI) has been operating digital Czech weather radar network (CZRAD) covering whole area of the Czech Republic and its vicinity. Additionally, the CHMI has been utilizing lightning data from the Central European Lightning Detection Network (CELDN) over the same domain. Data from fifteen-year period of 2002–2016 have roughly the same quality, therefore this time period was used to calculate long-term spatial and temporal characteristics of various weather radar and lightning products.

The paper presents these long-term characteristics which contribute to better understanding of convective storms climatology over the Czech Republic territory. These characteristics also reveal many quality issues of both weather radar and lightning detection data. They could be very useful for assessing various decision thresholds of convective storms severity. These findings are valuable for human forecasters as well as for automatic nowcasting systems. The paper also discusses relation between radar and lightning characteristics and presents long-term characteristics of convective storms identified by the cell-oriented CELLTRACK nowcasting algorithm.

KLÍČOVÁ SLOVA: detekce dálková – radiolokátor meteorologický – detekce blesků – nowcasting – klimatologie – CZRAD – Česká republika

KEYWORDS: remote sensing – weather radar – lightning detection – nowcasting – climatology – CZRAD – Czech Republic

1. Úvod

Meteorologické radiolokátory a systémy detekce blesků jsou jedny z nejdůležitějších nástrojů pro distanční detekci a sledování konvektivních bouří. Data z těchto systémů jsou využívána na předpovědních pracovištích Českého hydrometeorologického ústavu (ČHMÚ) a jsou i základem specializovaných nowcastingových metod např. COTREC (Novák 2007), CELLTRACK

(Kyznarová, Novák 2009) nebo JSWarnView (Novák et al. 2010). ČHMÚ provozuje meteorologické radary již od počátku sedmdesátých let (Strachota 1981, 1983). K modernizaci na digitální dopplerovské radary a s tím spojenému digitálnímu zpracování radarových dat došlo v letech devadesátých (Havránek, Kráčmar 1996; Kráčmar 2000). Od konce devadesátých let začal ČHMÚ využívat také data ze středoevropské bleskové detekční sítě CELDN (Novák, Kyznarová 2011), která je součástí evropské detekční sítě EUCLID (Schulz et al. 2016). Tato data byla využívána do konce roku 2016, od roku 2017 pak byla nahrazena daty z konkurenční sítě LINET (Betz et al. 2008).

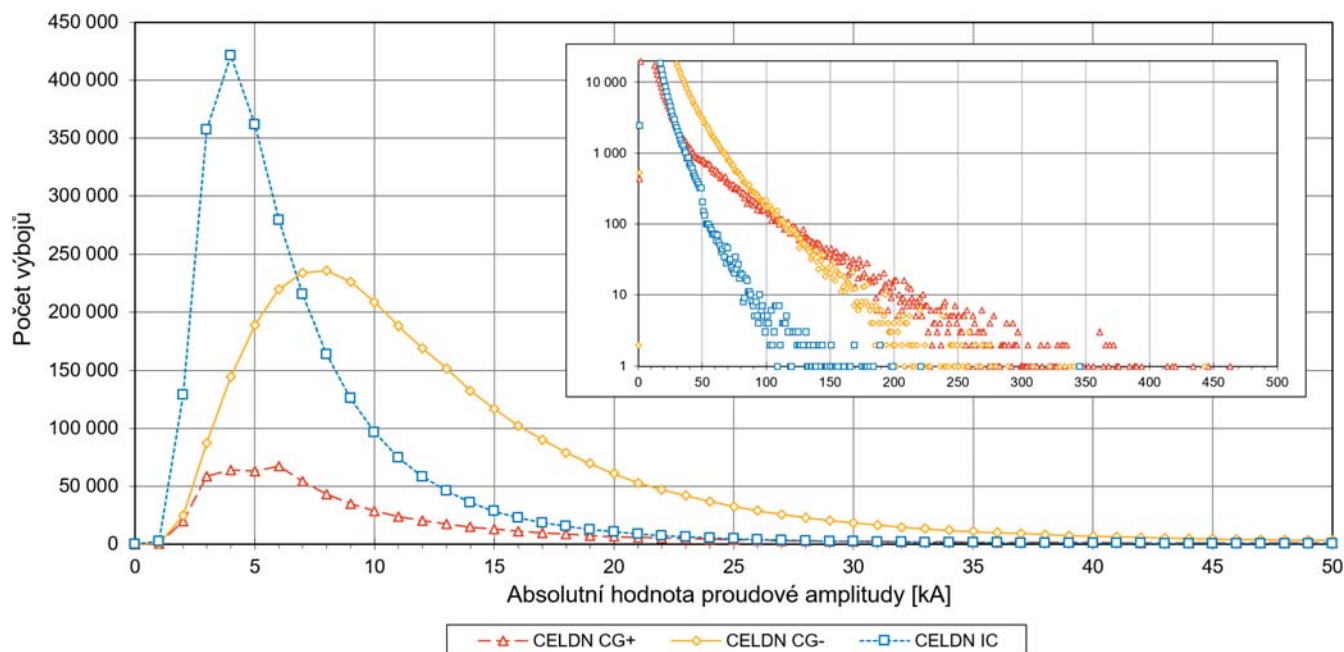
Radarová data i data detekce blesků pokrývají celé území Česka a jeho blízké okolí. V ČHMÚ je k dispozici archiv digitálních radarových i bleskových dat od počátku jejich měření resp. využívání. Přestože kvalita obou typů dat se v čase zlepšovala – a tedy měnila – a ani plošné pokrytí není optimálně homogenní, je možné při opatrném a pečlivém postupu získat z těchto dat zajímavé dlouhodobé charakteristiky. V minulosti již byly zpracovány dlouhodobé charakteristiky bleskové aktivity ze sítě CELDN za období 2002–2008 (Novák et al. 2009; Novák, Kyznarová 2011) a též porovnána data detekce blesků ze sítě CELDN a LINET za celou konvektivní sezónu 2010 (Novák 2012).

Tento článek představuje aktualizované dlouhodobé charakteristiky bleskové aktivity pro patnáctileté období 2002–2016 a rozšiřuje je o některé další, ale zejména přidává zcela nové odvozené z archivu radarových dat. Nově jsou též představeny charakteristiky konvektivních buněk identifikovaných metodou CELLTRACK.

2. Použitá data

2.1 Data detekce blesků

Pro výpočet dlouhodobých charakteristik bylo třeba použít období, po které byla detekce blesků a radarová měření co nejhomogennější. V tomto směru byla limitující zejména data detekce blesků. Jak je detailněji diskutováno v práci Nováka a Kyznarové (2011), v ČHMÚ byla využívána data ze sítě detekce blesků CELDN již od roku 1999. Do roku 2001 však měla tato data nedostatečnou kvalitu zejména vlivem chybějícího detekčního čidla v oblasti Čech a častým výpadkům dat. Za počátek vyhodnocovaného období tak byl stanoven rok 2002. Konec zpracovaného období byl limitován změnou poskytovatele dat na konci roku 2017. Data ze sítě CELDN jsou v ČHMÚ dostupná do konce září 2017, poté jsou k dispozici data ze sítě LINET. Jak bylo ukázáno ve studii Nováka (2012), data z obou systémů jsou sice kompatibilní a kvalitativně shodná, kvantitativně však systém LINET detekuje větší množství zejména slabších výbojů. Pokud by tedy měla být použita i data LINET, musela by se provést jejich homogenizace. S ohledem na znač-



Obr. 1. Rozdělení četností proudových amplitud bleskových výbojů CG–, CG+ a IC v intervalu 0 až 50 kA detekovaných sítí CELDN na území Česka v období 2002–2016. Třídící intervaly jsou široké 1 kA. Nezobrazených výbojů s proudovou amplitudou nad 50 kA bylo zaznamenáno 74 791, což představuje 1,16 % ze všech výbojů. Maximální zaznamenaná proudová amplituda byla 463 kA pro výboj CG+. Vložený menší graf zobrazuje rozdělení četností proudových amplitud bleskových výbojů v intervalu 0 až 500 kA a omezeném rozsahu četností 1 až 20 000 výbojů.

Fig. 1. Distribution of peak currents in 0–50 kA interval of CG–, CG+ and IC strokes detected by the CELDN network over the Czech Republic during the 2002–2016 period. Distribution bin size is 1 kA. 74 751 strokes with peak current above 50 kA were detected representing 1.16% of all strokes. Maximum recorded peak current was 463 kA for CG+ stroke. Inserted smaller graph shows frequency distribution of peak currents in 0–500 kA interval, frequency interval is limited to 1–20 000 strokes.

nou náročnost této homogenizace a pouze malé časové rozšíření zpracovávaného období byl za konec období zvolen rok 2016, kdy byla ještě po celý rok dostupná data ze sítě CELDN.

Pro každý bleskový výboj detekovaný sítí CELDN je k dispozici informace o přesném čase, poloze, typu (zda se jedná o výboj do země nebo mezioblačný), proudové amplitudě a pro bleskové výboje do země též informace o elektrické polaritě. V období 2002–2016 bylo na území Česka detekováno sítí CELDN celkem 6 449 532 bleskových výbojů, z nich bylo 61 % výbojů do země (CG) a 39 % výbojů mezioblačných (IC). Z výbojů do země bylo 83 % záporných (CG–) a 17 % kladných (CG+) což odpovídá výsledkům získaným jinými autory (Rakov, Uman 2003). Jak je zobrazeno na obr. 1, proudová amplituda detekovaných výbojů se nejčastěji pohybuje od jednotek po desítky kA. Výbojů s amplitudou řádu stovek kA je pouze 0,16 %. Maximální zaznamenaná proudová amplituda byla 463 kA pro kladný výboj do země. Rozložení proudových amplitud s nízkou četností je zobrazeno na menším vloženém grafu na obr. 1. Tento graf ukazuje, že zatímco bleskové výboje do země s menší proudovou amplitudou jsou častěji záporné, tak silnější bleskové výboje s proudovou amplitudou nad cca 125 kA jsou častěji kladné. Tato pozorování jsou též v souladu s výsledky jiných autorů, kteří uvádějí, že medián proudové amplitudy pro kladné bleskové výboje do země je větší než pro výboje záporné (Rakov, Uman 2003; Schulz et al. 2016).

Časově a prostorově blízké bleskové výboje byly následně sloučeny do jednotlivých blesků algoritmem podle Cumminse et al. (1998) a Schulze et al. (2005). Podle tohoto algoritmu bylo 3 909 118 výbojů do země sloučeno do 1 909 368 blesků do země. Průměrná multiplicita blesků byla 2,05. Pouze z jednoho výboje se skládalo 59,2 % blesků, 18 % blesků se skládalo ze dvou výbojů a 8,6 % blesků ze tří výbojů. Nejvyšší multipli-

cita byla nalezena pro jeden blesk, který se skládal z 35 výbojů. V rámci analýzy byly vyhodnocovány primární blesky do země. Charakteristiky mezioblačných bleskových výbojů byly sice také spočítány, nebyly však detailněji analyzovány, protože kvalita detekce mezioblačných výbojů se v průběhu zkoumaného časového období v souvislosti s modernizací detekční sítě výrazně zlepšovala a jejich časová řada je tak značně nehomogenní. Dále v textu jsou zpracovávány charakteristiky blesků i bleskových výbojů v závislosti na tom, co je v daném kontextu vhodnější. V textu je vždy uvedeno, zda se jedná o blesky či bleskové výboje.

2.2 Radarová data

Ve zvoleném období 2002–2016 byla radarová měření prováděna moderními digitálními dopplerovskými radary české radiolokační sítě CZRAD měřícími v pásmu C (Havránek, Kráčmar 1996; Kráčmar 2000). Jednalo se o radary od různých výrobců, navíc v roce 2015 došlo k výměně za modernější polarimetrické radary (Novák, Kyznarová 2016). U všech radarů však měření odrazivosti, využívané v této studii, probíhalo obdobně. Data z jednotlivých radarů by se tak měla lišit pouze minimálně, částečně vlivem některých odlišností v metodice kalibrace a částečně v mírně odlišné efektivitě eliminace nemeteorologických cílů. Větší vliv než odlišnosti mezi jednotlivými radary má na radarová měření vzdálenost od radarového stanoviště. Objemová 3D radarová data se začala archivovat na konci 90. let. Z celého analyzovaného období tak byla k dispozici objemová data z jednotlivých radarů, z kterých byly pro potřeby této studie spočítány a následně sloučeny do jedné informace pokrývající celé Česko jednotlivé radarové produkty, konkrétně maximální radiolokační odrazivost MAX_Z, radiolokační odrazivost v konstantních výškových hladinách CAPPI, výška

radarového echa ETOP (maximální výška radarového echa s odrazivostí alespoň 4 dBZ), vertikálně integrovaný obsah vody VIL, hustota VIL (Amburn, Wolf 1997), pravděpodobnost krup POH (Waldvogel et al. 1979), pravděpodobnost nebezpečných krup POSH a maximální odhadovaná velikost krup MEHS (Witt et al. 1998). Slučování produktů z jednotlivých radarů bylo provedeno tak, že v bodech, kde byla dostupná informace z více radarů, byla do sloučeného produktu zanesena největší naměřená hodnota. Prostorové rozlišení všech radarových produktů bylo 1 × 1 km, území Česka bylo pokryto 79 724 gridovými body. V průběhu celého období byla dostupnost dat z jednotlivých radarů vyšší než 95 %.

V období 2002–2016 bylo na území Česka detekováno celkem 27 506 198 gridových bodů, kde maximální radiolokační odrazivost MAX_Z dosáhla nebo překročila 44 dBZ, což je limitní hodnota pro detekci jader odrazivosti reprezentujících konvektivní buňky v nowcastingové metodě CELLTRACK (Kyznarová, Novák 2008; Kyznarová, Novák 2009) a 773 201 gridových bodů, kde pravděpodobnost krup POH dosáhla 100 %.

2.3 Staniční pozorování

Některé bleskové a radarové charakteristiky byly též porovnány s manuálním pozorováním na meteorologických stanicích. Pro tyto účely byly z databáze CLIDATA (Tolasz 2008) vybrány záznamy o pozorování bouřkových jevů. Z databáze byly vybrány záznamy všech pozorovaných bouřek, blízkých (BB – do 3 km), vzdálených (BV – mezi 3 a 5 km), i velmi vzdálených (BW – nad 5 km), přičemž za zkoumané období 2002–2016 se jednalo o 261 468 záznamů. V rámci provedeného zpracování byly u počtů staničních záznamů vždy uvažovány bouřky všech typů dohromady. Během let docházelo k postupnému snižování počtu stanic dodávajících do databáze CLIDATA pozorování jevů ze 797 na počátku období až po 681 ke konci období. Pro zajištění homogenity počtu staničních pozorování při analýze časového vývoje konvektivní aktivity (obr. 2) byly měsíční počty záznamů bouřek na stanicích vynásobeny korekčními koeficienty získanými jako podíl průměrného počtu dostupných stanic (747,9) a počtu stanic dostupných v daném měsíci.

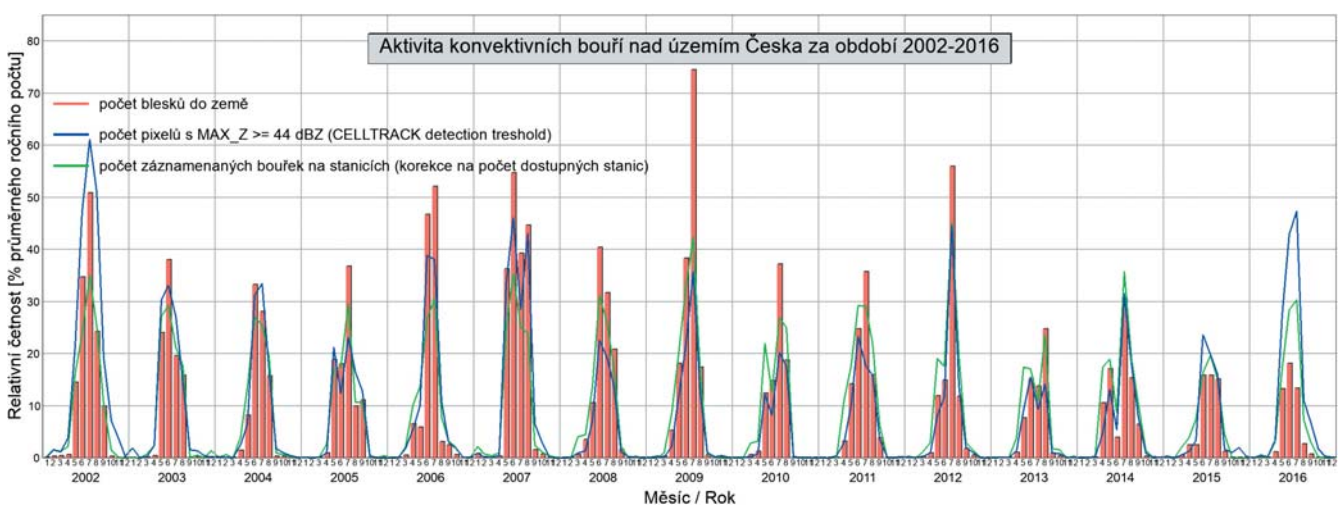
3. Dlouhodobé charakteristiky

Bouřková oblačnost je prostorově i časově velmi proměnlivá, což dobře ilustrují obr. 2 a 3.

Obr. 2 ilustruje časový vývoj konvektivní aktivity na území Česka, jsou zde vyznačeny měsíční úhrny počtu blesků do země a k nim odpovídající měsíční počty gridových bodů s MAX_Z ≥ 44 dBZ a počty záznamů bouřek na stanicích. Z obrázku je zřejmé, že jednotlivé typy informací jsou v poměrně dobrém souladu, i když ne úplném. Dobře se shodují např. roční chody jednotlivých typů dat, tedy např. identifikace měsíce s největší aktivitou. Rozdíly je možné pozorovat při porovnání hodnot jednotlivých charakteristik v různých letech, např. v posledních dvou letech zkoumaného období se vyskytlo relativně méně blesků v porovnání s počtem bouřek zaznamenaných na stanicích a s počtem gridových bodů s maximální radiolokační odrazivostí MAX_Z ≥ 44 dBZ. V těchto letech byla zřejmě blesková aktivita v konvektivních bouřích méně intenzivní.

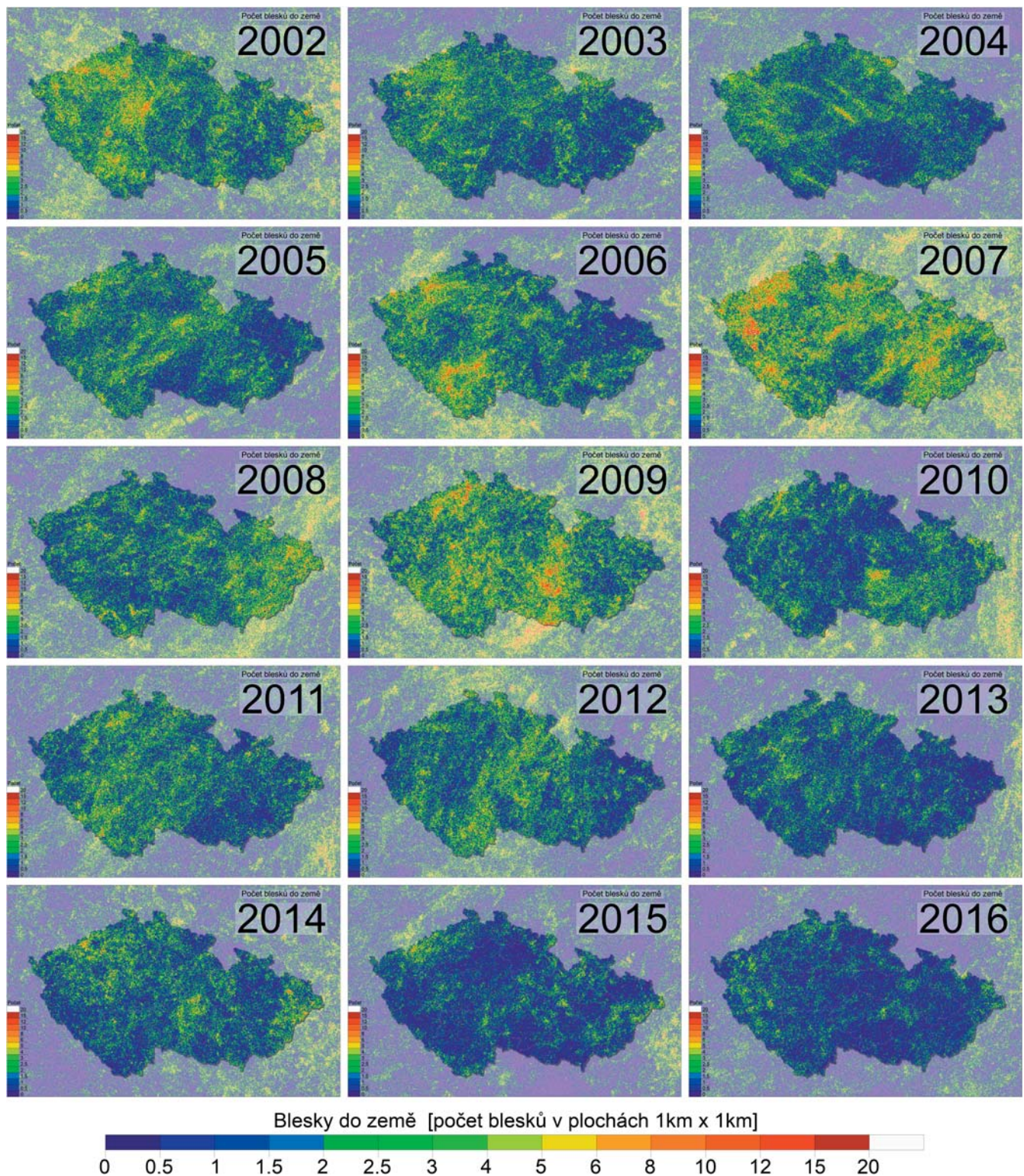
Jednotlivé části obr. 3 zobrazují plošné rozložení blesků do země v letech 2002 až 2016. Vedle velké prostorové proměnlivosti je i zde vidět velká meziroční proměnlivost. Na blesky do země byly nejbohatší roky 2007 s 226 524 blesky, 2009 s 195 892 blesky a 2002 s 171 998 blesky. Nejméně blesků do země se vyskytlo v letech 2016 (62 019 blesků), 2015 (67 356 blesků) a 2013 (80 402 blesků).

V bleskově intenzivních bouřích se vyskytuje značné množství blesků, které mohou významně ovlivnit průměrné plošné rozložení blesků i na několik let. Velmi vysoké počty blesků v nejsilnějších bouřích jsou dobře patrné, pokud se podíváme na počty dnů s konvektivní aktivitou (v celé této práci je za den bráno období 00:00:00 UTC–23:59:59 UTC). Počet blesků do země během pěti dní s nejvyšším počtem zaznamenaných blesků do země (cca 0,1 % všech dní) představuje 5,4 % jejich celkového počtu. Počet blesků do země během 55 bleskově nejintenzivnějších dní (cca 1 % všech dní) představuje 35,3 % jejich celkového počtu. V případě radarových produktů je množství



Obr. 2 Relativní četnosti měsíčních úhrnů blesků do země, počtů gridových bodů maximální radiolokační odrazivosti MAX_Z ≥ 44 dBZ a počtů záznamů bouřek na stanicích na území Česka v letech 2002–2016. Průměrný roční počet odpovídá: 127 291 bleskům do země, 1 833 747 gridovým bodům s MAX_Z ≥ 44 dBZ (0,022 % ze všech gridových bodů) a 17 368 záznamům s bouřkou na stanicích.

Fig. 2. Relative frequencies of monthly amounts of CG flashes (red bars), radar grid points of maximum reflectivity MAX_Z ≥ 44 dBZ (blue line) and storm records from meteorological stations (green line) on the Czech Republic territory during 2002–2006 period. Mean annual counts correspond to: 127 291 CG flashes, 1 833 747 grid points where MAX_Z ≥ 44 dBZ (0.022% of all grid points) and 17 368 storm records from meteorological stations.



Obr. 3 Plošné rozložení ročního počtu blesků do země v jednotlivých letech v období 2002–2016.

Fig. 3. Spatial distribution of the annual amount of cloud to ground flashes in individual years during 2002–2016 period.

zaznamenaných gridových bodů během dní s jejich nejvyššími počty o něco méně výrazné pro data maximálních odrazivostí, naopak ještě výraznější je pro pravděpodobnosti krup. Počet gridových bodů s $MAX_Z \geq 44$ dBZ během 5 nejintenzivnějších dní představuje 4,5 % všech gridových bodů s $MAX_Z \geq 44$ dBZ a během 55 nejintenzivnějších dní 24,6 %. Počet gridových bodů s $POH = 100$ % během 5 nejintenzivnějších dní představuje 14,1 % všech gridových bodů s $POH = 100$ % a během 55 nejintenzivnějších dní 62,6 %.

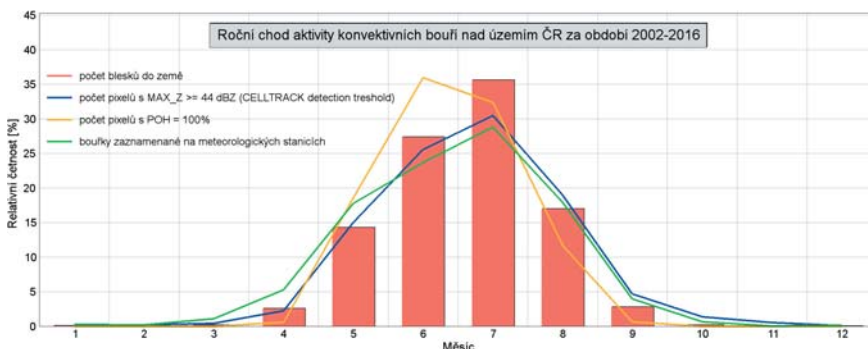
Nejintenzivnější blesková aktivita (největší počet blesků do země) ve sledovaném období v Česku byla ve dnech 21. 6. 2007 (27 175 blesků do země), 13. 7. 2002 (20 654 blesků do země) a 17. 7. 2010 (18 891 blesků do země). Dne 21. 6. 2007 byl zaznamenán i druhý nejvyšší počet gridových bodů s $MAX_Z \geq 44$ (271 280 gridových bodů), nejvyšší počet gridových bodů s $POH = 100$ % (26 922) a třetí nejvyšší denní počet záznamů bouřek na stanicích (1 151 záznamů). Nejvyšší počet gridových bodů s $MAX_Z \geq 44$ (278 949 gridových bodů) se vy-

skytl 13. 7. 2002, ve stejný den se vyskytl i nejvyšší denní počet záznamů bouřek na stanicích (1 185 záznamů). Pokud však provedeme u stanic korekci na počet stanic zaznamenávajících jevy v daném měsíci, je dnem s nejvyšším počtem záznamů 4. 8. 2013 (1 143 záznamů).

3.1 Časové charakteristiky

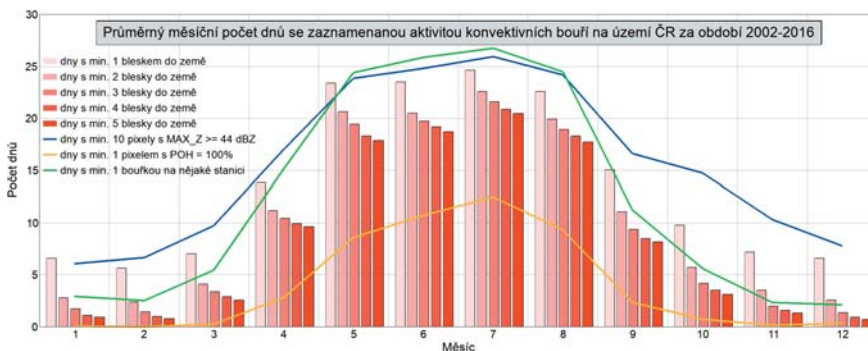
Časovou proměnlivost aktivity konvektivních bouří dobře popisují data detekce blesků i radarové produkty.

Obr. 4 zobrazuje roční chod průměrné relativní měsíční četnosti blesků do země, počtu gridových bodů s $MAX_Z \geq 44$ dBZ a $POH = 100\%$ a počtu dnů s bouřkou zaznamenané na meteorologických stanicích. Maximum bleskové aktivity je dosaženo v červenci a o něco nižší hodnoty poté v červnu. V květnu a srpnu je počet detekovaných blesků zhruba poloviční. V dubnu a září pak počet blesků klesne přibližně na desetinu červnových a červencových hodnot. Roční chody počtu gridových bodů s $MAX_Z \geq 44$ dBZ a počty bouřkových záznamů ze stanic jsou si velmi podobné. V porovnání s bleskovou aktivitou mají shodně své maximum v červenci, maximum však není tak ostré. Nejostřejší roční chod má počet gridových bodů s $POH = 100\%$, na rozdíl od ostatních dat má své maximum již v červnu.



Obr. 4 Roční chod průměrné relativní měsíční četnosti blesků do země, počtu gridových bodů s $MAX_Z \geq 44$ dBZ a $POH = 100\%$ a počtu bouřek zaznamenaných na meteorologických stanicích na území Česka. Měsíční četnosti jsou průměrované za období 2002–2016.

Fig. 4. Distribution of average relative monthly number of cloud to ground flashes (red bars), radar $MAX_Z \geq 44$ dBZ grid points (blue line), radar $POH = 100\%$ grid points (yellow line) and storm records from meteorological stations (green line) on the Czech Republic territory for 2002–2016 period.



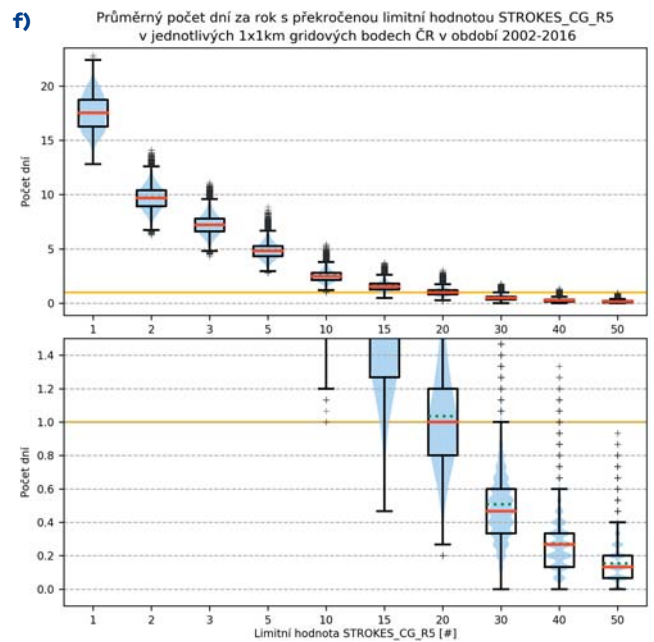
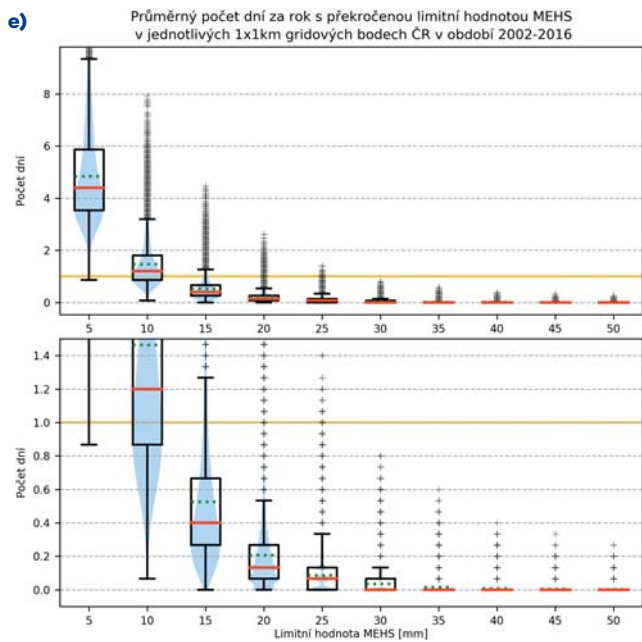
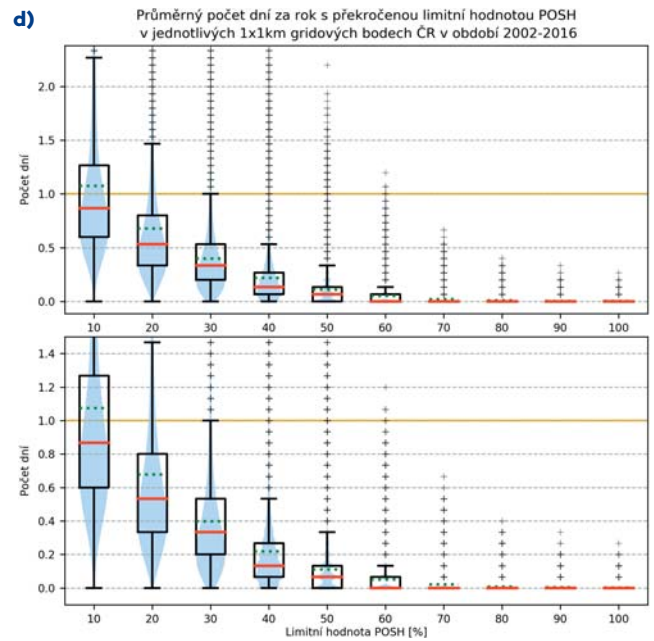
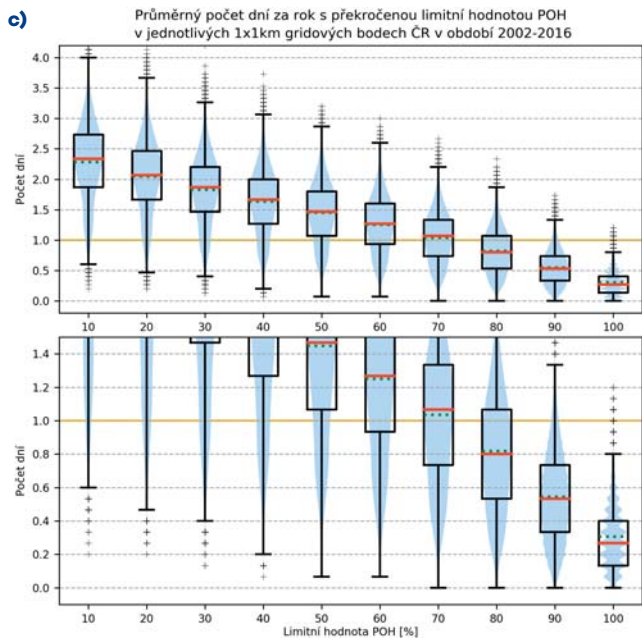
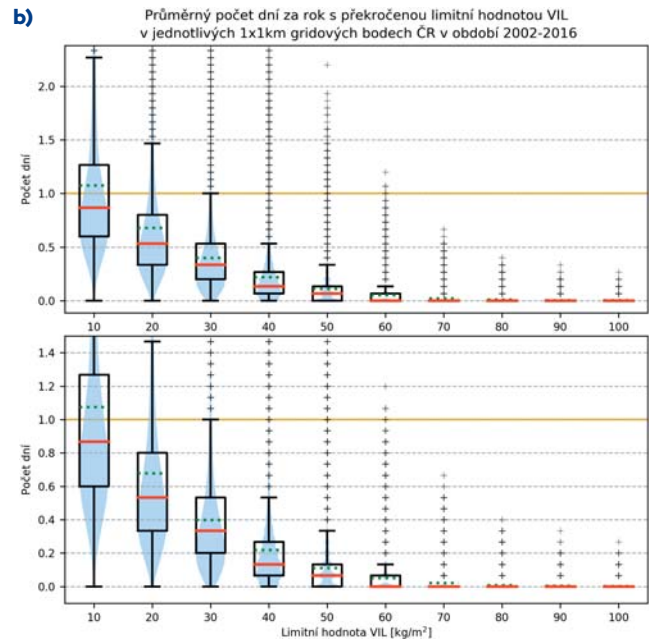
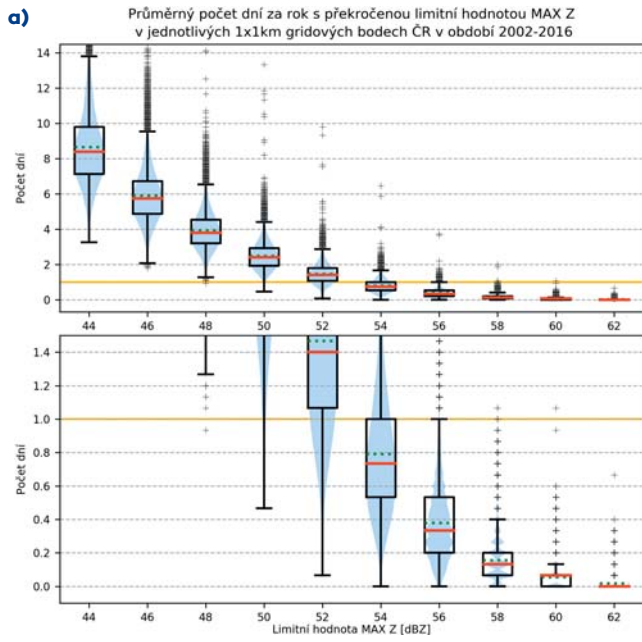
Obr. 5 Roční chod průměrného měsíčního počtu dnů s daným množstvím zaznamenaných blesků do země, počtem gridových bodů s $MAX_Z \geq 44$ dBZ a $POH = 100\%$ a počtem bouřek zaznamenaných na meteorologických stanicích na území Česka. Měsíční počty dnů jsou průměrované za období 2002–2016.

Fig. 5. Monthly distribution of average number of days with occurrence of cloud to ground flashes (red bars), radar $MAX_Z \geq 44$ dBZ (blue line), radar $POH = 100\%$ (yellow line) and storm records from meteorological stations (green line) on the Czech Republic territory for 2002–2016 period.

Zkoumán byl též roční chod průměrného měsíčního počtu dnů se zaznamenanou aktivitou konvektivních bouří na území Česka. Tento roční chod je zpracován na obr. 5. U počtu dnů se zaznamenanými blesky do země je zobrazeno více možností lišících se nutným minimálním počtem zaznamenaných blesků na území Česka v daném dnu. Přestože se nejedná o častý jev, je možné, že síť detekce blesků vyhodnotí falešný bleskový výboj. Z obrázku je vidět, že počet falešných blesků obvykle nepřesahuje 1 blesk za den. Již graf pro dny s výskytem minimálně dvou blesků do země dobře odpovídá počtu dnů se zaznamenanými bouřkami na meteorologických stanicích. V jarních, podzimních a zimních měsících je shoda velmi dobrá. V letních měsících je o cca 4–5 vyšší počet dnů s bouřkami zaznamenanými na meteorologických stanicích. To by mohlo být způsobeno tím, že na stanicích v příhraničních oblastech může být teoreticky zaznamenána i bouřka mimo území Česka, zatímco detekované blesky byly brány pouze z území Česka. V porovnání s ročním chodem aktivity konvektivních bouří na obr. 4 je roční chod počtu dnů s konvektivními bouřkami méně ostrý. V letních měsících se tedy zvyšuje výrazněji intenzita konvektivních bouří než jejich četnost. Počty dnů s pravděpodobností krup $POH = 100\%$ jsou dle očekávání obecně nižší, ovšem i u nich je pozorována menší ostrost ročního chodu než u její intenzity. Všechny sledované charakteristiky mají své maximum v červenci, červnové hodnoty jsou však velmi podobné a příliš se neliší ani květnové a srpnové hodnoty.

Průměrný počet dní za rok se zaznamenanou aktivitou konvektivních bouří na území Česka je dle staničních záznamů 149 dní, dle detekovaných blesků do země (alespoň 2 blesky do země) 165 dní, dle dat maximální radiolokační odrazivosti (alespoň 10 gridových bodů s $MAX_Z \geq 44$ dBZ) 238 dní a dle radarové pravděpodobnosti krup (alespoň 1 gridový bod s $POH = 100\%$) 48 dní. Tyto uvedené počty dnů se vztahují k výskytu bouřkové aktivity kdekoli na území Česka. Pokud by nás zajímal počet dní s výskytem bouřkové aktivity v nějaké konkrétní lokalitě, tak počet dnů bude logicky výrazně nižší.

Grafy průměrného počtu dní za rok s překročením limitních hodnot vybraných radarových a bleskových produktů v jednotlivých gridových bodech jsou zobrazeny na obr. 6(a)–6(f). U každého produktu bylo pro všechny gridové body na území Česka testováno překročení jednotlivých limitních hodnot v jednotlivých dnech za celé období 2002–2016. Pro každý gridový bod tak bylo určeno, v kolika dnech během těchto 15 let došlo k překročení limitní hodnoty, a z toho již byl jednoduše určen průměrný počet dní za rok. Následně byly do grafů pro jednotlivé limitní hodnoty vykresleny distribuce rozložení průměrných počtů dní z jednotlivých gridových bodů na území Česka formou box plotů. Do jednotlivých box plotů byl navíc modrou barvou do-kreslen tzv. violin plot znázorňující reál-



◀ **Obr. 6 Rozložení průměrných počtů dní za rok s překročením limitních hodnot jednotlivých produktů: maximální radiolokační odrazivosti MAX_Z (a), vertikálně integrovaného množství vody VIL (b), pravděpodobnosti krup POH (c), pravděpodobnosti nebezpečných krup POSH (d), maximální očekávaný průměr krup MEHS (e) a množství zaznamenaných bleskových výbojů v 5 km okolí za 5 minut STROKES_CG_R5 (f). Jednotlivé box ploty zobrazují rozložení průměrného počtů dní, ve kterých došlo k překročení konkrétní limitní hodnoty u konkrétního produktu v jednotlivých gridových bodech na území Česka. Medián je zobrazen plnou červenou čarou, průměr zelenou čárkovanou čarou. Žlutá čára vyznačuje četnost 1 den za rok. Modrou barvou je u jednotlivých box plotů vykreslen tzv. violin plot znázorňující tvar rozložení relativních četností.**

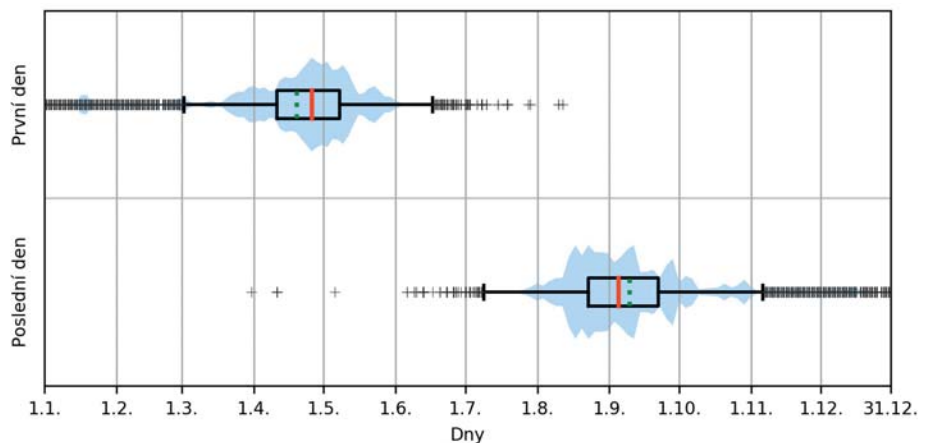
Fig. 6. Distribution of average numbers of days with exceeding of thresholds of individual products: maximum radar reflectivity MAX_Z (a), vertically integrated liquid VIL (b), probability of hail POH (c), probability of severe hail POSH (d), maximum expected hail size MEHS (e) and number of strokes in 5 km vicinity STROKES_CG_R5 (f). Individual box plots show distribution of average numbers of days with exceeding of specific threshold of specific product in individual grid points over the Czech Republic. Median of distribution is shown by solid red line, mean by green dashed line. Yellow line denotes occurrence frequency 1 day per year. So-called violin plot representing relative frequency distribution is depicted using blue colour.

ný tvar rozložení relativních četností. Z těchto grafů lze poté odvodit průměrné četnosti výskytu jednotlivých jevů na území Česka. Z obr. 6(a) tedy např. vidíme, že v libovolně zvoleném gridovém bodě na území Česka se odrazivost $MAX_Z \geq 44$ dBZ (tedy aproximace pro výskyt konvektivních bouří) vyskytuje typicky v cca 8–9 dnech za rok, rozložení není nijak výrazně vychýleno, medián a průměr jsou velmi podobné. Z grafů můžeme také určit, jaká nejvyšší hodnota se v libovolně zvoleném místě na území Česka v průměru vyskytne s určitou frekvencí. Tedy v průměru v jednom dnu za rok se vyskytne maximální odrazivost (MAX_Z) alespoň cca 53 dBZ, vertikálně integrované množství vody (VIL) cca $10 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$, pravděpodobnost krup (POH) cca 70 %, pravděpodobnost nebezpečných krup (POSH) cca 10 %, maximální očekávaný průměr krup (MEHS) mezi 10 a 15 mm nebo se v 5 km okolí za 5 minut vyskytne alespoň cca 20 bleskových výbojů do země (STROKES_CG_R5). Tyto grafy mohou pomoci při objektivním určování kritérií nebezpečnosti detekovaných konvektivních bouří.

Během analýzy ročního chodu dat detekce blesků byl též zkoumán první a poslední den s výskytem bouřkové aktivity. Výsledek zobrazuje obr. 7, kde jsou ze všech 1×1 km gridových bodů na území Česka z jednotlivých let období 2002–2016 vykresleny distribuce prvního a posledního dne v roce s výskytem alespoň 1 bleskového výboje do země v 5 km okolí daného gridového bodu. Z grafu je zřejmé, že bouřková aktivita nejčastěji začíná v druhé polovině dubna a končí na přelomu srpna a září.

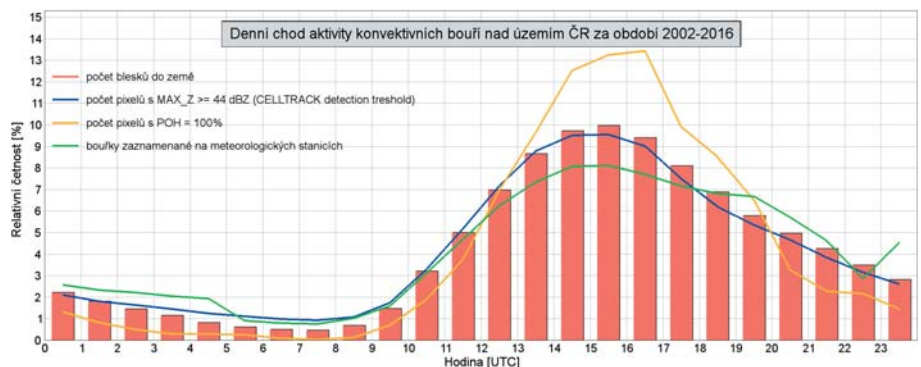
Denní chody průměrné relativní četnosti blesků do země, počtu gridových bodů s $MAX_Z \geq 44$ dBZ a $POH = 100\%$ a bouřek zaznamenaných na meteorologických stanicích na území Česka jsou zobrazeny na obr. 8. Velmi podobně se chová aktivita konvektivních bouří z pohledu detekovaných blesků, maximální odrazivosti i staničních měření, největší aktivita je zaznamenána v od-

poledních hodinách mezi 13:00 a 17:00 UTC s maximem mezi 14:00 a 16:00 UTC. Nejnižší aktivita nastává v ranních hodinách. U pravděpodobnosti krup je denní chod výrazně ostřejší, nižší jsou četnosti v nočních, ranních a dopoledních hodinách, naopak výrazně vyšší četnosti se vyskytují v odpoledních hodinách. Do pozdější doby je posunuto maximum, konkrétně mezi 16:00 a 17:00 UTC.



Obr. 7 První a poslední den v roce s výskytem alespoň 1 bleskového výboje do země v 5 km okolí. Rozdělení sestrojeno pro hodnoty ze všech 1×1 km gridových bodů na území Česka ze všech let v období 2002–2016. Medián je zobrazen plnou červenou čarou, průměr zelenou čárkovanou čarou.

Fig. 7. The first and last day with occurrence of at least 1 CG stroke in 5 km vicinity. Size of grid points is 1×1 km. Distribution for all grid points over the Czech Republic in all years during 2002–2016 period. Median of distribution is shown by solid red line, mean by green dashed line.



Obr. 8 Denní chod průměrné relativní četnosti blesků do země, počtu gridových bodů s $MAX_Z \geq 44$ dBZ a $POH = 100\%$ a počtu bouřek zaznamenaných na meteorologických stanicích na území Česka za období 2002–2016.

Fig. 8. Hourly distribution of average number of cloud to ground flashes (red bars), radar $MAX_Z \geq 44$ dBZ grid points (blue line), radar $POH = 100\%$ grid points (yellow line) and storm records from meteorological stations (green line) on the Czech Republic territory for period 2002–2016.

3.2 Prostorové charakteristiky

Na obr. 9(a) a 9(b) jsou zobrazena plošná rozložení průměrného ročního počtu blesků do země v gridových bodech 1×1 km a 20×20 km. Rozložení v gridových bodech 1×1 km, zobrazené na obr. 9(a), odpovídá zhruba nejdetajnějšímu možnému rozlišení danému prostorovou přesností detekce bleskových výbojů. Jak již bylo detailněji diskutováno v práci Nováka, Kyznarové (2011), je v tomto 1×1 km zobrazení možné identifikovat gridové body s lokálně výrazně zvýšeným průměrným počtem blesků oproti jejich okolí, který je často způsobený výskytem nějaké výškové stavby umístěné ve vyvýšené exponované lokalitě (typicky televizní vysílač na vrcholu vysokého kopce, např. Praždř, Ještěd, Lysá hora a další). Nejčastěji dosahované hustoty blesků do země se pohybují v rozmezí 1–2,2 blesků.km⁻².rok⁻¹, nejvyšší dosažená hodnota je 6,4 blesků.km⁻².rok⁻¹ a nejmenší 0,2 blesků.km⁻².rok⁻¹.

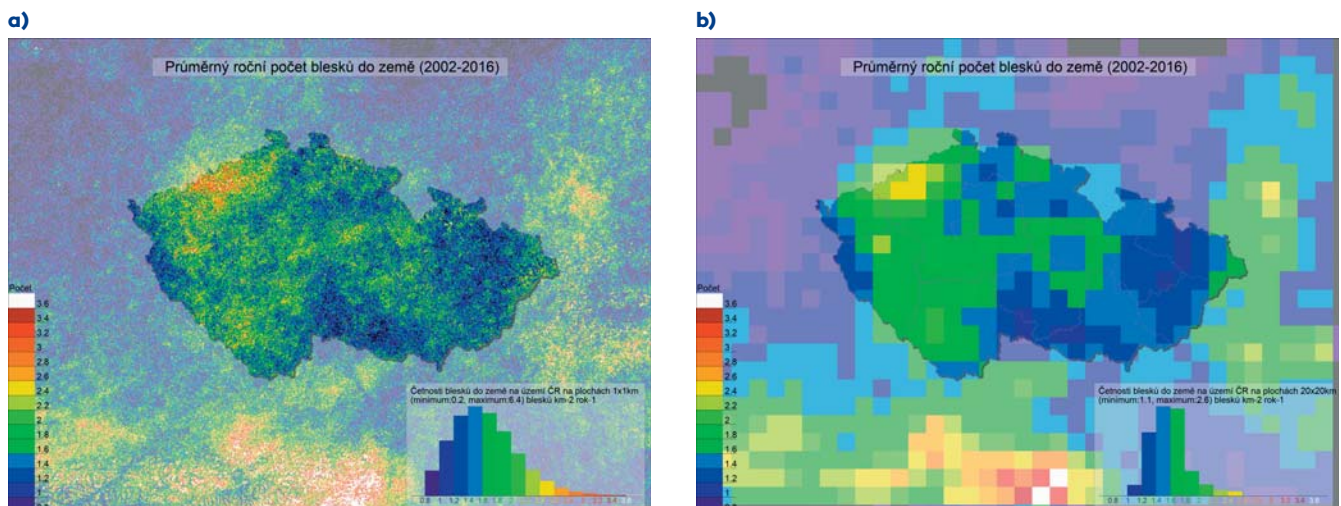
Tato detailní data jsou však plošně velmi proměnlivá a nejsou vhodná pro stanovení vypovídající průměrné hodnoty počtu blesků v dané lokalitě. Pro tyto účely se typicky využívá výpočet průměrné hodnoty z větších ploch. Průměrnou hustotu blesků do země v plochách o velikosti 10×10 km udává např. Tuomi, Mäkelä (2008), kde pro Finsko udává 0,35 blesků.km⁻².rok⁻¹, s maximem 0,56 blesků.km⁻².rok⁻¹. Na plochách stejné velikosti vyhodnotili Taszarek et al. (2015) průměrnou hustotu blesků do země na území Polska, pro které udávají 0,2–3,1 blesků.km⁻².rok⁻¹. Zřejmě častěji se provádějí analýzy v gridu 20×20 km, např. pro Rakousko se uvádí maximální průměrná hustota blesků do země větší než 6 blesků.km⁻².rok⁻¹ (Schulz et al. 2005), pro Rumunsko 3,06 blesků.km⁻².rok⁻¹ (Antonescu, Burcea 2010) a nevyšší hodnota udávaná pro USA je 9 blesků.km⁻².rok⁻¹ v Tampě na Floridě (Orville, Huffines 2001). Z obr. 9(b) je možné odvodit odpovídající hodnoty pro Česko. Nejčastěji se hustota blesků do země pohybuje v rozmezí 1,2–1,8 blesků.km⁻².rok⁻¹, maximum odpovídá 2,6 blesků.km⁻².rok⁻¹ a minimum 1,1 blesků.km⁻².rok⁻¹. Tyto hodnoty jsou v souladu s jinými pozorováními z Evropy uvedenými výše.

Vzhledem k tomu, že intenzita bleskové aktivity v různých bouřích může být velmi rozdílná a bouřkový komplex s intenzivní bleskovou aktivitou může ovlivnit plošné rozložení hustoty blesků v jednotlivých gridových bodech i na velmi dlouhé období, nemusí rozložení hustoty blesků příliš odpovídat tomu, jak vnímáme bouřkovou aktivitu ze zemského povrchu a jak ji

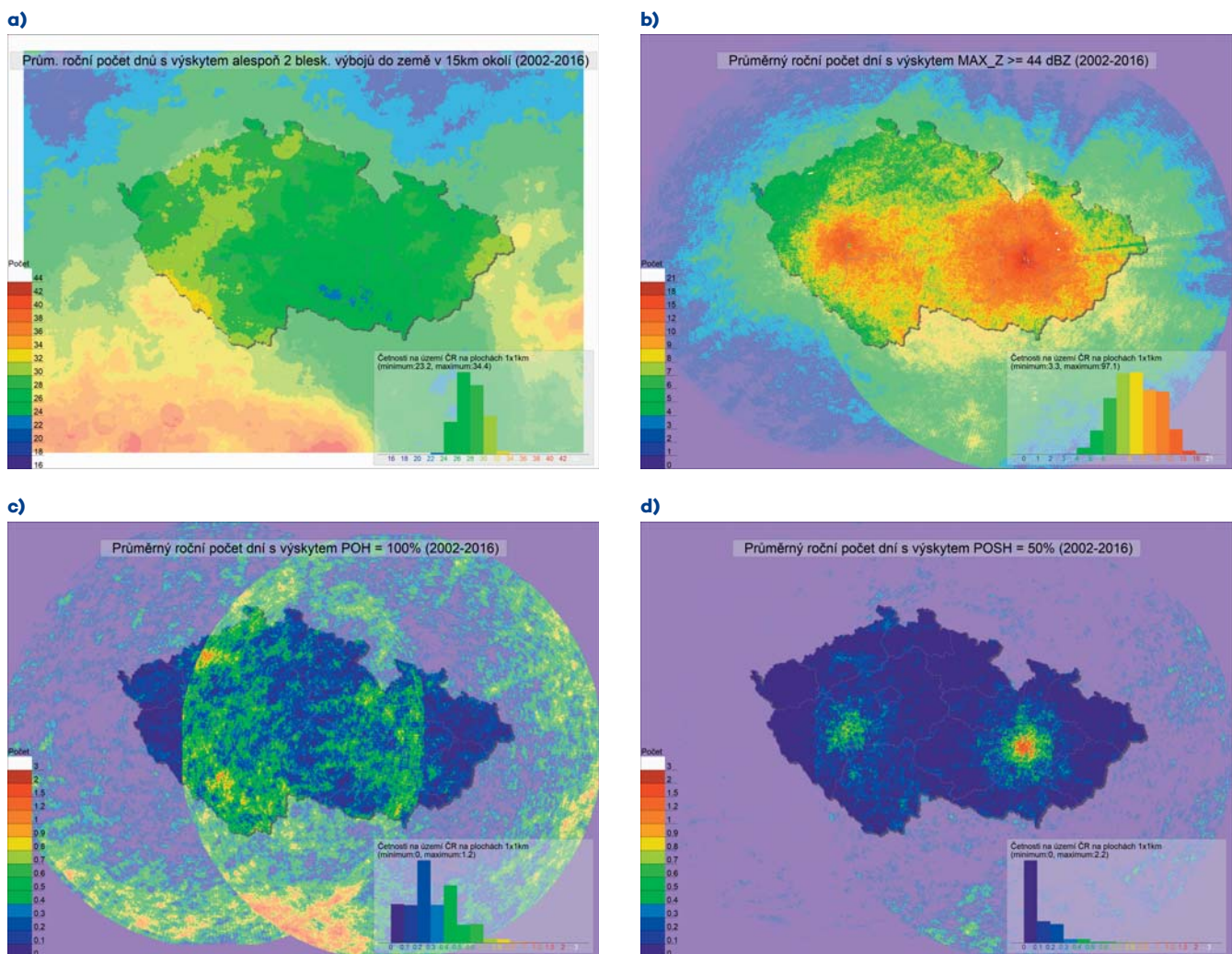
zaznamenáváme při staničních měřeních (Tolasz et al. 2007). Pro takovéto porovnání je lepší použít plošné rozložení průměrného ročního počtu dnů s výskytem blesků v definovaném okolí. Jak již bylo diskutováno (Novák, Kyznarová 2011), staničním pozorováním dobře odpovídá počet dní s výskytem alespoň 2 bleskových výbojů do země v 15 km okolí, jejich plošné rozložení je znázorněno na obr. 10(a).

Plošné rozložení průměrného počtu dní bylo zpracováno také pro různé radarové produkty. Pro ukázkou jsou na obr. 10(b)–10(d) zobrazena plošná rozložení průměrného počtu dnů s výskytem MAX_Z \geq 44 dBZ (b), POH = 100 % (c) a POSH \geq 50 % (d). Z těchto obrázků je zřejmé, že dlouhodobé radarové charakteristiky nejsou příliš vhodné k popisu prostorového rozložení aktivity konvektivních bouří, k tomu lépe poslouží data detekce blesků. Prostorová rozložení dlouhodobých radarových charakteristik jsou významně ovlivněna snímací strategií radarových měření a vzdáleností od radaru. Jedná se jednak o rostoucí výšku radarového paprsku vzhledem k povrchu země s rostoucí vzdáleností od radaru a jednak o rozšiřování radarového paprsku s rostoucí vzdáleností od radaru, a tedy průměrování odrazivosti z většího objemu radarového pulsu a s tím související vyhlazení radarových dat a nadhodnocování výšky radarového echa ve velkých vzdálenostech. Pozorování jevy velmi dobře odpovídají výsledkům získaným z různých studií (Delobbe, Holleman 2006; Kaltenboeck, Steinheimer 2015; Goudenhoofd, Delobbe 2013). Výše zmíněné dlouhodobé charakteristiky jsou však velmi užitečné pro identifikaci různých problémů a nejistot radarových měření a produktů (např. zastínění orografickými překážkami nebo blízkými překážkami nebo výskyt permanentních pozemních odrazů jako např. parky větrných elektráren), mohou tedy být použity k popisu kvality radarových produktů včetně jejího časového vývoje (porovnáním plošných rozložení v jednotlivých letech).

Získané počty dnů s překročenými limitními hodnotami POH a POSH (obr. 6(c)–6(d) a 10(c)–10(d)) je možné porovnat s výsledky radarové detekce krup získaných jinými autory. Jednotlivé algoritmy i metodiky zpracování se sice mírně liší, ale orientační porovnání je možné. Průměrné četnosti výskytu krup v libovolně zvoleném gridovém bodě na území Česka se při použití POH = 100 % pohybují nejčastěji mezi 0,1 a 0,5 dne za rok. Pro Belgii uvádí Lukach et al. (2017) četnost 0,55 dne za rok pro POH \geq 90 %, pro Švýcarsko uvádí Nisi et al. (2016) velký rozsah hodnot, který souvisí s jeho velmi proměnlivou orografií; nejčastěji jsou



Obr. 9 Průměrný roční počet blesků do země za období 2002–2016. Velikost gridového bodu je 1×1 km (a) a 20×20 km (b).
 Fig. 9. The annual average of cloud to ground flashes for 2002–2016 period. Grid point size is 1×1 km (a) and 20×20 km (b).



Obr. 10 Průměrný roční počet dní s výskytem alespoň 2 bleskových výbojů do země v 15 km okolí (a), MAX_Z ≥ 44 dBZ (b), POH = 100 % (c) a POSH ≥ 50 % (d) za období 2002–2016.

Fig. 10. The annual average number of days with the occurrence of at least 2 cloud to ground strokes in 15 km surroundings (a), MAX_Z ≥ 44 dBZ (b), POH = 100% (c) a POSH ≥ 50% (d) for 2002–2016 period.

pozorovány hodnoty v rozsahu 0,5–2,5 dne za rok pro POH > 80 %, na poměrně velkém území zejména ve vrcholových partiích Alp jsou hodnoty nižší než 0,5 dne za rok, maxima naopak dosahují hodnot až 4 dnů za rok. Pro pravděpodobnost nebezpečných krup POSH ≥ 50 % se průměrná četnost výskytu pohybuje typicky v rozsahu 0–0,2 dne za rok, což odpovídá rozsahu 0–0,25, který získaly pro Česko (Skripniková, Řezáčová 2014) při využití COMBI kritéria zaměřeného na detekci nebezpečných krup, které kombinuje modifikované produkty POSH a POH. Četnost 0,2 dne za rok pro POSH ≥ 50 % uvádí též Lukach et al. (2017) pro Belgii.

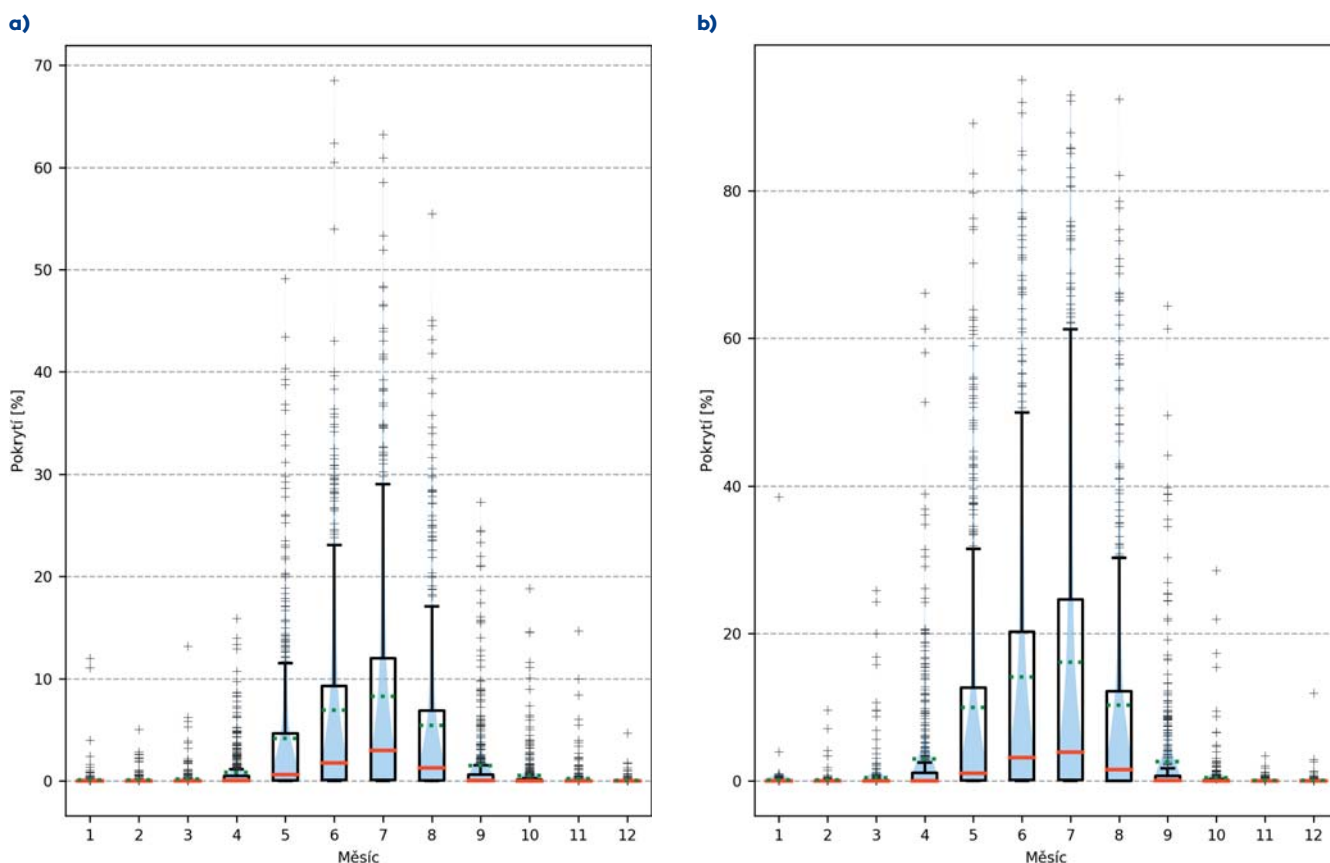
V rámci počítání prostorových charakteristik bylo též studováno denní pokrytí Česka konvektivními bouřemi v jednotlivých měsících. Na obr. 11(a) a 11(b) jsou znázorněna procentuální denní pokrytí Česka radiolokační odrazivostí MAX_Z ≥ 44 dBZ a oblastí s výskytem alespoň 1 bleskového výboje do země v 5 km okolí (použití pouze 1 × 1 km gridových bodů s výskytem bleskového výboje by zřejmě podceňovalo oblast bouřkové aktivity, 5 km okolí bylo vybráno jako oblast, která by měla lépe odpovídat oblastem, kde hrozí nebezpečí bouřkové aktivity). Pro jednotlivé měsíce jsou zobrazeny box-ploty a violin-ploty sestavené pro hodnoty ze všech dnů z daného měsíce v období 2002–2016. Box-ploty zobrazují průměr, medián a všechny

odlehle extrémní hodnoty. Z grafů vidíme, že typická velikost oblasti zasažená konvektivními bouřemi v jeden den během letních měsíců je do cca 10 % plochy Česka z pohledu radiolokační odrazivosti a do cca 20 % plochy z pohledu dat detekce blesků, maximální dosažené pokrytí je necelých 70 % plochy Česka z pohledu radiolokační odrazivosti a přes 90 % plochy z pohledu detekce blesků. Větší zasažená oblast v případě dat detekce blesků je dána tím, že u každéhoblesku uvažujeme i 5 km okolí, zatímco u radarových dat pouze skutečně zasažené gridové body (MAX_Z ≥ 44 dBZ).

Dále byla studována závislost počtu blesků do země na nadmořské výšce, která je zobrazena na obr. 12. Vidíme, že s rostoucí nadmořskou výškou lze pozorovat jisté zvyšováníbleskové aktivity, tato závislost však není nijak významná. Odlehle hodnoty s vysokou četností výskytu blesků do země představují nejčastěji již dříve zmiňované body s výskytem vysokých budov či konstrukcí, jako například televizních vysílačů.

3.3 Charakteristiky vztažené k identifikovaným jádrům odrazivosti

V rámci studie byla též analyzována jádra radiolokační odrazivosti s MAX_Z ≥ 44 dBZ identifikovaná nowcastingovou meto-



Obr. 11 Denní pokrytí území Česka gridovými body s $MAX_Z \geq 44$ dBZ (a) a gridovými body s alespoň 1 bleskovým výbojem do země v 5 km okolí (b) v období 2002–2016. Medián je zobrazen plnou červenou čarou, průměr zelenou čárkovanou čarou.

Fig. 11. Daily fractional coverage of the Czech Republic by grid points with $MAX_Z \geq 44$ dBZ (a) and grid points with at least 1 cloud to ground stroke in 5 km surroundings (b) for 2002–2016 period. Median of distribution is shown by solid red line, mean by green dashed line.

dou CELLTRACK operativně využívanou v ČHMÚ (Kyznarová, Novák 2009). Metoda CELLTRACK byla přepočítána pro celé patnáctileté období. Celkem byla na sloučených produktech maximální odrazivosti identifikováno 1 850 340 jader odrazivosti.

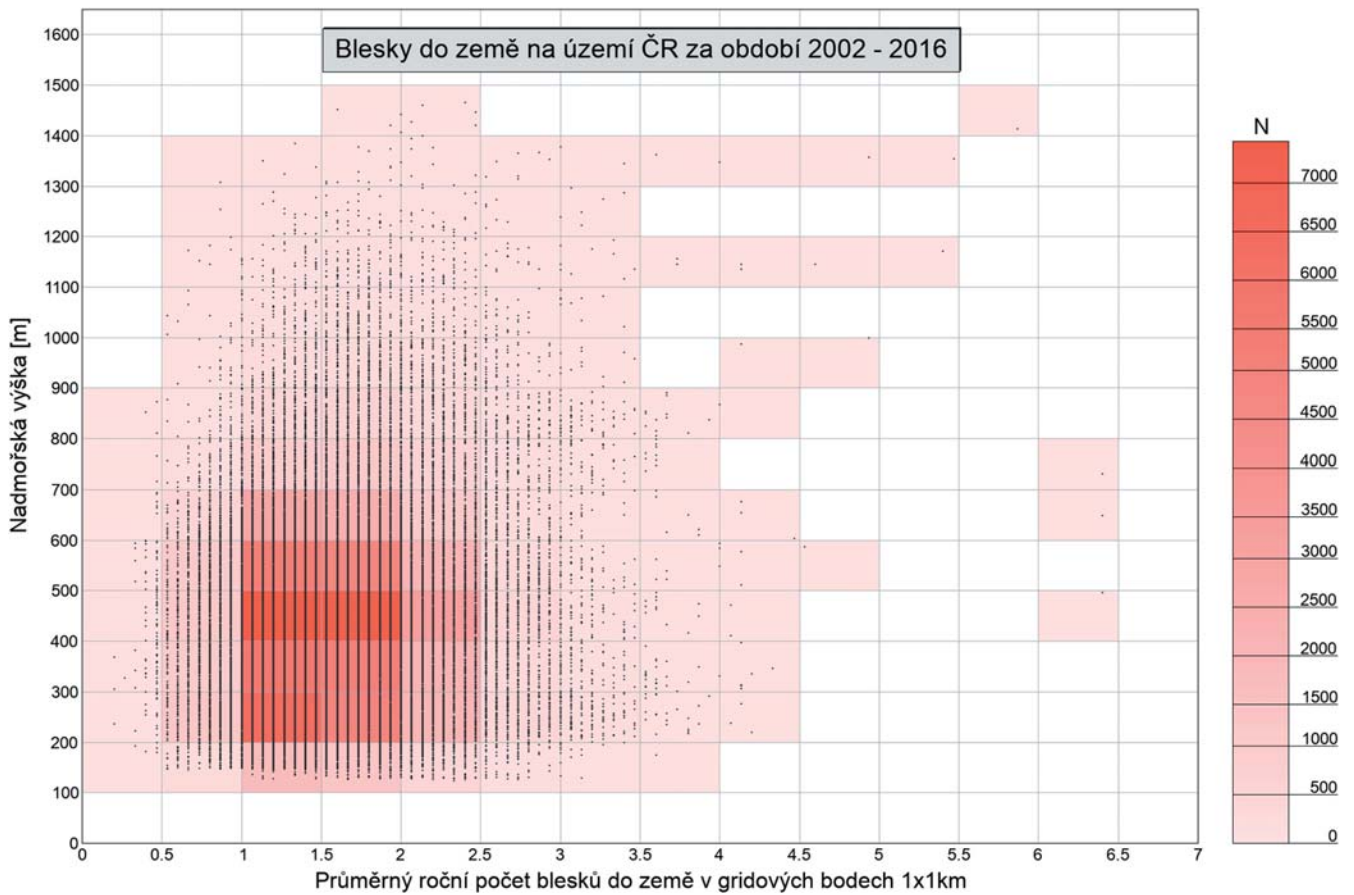
Obr. 13 zobrazuje trajektorie pohybu jader odrazivosti žijících po dobu alespoň 90 minut identifikovaných metodou CELLTRACK v období 2002–2016. Četnost identifikovaných jader a jejich trajektorií je ovlivněna rostoucí minimální výškou radarového paprsku nad povrchem země s rostoucí vzdáleností od radaru. Četnost jader je vyšší na území Česka než v okolních zemích, kde je již radarový parsek dále od radaru, a tedy i výše nad zemským povrchem, a není proto možné detekovat odrazivost v nejnižších hladinách. Pokles počtu identifikovaných jader s rostoucí vzdáleností od radaru dobře koresponduje s obr. 10(b), kde obdobně pozorujeme pokles průměrného počtu dní s výskytem maximální odrazivosti $MAX_Z \geq 44$ dBZ s rostoucí vzdáleností od radaru.

Rozložení relativních četností pohybových vektorů všech identifikovaných jader odrazivosti a rozložení relativních četností vektorů rychlosti větru v tlakové hladině 500 hPa získaných ze sondážních výstupů v 12:00 UTC v Praze a Prostějově je zobrazeno na obr. 14. Grafy relativních četností sondážních výstupů jsou dále rozděleny podle dnů, kdy byla zaznamenána aktivita konvektivních bouří (alespoň 10 gridových bodů s $MAX_Z \geq 44$ dBZ) a zbylé dny z období 2002–2016. Jádra odrazivosti se pohybují všemi směry, nejvíce jader se pohybuje z jihozápadu na severovýchod, četnost klesá se rostoucí rychlostí. Tlaková

hladina 500 hPa přibližně odpovídá hladině non-divergence. Většina identifikovaných jader odrazivosti odpovídá krátce žijícím konvektivním buňkám, lze tedy předpokládat, že interní dynamika jejich pohyb zásadně neovlivňuje. Při zanedbatelné propagaci jader odrazivosti vlivem interní dynamiky konvektivních bouří by mělo být rozložení relativních četností pohybových vektorů jader odrazivosti a proudění v hladině 500 hPa obdobné. Což potvrzují rozložení na obr. 14. Při porovnání vektorů rychlostí získaných ze sondážních měření existuje rozdíl mezi rozložením relativních četností pro dny se zaznamenanou aktivitou konvektivních bouří a bez ní. V druhém případě je nejvyšších relativních četností dosaženo pro jižní proudění v hladině 500 hPa.

V případě metody CELLTRACK je vidět, že v každém směru existují přibližně desítky až nízké stovky vektorů, jejichž velikost je větší než velikost vektorů získaných sondážními měřeními. Lze předpokládat, že u části z nich se jedná o vektory vzniklé v důsledku chybného přiřazení jader odrazivosti, nicméně tyto pravděpodobně chybné vektory tvoří jednotky promile ze všech vektorů, což lze považovat za dobrý výsledek.

Zpracováno bylo též rozložení doby života a plochy jednotlivých jader odrazivosti, které jsou zobrazeny na obr. 15. Počet jader s rostoucí délkou života klesá přibližně exponenciálně. Pokles počtu jader s rostoucí plochou je ještě vyšší. Graf rozložení doby života ukazuje, že existuje značné množství jader detekovaných pouze v jednom termínu měření. Pevný spodní práh odrazivosti 44 dBZ pro detekci jader může přispívat k navýšení počtu jader detekovaných pouze v jednom termínu. Některá jádra, jejichž



Obr. 12 Závislost průměrného ročního počtu blesků do země na nadmořské výšce za období 2002–2016. Jednotlivé body představují průměrné roční počty blesků do země pro jednotlivé 1 × 1 km gridové body na území Česka. Intenzitou červené barvy je vyznačena četnost bodů v jednotlivých intervalech.

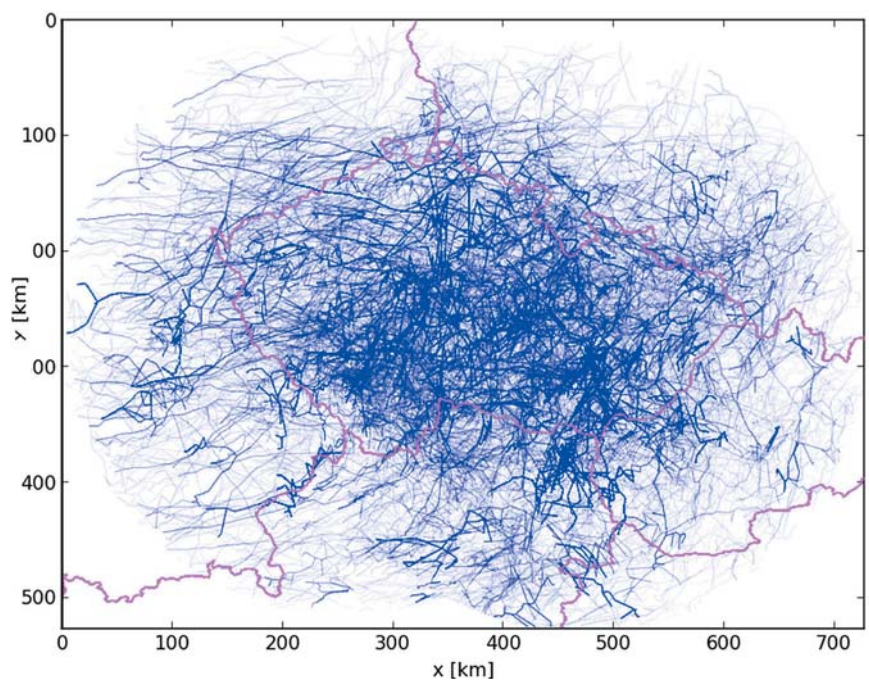
Fig. 12. The dependence of annual average number of cloud to ground flashes on the altitude for 2002–2016 period. Individual crosses represent annual average number of cloud to ground flashes for individual 1 × 1 km grid points over the Czech Republic territory. The intensity of red colour marks the number of crosses in individual intervals.

maximální odrazivost se pohybuje okolo 44 dBZ, totiž mohou z pohledu metody CELLTRACK opakovaně vznikat a zanikat, čímž se uměle zvyšuje počet jader s krátkou dobou života. Pro delší doby života již počet jader klesá přibližně exponenciálně. Během celého patnáctiletého období byly detekovány pouze stovky jader s délkou života 200 minut a větší.

4. Závěr

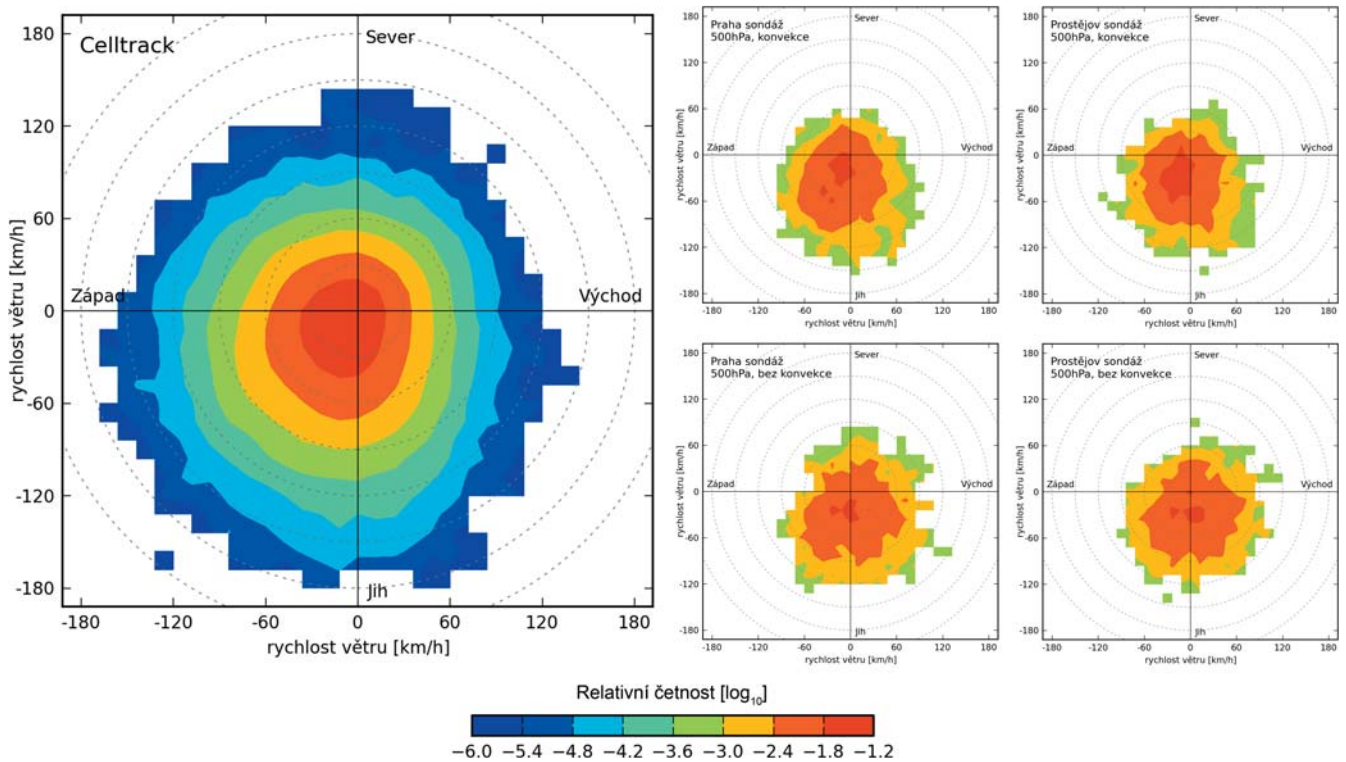
Článek představuje patnáctileté časové a prostorové charakteristiky konvektivních bouří na území Česka odvozené z dat ze sítě detekce blesků CELDN a produktů české radiolokační sítě CZRAD. Byla doložena velká časová i prostorová proměnlivost konvektivních bouří. Ve zkoumaném období 2002–2016 byla největší blesková aktivita zaznamenána v letech 2007, 2009 a 2002, dny s nejintenzivnější bleskovou aktivitou byly 21. 6. 2007, 13. 7. 2002 a 17. 7. 2010.

Časová proměnlivost konvektivních bouří je dobře popsána daty detekce blesků



Obr. 13 Trajektorie pohybu jader odrazivosti žijících alespoň 90 minut identifikovaných metodou CELLTRACK v období 2002–2016.

Fig. 13. Tracks of reflectivity cores with lifetime at least 90 minutes identified by the CELLTRACK method during 2002–2016 period.



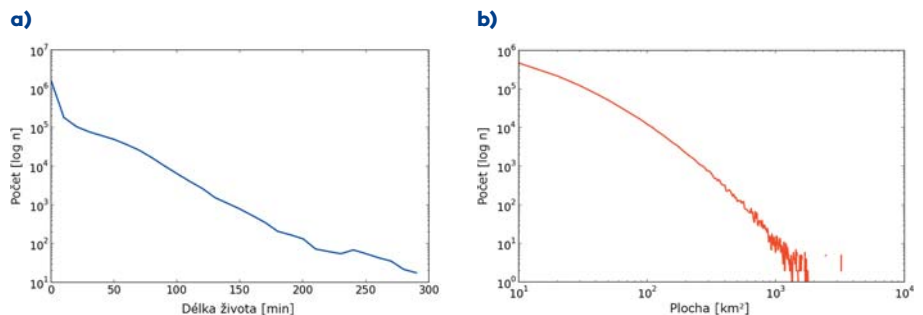
Obr. 14 Rozložení relativních četností vektorů pohybu jednotlivých jader odrazivosti identifikovaných metodou CELLTRACK (vlevo) a rozložení relativních četností vektorů rychlosti větru v tlakové hladině 500 hPa získaných se sondážních výstupů v 12:00 UTC v Praze a Prostějově (vpravo) pro dny se zaznamenanou aktivitou konvektivních bouří (nahore) a bez ní (dole) v období 2002–2016.

Fig. 14. Distribution of relative number of movement vectors of individual reflectivity cores identified by the CELLTRACK method (left) and distributions of relative number of wind vectors in 500 hPa pressure level obtained from 12:00 UTC Prague and Prostějov soundings (top) in days with detected convective storms activity (up) and without activity (bottom) during 2002–2016 period.

i radarovými produkty. Jejich roční i denní chody si navzájem odpovídají a jsou ve shodě i se záznamy výskytu bouřek z meteorologických stanic. Nejvyšší hodnoty ročních resp. denních chodů jsou dosahovány v červenci a červnu resp. mezi 14:00–17:00 UTC. U radarového produktu detekce krup byl v porovnání s ostatními daty pozorován mírný posun maxima u ročního i denního chodu. Vypočteny byly též průměrné počty dní za rok s překročením různých limitních hodnot u jednotlivých produktů, což umožní objektivní nastavení limitů při požadavku detekce jevu s určitou časovou četností.

Prostorová proměnlivost konvektivních bouří je v případě dat detekce blesků méně zatížena rozdíly v kvalitě pokrytí. Prostorová proměnlivost odvozená z radarových dat je výrazně ovlivněna snímací strategií radarových měření a zejména vlivem vzdálenosti na radarový paprsek. Tyto dlouhodobé plošné charakteristiky jsou však velmi užitečné pro popis kvality/nejistoty plošného rozložení jednotlivých radarových produktů.

Vyhodnoceny a porovnány s výsledky z okolních zemí byly průměrné roční hustoty blesků do země a roční počty dní s pravděpodobností výskytu krup POH = 100 %. Na území Česka je nejčastěji dosahována hustota blesků do země v rozmezí 1–2,2



Obr. 15 Rozložení délky života (a) a plochy (b) jednotlivých jader odrazivosti identifikovaných metodou CELLTRACK v období 2002–2016.

Fig. 15. Distribution of lifetime (a) and area (b) of reflectivity cores identified by the CELLTRACK method during 2002–2016 period.

blesků.km⁻².rok⁻¹ a kroupy jsou detekovány v radarovém produktu POH = 100 % typicky 0,1 až 0,5 dnů v roce.

Studována byla též jádra odrazivosti identifikovaná metodou CELLTRACK. Vyhodnoceny byly trajektorie a pohybové vektory jader a též jejich plocha a doba života. Metodou CELLTRACK byly za zkoumané období identifikovány téměř 2 miliony jader odrazivosti, z jejichž analýzy je patrné, že počet jader klesá s rostoucí dobou života exponenciálně. Z rozložení relativních četností vektorů pohybu jader odrazivosti plyne, že nejčastěji se jádra odrazivosti pohybují z jihozápadu, což souhlasí s rozložением relativních četností vektorů proudění v tlakové hladině 500 hPa v daných dnech. Ve dnech bez zaznamenané

aktivity konvektivních bouří nejvyšších relativních četností dosahuje v hladině 500 hPa jižní proudění.

Dlouhodobé charakteristiky dat detekce blesků a radarových produktů přispívají k rozšíření znalostí o konvektivních bouřích. Mohou být použity ke zkvalitnění klimatologie konvektivních bouří na území Česka, ale též ke zlepšení nowcastingových a varovných systémů ČHMÚ díky lepšímu popisu kvality radarových a bleskových produktů a díky možnosti odvození objektivních kritérií pro posouzení nebezpečnosti konvektivních bouří.

Poděkování:

Práce prezentovaná v tomto článku vznikla s částečnou podporou výzkumného projektu MV ČR “Program bezpečnostního výzkumu pro potřeby státu 2016–2021 (BV III/2 – VZ)”. Autoři děkují recenzentům za cenné připomínky, které pomohly zlepšit kvalitu výsledného článku.

Literatura:

- AMBURN, S. A., WOLF, P. L., 1997. VIL Density as a Hail Indicator. *Weather and Forecasting*, Vol. **12**, s. 473–478. ISSN 0882-8156.
- ANTONESCU, B., BURCEA, S., 2010. A cloud-to-ground lightning climatology for Romania. *Mon. Wea. Rev.*, Vol. **138**, s. 579–591. ISSN 0027-0644.
- BETZ, H. D., SCHMIDT, K., OETTINGER, P., 2008. LINET – An International VLF/LF Lightning Detection Network in Europe. In: “Lightning: Principles, Instruments and Applications”, Eds. H.-D. Betz, U. Schumann, and P. Laroche, Ch. 5, Dordrecht (NL), Springer, s. 115–140. ISBN 978-1-4020-9079-0.
- CUMMINS, K. L., MURPHY, M. J., BARDO E. A., HISCOX, W. L., PYLE, R. B., PIFER, A. E., 1998. A Combined TOA/MDF Technology Upgrade of the U.S. National Lightning Detection Network. *Journal of Geophysical Research*, Vol. **103**, s. 9035–9044. ISSN 2169-897X.
- DELOBBE, L., HOLLEMAN, I., 2006. Uncertainties in radar echo top heights used for hail detection. *Meteorological Applications*, Vol. **13**, s. 361–374. ISSN 1350-4827.
- GOUDENHOOFDT, E., DELOBBE, L., 2013. Statistical Characteristics of Convective Storms in Belgium Derived from Volumetric Weather Radar Observations. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, Vol. **52**, s. 918–934. ISSN 1558-8424.
- HAVRÁNEK, P., KRÁČMAR, J., 1996. Nová meteorologická radiolokační stanice na střední Moravě. *Meteorologické zprávy*, Vol. **49**, s. 81–84. ISSN 0026-1173.
- KALTENBOECK, R., STEINHEIMER, M., 2015. Radar-based severe storm climatology for Austrian complex orography related to vertical wind shear and atmospheric instability. *Atmospheric Research*, Vol. **158–159**, s. 216–230. ISSN 0169-8095.
- KRÁČMAR, J., 2000. Nový meteorologický radar Brdy v síti CZRAD. *Meteorologické zprávy*, roč. **53**, č. 6, s. 161–168. ISSN 0026-1173.
- KYZNAROVÁ, H., NOVÁK, P., 2008. Využití radarových měření pro identifikaci a předpověď pohybu konvekčních bouří. *Meteorologické zprávy*, roč. **61**, č. 1, s. 14–19. ISSN 0026-1173.
- KYZNAROVÁ, H., NOVÁK, P., 2009. CELLTRACK – Convective cell cracking algorithm and its use for deriving life cycle characteristics. *Atmospheric Research*, Vol. **93**, s. 317–327. ISSN 0169-8095.
- LUKACH, M., FORESTI, L., GIOT, O., DELOBBE, L., 2017. Estimating the occurrence and severity of hail based on 10 years of observations from weather radar in Belgium. *Meteorological Applications*, Vol. **24**, s. 250–259. ISSN 1350-4827.
- NISI, L., MARTIUS, O., HERING, A., KUNZE, M., GERMANN, U., 2016. Spatial and temporal distribution of hailstorms in the Alpine region: a long-term, high resolution, radar-based analysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. **142**, s. 1590–1604. ISSN 0035-9009.
- NOVÁK, P., 2007. The Czech Hydrometeorological Institute’s Severe Storm Nowcasting System. *Atmospheric Research*, Vol. **83**, s. 450–457. ISSN 0169-8095.
- NOVÁK, P., ŽEJDLÍK, T., TOLASZ, R., 2009. Deset let využívání dat detekce blesků v českém hydrometeorologickém ústavu. *Meteorologické zprávy*, Vol. **62**, s. 165–172. ISSN 0026-1173.
- NOVÁK, P., FROLÍK, P., BŘEZKOVÁ, L., JANÁL, P., 2010. Improvements of Czech Precipitation Nowcasting System. In: *6th European Conf. on Radar in Meteorology and Hydrology (ERAD 2010)*, Sibiu, 6.–10. 9. 2010.
- NOVÁK, P., KYZNAROVÁ, H., 2011. Climatology of lightning in the Czech Republic. *Atmospheric Research*, Vol. **100**, s. 318–333. ISSN 0169-8095.
- NOVÁK, P., 2012. Comparison of lightning data from the CELDN and the LINET detection networks over the Czech Republic territory in the 2010 convective season. *Meteorologické zprávy*, Vol. **65**, s. 161–167. ISSN 0026-1173.
- NOVÁK, P., KYZNAROVÁ, H., 2016. Obnova meteorologické radarové sítě CZRAD v roce 2015. *Meteorologické zprávy*, roč. **69**, č. 1, s. 17–24. ISSN 0026-1173.
- ORVILLE, R. E., HUFFINES, G. R., 2001. Cloud-to-ground lightning in the United States: NLDN results in the first decade, 1989–98. *Mon. Wea. Rev.*, Vol. **129**, s. 1179–1193. ISSN 0027-0644.
- RAKOV, V. A., UMAN, M. A., 2003. Lightning. Physics and Effects. Cambridge University Press, 687 s., ISBN 0-521-58327-6.
- SCHULZ, W., CUMMINS, K., DIENDORFER, G., DORNINGER, M., 2005. Cloud-toground lightning in Austria: a 10-year study using data from a lightning location system. *Journal of geophysical research*, Vol. **110**, D09101. ISSN 2169-897X.
- SCHULZ, W., DIENDORFER, G., PEDEBOY, S., POELMAN, D. R., 2016. The European lightning location system EUCLID – Part 1: Performance analysis and validation. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, Vol. **16**, s. 595–605. ISSN 1561-8633.
- SKRIPNIKOVÁ, K., ŘEZÁČOVÁ, D., 2014. Radar-based hail detection. *Atmospheric Research*, Vol. **144**, s. 175–185. ISSN 0169-8095.
- STRACHOTA, J., 1981. Využití meteorologického radiolokátoru TESLA RM-2 při zajišťování požadavků uživatelů meteorologických radiolokačních informací. *Meteorologické zprávy*, roč. **34**, č. 1, s. 4–8. ISSN 0026-1173.
- STRACHOTA, J., 1983. Lokalizace a identifikace nebezpečných letních konvektivních jevů meteorologickým radiolokátorem MRL-2. *Meteorologické zprávy*, roč. **36**, č. 1, s. 147–157. ISSN 0026-1173.
- TASZAREK, M., CZERNECKI, B., 2015. A Cloud-to-Ground Lightning Climatology for Poland. *Mon. Wea. Rev.*, Vol. **143**, s. 4285–4304. ISSN 0027-0644.
- TOLASZ, R. a kol., 2007. Atlas podnebí Česka. Praha – Olomouc: Český hydrometeorologický ústav, Univerzita Palackého v Olomouci, 255 s., ISBN 978-80-86690-26-1 (ČHMÚ), ISBN 978-80-244-1626-7 (UP).
- TOLASZ, R., 2008. Databázové zpracování klimatologických dat. *Sborník prací ČHMÚ*, sv. **52**, 1. vydání, 68 s., ISBN 978-80-86690-50-6.
- TUOMI, T. J., MÄKELÄ, A., 2008. Thunderstorm climate of Finland 1998–2007. *Geophysica*, Vol. **44** (1–2), s. 67–80. ISSN 0367-4231.
- WALDVOGEL, A., FEDERER, B., GRIMM, P., 1979. Criteria for the Detection of Hail Cells. *Journal of Applied Meteorology*, Vol. **18**, s. 1521–1525. ISSN 0021-8952.
- WITT, A., EILTS, M. D., STUMPF, G. J., JOHNSON, J. T., MITCHEL, E. D., THOMAS, K. W., 1998. An Enhanced Hail Detection Algorithm for the WSR-88D. *Weather and Forecasting*, Vol. **13**, s. 286–303. ISSN 0882-8156.

Lektoři (Reviewers):

RNDr. Jan Kráčmar,

RNDr. Jan Sulan

Zpřesnění operativních map PM_{10} zahrnutím výstupu modelu CAMx, dalších doplňkových dat a využitím krigingu

Improvement of near real-time PM_{10} maps through inclusion of CAMx model output, other supplementary data, and the use of kriging

Jana Ďoubalová

Český hydrometeorologický ústav
oddělení modelování a expertiz
Na Šabatce 2050/17, 143 06 Praha 4
✉ jana.doubalova@chmi.cz

Ondřej Vlček

Český hydrometeorologický ústav
oddělení modelování a expertiz
Na Šabatce 2050/17, 143 06 Praha 4
✉ ondrej.vlcek@chmi.cz

Jan Horálek

Český hydrometeorologický ústav
oddělení informačních systémů kvality ovzduší
Na Šabatce 2050/17, 143 06 Praha 4
✉ jan.horalek@chmi.cz

The Czech Hydrometeorological Institute publishes near real-time maps of PM_{10} concentrations. These maps are constructed by combining in-situ measurements and various supplementary data using data fusion. The principle of the data fusion is based on linear regression supplemented by interpolation of the residuals. This paper compares the currently used method with an updated method for daily and hourly maps of 2015. The current method utilizes five-year averages of annual average concentrations of PM_{10} and annual average concentrations calculated with the SYMOS dispersion model applying the Czech anthropogenic emissions. The updated approach uses hourly outputs of the CAMx chemical transport model together with other data (altitude, urban and rural average annual PM_{10} concentrations). The interpolation method used in the current approach is IDW, the new approach uses kriging. The results show that the new approach reduces the bias and overall error, particularly in rural areas. The number of cases when the map was created by the interpolation of in-situ data only has been greatly reduced. The magnitude of bias of the new approach is less dependent on measured concentrations.

KLÍČOVÁ SLOVA: CAMx – fúze dat – IDW – kriging – regrese lineární – mapy kvality ovzduší operativní – částice PM_{10} suspendované

KEYWORDS: CAMx – data fusion – IDW – kriging – linear regression – near real-time air quality maps – PM_{10} suspended particulate matter

1. Úvod

Český hydrometeorologický ústav (ČHMÚ) má na základě své zřizovací listiny (MŽP 2017) povinnost mj. pravidelně informovat veřejnost o kvalitě ovzduší na území České republiky. Aby měla veřejnost informaci o koncentracích znečišťujících látek i mimo místa stanic imisního monitoringu, zveřejňuje ČHMÚ na svých stránkách operativní mapy aktuálních koncentrací¹. Tyto mapy jsou konstruovány pro suspendované částice PM_{10} , oxid dusičitý NO_2 , ozon O_3 , oxid siřičitý SO_2 a oxid uhelnatý CO na základě on-line dat ze stanic automatizovaného imisního monitoringu (AIM) podle metodiky popsané v kap. 2.1. Stávající způsob tvorby map byl zaveden přibližně před 10 lety a od té doby se nezměnil. V rámci testování chemického transportního modelu CAMx pro operativní předpověď kvality ovzduší vyvstala možnost začlenit aktuální výstup rozptylového modelu do tvorby těchto operativních map. V článku přinášíme srovnání stávajícího a nového přístupu pro mapy průměrných denních a hodinových koncentrací PM_{10} (dále v textu pro stručnost označované jako denní a hodinové mapy), jakožto první znečišťující látky, kterou jsme se v této souvislosti zabývali. Aktualizovaný přístup je popsán v kap. 2.3, výsledky obou přístupů pro rok 2015 jsou uvedeny v kap. 3. Rok 2015 byl zvolen z toho důvodu, že pro něj byly k dispozici nejuplněnější emisní vstupy a okrajové podmínky pro model CAMx (viz níže).

2. Metodika tvorby map

2.1 Obecný popis

Tvorba operativních map znečišťujících látek je metodicky shodná s přístupem Horálek et al. (2007) používaným pro tvorbu evropských map zpracovávaných centrem ETC/ATNI² pro Evropskou agenturu pro životní prostředí i map publikovaných v ročence Znečištění ovzduší na území České republiky (např. ČHMÚ 2014a). **Primárními daty** pro tvorbu map znečištění ovzduší jsou koncentrace znečišťujících látek naměřené na stanicích imisního monitoringu, které představují přesnou, ale lokální informaci na omezeném počtu míst. Proto jsou pro potřeby mapování využita i různá **doplňková (sekundární) data**, poskytující komplexní informaci o celém území

¹ <http://pr-asu.chmi.cz:8080/IskoPollution-MapView/faces/viewMapImages.xhtml>

² European Topic Center on Air Pollution, Transport, Noise and Industrial Pollution (ETC/ATNI). WWW: <https://www.eionet.europa.eu/etcs/etc-atni>

a zároveň vykazující regresní závislost s měřenými daty. Pro kombinaci primárních a doplňkových dat je používán lineární regresní model s následnou interpolací jeho reziduí. Městské a venkovské znečištění má odlišný charakter: v případě suspenovaných částic PM₁₀ je městské znečištění vlivem emisí obecně vyšší než znečištění venkovské. Struktura imisního pole (z hlediska variogramu, viz níže) ve městech a na venkově je odlišná. Městské a venkovské mapové vrstvy jsou proto tvořeny samostatně a výsledná mapa vzniká jejich sloučením pomocí populační hustoty³. Pro konstrukci venkovské mapové vrstvy jsou jako primární data používána měřená imisní data z pozadových venkovských stanic. V případě městské mapové vrstvy to jsou imisní data z městských a předměstských pozadových stanic. Využívána je přitom klasifikace stanic podle databáze Informačního systému kvality ovzduší (ISKO) ČHMÚ. Mapy jsou konstruovány v prostorovém rozlišení 1 × 1 km.

Výše popsaný postup tvorby městské a venkovské mapové vrstvy lze popsat následující rovnicí popisující výpočet (odhad) koncentrace \hat{Z} v bodě s_0 :

$$\hat{Z}(s_0) = c + a_1 \cdot X_1(s_0) + a_2 \cdot X_2(s_0) + \dots + a_p \cdot X_p(s_0) + \hat{R}(s_0), \quad (1)$$

kde X_i jsou různá doplňková data, c a a_i jsou parametry lineárního regresního modelu a \hat{R} je prostorová interpolace reziduí lineárního regresního modelu v bodě s_0 , spočtená na základě reziduí v bodech měření. Doplňková data jsou přitom použita pouze tehdy, pokud u dané mapy vykazují pozitivní korelaci (u nadmořské výšky negativní) s měřenými daty. V případě, že žádná doplňková data tento předpoklad nesplňují, použije se prostá interpolace naměřených dat.

Interpolace je prováděna buď pomocí metody vážení převrácenou hodnotou vzdálenosti (IDW), nebo pomocí obyčejného krigingu (značí odborný termín; anglicky “ordinary kriging”). Metoda IDW je jednoduchá deterministická metoda, kdy váha jednotlivých měřicích stanic v interpolaci závisí jen na jejich vzdálenosti od odhadovaného bodu. Kriging je oproti tomu pokročilejší geostatistická metoda, která zohledňuje strukturu imisního pole. Výhodou IDW ovšem je, že tato interpolace respektuje naměřené hodnoty v bodech měřicích stanic. Kriging naměřené hodnoty obecně nerespektuje. Interpolace reziduí pomocí IDW je v bodě s_0 počítána pomocí vztahu

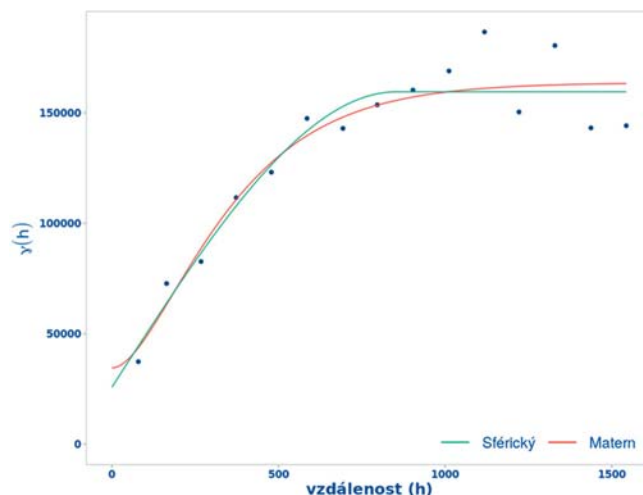
$$\hat{R}(s_0) = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{R(s_i)}{d_{0i}^\beta}}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{d_{0i}^\beta}}, \quad (2)$$

kde \hat{R} je odhad pole reziduí v bodě s_0 , $R(s_i)$ je reziduum lineárního regresního modelu v místě měření s_i , d_{0i} je vzdálenost mezi body s_0 a s_i , β je váha a N počet okolních stanic použitých při interpolaci.

V případě obyčejného krigingu je interpolace reziduí počítána pomocí vztahu

$$\hat{R}(s_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i \cdot R(s_i) \quad (3)$$

³ Čtenáře s hlubším zájmem o problematiku odkazujeme na grafické ročenky Znečištění ovzduší na území České republiky (http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/grafroc/grafroc_CZ.html), kde jsou od ročenky za rok 2013 v příloze I uváděny podrobné specifikace imisních map.



Obr. 1 Ukázka empirického variogramu proloženého odhadnutým variogramem s dvěma parametrizacemi křivek: sférická a Matern.

Fig. 1. An example of an empirical variogram with a variogram model fitted to the data with two parametrizations: Spherical and Matern.

kde $R(s_i)$ je reziduum lineárního regresního modelu v místě měření s_i a λ_i jsou váhy odvozené pomocí teorie prostorové statistiky (viz Cressie 1993) ze soustavy $N+1$ rovnic pro neznámé λ_i a m :

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i \cdot \gamma(d_{ij}) + \gamma(d_{0i}) - m = 0 \quad \text{pro } i = 1, \dots, N$$

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i = 1 \quad (4)$$

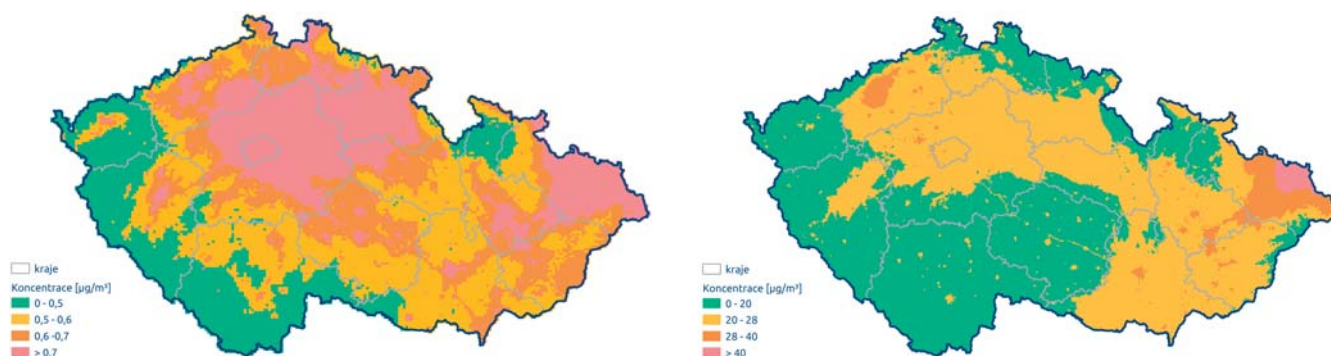
kde $g(d_{ij})$ je hodnota odhadnutého variogramu (anglicky *fitted variogram*, viz níže) pro vzdálenost d_{ij} mezi místy měření s_i a s_j (případně mezi bodem s_0 a místem měření s_i) a m je tzv. Lagrangeův multiplikátor umožňující, aby suma vah λ_i byla rovna jedné. Variogram je mírou prostorové korelace a vyjadřuje závislost mezibodové variability na vzájemné vzdálenosti bodů. Odhadnutý variogram vzniká proložením křivky empirickým variogramem (shlukem bodů) pole reziduí, který je počítán pomocí vztahu

$$2\gamma_v(h) = \frac{1}{n} \sum_{i,j; d_{ij}=h \pm \delta} (R(s_i) - R(s_j))^2 \quad (5)$$

kde n je počet dvojic stanic s_i a s_j , jejichž vzájemná vzdálenost je $h \pm \delta$ a δ je tolerance. Na základě testování různých způsobů proložení empirického variogramu provedeného v rámci projektu SAMIRA⁴ je pro městskou mapovou vrstvu používána křivka s parametrizací sférickou a pro venkovskou mapovou vrstvu křivka s parametrizací Matern. Ukázka obou parametrizací je na obr. 1.

Spočtené městské a venkovské mapové vrstvy jsou následně sloučeny pomocí gridu populační hustoty (Horálek et al. 2007; De Smet et al. 2011). Sloučení se provádí pomocí vztahu

⁴ SAMIRA – Satellite based Monitoring Initiative for Regional Air quality. Projekt financovaný Evropskou vesmírnou agenturou (grant č. ESA ESRIN/4000117393/16/I-NB). Hlavní příjemce: NILU. Období řešení projektu: 2016–2019. www://samira.nilu.no/



Obr. 2 Doplnková data u stávajícího způsobu tvorby operativních map PM_{10} : imisní příspěvek primárních částic PM_{10} z českých antropogenních zdrojů v roce 2014 spočtený modelem SYMOS (vlevo) a pětiletý průměr map průměrných ročních koncentrací PM_{10} pro období 2009–2013 (vpravo).

Fig. 2. Supplementary data included within the current approach of near real-time mapping of PM_{10} concentrations: concentrations of primary PM_{10} from the Czech anthropogenic sources in 2014 calculated by SYMOS model (left) and 5-year average of annual PM_{10} concentration for 2009–2013 period (right).

$$\hat{Z}(s_0) = \begin{cases} \hat{Z}_r(s_0), & \text{pro } \alpha(s_0) \leq \alpha_1 \\ \frac{\alpha_2 - \alpha(s_0)}{\alpha_2 - \alpha_1} \cdot \hat{Z}_r(s_0) + \frac{\alpha(s_0) - \alpha_1}{\alpha_2 - \alpha_1} \cdot \hat{Z}_u(s_0), & \text{pro } \alpha_1 < \alpha(s_0) < \alpha_2, \\ \hat{Z}_u(s_0), & \text{pro } \alpha(s_0) \geq \alpha_2 \end{cases} \quad (6)$$

kde $\hat{Z}(s_0)$ je výsledný odhad koncentrace v bodě s_0 , \hat{Z}_r , resp. \hat{Z}_u je koncentrace v bodě pro venkovskou, resp. městskou mapovou vrstvu, α je hustota populace a α_1 , α_2 jsou klasifikační intervaly příslušné k populační hustotě. Hodnoty parametrů α_1 , α_2 používané standardně při tvorbě map pro území České republiky jsou 200 a 1000 obyv.km⁻² (ČHMÚ 2014a).

Celý koncept odděleného mapování venkovského a městského znečištění je založen na předpokladu, že pro suspendované částice platí $\hat{Z}_r(s_0) \leq \hat{Z}_u(s_0)$. Pro oblasti, kde tento předpoklad není splněn, se použije třetí mapová vrstva vytvořená obdobně jako městská nebo venkovská, nicméně na základě veškerých požadovaných stanic, bez rozlišení na městské a venkovské.

Odhad nejistoty

Pro odhad nejistoty příslušné mapy byla použita metoda křížového ověřování (cross-validation): koncentrace v místě měření je spočtena bez zahrnutí daného měření a postup je opakován pro všechna místa měření. Tím je objektivně odhadnuta kvalita mapy mimo místa měření. Odhadnuté hodnoty byly porovnány s naměřenými hodnotami pomocí *standardní chyby odhadu* (Root Mean Square Error, RMSE), *normované standardní chyby odhadu* (nRMSE), *systematického vychýlení* (bias) a *faktoru 2* (FAC2):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^N (\hat{Z}(s_i) - Z(s_i))^2},$$

$$nRMSE = \frac{RMSE}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^N Z(s_i)}, \quad bias = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^N (\hat{Z}(s_i) - Z(s_i)) \quad (7)$$

kde Z je naměřená hodnota koncentrace v i -tém bodě, \hat{Z} její odhad provedený bez zahrnutí i -tého bodu a N počet měřicích stanic. Faktor dvou vyjadřuje počet případů, kdy se odhadnutá hodnota vyskytuje v rozmezí poloviny až dvojnásobku měřené hodnoty.

Jde o střední nejistotu celé mapy, prostorové rozložení nejistoty nebylo odhadováno. Pro úplnost je třeba uvést, že odhad ne-

jistoty byl počítán jen pro interpolaci reziduí (lineární regrese byla počítána se zahrnutím všech stanic), jak je tomu i v případě map pro ročenku Znečištění ovzduší na území České republiky (ČHMÚ 2015). Celková nejistota mapy je proto poněkud větší. Lze ale očekávat, že ve většině případů nezmění vynechání jedné stanice zásadně parametry lineární regrese.

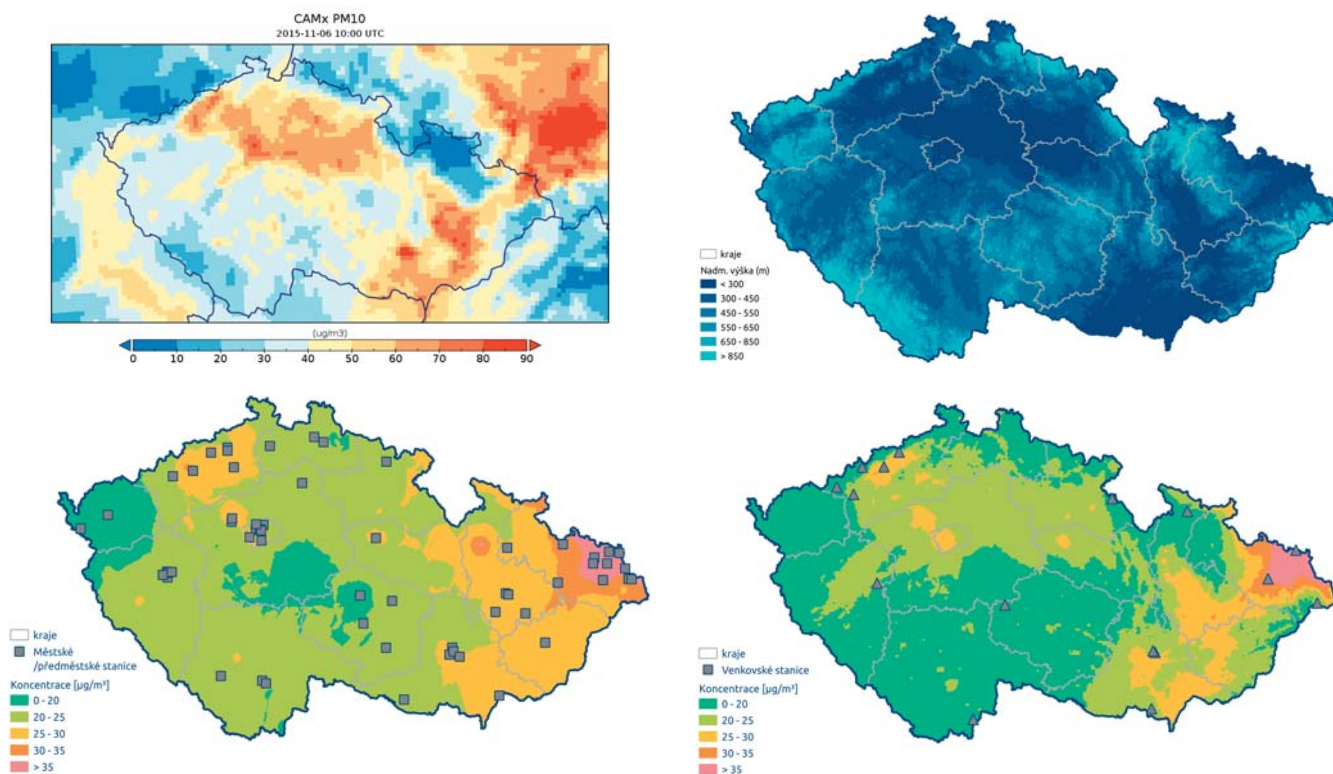
2.2 Stávající způsob tvorby operativních map PM_{10}

Jako doplňkový zdroj informací je u stávajícího způsobu tvorby operativních map PM_{10} používán pětiletý průměr map průměrných ročních koncentrací PM_{10} ⁵ a pole průměrného ročního imisního příspěvku primárních částic PM_{10} z českých antropogenních zdrojů vypočítané modelem SYMOS. Pro potřeby tohoto srovnání byl použit pětiletý průměr 2009–2013 a výstup modelu SYMOS pro rok 2014. Zvolené roky odpovídají nejnovějším podkladovým datům, které by byly dostupné při vytváření příslušných operativních map v roce 2015. Oba podklady byly k dispozici v pravidelné síti 1 × 1 km. Doplnková data jsou znázorněna na obr. 2. Mapy byly vytvořeny dle výše popsané metodiky a interpolace reziduí byla provedena metodou IDW.

2.3 Nový způsob tvorby operativních map PM_{10}

Jako doplňkový zdroj informací byly použity průměrné hodinové a denní koncentrace PM_{10} z modelu CAMx pro rok 2015, nadmořská výška a pro tvorbu venkovské a městské mapové vrstvy odpovídající (tj. venkovská, nebo městská) mapová vrstva průměrné roční koncentrace PM_{10} , které byly použity pro vytvoření mapy ročních průměrných koncentrací v ročence za rok 2013 (ČHMÚ 2014). Pro tvorbu mapy využívající všech stanic, která se použije v bodech, kde je odhadnutá koncentrace venkovské mapové vrstvy vyšší než městské, se používal pouze výstup z modelu CAMx a nadmořská výška. Model CAMx byl k dispozici v rozlišení 4,7 × 4,7 km, ostatní podklady v síti 1 × 1 km. Použitá data jsou znázorněna na obr. 3. Mapy byly vytvořeny dle výše popsané metodiky a interpolace reziduí byla provedena metodou krigingu.

⁵ http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/ozko/ozko_CZ.html



Obr. 3 Použitá data u nového způsobu tvorby operativních map PM_{10} : průměrné hodinové, resp. denní koncentrace PM_{10} z modelu CAMx (nahore vlevo), nadmořská výška (nahore vpravo), městská, resp. venkovská mapová vrstva průměrné roční koncentrace PM_{10} v roce 2013 (dole vlevo, resp. vpravo). Pozadové (před)městské a venkovské stanice použité v tomto článku jsou zobrazeny na obrázcích dole vlevo, resp. vpravo.

Fig. 3. Data included within the new approach of near real-time mapping of PM_{10} concentrations: 1-hour and daily PM_{10} maps, respectively, from the CAMx model (top left), terrain elevation (top right), urban and rural map of annual PM_{10} concentrations in 2013 (bottom left and right, respectively). Background (sub)urban and rural stations used in this article are displayed in bottom left and right picture respectively.

3. Použitá data

Tato kapitola podrobněji popisuje data, která byla použita při analýze popsané v této zprávě.

3.1 Měřená data ze stanic imisního monitoringu

Jako primární data pro tvorbu map byla použita data z měřících stanic z databáze ISKO. Pro analýzu byla použita data ze stanic automatizovaného imisního monitoringu. Důvodem je, že pouze tato data jsou k dispozici pro tvorbu operativních map. Použity byly pouze pozadové stanice – celkem se jednalo o 89 městských a předměstských pozadových stanic a 19 venkovských pozadových stanic.

Použity byly průměrné hodinové koncentrace a agregované denní průměry PM_{10} pro období kalendářního roku 2015. Polohy stanic jsou znázorněny na obr. 3.

3.2 Chemický transportní model CAMx

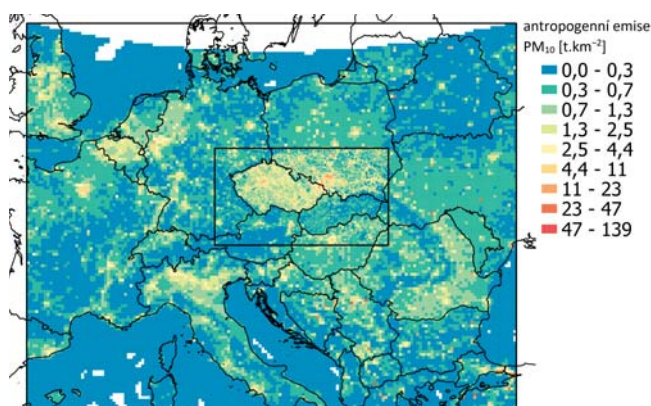
Pro výpočet hodinových polí koncentrací PM_{10} byl využit chemický transportní model CAMx v5.41 (ENVIRON 2011) konfigurovaný na dvou oboustranně vnořených doménách: vnější s horizontálním rozlišením 14,1 km pokrývající oblast předpovědního modelu ALADIN a vnitřní s horizontálním rozlišením 4,7 km zahrnující území České republiky a Slovenska. Domény spolu s antropogenními emisemi PM_{10} jsou znázorně-

ny na obr. 4. Pro mapování PM_{10} byly využity výstupy modelu CAMx z vnitřní domény.

CAMx je volně dostupný model vyvíjený společností Ramboll Environ, který umožňuje současné modelování plynných znečišťujících látek i aerosolu v rozlišení od stovek metrů po desítky kilometrů. CAMx na základě emisních a meteorologických vstupů modeluje na třírozměrném gridu rozptyl, chemické reakce a odstraňování znečišťujících látek z atmosféry. Byl použit chemický mechanismus Carbon Bond verze 6 (CB6) obsahující 218 reakcí mezi 114 látkami: 69 plynnými, 22 složkami aerosolu a 23 radikály. Velikostní rozdělení aerosolu bylo modelováno v hrubém-jemném módu (coarse-fine, CF): přímo emitovaný organický aerosol, elementární uhlík, sírany, sodíkové a chloridové ionty a sekundárně vznikající aerosol jsou zahrnuty ve frakci $PM_{2,5}$. Pouze půdní částice a ostatní nerozlišené primární částice mohou být zahrnuty do hrubé frakce (tedy mezi částice o aerodynamickém průměru 2,5–10 μm). Aerosolový chemismus zahrnuje tvorbu sekundárního anorganického i organického aerosolu a chemii vodní fáze anorganických iontů. Prekursor sekundárního anorganického aerosolu jsou oxidy dusíku, síry a amoniak, u sekundárního organického aerosolu pak zejména isopreny a terpeny, které jsou převážně biogenního původu.

Meteorologické vstupy

Meteorologická data s časovým krokem 1 h byla získána z asimilačního cyklu numerického předpovědního modelu ALADIN/CE, provozovaného v rozlišení 4,7 km s 87 vertikálními



Obr. 4 Domény modelu CAMx spolu s emisními hustotami primárních antropogenních částic PM₁₀ [t.km⁻²]. Státní hranice © EuroGeographics.

Fig. 4. Domains of the CAMx model and emission densities of annual primary anthropogenic PM₁₀ [t.km⁻²]. © EuroGeographics for the administrative boundaries.

hladinami, ve verzi ALARO (Termonia et al. 2018). Cyklus sestává z analýzy a následně 6hodinové předpovědi s počátkem v 00:00, 06:00, 12:00 a 18:00 UTC. Pro výškové parametry představuje analýza sofistikovanou kombinaci polí řídicího globálního modelu ARPEGE s mezoměřítkovými strukturami modelu ALADIN metodou DFI blending, která je doplněna o variační asimilaci pozorování 3DVAR (Bučánek et al. 2015). Asimilace přízemní teploty a relativní vlhkosti metodou optimální interpolace poskytuje vstupy pro analýzu prognostických proměnných schématu zemského povrchu (Giard, Bazile 2000). Výsledky asimilačního cyklu lze považovat za nejpřesnější dostupné meteorologické vstupy představující limitní kvalitu běžné operativní předpovědi. Spodních 68 hladin modelu ALADIN bylo sloučeno do 26 hladin modelu CAMx s horní hranicí první vrstvy přibližně v 50 m a nejvyšší hladinou v cca 10 km nad zemí. Vertikální difuzivita byla vypočtena podle schématu používaného v modelu CMAQ (funkce *kv_cmaq* v ENVIRON 2020; Byun and Ching 1999) s minimální hodnotou nastavenou na 1 m²·s⁻¹. Optická tloušťka byla získána postupem použitým v preprocesoru WRF-CAMx (funkce *clddiag* v ENVIRON 2020).

Emisní vstupy a okrajové podmínky

Tam, kde byla k dispozici příslušná data (tj. pro Českou republiku, Polsko a částečně Slovensko), byly použity podrobné národní emisní inventáře s vysokým rozlišením. České emise zahrnovaly bodové zdroje REZZO 1 a 2 a plošné zdroje REZZO 3 pro rok 2015, emise ze silniční dopravy vycházející ze sčítání ŘSD v roce 2016. Emise ze silniční dopravy připravila společnost ATEM – Ateliér ekologických modelů, s. r. o. a zahrnují v sobě i resuspenzi prachu usazeného na vozovce, která činí naprostou většinu celkových emisí primárních částic. Dále byly zahrnuty nevykazované fugitivní emise z povrchové těžby (celá ČR), výroby koksu, železa a oceli a jiných zdrojů (aglomerace CZ08A) a sléváren (celá ČR). Polské emise pro rok 2015 byly v rámci projektu LIFE-IP MAŁOPOLSKA⁶ poskytnuty úřady GIOS (Główny Inspektorat Ochrony Środowiska) a KOBIZE (Krajowy Ośrodek Bilansowania i Zarządzania Emisjami). Pro Slovensko byly z téhož projektu k dispozici detailní emise

z lokálního vytápění. Emise z lokálního vytápění pro Českou republiku a Slovensko byly spočteny za předpokladu, že kotle jsou po 15 % času provozovány na jmenovitý výkon a po zbytek času na snížený výkon, znamenající nedokonalé spalování a zvýšené emise⁷. Mimo výše uvedené oblasti a pro ostatní sektory, než SNAP⁸ 2 na území Slovenska byl využit inventář CAMS-REGv1.1-AP pro rok 2015 (ECCAD 2018; Kuenen et al. 2014; Granier et al. 2012). Biogenní emise byly vypočteny modelem MEGAN v2.1 (Guenther et al. 2012). Emise byly zpracovány procesorem FUME (Benešová et al. 2018). Pro účely časových a látkových rozpočtů byly zdrojům přiřazeny základní kategorie SNAP. Časový rozpočet byl proveden na základě faktorů pro měsíce, dny v týdnu a hodiny podle Builtjes et al. (2003), dostupné také v DENIER van der Gon et al. (2011). Výjimku tvořilo lokální vytápění, kde byl u českých zdrojů použit rozpočet emisí na dny podle typových diagramů dodávek zemního plynu pro kategorii DOM4, tj. domácnosti využívající plyn pouze k vytápění (Novák et al. 2019; OTE 2020). Látkový rozpočet PM proběhnul podle faktorů dodaných spolu s evropskou databází CAMS-REGv1.1-AP a u těžkých organických látek podle Passant (2002). Okrajové podmínky převzaty z globální předpovědi ECMWF CAMS IFS (ECMWF 2020).

3.3 Venkovská a městská mapová vrstva průměrných ročních koncentrací

Dalším doplňkovým zdrojem dat pro nový způsob tvorby operativních map PM₁₀ byla venkovská a městská mapová vrstva průměrných ročních koncentrací PM₁₀ pro rok 2013. Jde o meziprodukty, které byly použity při tvorbě mapy ročních průměrných koncentrací PM₁₀ pro rok 2013 (ČHMÚ 2014a). Při tvorbě venkovské mapové vrstvy byla použita roční data PM₁₀ ze všech venkovských pozadových stanic, při tvorbě městské mapové vrstvy byla použita roční data PM₁₀ ze všech městských a předměstských pozadových stanic (tj. nejen automatických, ale i manuálních).

3.4 Výstupy z Gaussovského rozptylového modelu SYMOS

Prvním doplňkovým zdrojem dat pro stávající způsob tvorby operativních map PM₁₀ byl průměrný roční emisní příspěvek primárních částic PM₁₀ z českých antropogenních zdrojů spočtený modelem SYMOS pro rok 2014. Při výpočtu byly využity větrné růžice pro rok 2014 konstruované pro 47 oblastí ČR a emise REZZO pro rok 2013. Model SYMOS popisuje Bubník et al. (1998) a ČHMÚ (2020).

⁶ LIFE-IP MAŁOPOLSKA – Implementation of Air Quality Plan for Małopolska Region – Małopolska in Healthy Atmosphere (LIFE14 IPE/PL/000021). WWW: <https://powietrze.malopolska.pl/en/life-project>

⁷ Tento předpoklad odpovídá nařízení Evropské komise, kterým se stanovují požadavky na ekodesign kotlů na tuhá paliva. Podle tohoto nařízení se sezónní energetická účinnost vytápění vnitřních prostor v aktivním režimu u kotlů na tuhá paliva s ručním přiřkládáním, které lze provozovat při 50 % jmenovitém tepelném výkonu v režimu nepřetržitého provozu, a u kotlů na tuhá paliva s automatickým přiřkládáním stanovuje za předpokladu provozu těchto zařízení po 15 % času na jmenovitý výkon a po zbytek na snížený (EC 2015, příloha III, bod 4b).

⁸ SNAP – Selected Nomenclature for sources of Air Pollution. První úroveň SNAP zahrnuje následující emisní sektory: 1. Spalovací procesy v energetice a transformace paliv, 2. Neprůmyslová spalovací zařízení, 3. Spalovací procesy ve zpracovatelském průmyslu, 4. Výrobní procesy, 5. Těžba a distribuce fosilních paliv a geotermální energie, 6. Použití rozpouštědel a jiných produktů, 7. Silniční doprava, 8. Ostatní mobilní zdroje a strojní zařízení, 9. Nakládání s odpady a jejich likvidace, 10. Zemědělství.

3.5 Pětiletý průměr map průměrných ročních koncentrací

Dalším doplňkovým zdrojem dat pro stávající způsob tvorby operativních map PM₁₀ byl pětiletý průměr map průměrných ročních koncentrací PM₁₀ pro roky 2009–2013 (ČHMÚ 2014b). Při tvorbě jednotlivých map ročních koncentrací byla použita roční data PM₁₀ ze všech pozadových (jak venkovských, tak městských a předměstských) stanic, tj. nejen automatických, ale i manuálních.

3.6 Ostatní doplňková data

Pro nadmořskou výšku byla použita data ZABAGED (Základní báze geografických dat), která poskytuje Zeměměřický úřad, v rozlišení 1 × 1 km. Populační hustota byla poskytnuta Českým statistickým úřadem.

4. Výsledky

Přesnost map vytvořených oběma způsoby byla porovnána pomocí křížového ověřování a ukazatelů RMSE, nRMSE, bias a FAC2 (tab. 1). Přehled, jak často byly do tvorby denních a hodinových mapových vrstev zahrnuty jednotlivé doplňkové podklady, je uveden v tab. 2 a 3.

4.1 Denní mapy

Z výsledků křížového ověřování vyplývá, že stávající mapy jsou

systematicky nadhodnocené s průměrnou odchylkou u venkovské mapové vrstvy 0,52 µg.m⁻³ a u městské 0,28 µg.m⁻³. Toto systematické vychýlení je výrazně vyšší než u nového přístupu, kde dosáhlo hodnot -0,04, resp. -0,07 µg.m⁻³. Obdobně vylepšení se ukázalo také v případě průměrné RMSE, která byla u stávající venkovské mapové vrstvy 9,3 µg.m⁻³ a u městské 6,6 µg.m⁻³. U nového přístupu dosáhla průměrná hodnota RMSE u venkovské mapové vrstvy 6,6 µg.m⁻³ a u městské 5,7 µg.m⁻³. Celkový přehled statistik křížového ověřování je uveden v tab. 1. Grafické znázornění distribuce RMSE a systematického vychýlení je na obr. 5.

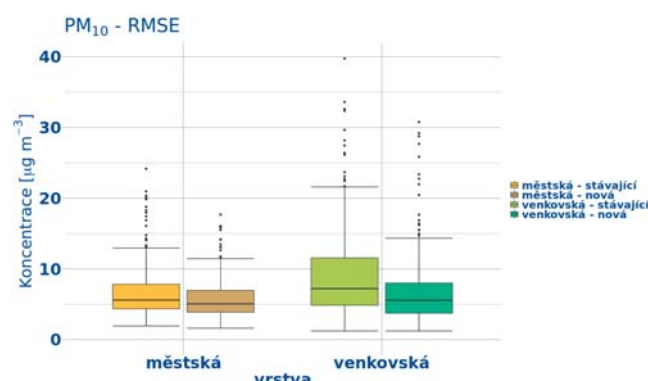
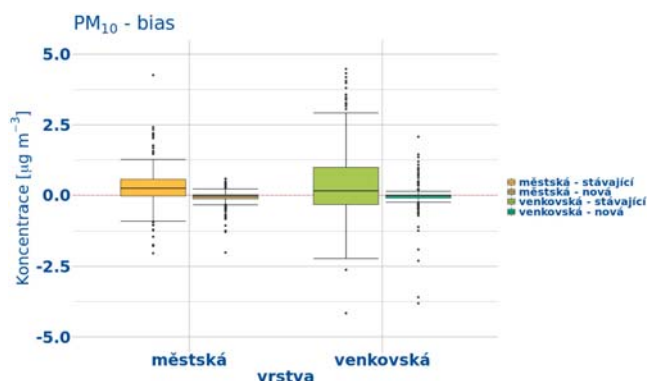
Předpoklad kladné (v případě nadmořské výšky záporné) korelace měřených hodnot s podkladovými daty nebyl u stávajícího přístupu splněn přibližně ve třetině dnů (u alespoň jedné mapové vrstvy), a v těchto dnech byla použita prostá interpolace měřených hodnot. U nového přístupu tato situace nastala pouze ve třech případech pro obě mapové vrstvy. Jako nejčastěji začleněný podklad se ukázal model CAMx, který byl využit ve více než 78 % případů (tab. 2 a 3).

Zvláště důležité je porovnat přesnost map v období vysokých koncentrací. Pro tento účel bylo zvoleno období na začátku listopadu 2015, kdy byla vyhlášena smogová situace v 7 z 15 oblastí České republiky. Na obr. 7 je znázorněn časový průběh denních koncentrací (průměr ze všech stanic) měřených na stanicích a odhadnutých v místě stanic pomocí křížového ověřování stávajícím i novým přístupem. Dále je zobrazen časový průběh příslušné RMSE a systematického vychýlení. Stávající přístup výrazně nadhodnocoval vysoké koncentrace ve dnech

Tab. 1 Výsledky křížového ověřování pro stávající a nový způsob tvorby operativních map PM₁₀. prům ... průměr, Q_{0,25} ... spodní kvartil, med ... medián, Q_{0,75} ... horní kvartil.

Table 1. Results of cross-validation for the current and new approach to near real-time PM₁₀ mapping. prům ... mean, Q_{0,25} ... lower quartile, med ... median, Q_{0,75} ... upper quartile.

Mapová vrstva PM ₁₀	Způsob mapování	RMSE [µg.m ⁻³]				nRMSE [%]				bias [µg.m ⁻³]				FAC2
		prům	Q _{0,25}	med	Q _{0,75}	prům	Q _{0,25}	med	Q _{0,75}	prům	Q _{0,25}	med	Q _{0,75}	
Městská denní	stávající	6,6	4,4	5,6	7,8	28	23	27	31	0,28	-0,03	0,25	0,56	0,97
	nový	5,7	3,9	5,1	7,0	24	20	23	28	-0,07	-0,12	-0,03	0,02	0,98
Venkovská denní	stávající	9,3	4,9	7,3	11,6	43	30	43	52	0,52	-0,31	0,16	1,03	0,85
	nový	6,6	3,8	5,6	8,0	32	23	31	38	-0,04	-0,09	-0,01	0,01	0,92
Městská hodinová	stávající	11,8	8,1	10,5	13,9	53	40	49	62	0,20	-0,35	0,15	0,69	0,82
	nový	10,5	7,2	9,4	12,4	47	36	44	55	-0,12	-0,22	-0,04	0,04	0,85
Venkovská hodinová	stávající	13,7	7,3	11,1	16,7	66	49	62	78	0,46	-0,61	0,17	1,19	0,68
	nový	11,0	6,3	9,0	13,1	56	39	50	64	-0,09	-0,11	-0,01	0,01	0,76



Obr. 5 Rozložení celkových nejistot map průměrných denních koncentrací PM₁₀. Krabičky zobrazují spodní kvartil, medián a horní kvartil; „spodní vous“ nejmenší hodnotu větší než dolní kvartil – 1,5*násobek mezikvartilového rozpětí (IQR), „horní vous“ největší hodnotu menší než horní kvartil + 1,5*IQR a body odlehlé hodnoty.

Fig. 5. Total uncertainties of daily maps of PM₁₀. Boxes display 1st quartile, median, 3rd quartile; lower whisker is the smallest value greater than or equal to 1st quartile – 1.5*IQR (interquartile range), upper whisker is the largest value less than or equal to 3rd quartile + 1.5*IQR, dots are outliers.

Tab. 2 Stávající způsob tvorby operativních map – počet dní/hodin z roku 2015, kdy byla použita daná doplňková data pro tvorbu městské a venkovské vrstvy.

Table 2. Current approach to near real-time PM₁₀ mapping – number of days/hours in 2015, when particular supplementary data were used in producing urban and rural layer.

Typ map	Mapová vrstva	Jen interpolace	Pětiletí	SYMOS
Denní	městská	257	104	108
	venkovská	226	122	139
Hodinové	městská	5 851	2 373	2 909
	venkovská	5 704	2 190	3 056

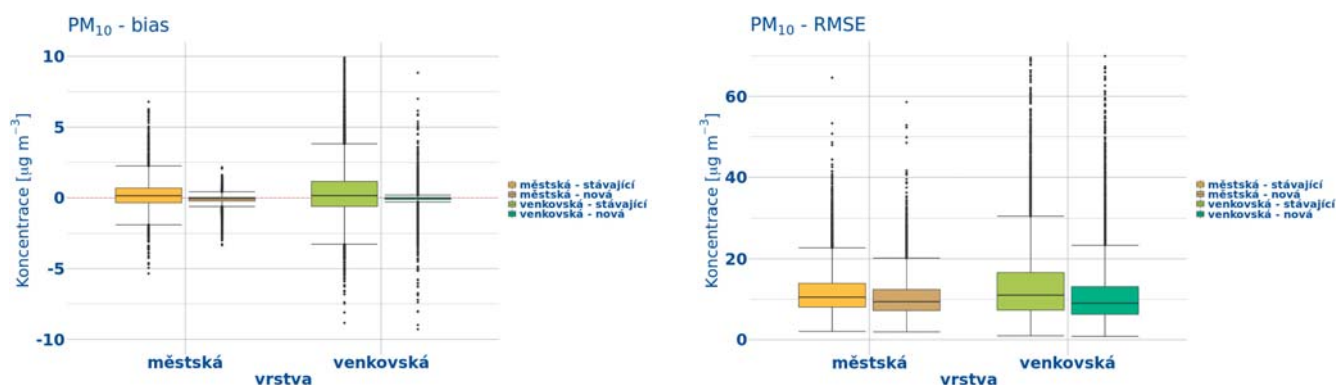
Pozn.: Jen interpolace – nebyla použita žádná z podkladových vrstev. Mapa vznikla prostou interpolací (IDW) staničních dat.

Tab. 3 Nový způsob tvorby operativních map – počet dní/hodin z roku 2015, kdy byla použita daná doplňková data pro tvorbu městské a venkovské vrstvy.

Table 3. New approach to near real-time PM₁₀ mapping – number of days/hours in 2015, when particular supplementary data were used in producing urban and rural layer.

Typ map	Mapová vrstva	Jen interpolace	CAMx	Nadm. výška	Ročenka (venkovská)	Ročenka (městská)
Denní	městská	3	286	167	nebylo použito	321
	venkovská	3	297	170	260	nebylo použito
Hodinové	městská	244	6 376	3 974	nebylo použito	6 378
	venkovská	331	6 314	4 073	5 281	nebylo použito

Pozn.: Jen interpolace – nebyla použita žádná z podkladových vrstev. Mapa vznikla prostou interpolací (kriging) staničních dat.



Obr. 6 Rozložení celkových nejistot map průměrných hodinových koncentrací PM₁₀. Krabíčky zobrazují spodní kvartil, medián a horní kvartil, „spodní vous“ nejmenší hodnotu větší než dolní kvartil – 1,5násobek mezikvartilového rozpětí (IQR), „horní vous“ největší hodnotu menší než horní kvartil + 1,5*IQR a body odlehle hodnoty.

Fig. 6. Total uncertainties of hourly maps of PM₁₀. Boxes display 1st quartile, median, 3rd quartile; lower whisker is the smallest value greater than or equal to 1st quartile – 1.5*IQR (interquartile range), upper whisker is the largest value less than or equal to 3rd quartile + 1.5*IQR, dots are outliers.

4.–6. listopadu. Zatímco u nového přístupu není systematické vychýlení výrazně závislé na absolutních koncentracích, u stávajícího přístupu je patrný jeho nárůst během extrémě naměřených hodnot.

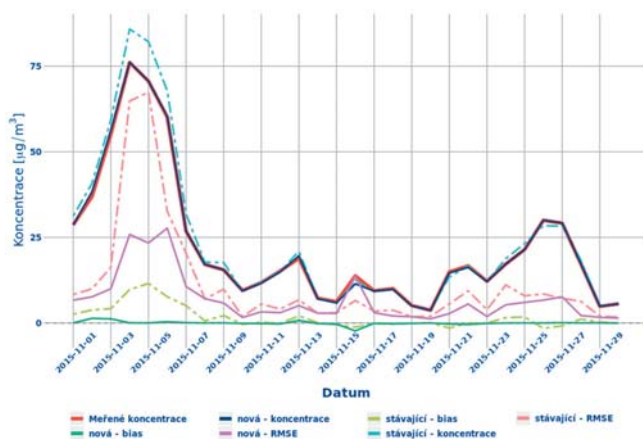
4.2 Hodinové mapy

Stejně jako v případě denních map vyplývá z výsledků křížového ověřování, že stávající hodinové mapy jsou systematicky nadhodnocené s průměrným vychýlením u venkovské mapové vrstvy 0,46 µg.m⁻³ a u městské 0,20 µg.m⁻³. Zejména u městské vrstvy je toto systematické nadhodnocení nižší než u denních map. U nového přístupu klesla průměrná odchylka u venkovské mapové vrstvy na -0,09 µg.m⁻³ a u městské na -0,12 µg.m⁻³. Obdobné vylepšení se ukázalo také v případě průměrné RMSE, která byla u stávající venkovské mapové vrstvy 13,7 µg.m⁻³ a u městské 11,8 µg.m⁻³. U nových map dosáhla průměrná hodnota RMSE u venkovské mapové vrstvy 11,0 µg.m⁻³ a u městské 10,5 µg.m⁻³. Zřetelný je zejména pokles horního kvartilu RMSE u venkovské mapové vrstvy. Celkový přehled statistik křížového ověřování je uveden v tab. 1. Grafické znázornění distribuce RMSE a systematického vychýlení je na obr. 6.

Předpoklad kladné (v případě nadmořské výšky záporné) korelace měřených hodnot s podkladovými daty nebyl u stávajícího přístupu splněn přibližně ve 44 % hodin pro alespoň jednu mapovou vrstvu, v těchto případech byla použita prostá interpolace měřených hodnot. U nového přístupu tato situace nastala přibližně ve 3 % hodin pro obě mapové vrstvy. U nové metodiky se jako nejčastěji začleněný podklad ukázal model CAMx, který byl využit ve více než 72 % případů (tab. 2 a 3).

Časový průběh hodinových koncentrací v první dekádě listopadu 2015 je na obr. 8. V období vysokých koncentrací je RMSE stávajících map až dvojnásobná v porovnání s novým přístupem. Stejně jako v případě denních map lze konstatovat, že u nových map není systematické vychýlení tak silně závislé na absolutních koncentracích.

Ukázka výsledných map je na obr. 9. Odpovídající výstup modelu CAMx je uveden na obr. 3. Je zřejmé, že mapa tvořená novým přístupem převzala prostorové rozložení koncentrací modelu CAMx (např. pás zvýšených koncentrací táhnoucí se ze Středočeského kraje přes Vysočinu), které je pro danou hodinu odlišné od ostatních podkladových dat.



Obr. 7 Časový průběh průměrných denních koncentrací PM_{10} na stanicích (průměr ze všech stanic) a nejistot map pro listopad 2015. Mapované koncentrace jsou v místě stanice spočteny metodou křížového ověřování.

Fig. 7. Time series of daily PM_{10} concentrations (average from all stations) and related uncertainties, November 2015. Values in the station location are calculated by cross-validation.

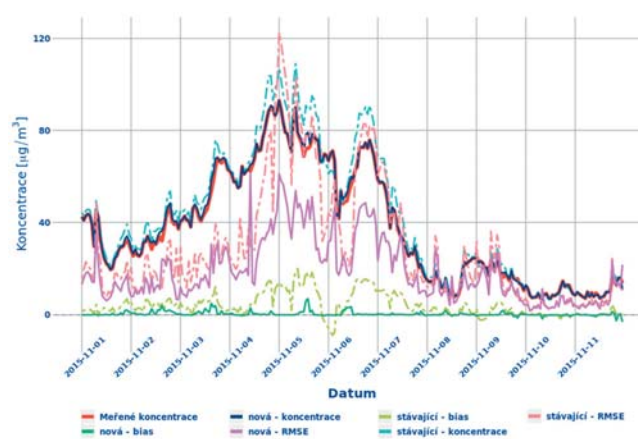
5. Diskuze

V článku jsou srovnávány dva různé způsoby tvorby operativních dat, založené na stejné metodice, ale lišící se doplňkovými daty a způsobem interpolace zbylé variability měřených koncentrací, která není vysvětlena lineární regresí mezi měřeními a doplňkovými daty. Článek poskytuje informaci, jak se změnila výsledná přesnost map, byť z důvodu rozsahu provedené studie detailně nerozebírá, do jaké míry je toto způsobeno změnou interpolační metody, nebo naopak zahrnutím jiných doplňkových dat. Každopádně je však možné říci, že nová doplňková data vedou k žádoucímu zpřesnění, což vyplývá mj. z výrazného poklesu případů, kdy je mapa tvořena pouze interpolací staničních dat (srovnej tab. 2 a tab. 3). Zároveň se ukázalo, že model CAMx je v porovnání se statickými podklady častěji využíván zejména při tvorbě venkovské mapové vrstvy, což souvisí jak s jeho hrubším horizontálním rozlišením, tak s výrazně menším počtem venkovských stanic. Další možností zpřesnění hodinových map, zejména v případě rychle se měnících rozptylových podmínek, by mohlo být začlenění dalších hodinových výstupů z modelu CAMx ze zvoleného okna kolem dané hodiny po operativním testování, zda nevykážou lepší regresi s naměřenými daty než modelový výstup po danou hodinu.



Obr. 9 Průměrná hodinová koncentrace PM_{10} 6. 11. 2015 v 10:00 UTC (výsledná kombinovaná mapa). Stávající (vlevo) a nový (vpravo) způsob mapování.

Fig. 9. Hourly PM_{10} concentration on 6th November 2015, 10:00 UTC (final combination of rural and urban maps). Current and new approach (left and right respectively).



Obr. 8 Časový průběh průměrných hodinových koncentrací PM_{10} na stanicích (průměr ze všech stanic) a nejistot map pro první dekádu listopadu 2015. Mapované koncentrace jsou v místě stanice spočteny metodou křížového ověřování.

Fig. 8. Time series of hourly PM_{10} concentrations (average from all stations) and related uncertainties, 1–11 November 2015. Values in the station location are calculated by cross-validation.

Výstupy rozptylového modelu jsou samozřejmě zatíženy značnou nejistotou, a to zejména na straně emisních vstupů. Obecně platí, že čím je silnější vazba mezi modelem a měřením, tím menší roli hraje interpolace reziduí. To je samozřejmě žádoucí, ale zároveň z toho vyplývá důležitost co nejpřesnějšího popisu koncentrací modelem (a tedy i emisí) i mimo místa měření. V opačném případě je mapa zatížena chybou, kterou není v porovnání se staničními daty možné odhalit.

6. Závěr

Pro rok 2015 byl vyzkoušen nový způsob tvorby operativní denních a hodinových map PM_{10} , který ve srovnání se stávajícím způsobem používá alternativní doplňková data, zejména aktuální výstupy chemického transportního modelu CAMx, a který pro interpolaci reziduí využívá metodu kriging (namísto doposud užívané metody IDW). V porovnání se stávajícími operativními mapami odstranil systematické vychýlení, které bylo výrazné zejména ve venkovských oblastech, a snížil celkovou chybu, opět zejména ve venkovských oblastech. Dále byly téměř eliminovány případy, kdy je mapa tvořena prostou interpolací staničních dat. U nového přístupu také není systematické vychýlení tak silně závislé na velikosti měřených koncentrací. Výrazné zpřesnění nastalo zejména v období

smogových situací. Provozní využití nového přístupu tvorby operativních map PM₁₀ je předpokládáno od konce roku 2020. V následujících letech bude obdobné zpřesnění probíhat i pro další látky (ozon, oxid dusičitý a oxid siřičitý).

Poděkování:

Autoři děkují dr. Brožkové za poskytnutí informací o konfiguraci operativní verze modelu ALADIN v roce 2015.

Literatura:

- BENEŠOVÁ, N. et al., 2018. New open source emission processor for air quality models. In SOKHI, R. et al. (eds.) Proceedings of Abstracts 11th International Conference on Air Quality Science and Application. DOI: 10.18745/PB.19829. (pp. 27). WWW: <http://fume-ep.org>.
- BUBNÍK, J., KEDER, J., MACOUN, J., MAŇÁK, J., 1998. SYMOS '97. Systém modelování stacionárních zdrojů. Praha: ČHMÚ. ISBN 80-85813-55-6.
- BUČÁNEK, A., BROŽKOVÁ, R., TROJÁKOVÁ, A., 2015. Asimilační schéma BlendVar v ČHMÚ. *Meteorologické zprávy*, roč. 68, č. 6, s. 180–185. ISSN 0026-1173.
- BUILTJES, P., J. H., van LOON, M., SCHAAP, M., TEEUWISSE, S., VISSCHEDIJK, A., J. H., BLOOS, J., P., 2003. Project on the modelling and verification of ozone reduction strategies: contribution of TNO-MEP, TNO-report, MEP-R2003/166, Apeldoorn, The Netherlands.
- BYUN, D. W., CHING, J. K. S., 1999. Science Algorithms of the EPA Model-3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) Modeling System. Office of Research and Development, U.S. EPA tech. report EPA/600/R-99/030, North Carolina, 1999. Dostupné také z WWW: https://www.cmascenter.org/cmaq/science_documentation/.
- ČHMÚ, 2014a. Znečištění ovzduší na území České republiky v roce 2013. Praha: ČHMÚ. ISBN 978-80-87577-37-0. [online]. [cit. 5. 3. 2020]. Dostupné také z WWW: http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/grafroc/13groc/gr13cz/Obsah_CZ.html.
- ČHMÚ, 2014b. Průměrné koncentrace za roky 2009–2013, Česká republika. [online]. [cit. 8.4. 2020]. Dostupné také z WWW: http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/ozko/13petileti/png/index_CZ.html.
- ČHMÚ, 2015. Znečištění ovzduší na území České republiky v roce 2014. Praha: ČHMÚ. ISBN 978-80-87577-52-3. [online]. [cit. 5. 3. 2020]. Dostupné také z WWW: http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/grafroc/14groc/gr14cz/Obsah_CZ.html.
- ČHMÚ, 2020. Informace o modelu SYMOS. [online]. [cit. 13. 3. 2020]. Dostupné z WWW: <http://portal.chmi.cz/aktualni-situace/stav-ovzdusi/modelovani-kvality-ovzdusi/model-symos>.
- CRESSIE, N., 1993. Statistics for spatial data. New York: Revised. New York: Wiley. ISBN 0-471-00255-0.
- DE SMET, P., HORÁLEK, J., COŇKOVÁ, M., KURFÜRST, P., DE LEEUW, F. et al., 2011. European air quality maps of ozone and PM10 for 2008 and their uncertainty analysis. ETC/ACC Technical Paper 2010/10. [online]. [cit. 5. 3. 2020]. Dostupné z WWW: https://www.eionet.europa.eu/etcs/etc-atni/products/etc-atni-reports/etcacc_tp_2010_10_spatamaps_2008.
- DENIER van der GON, H., HENDRIKS, C., KUENEN, J., SEGERS, A., VISSCHEDIJK, A., 2011. Description of current temporal emission patterns and sensitivity of predicted AQ for temporal emission patterns. EU FP7 MACC deliverable report D_D-EMIS_1.3. WWW: www.gmes-atmosphere.eu/documents/deliverables/d-emis/MACC_TNO_del_1_3_v2.pdf.
- EC, 2015. Commission Regulation (EU) 2015/1189 of 28 April 2015 implementing Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council with regard to ecodesign requirements for solid fuel boilers, Annex III, point 4b. WWW: <http://data.europa.eu/eli/reg/2015/1189/oj>.
- ECCAD, 2018. CAMS European anthropogenic emissions v1.1 – Air pollutants (CAMS-REGv1.1-AP). [on-line]. [cit. 12. 3. 2020]. Dostupné z WWW: <https://permalink.aeris-data.fr/CAMS-REGv1.1-AP>.
- ECMWF, 2020. CAMS Global archived analysis and forecast daily data. [on-line]. [cit. 12. 3. 2020]. Dostupné z WWW: <https://confluence.ecmwf.int/pages/viewpage.action?pageId=56659592>.
- ENVIRON, 2011. User's Guide to the Comprehensive Air Quality Model with Extensions (CAMx) Version 5.40. [on-line]. [cit. 12. 3. 2020]. Dostupné z WWW: <http://www.camx.com>.
- ENVIRON, 2020. wrfcamx-26feb19.tgz – a program that generates CAMx v6+ meteorological input files from WRF/ARW v3/4 output files. [on-line]. [cit. 12. 3. 2020]. Dostupné z WWW: <http://www.camx.com>.
- GIARD, D., BAZILE, E., 2000. Implementation of a New Assimilation Scheme for Soil and Surface Variables in a Global NWP Model. *Monthly Weather Review*, roč. 128, č. 4, s. 997–1015. ISSN 0027-064.
- GRANIER, C. et al., 2012. Report on the update of anthropogenic surface emissions, MACC-II deliverable report D_22.1.
- GUENTHER, A. B. et al., 2012. The Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature version 2.1 (MEGAN2.1): an extended and updated framework for modeling biogenic emissions. *Geoscientific Model Development*, Vol. 5, s. 1471–1492. Dostupné z WWW: <http://www.geosci-model-dev.net/5/1471/2012/>.
- HORÁLEK, J., DENBY, B., DE SMET, P., DE LEEUW, F., KURFÜRST, P. et al., 2007. Spatial mapping of air quality for European scale assessment. ETC/ACC Technical paper 2006/6. [online]. [cit. 5. 3. 2020]. Dostupné z WWW: https://www.eionet.europa.eu/etcs/etc-atni/products/etc-atni-reports/etcacc_techpaper_2006_6_spat_aq.
- KUENEN, J. J. P., VISSCHEDIJK, A. J. H., JOZWICKA, M., DENIER van der GON, H., 2014. TNO-MACC_II emission inventory; a multi-year (2003–2009) consistent high-resolution European emission inventory for air quality modelling. *Atmospheric Chemistry and Physics*, Vol. 14, s. 10963–10976. Dostupné z WWW: <https://doi.org/10.5194/acp-14-10963-2014>.
- MŽP, 2017. Opatření č. 17/17 Ministerstva životního prostředí o vydání úplného znění zřizovací listiny státní příspěvkové organizace Český hydrometeorologický ústav. Praha 4. října 2017, čj. MZP/2017/110/396. Dostupné z WWW: <http://portal.chmi.cz/o-nas/zakladni-dokumenty>.
- NOVAK, J., JIŘINA, M., BENEŠOVÁ, M., 2019. Projekt TDD-ČR, POPIS MODELU TDD verze 3.9, Výzkumná zpráva č. V-1261, Ústav Informatiky AV ČR, v.v.i. [on-line]. [cit. 12. 3. 2020]. Dostupné z WWW: <https://www.ote-cr.cz/cs/dokumentace/dokumentace-plyn/dokumentace-k-tdd-plyn>.
- OTE, 2020. Normalizované typové diagramy dodávek plynu. [on-line]. [cit. 12. 3. 2020]. Dostupné z WWW: <https://www.ote-cr.cz/cs/statistika/typove-diagramy-dodavek-plynu/normalizovane-tdd>.
- PASSANT, N. R., 2002. Speciation of UK emissions of non-methane volatile organic compounds. AEA Technology, 2002. [on-line]. [cit. 12. 3. 2020]. Dostupné z WWW: http://uk-air.defra.gov.uk/reports/empire/AEAT_ENV_0545_final_v2.pdf.
- SCHAAP, M., ROEMER, M., SAUTER, F., BOERSEN, G., TIMMERMANS, R., BUILTJES, P. J. H., 2005. LOTOS-EUROS: Documentation, TNO report B&O-A, 2005-297, Apeldoorn. Dostupné z WWW: http://wdc.dlr.de/data_products/projects/promote/IAQ/Documentation-LOTOS-2005-297.pdf.
- TERMONIA, P., FISHER, C., BAZILE, E., BOUYSSSEL, F., BROŽKOVÁ, R. et al., 2018. The ALADIN System and its canonical model configurations AROME CY41T1 and ALARO CY40T1. *Geosci. Model Dev.*, Vol. 11, s. 257–281. Dostupné z WWW: <https://doi.org/10.5194/gmd-11-257-2018>.

Lektoři (Reviewers):

Mgr. Blanka Krejčí, Ph.D.,

Mgr. Peter Huszár, Ph.D.

Zpráva Světové meteorologické organizace o stavu klimatu ve světě v roce 2019 – část I.

The WMO report on the Status of the Global Climate in 2019 – part I.

The WMO report on the Status of the Global Climate in 2019. Since 1994 the World Meteorological Organization (WMO) has been publishing its annual “WMO Statement on the Status of the Global Climate”. The report has gradually gained in popularity and recently is a recognized authoritative source of information for the scientific community, the media and the general public. The report presented is the latest link of this successful sequence. The journal Meteorologické zprávy (Meteorological Bulletin) offers to its readers an abbreviated version of the report.

KLÍČOVÁ SLOVA: globální teplota průměrná – úhrn srážek globální – plyny skleníkové – ozon – hladina oceánu – obsah oceánu tepelný – acidifikace – led mořský

KEY WORDS: average global temperature – globally precipitations – greenhouse gases – ozone – sea level – ocean heat content – acidification – sea-ice

1. Předmluva

Tato zpráva je dvacátým šestým prohlášením Světové meteorologické organizace (SMO) o stavu globálního klimatu. Představuje trvalé mezinárodní úsilí zaměřené na výstupy vědeckých analýz vedoucí k porozumění meziročním změnám a dlouhodobých trendů měnícího se klimatu, jak v úvodu konstatuje generální tajemník SMO Petteri Taalas.

Mezi hlavní zjištění letošní zprávy patří pokračující růst skleníkových plynů, zejména CO₂. Rok 2019 skončil s celosvětovou průměrnou teplotou o 1,1 °C nad odhadovaným průměrem před industrializací, což je druhé místo po rekordní hodnotě z roku 2016. Bez úlohy El Niño, který měl vliv na růst oteplování pozorované v roce 2016, by se býval mohl rok 2019 stát rekordním.

Teplota je jedním z ukazatelů probíhající změny klimatu. Rovněž hladiny moří stoupají rychlejším tempem, a to kvůli většímu oteplování oceánů, na povrchu i v hloubkách a prostřednictvím zvýšeného tání grónského ledu a ledovců, což vystavuje pobřežní oblasti a ostrovy většímu riziku záplav a zatopení nízkopoložených oblastí.

V roce 2019 se vyskytly požáry nebývalého rozsahu spojené s horkými vlnami v kombinaci s dlouhým obdobím sucha. Tak tomu bylo v Austrálii, kde byly spá-

leny miliony hektarů půdy, také Sibiř a další arktické oblasti zasáhly požáry rekordní intenzity.

Kromě těchto jevů docházelo ke škodám způsobených vlivem počasí, jako jsou účinky víceletého sucha na vnitrostátní i přeshraniční migraci obyvatel, větší vystavení světové populace zdravotním rizikům a snížením hospodářského růstu, zejména v rozvojových ekonomikách, v důsledku znečištění, rostoucí teploty a extrémů počasí.

Tato zpráva ukazuje, že změna klimatu je již široce prokazatelná. K udržení oteplení pod 2 °C do konce století je zapotřebí ambicióznějšího úsilí o zmírnění změny klimatu. Světová meteorologická organizace bude i nadále pozorně sledovat proměnlivost a změnu klimatu a jejich vliv a vybuduje informační portál, který umožní sledovat ukazatele stavu klimatu.

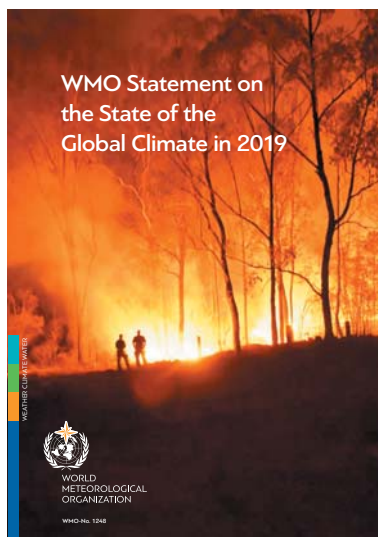
Generální tajemník SMO Petteri Taalas děkuje mnoha týmům odborníků v oblasti klimatologie a dalších disciplín, národním meteorologickým a hydrologickým službám, globálním a regionálním centřům pro sběr údajů a analýz o klimatu. Díky jejich nepřetržité spolupráci se prohlášení SMO o stavu globálního klimatu stalo stěžejní publikací poskytující politikům po celém světě základní informace o klimatu.

2. Prohlášení generálního tajemníka OSN A. Guterrese

Změna klimatu je hlavní výzvou naší doby. Čas, abychom odvrátili nejhorší narušení klimatu a chránili naše společnosti před nevyhnutelnými dopady, které přijdou, nám rychle vyprchává.

Věda nám říká, že i kdyby se nám podařilo omezit oteplení na 1,5 °C, budeme čelit výrazně vyšším rizikům narušení rovnováhy přírodních a lidských ekosystémů. Údaje v této zprávě ukazují, že rok 2019 byl již o 1,1 °C teplejší než doba před industrializací. Důsledky jsou již zřejmé. Vážnější a častější povodně, sucha a tropické bouře, nebezpečné vlny veder a stoupající hladiny moře již vážně ohrožují životy a živobytí na celé planetě.

V současnosti nejsme na cestě k dosažení cílů 1,5 °C nebo 2 °C, které Pařížská dohoda požaduje. Do roku 2030 musíme snížit emise skleníkových plynů o 45 % z úrovně roku 2010 a dosáhnout čistých nulových emisí do roku 2050.

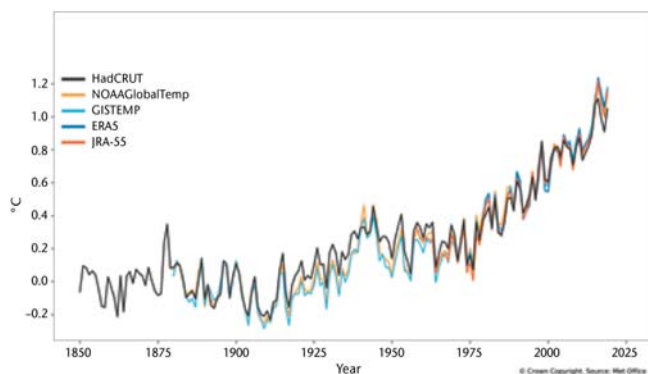


Obr. 1 Obálka publikace WMO.

Fig. 1. Cover of the WMO publication.



Obr. 2 Klíčové události.
Fig. 2. Key messages.



Obr. 3 Globální odchylka roční průměrné teploty od předindustriálních podmínek (1850–1900). Dvě reanalýzy (ERA5 a JRA-55) jsou v období 1981–2010 v souladu s přízemními datovými sadami (HadCRUT, NOAA GlobalTemp a GISTEMP).

Fig. 3. Global annual mean temperature difference from preindustrial conditions (1850–1900). The two reanalyses (ERA5 and JRA-55) are aligned with the in situ datasets (HadCRUT, NOAA GlobalTemp and GISTEMP) over the period 1981–2010.

K tomu potřebujeme politickou vůli a naléhavá opatření, abychom stanovili jinou cestu.

Tato zpráva nastiňuje nejnovější vědecké poznatky a ukazuje naléhavost pro dalekosáhlá opatření v oblasti klimatu. Shromažďuje údaje z různých oborů vědy o klimatu a uvádí potenciální budoucí následky změny klimatu – od zdravotních a ekonomických, po sníženou bezpečnost potravin a větší vysídlování.

Vyzývám všechny – od vládních činitelů, občanských sdružení a vedení podniků po jednotlivé občany – aby respektovali tato fakta a přijali naléhavá opatření pro zastavení nejhorších důsledků změny klimatu. Potřebujeme včas větší aktivitu v oblasti zmírňování dopadů, adaptace a financování, pro plánovanou konferenci o klimatu (COP26), která se má letos konat v listopadu v Glasgow¹. To je jediný způsob, jak zajistit bezpečnější, prosperující a udržitelnější budoucnost pro všechny lidi na zdravé planetě.

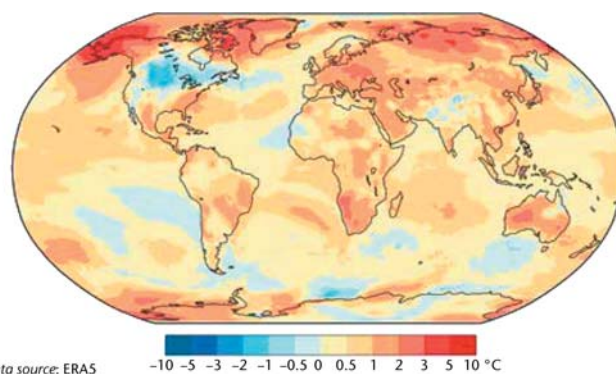
3. Klíčové ukazatele klimatu

Globální klimatické indikátory popisují měnící se klima a poskytují jeho široký obraz. Přinášejí důležité informace pro oblasti nejvýznamnější pro změnu klimatu, včetně složení atmosféry, energetických změn, které vznikají v důsledku akumulace skleníkových plynů a dalších faktorů, a reakcí pevniny, oceánů a kryosféry. Mezi klíčové globální ukazatele klimatu patří globální průměrná povrchová teplota, koncentrace skleníkových plynů v atmosféře, tepelný obsah oceánu, úroveň hladiny oceánu, okyselení oceánu, rozsah mořského ledu a hmotnostní bilance ledovců a ledových ploch.

3.1 Teplota

Globální průměrná teplota byla v roce 2019 kolem 1,1 ± 0,1 °C nad základní hodnotou z let 1850–1900, která byla použita jako aproximace předindustriálních hodnot. Rok 2019 je zatím druhým nejteplejším v historii. Hodnocení

¹ Z důvodu globální epidemiologické situace byla konference přesunuta na rok 2021 (pozn. překladatele).



Data source: ERA5 -10 -5 -3 -2 -1 -0.5 0 0.5 1 2 3 5 10 °C

Obr. 4 Odchylky teploty vzduchu na souši v roce 2019 v porovnání s průměrem let 1981–2010 (Zdroj: European Centre for Medium-range Weather Forecasts (ECMWF) ERA5 data, Copernicus Climate Change Service).

Fig. 4. Surface-air temperature anomaly for 2019 with respect to the 1981–2010 average (Source: European Centre for Medium-range Weather Forecasts (ECMWF) ERA5 data, Copernicus Climate Change Service).

SMO je založeno na pěti globálních datových sadách² teplot (obr. 3), přičemž čtyři z těchto pěti datových sad umístily rok 2019 na druhém místě a jeden soubor dat ho umístil jako třetí nejteplejší. Rozpětí pěti odhadů se pohybuje mezi 1,05 °C až 1,18 °C ve srovnání s předindustriální hodnotou.

Zvláštní zpráva *Globální oteplení 1,5 °C* (IPCC 2018, dále IPCC SR15) Mezivládního panelu pro změnu klimatu (IPCC) dospěla k závěru, že „oteplení vyvolané člověkem dosáhlo v roce 2017 přibližně 1 °C (pravděpodobně mezi 0,8 °C až 1,2 °C) nad předindustriální úrovní a zvyšuje se o 0,2 °C (pravděpodobně mezi 0,1 °C až 0,3 °C) za desetiletí (vysoká spolehlivost)“. Aktualizace údajů pro rok 2019 je v souladu s pokračujícím oteplováním v rozmezí 0,1 až 0,3 °C za desetiletí.

Rok 2016, který začal s mimořádně silným El Niño, zůstává nejteplejším v historii. Slabé podmínky El Niña v první polovině roku 2019 pravděpodobně přispěly jen k celosvětově vysoké roční teplotě, ale nedošlo zde začátkem roku k tak výraznému zvýšení teploty, jaké bylo vidět na začátku roku 2016.

Posledních pět let (2015–2019) je pět nejteplejších v historii měření. Poslední pětileté (2015–2019) i desetileté (2010–2019) průměry jsou také nejteplejší v historii. Od 80. let byla každá následující dekáda teplejší než kterákoli z předchozích.

Přestože globální roční oteplení je zřejmé, docházelo po celém světě k různému kolísání teplotních odchylek. Většina oblastí souše byla teplejší než nedávný normál (1981–2010, obr. 4). Rok 2019 patřil v Africe mezi tři nejteplejší roky v historii od roku 1950. Ostatní kontinentální průměry byly mezi třemi nejteplejšími, s výjimkou průměru pro Severní Ameriku, kde byl na 14. nejteplejším místě. Mimo-

² Datové sady zahrnují tři přízemní sady – HadCRUT.4.6.0.0 připravený UK Met Office a Climatic Research Unit Univerzity Jižní Anglie, NOAA GlobalTemp v5 připravený US NOAA a GISTEMP v4 připravený US NASA Goddardovým ústavem – a dvě sady reanalýz – ERA5 připravená ECMWF pro Copernicus Climate Change Service a JRA-55 připravená Japonskou meteorologickou službou.

řádne teplý byl americký stát Aljaška. Výjimečně teplé byly velké oblasti Arktidy, střední a východní Evropy, jižní Afriky, jihovýchodní Asie, části Austrálie (kde to byl nejteplejší a nejušší rok v historii), severovýchodní Asie a části Brazílie. Kromě Severní Ameriky se vyskytly oblasti s průměrnou teplotou jen omezeně.

3.2 Skleníkové plyny a ozon

Globální průměrné koncentrace skleníkových plynů se počítají z pozorování z mnoha míst, získaných programem Global Atmosphere Watch (GAW) programu SMO. Tato data jsou k dispozici ve Světovém datovém centru pro skleníkové plyny provozovaném Japonskou meteorologickou službou. Rok 1750 se používá jako základní reprezentativní hodnota předindustriálních podmínek.

Zvyšující se koncentrace skleníkových plynů v atmosféře je hlavním z klíčových faktorů změny klimatu. Atmosférické koncentrace odrážejí rovnováhu mezi zdroji (včetně emisí způsobených lidmi) a úložišti (absorpce biosférou a oceány). Koncentrace skleníkových plynů dosáhly v roce 2018 nového maxima, s globální průměrnou koncentrací oxidu uhličitého CO_2 $407,8 \pm 0,1$ ppm, metanu CH_4 1869 ± 2 ppb a oxidu dusného N_2O $331,1 \pm 0,1$ ppb (obr. 5). Meziroční růst tří hlavních skleníkových plynů byl větší než růst v předchozím roce i než průměrné tempo růstu za 10 let. Globální průměrné koncentrace v roce 2018 představují 147 %, 259 % a 123 % předindustriální úrovně (rok 1750).

Globální průměrné údaje za rok 2019 nebudou k dispozici až do konce roku 2020, ale aktuální data z konkrétních lokalit, včetně Mauna Loa (Havaj) a Cape Grim (Tasmánie), naznačují, že se množství CO_2 , CH_4 a N_2O se v roce 2019 na-

dále zvyšovalo. Zpráva IPCC SR15 říká, že omezení oteplení o $1,5^\circ\text{C}$ nad předindustriální úroveň předpokládá dosažení světových čistých nulových emisí CO_2 kolem roku 2050 a zároveň velké snížení emisí i jiných zdrojů než CO_2 , zejména metanu.

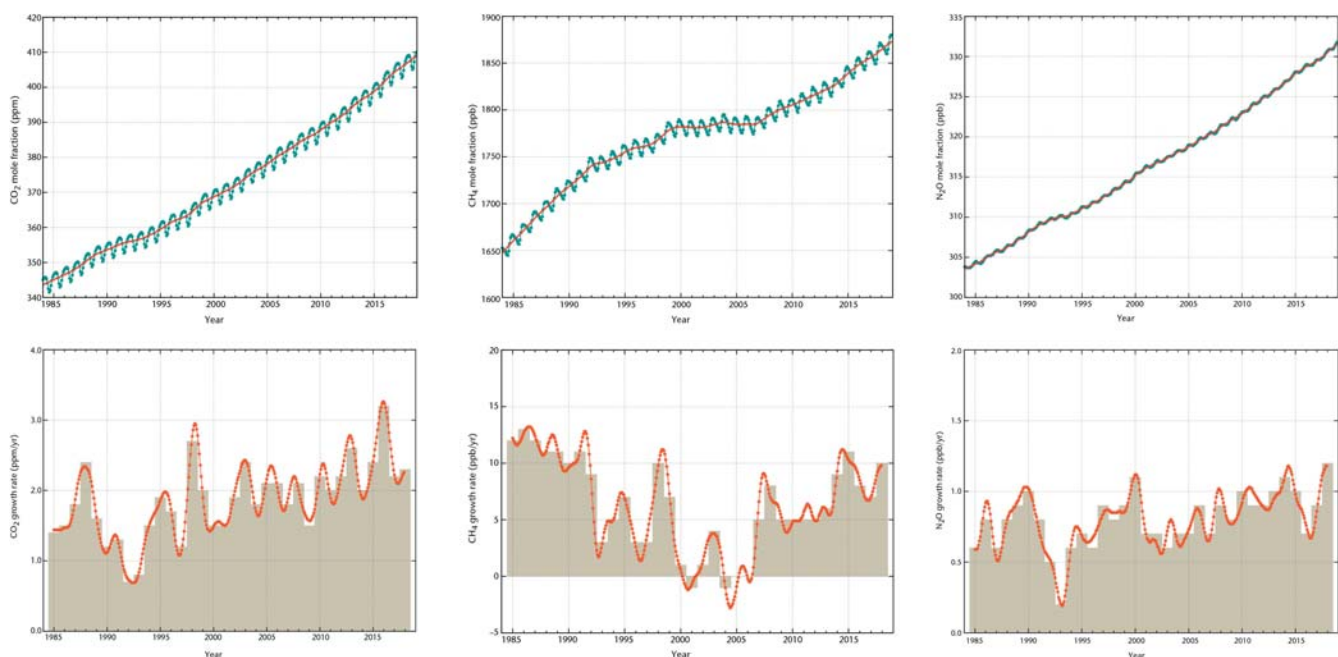
3.2.1 Globální uhlíkový rozpočet

Přesné posouzení antropogenních emisí CO_2 a jejich rozložení mezi atmosférou, oceánem a suchozemskou biosférou, tzv. globální uhlíkový rozpočet, je důležité pro lepší pochopení uhlíkového cyklu, podporuje rozvoj opatření v oblasti klimatu a zpřesňuje modelování budoucích klimatických scénářů.

Emise CO_2 z fosilních paliv se v posledních dvou stoletích neustále zvyšovaly, s krátkými přerušeními v důsledku významných hospodářských recesí nebo nárůstu cen ropy. Během desetiletí 2009–2018 byly roční globální emise fosilního CO_2 v průměru $34,7 \pm 1,8$ Gt (miliard tun), rostly průměrně o $0,9\%$ za rok a v 2018 dosáhly rekordních $36,6$ Gt CO_2 . Emise oxidu uhličitého ze změn ve využívání půdy byly ve stejném období $5,5 \pm 2,6$ Gt CO_2 bez jasného trendu (obr. 6).

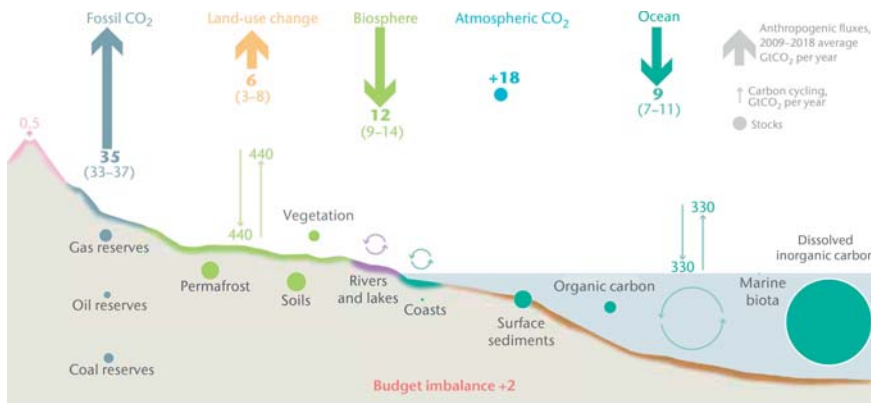
V desetiletí 2009–2018 vzrostla jak koncentrace CO_2 v atmosféře, tak jeho rychlost růstu, a v důsledku zvyšování koncentrací CO_2 v atmosféře pokračovala zvyšující se absorpce CO_2 půdou a oceány. Přibližně 45 % všech antropogenních emisí CO_2 je takto vstřebávaným zachyceno.

Předběžný odhad světových emisí fosilního CO_2 s využitím údajů z prvních tří čtvrtletí roku 2019 naznačil, že emise vzrostly v roce 2019 o $0,6\%$ (s přesností $-0,2\%$ až $+1,5\%$), což zahrnuje dokonce mírný pokles emisí v po-



Obr. 5 Horní řada: Celková průměrná koncentrace CO_2 ppm (vlevo), CH_4 (uprostřed) a N_2O (vpravo) ppb v období 1984 až 2018. Červená čára je průměr měsíčních koncentrací bez sezónních odchylek; modré tečky ukazují měsíční průměry. Dolní řada: Rychlost růstu je reprezentovaná meziročním přírůstkem koncentrace CO_2 ppm (vlevo), CH_4 (uprostřed) a N_2O (vpravo) ppb. Zdroj: WMO Global Atmosphere Watch.

Fig. 5. Top row: Globally averaged mole fraction (measure of concentration), from 1984 to 2018, of CO_2 in parts per million (left), CH_4 in parts per billion (centre) and N_2O in parts per billion (right). The red line is the monthly mean mole fraction with the seasonal variations removed; the blue dots and line show the monthly averages. Bottom row: The growth rates representing increases in successive annual means of mole fractions for CO_2 in parts per million per year (left), CH_4 in parts per billion per year (centre) and N_2O in parts per billion per year (right) (Source: WMO Global Atmosphere Watch).



Obr. 6 Změny globálního uhlíkového cyklu v důsledku lidských aktivit v desetiletém období 2009–2018. Antropogenní vliv se vyskytuje na vrcholu přírodních toků uhlíku, přičemž pohyb a zásoby představují tenčí šipky a kruhy. Nerovnováha mezi celkovými emisemi a celkovým ukládáním uhlíku odráží mezery v datech, modelování nebo v našem chápání uhlíkového cyklu (Zdroje: Globální uhlíkový projekt, <http://www.globalcarbonproject.org/carbonbudget>; Friedlingstein et al. 2019).

Fig. 6. Perturbation budget of the global carbon cycle as a result of human activities, averaged globally for the decade 2009–2018. The anthropogenic perturbation occurs on top of natural carbon fluxes, with fluxes and stocks represented by thinner arrows and circles. The imbalance between total emissions and total sinks reflects the gaps in data, modelling or our understanding of the carbon cycle (Sources: Global Carbon Project, <http://www.globalcarbonproject.org/carbonbudget>; Friedlingstein et al. 2019).

rovnání s rokem 2018. Emise z požárů v odlesňovaných oblastech naznačují, že emise ze změn ve využívání půdy za rok 2019 byly nad průměrem 2009–2018. V roce 2019 byla míra růstu atmosférického CO_2 $19,1 \pm 3,3$ Gt, což je nad průměrem 2009–2018, přičemž nárůst byl způsoben rostoucími emisemi CO_2 . Předběžné odhady pro zachytávání CO_2 v oceánu a na pevnině v roce 2019 byly 9,5 Gt a 14,3 Gt, oba nad svým desetiletým průměrem.

3.2.2 Skleníkové plyny a ozon

Na základě Montrealského protokolu bylo používání halonů a chlor-fluorovaných uhlovodíků (CFC) zastaveno. Jejich hladiny v atmosféře jsou však nadále sledovány, aby bylo možné pochopit pokračující účinky na ozonovou vrstvu, a detekovat neočekávané změny. Nedávné studie uvádějí zpomalení poklesu atmosférické koncentrace CFC-11 po roce 2012, což je spojeno se zvýšením globálních emisí, k nimž přispěly emise z východní Asie. Díky dlouhé životnosti zůstávají tyto sloučeniny v atmosféře po mnoho desetiletí. I když by nebyly žádné nové emise, v atmosféře je takové množství chloru a bromu, že v srpnu až prosinci způsobuje v některých oblastech Antarktidy úplné zničení ozonu. Ozonová díra se zde utváří každoročně na jaře pouze s různou velikostí a mocností, a její vlastnosti jsou do značné míry ovlivněny meteorologickými podmínkami.

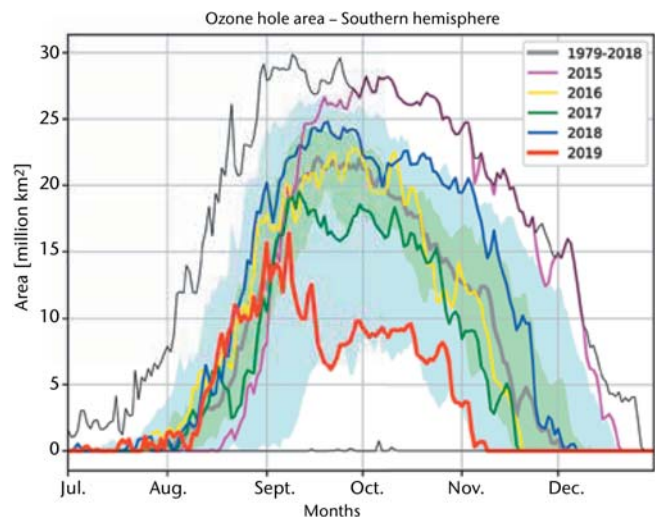
Ozonová díra se v roce 2019 vyvinula relativně brzy a pokračovala v růstu až do náhlého stratosférického oteplení v září, které narušilo postup ničení ozonu a vedlo k tomu, že ozonová díra byla menší a slabší než dlouhodobý průměr. Oblast úbytku ozonu byla pod dlouhodobým průměrem a minimum ozonu zůstalo nad dlouhodobým průměrem až do začátku listopadu, o několik týdnů dříve než obvykle. Rozloha ozonové díry v roce 2019 dosáhla svého maxima dne 8. září s 16,4 milionu km^2 . Pro srovnání: nejvyššího maxima dosáhla dne 9. září 2000 29,9 milionu km^2 a dne 24. září 2006 29,6 milionu km^2 podle analýzy amerického Národního úřadu pro letectví a kosmonautiku (NASA) (obr. 7).

3.3 Oceány

Oceán je důležitou součástí Země. Míra změny tepelného obsahu oceánu je měřítkem globálního oteplování, protože představuje velkou část tepla akumulujícího se v klimatickém systému. Tepelná expanze z oteplování oceánu spojená s táním ledu na pevnině vede ke zvýšení hladiny oceánu, což ovlivňuje pobřežní oblasti. Změna chemického složení oceánu vlivem stoupající koncentrace CO_2 v atmosféře snižuje pH oceánu.

3.3.1 Tepelný obsah oceánu

Tepelný obsah oceánu (OHC-Ocean Heat Content) je základním ukazatelem změny klimatu, protože se jedná o míru akumulace tepla na Zemi. Změny atmosférického složení vlivem člověka způsobují radiční nerovnováhu v horní části atmosféry, energetickou nerovnováhu Země, která je pohonným globálního oteplování. Vzhledem



Obr. 7 Plocha (miliony km^2) s celkovým ozonem pod 220 Dobsonových jednotek. Rok 2019 je zobrazen červeně, předchozí roky pro srovnání, silná šedá čára je průměr 1979–2018. Oblast mezi 30. a 70. percentilem je znázorněna tmavě zeleno-modře a světle zeleno-modrá barva představuje oblast mezi 10. a 90. percentilem pro období 1979–2017. Tenká černá čára ukazuje maximální a minimální hodnoty pro každý den v období 1979–2017. Graf zhotovila SMO na základě údajů získaných z Ozone Watch NASA (<https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/>). Data NASA jsou založena na satelitních pozorováních z OMI a TOMS.

Fig. 7. Area (millions of km^2) where the total ozone column is less than 220 Dobson units; 2019 is shown in red. The most recent years are shown for comparison as indicated by the legend. The smooth, thick grey line is the 1979–2018 average. The blue shaded area represents the 30th to 70th percentiles, and the green shaded area represents the 10th and 90th percentiles for the period 1979–2018. The thin black lines show the maximum and minimum values for each day in the 1979–2018 period. The plot is made at WMO on the basis of data downloaded from the NASA Ozone Watch (<https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/>). The NASA data are based on satellite observations from the OMI and TOMS instruments.

k velké tepelné kapacitě oceánu je zde většina (asi 90 %) této akumulované energie uložena.

Následně se oceán otepluje a ovlivňuje klimatický systém Země. Například zvýšení OHC přispívá prostřednictvím tepelné expanze mořské vody k více než 30 % pozorovaného globálního průměrného zvýšení hladiny moře. Ohřívání oceánu mění mořská proudění a nepřímo mění postup bouřek. Důsledky oteplování oceánu jsou patrné i na kryosféře Země, protože ledovce se stávají tenčí a ustupují. Oteplování zvyšuje stratifikaci oceánu a spolu s okyselením a deoxygenací oceánu může vést k dramatickým změnám jednotlivých ekosystémů a biologické rozmanitosti, k vymírání populace, bělení korálů, infekčním chorobám, změnám v chování (včetně reprodukce) a obměnám míst výskytu. Historická měření od 40. let 20. století se většinou opírala o techniky měření z lodí, které globálně omezovaly dostupnost pozorování podpovrchových teplot. Odhady OHC v globálním měřítku jsou tak často omezeny na období od roku 1960 a na vertikální integraci od povrchu do hloubky 700 m. S rozmístěním sítě nezávislých plovoucích bójí Argo, která dosáhla cílového pokrytí v roce 2006, je nyní možné rutinně měřit změny OHC až do hloubky 2000 m.

OHC v roce 2019 v horních 700 m (řada měření počínaje padesátými léty) a v horních 2000 m (řada měření počínaje rokem 2006) nadále rostla a dosáhla rekordní nebo téměř rekordní úrovně, přičemž průměr za rok překročil předchozí rekordní maximum z roku 2018. Rekordně se stupňující akumulací tepla od roku 1960 v horní vrstvě oceánu (0–700 m) se v poslední čtvrtině desetiletí zvýšil globální tepelný zisk oceánu a oteplení se projevilo i v hlubších vrstvách (0–2 000 m).

3.3.2 Mořské horké vlny

Stejně jako u vln veder na pevnině může extrémní teplo ovlivnit vrstvu oceánu v blízkosti povrchu s řadou důsledků pro mořský život a závislé komunity. K měření mořských horkých vln (marine heatwaves, MHW) lze použít satelitní měření teploty mořské hladiny. V tomto případě jsou MHW kategorizovány jako střední, pokud je teplota mořské hladiny po dobu pěti dnů nebo déle nad 90. percentilem klimatického rozdělení; silná, pokud je odchylka od dlouhodobého průměru více než dvojnásobek rozdílu mezi 90. percentilem a dlouhodobým průměrem; závažná, je-li odchylka od dlouhodobého průměru více než třikrát větší a extrémní, je-li tento rozdíl více než čtyřikrát větší.

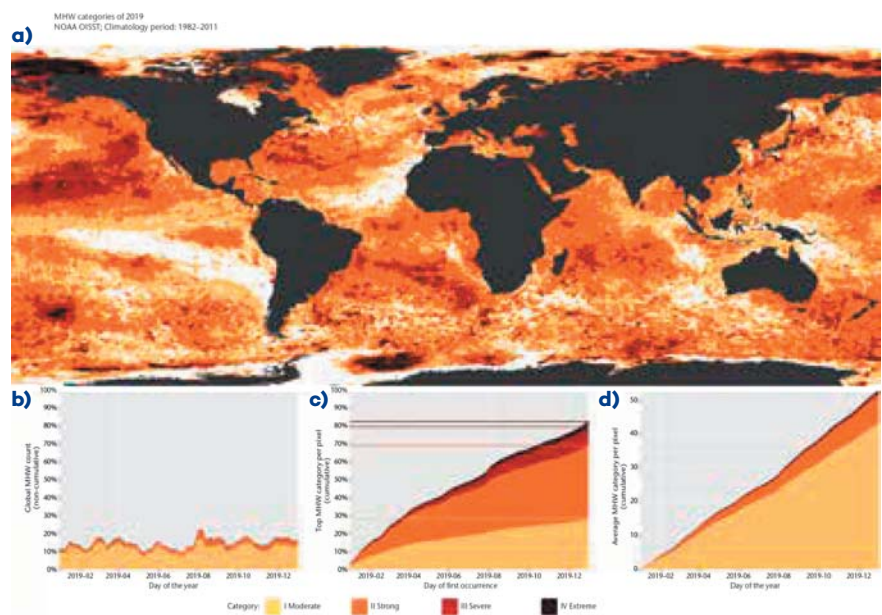
V roce 2019 (obr. 8) byl průměrný počet dní MHW po celém oceánu přibližně 55 dní na pixel, téměř 2 měsíce byly nezvykle vysoké teploty. Většina oceánu měla MHW klasifikovaný spíše jako silný (41 %) než mírný (29 %) a 84 % oceánu mělo alespoň jeden MHW. Ve velkých oblastech severovýchodního Pacifiku dosáhly MHW kate-

gorie „závažné“. Od roku 2014 do roku 2016 byla teplota mořské hladiny v této oblasti extrémně vysoká a tato masa nadprůměrně teplých vod byla označována jako „blob“. Další významnou oblastí je Tasmánské moře, kde byla řada MHW v letech 2015/2016, 2017/2018 a znovu v roce 2018/2019. Extrémní MHW koncem roku 2019 zasáhla oblast východně od Nového Zélandu. Klimatické události mezi lety 2011 a 2017, včetně mořských horkých vln a povodní, jsou spojeny s rozsáhlou úmrtností klíčových mořských organismů na více než 45 % australského pobřeží.

3.3.3 Úroveň hladiny oceánu

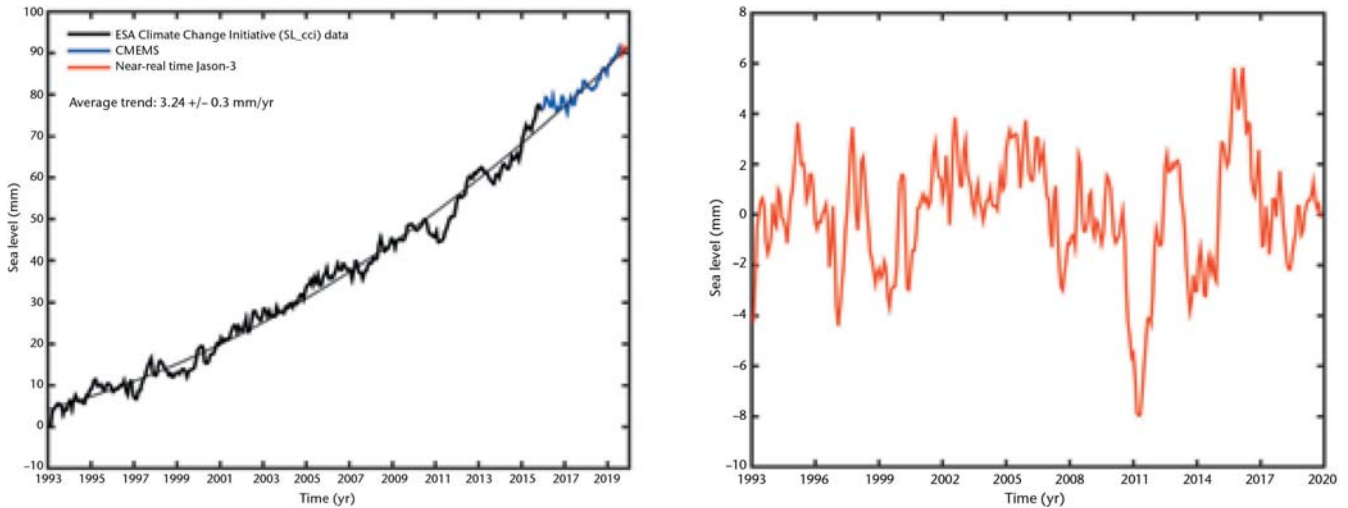
Hladina moře v roce 2019 nadále stoupala (obr. 9, vlevo), přičemž globální průměrná výška hladiny moře dosáhla maximální hodnoty od začátku přesného měření výšek (leden 1993). Průměrná míra růstu se za období 27 let odhaduje na $3,24 \pm 0,3$ mm za rok, ale v průběhu této doby se hodnota zvýšila. Větší úbytek ledové hmoty táním ledovců, je hlavní příčinou zrychleného nárůstu průměru světové výšky hladiny moře, společně se stabilně se zvyšující expanzí oceánských vod vyvolanou oteplováním.

Meziroční variabilita (obr. 9, vpravo) výšky hladiny moře je způsobena hlavně El Niño – jižní oscilací ENSO (viz část 3.5). Během El Niña se srážky přesouvají z tropických povodí na souši nad oceán (např. v letech 1997, 2012 a 2015). Během La Niña se naopak přesunují srážky z oceánu na



Obr. 8 (a) Globální mapa ukazující nejvyšší kategorii MHW zaznamenanou u každého pixelu v průběhu roku, odhadnutou pomocí dvou datových souborů NOAA OISST (referenční období 1982–2011). Bílá označuje, že během celého roku nedošlo v pixelech k žádnému MHW; b) Sloupcový graf znázorňující procentuální podíl pixelů oceánu, které se vyskytly v MHW, v kterýkoli daný den v roce; c) Sloupcový graf znázorňující kumulativní procento oceánu, který měl MHW v průběhu roku. Horizontální linie v tomto obrázku ukazují konečná procenta pro každou kategorii MHW; d) Sloupcový graf znázorňující kumulativní počet dní MHW průměrovaných na všech pixelech v oceánu (Zdroj: Robert Schlegel, Woods Hole).

Fig. 8. (a) Global map showing the highest MHW category experienced at each pixel over the course of the year, estimated using the NOAA OISST v2 dataset (reference period 1982–2011). White indicates that no MHWs occurred in a pixel over the entire year; (b) Stacked bar plot showing the percentage of ocean pixels experiencing an MHW on any given day of the year; (c) Stacked bar plot showing the cumulative percentage of the ocean that experienced an MHW over the year. Horizontal lines in this figure show the final percentages for each category of MHW; (d) Stacked bar plot showing the cumulative number of MHW days averaged over all pixels in the ocean30 (Source: Robert Schlegel, Woods Hole).



Obr. 9 Vlevo: Vývoj světové průměrné výšky hladiny oceánu za leden 1993–prosinec 2019 (vysoce přesné měření výšky). Tenká černá křivka je kvadratická funkce, která nejlépe odpovídá datům. Data ze Služby monitorování mořského prostředí Copernicus (CMEMS) začínají v lednu 2016 a data z Evropské organizace pro výzkum meteorologickými satelity (EUMETSAT) Jason-3 v říjnu 2019. Vpravo: Meziroční variabilita světové průměrné výšky hladiny moře ve stejném období (rozdíl mezi hladkou kvadratickou funkcí a změřenými hodnotami v levém panelu).

Fig. 9. Left: Global mean sea-level evolution for January 1993–December 2019, from high-precision altimetry. The thin black curve is a quadratic function that best fits the data. The data from the Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS) begin in January 2016 and those from the European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites (EUMETSAT) Jason-3 in October 2019. Right: Detrended global mean sea level over the same period (the difference between the smooth quadratic function and the measured values in the left panel).

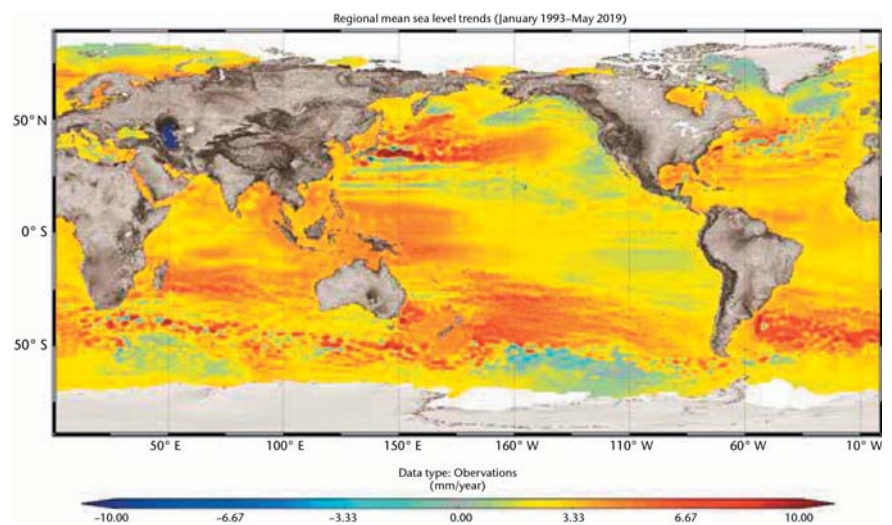
pevninu (například v roce 2011). Nárůst hladiny moře není regionálně stejný. Obr. 10 ukazuje změny trendů výšky hladiny oceánu od ledna 1993 do května 2019. Nejvýznamnější regionální rozdíly jsou na jižní polokouli východně od Madagaskaru v Indickém oceánu, východně od Nového Zélandu v Tichém oceánu a v jižním Atlantiku východně od Ria de la Platy v Jižní Americe. Na severní polokouli jsou nejvyšší rozdíly v severním Pacifiku. Dřívější maximum pozorované v západním tropickém Pacifiku během prvních dvou desetiletí přesného měření výšky postupně slábne. Nejednotné trendy výšky hladiny moře určují geografické odchylky v OHC, ale závisí také na dalších procesech v atmosféře a kryosféře.

3.3.4 Okyselení oceánů

V desetiletí 2009–2018 absorboval oceán kolem 23 % ročních emisí CO₂, což pomáhá zmírnit změny klimatu. Zvyšující se koncentrace CO₂ v atmosféře mění chemii oceánu, protože CO₂ reaguje s mořskou vodou a zvyšuje kyselost oceánu (snižuje jeho pH). Tento proces se nazývá okyselení oceánu. Změna pH je spojena s dalšími změnami chemie uhličitánů a některé mořské organismy (např. měkkýši, koráři) ztrácí schopnost budovat své schránky. Kombinované změny ovlivňují mořský život a snižují potenciál růstu a reprodukce. Pozorování oceánů od konce 80. let ukazují za posledních 20 až 30 let zřetelný pokles průměrného pH u hladiny oceánu o 0,017–0,027 jednotek pH za desetiletí.

V pobřežních mořích je obtížnější rozlišit změny v chemii uhličitánů způsobené antropogenním okyselením oceánu vzhledem ke složitosti prostředí a rozmanitosti vlivů na něj. Změny ovlivňují možnosti využití oceánů lidmi žijícími na pobřeží, jako je rybolov, akvakultura, cestovní ruch a rekreace. Silné sezónní rozdíly a variabilita pH jsou patrné hlavně v Jižním oceánu kolem Nového Zélandu, což zdůrazňuje potřebu trvalých, podrobných a dlouhodobých měření a pozorování.

Dokončení článku v dalším čísle Meteorologických zpráv



Obr. 10 Regionální variabilita trendů výšky hladiny moří 1993–2019 založená na družicovém měření. Zdroj: Copernicus / Collecte Localisation Satellites (CLS) / Center national d'études spatiales (CNES) / Laboratoire d'Études en Géophysique et Océanographie Spatiales (LEGOS).

Fig. 10. Regional variability in sea-level trends 1993–2019 based on satellite altimetry (Source: Copernicus/ Collecte Localisation Satellites (CLS)/Centre national d'études spatiales (CNES)/ Laboratoire d'Études en Géophysique et Océanographie Spatiales (LEGOS)).

POČASÍ A ROSTLINY

Fenologický vývoj na území ČR v březnu a dubnu 2020

V tomto čísle Vás budeme informovat, jak se změnila vybrané agroklimatické charakteristiky a jaký byl vývoj vegetace v průběhu měsíce března a dubna.

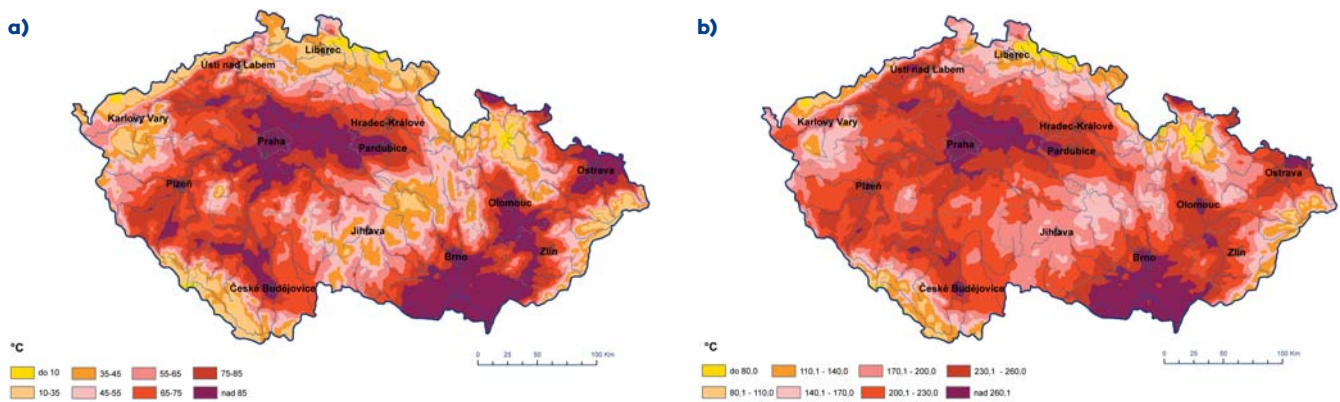
Suma efektivních teplot nad 5 °C od začátku roku k 31. 3. a k 30. 4. 2020 je uvedena v následujících mapách (obr. 1).

Nezvykle vysoké teploty pro dané roční období potvrzují i odchylky sumy efektivních teplot vzduchu nad 5 °C od normálu 1981–2010, výsledky jsou uvedeny na obrázku 2.

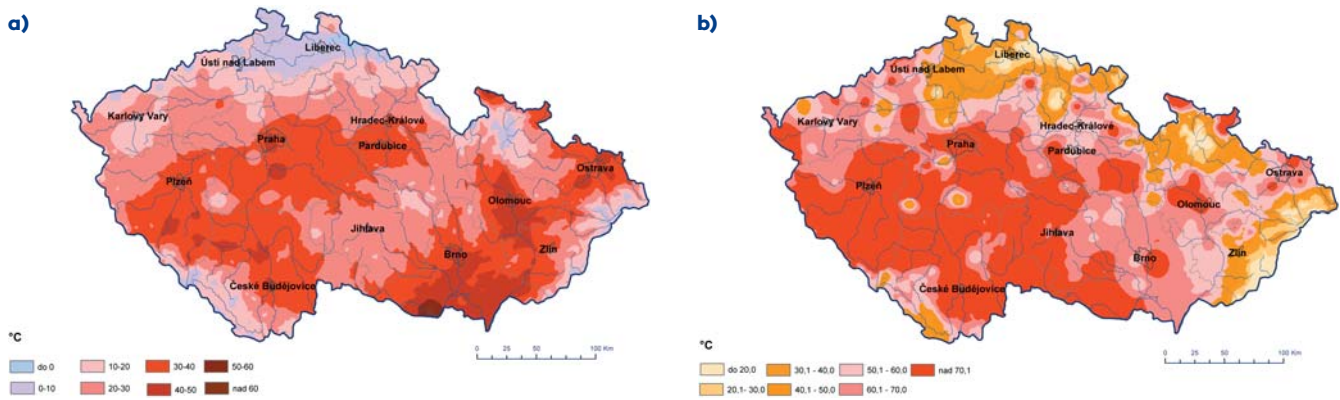
K 31. 3. 2020 činila odchylka i více než 60 °C např. na jižní Moravě, na Olomoucku a Ostravsku, naopak ve Šluknovském výběžku či na Liberecku byly odchylky pouze do 10 °C, místy byly i záporné. K 30. 4. 2020 byly odchylky od normálu kladné na celém na území, na většině území dokonce více než 70 °C.

I teplota půdy v 10 cm byla vyšší, než je obvyklé, 31. 3. 2020 se její hodnoty pohybovaly i nad 9 °C a 30. 4. 2020 až nad 14 °C. Výsledky jsou uvedeny na obr. 3.

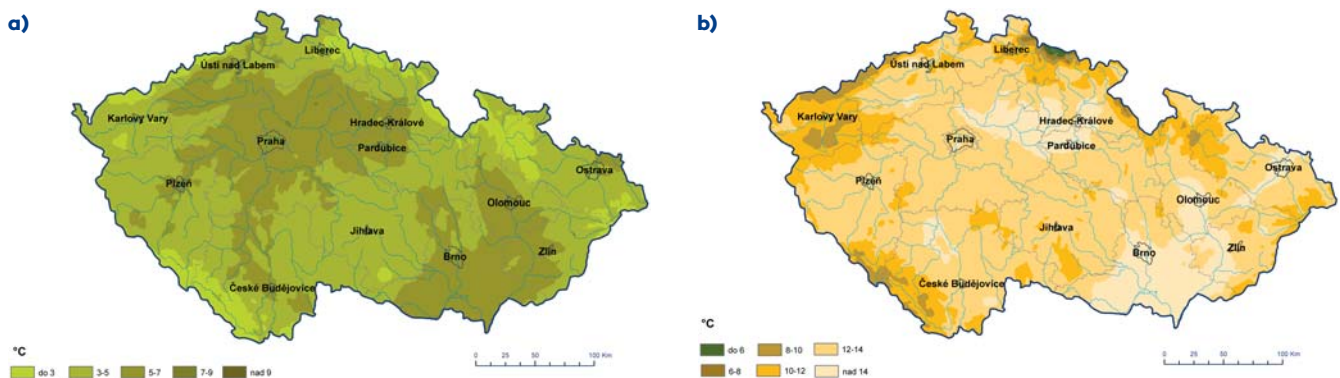
Kumulativní úhrn atmosférických srážek (od 1. 1. 2020) k 31. 3. a 30. 4. je zobrazen v mapách na obr. 4. Při srovnání s normálem (obr. 5) je vidět nedostatek srážek, v březnu



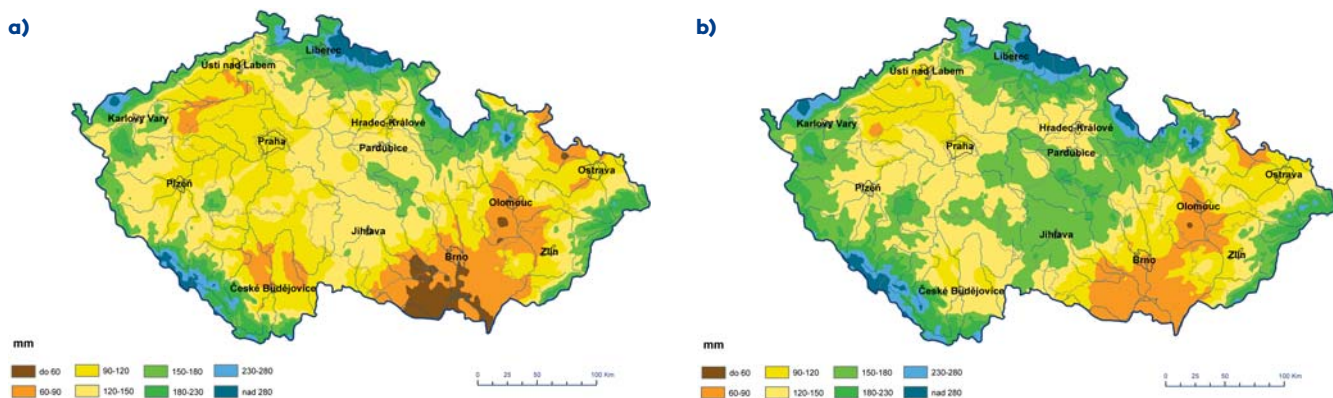
Obr. 1 Suma efektivních teplot vzduchu nad 5 °C k 31. 3. 2020 (a) a k 30. 4. 2020 (b).



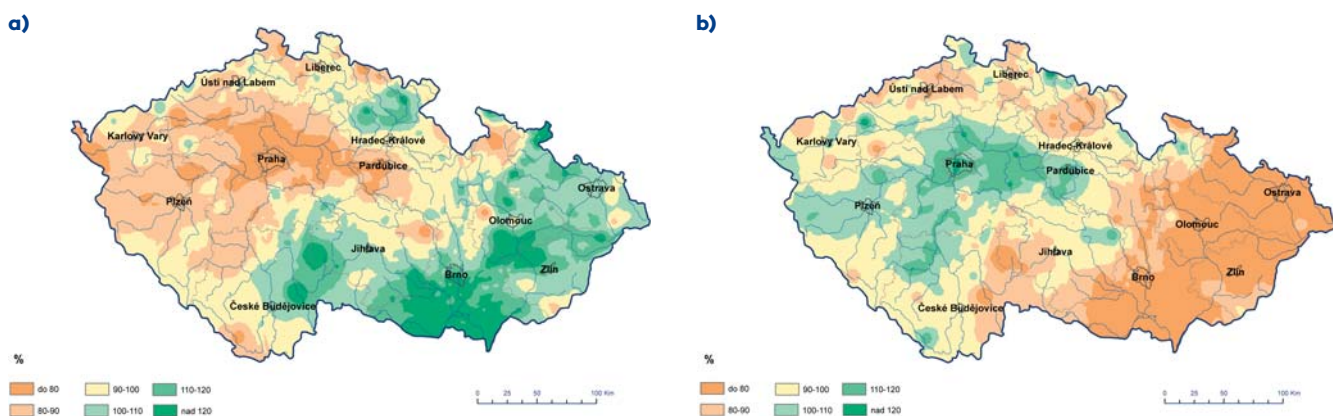
Obr. 2 Suma efektivních teplot vzduchu nad 5 °C (odchylka od normálu 1981–2010) k 31. 3. 2020 (a) a k 30. 4. 2020 (b).



Obr. 3 Průměrná denní teplota půdy v hloubce 10 cm dne 31. 3. 2020 (a) a 30. 4. 2020 (b).



Obr. 4 Kumulativní úhrn srážek k 31. 3. 2020 (a) a k 30. 4. 2020 (b).



Obr. 5 Kumulativní úhrn srážek (% normálu 1981–2010) k 31. 3. 2020 (a) a k 30. 4. 2020 (b).

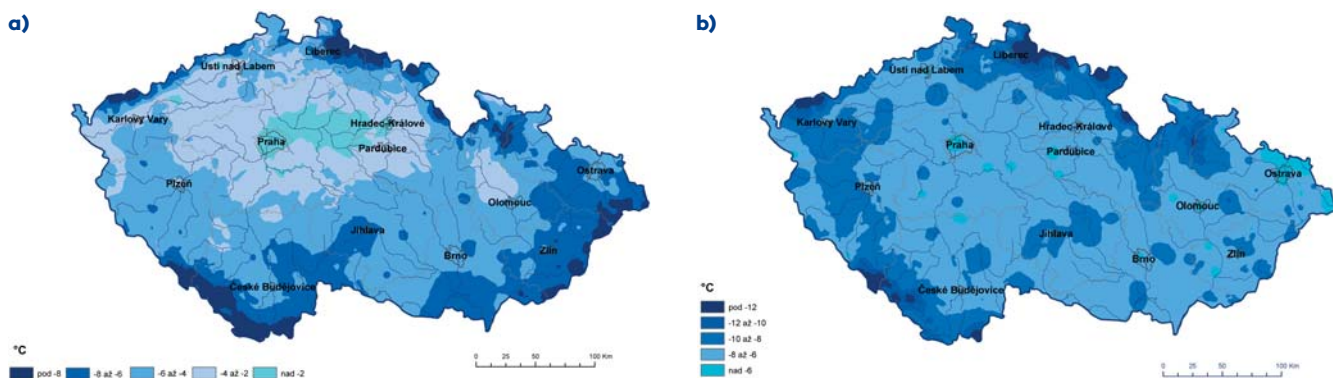
převládal v Čechách a v dubnu naopak na Moravě. Vláhový deficit v ČR se opět začíná prohlubovat. Je to způsobeno větším výparem kvůli vyšším teplotám vzduchu a nastartování vegetace, která odčerpává vodu z krajiny a využívá ji ke svému vývoji.

Vegetace se začala pozvolna vyvíjet (obr. 6) a na konci března začalo velké vegetační období (stanovené na základě průměrné denní teploty vzduchu nad 5 °C). Bohužel na přelomu března a dubna došlo ke vpádu studeného vzduchu a byly poškozeny meruňky, broskvoně, třešně (tou dobou již bohužel kvetly) a též některé polní plodiny, zejména jařiny. Velikost mrazů dokládají mapy na obr. 7, dne 31. 3. 2020 dosahovala minimální teplota vzduchu (měřeno ve 2 m) i –8 °C a 30. 4. 2020 dokonce i –12 °C.

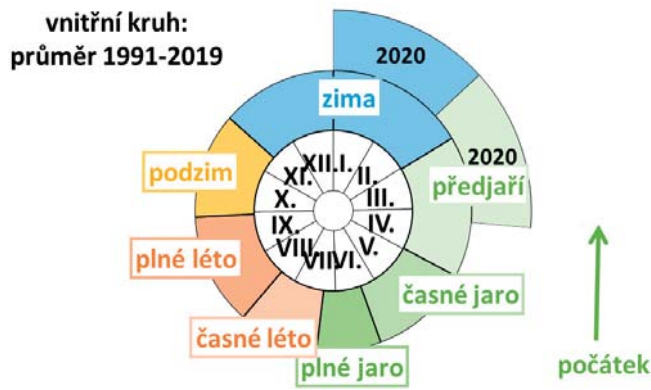
Na začátku března začaly kvést první jarní byliny, jako např.



Obr. 6 Začátek velkého vegetačního období v roce 2020.



Obr. 7 Minimální teplota vzduchu ve 2 m dne 31. 3. 2020 (a) a 1. 4. 2020 (b).



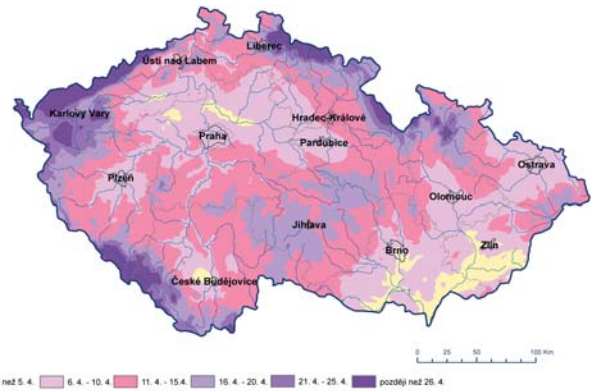
Obr. 8 Fenologický kalendář ČR.

jaterník podléška a podběl obecný. V první polovině března již byla sněženka v plném květu ve středních a vyšších polohách a rovněž svída dřín zdobila krajinu svými jasně žlutými květy. Z pylových alergenů kvetly v březnu olše a vrby. V průběhu března začal tzv. jarní aspekt (v této části jara jsou stromy a keře ještě holé, a tak v bylinném patře převládají kvetoucí rostliny, které vyžadují poměrně velké množství světla. Byliny využívají k vykvetení krátkého období zvýšeného dopadu slunečního záření před olistěním stromového patra. Za jarním aspektem je nejlepší se vypravit do lužního lesa). Typickým představitelem jarního aspektu je např. i sasanka hajní, která na konci března kvetla již i ve středních polohách.

Ve druhé polovině března začaly rašit habry, lísky, javory, trnky, hlohy, olše, třešně a modřiny, na konci března se začaly objevovat první listy pryskyřníku, sasaneček, jahodníku, blatouchu, bezu černého a hroznatého. V nejnižších polohách začal na konci března kvést habr obecný, který patří mezi významné pylové alergeny.

V první dekádě dubna postupně odkvétaly vrby a olše, a naopak do plného květu se dostával habr obecný. V nížinách začaly rozkvétat blatouchy, u jaterníku se objevovaly první listy, zatímco ve středních a vyšších polohách byl jaterník stále v plném květu. V nižších polohách, např. na jižní Moravě, vykvetly trnky, které byly bohužel též v některých lokalitách poškozeny mrazem. Do fáze butonizace přecházel modřín, bez hroznatý a třešň ptačí.

V polovině dubna začaly kvést javory mléče, modřiny a dále rašily lísky, javory, habry, vrby, trnky, olše, třešně, modřiny a hlohy ve středních a vyšších polohách. Na jižní Moravě již bylo zaznamenáno i rašení trnovníku akát. A postupně se



Obr. 9 Začátek kvetení třešň ptačí v roce 2020.

začaly objevovat první listy u vrby, lísky, břízy, svídy, habru, podběle, jaterníku a ocunu a výrazně pokročilo olistování bezu černého a hroznatého, zejména v nižších polohách.

V polovině dubna začalo fenologické časně jaro, které je charakterizováno následovně: kvetou stromy, které současně vyrážejí květ i listů nebo jen s nepatrnou časovou diferencí, rozkvétají a odkvétají ovocné stromy, zalistuje se bříza, buk, jírovec maďal, dub letní a další. Na obrázku 8 je uveden fenologický kalendář ČR, vyjadřuje srovnání začátku fenologických ročních období v roce 2020 s dlouhodobým průměrem 1991–2019 (jedná se o průměr za republiku).

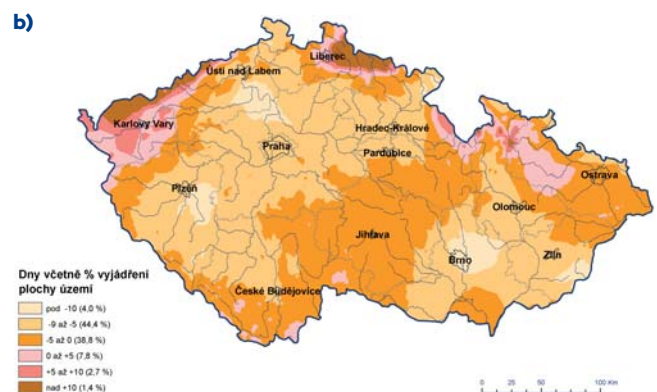
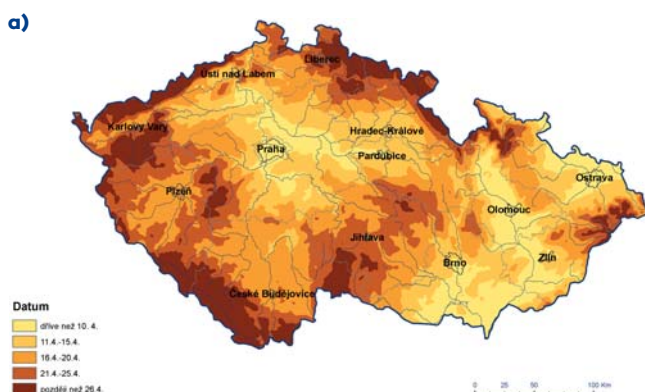
Ve třetí dekádě dubna naplno kvetly bříza, habry, modřiny, javory a v nižších polohách začaly kvést i buky a bez hroznatý. Olistovaly se jeřáby, třešně, habry, buky, lísky, břízy, olše, vrby a javory. V nejnižších polohách, zejména na jižní Moravě, se začal olistovat i dub letní a trnovník akát. Nejvíce byly touto dobou již olistěny hlohy a bezy na velké části území. Naplno kvetly trnky, třešně a mnohé další ovocné stromy např. jabloně a hrušně. A z polních plodin začala kvést řepka ozimá.

Třešň ptačí rozkvetla opět dříve (dokonce dříve než v roce 2019), časový nástup počátku kvetení na obr. 9.

A bříza bělokorá, nejvýznamnější pylový alergen, začala rovněž kvést na většině území s několikadenním předstihem, než je dlouhodobý průměr 1991–2019 (obr. 10).

Jak dokládají výše uvedené řádky a mapy, vývoj vegetace byl v průběhu měsíců března a dubna velmi rozmanitý a většina fází nastala dříve, než je obvyklé.

Lenka Hájková



Obr. 10 Počátek kvetení břízy bělokoré v roce 2020 (a) a odchylky od průměru 1991–2019 (b).

Meteorologické zprávy

Meteorological
Bulletin

Odborný recenzovaný časopis se zaměřením na meteorologii, klimatologii, kvalitu ovzduší a hydrologii. Dvuměsíčník

Reviewed journal specialized in meteorology, climatology, air quality and hydrology. Bi-monthly

Vydavatel (redakce) – Publishers

Český hydrometeorologický ústav, Na Šabatce 2050/17,
143 06 Praha 4-Komořany

Czech Hydrometeorological Institute, Na Šabatce 2050/17,
143 06 Praha 4-Komořany, Czech Republic

e-mail: mz@chmi.cz, casmz.chmi.cz

Vedoucí redaktor – Chief Editor

R. Tolasz, Český hydrometeorologický ústav, Ostrava, Česká republika

Redaktor – Assistant Editor

H. Stehlíková, Český hydrometeorologický ústav, Praha, Česká republika

Redakční rada – Editorial Board

J. Bednář, Univerzita Karlova, Praha, Česká republika

R. Brožková, Český hydrometeorologický ústav, Praha, Česká republika

R. Čekal, Český hydrometeorologický ústav, Praha, Česká republika

Z. Horký, Praha, Česká republika

F. Hudec, Univerzita obrany, Brno, Česká republika

I. Hůnová, Český hydrometeorologický ústav, Praha, Česká republika

P. Huszár, Univerzita Karlova, Praha, Česká republika

M. Kučerová, Ústav fyziky atmosféry AV ČR, Praha, Česká republika

K. Krška, Brno, Česká republika

M. Lapin, Univerzita Komenského, Bratislava, Slovenská republika

F. Neuwirth, Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wien, Austria

L. Němec, Český hydrometeorologický ústav, Praha, Česká republika

V. Pastirčák, Bratislava, Slovenská republika

D. Řezáčová, Ústav fyziky atmosféry AV ČR, Praha, Česká republika

M. Setvák, Český hydrometeorologický ústav, Praha, Česká republika

J. Strachota, Praha, Česká republika

J. Sulan, Český hydrometeorologický ústav, Plzeň, Česká republika

F. Šopko, Český hydrometeorologický ústav, Praha, Česká republika

A. Vizina, Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v. v. i., Praha, Česká republika

H. Vondráčková, Praha, Česká republika

V. Voženilek, Univerzita Palackého v Olomouci, Olomouc, Česká republika

Abstracting and Indexing:

Meteorological and Geostrophical Abstracts

Sazba a tisk:

Ing. Jiří Šilar DTP

ISSN 0026-1173

Registrační číslo MK ČR E 5107

© Meteorologické zprávy, Český hydrometeorologický ústav

Výběr z novinek Specializované knihovny ČHMÚ

Musil, Rudolf a kol.

Moravský kras.

Průvodce Josefovským a Křtinským údolím

Praha: Masarykova univerzita 2019

ISBN 978-80-210-8742-2

Fothergill, Alastair – Scholey, Keith

Naše planeta

Praha: Euromedia Group a.s. 2019

ISBN 978-80-242-6221-5

Opera Corcontica č. 56

Krkonošské práce = Prace karkonoskie

Vrchlabí: Správa KRNAP 2019

ISBN 978-80-7535-091-6

Wilks, Daniel

Statistical Methods in the Atmospheric Sciences

Amsterdam Elsevier 2019

ISBN 978-0-12-815823-4

Pinkovský, Martin

Úprava pitné vody:

Současný výzkum a realita

Praha: Academia 2019

ISBN 978-80-200-2985-0

Kimbrell, Colins – Kuncová, Jitka – Osička, Jan

Waste-to-Energy in the Danube Strategy Region:

Challenges and Prospects

Brno: Masarykova univerzita 2019

ISBN 978-80-210-9175-7

Seria publikacji naukowo-badawczych IMGW – PIB

XVIII. Międzynarodowa Konferencja

Technicznej Kontroli Zapór.

Warszawa: Instytut meteorologii i Gospodarki Wodnej

ISBN 978-83-64979-32-3

<http://biblio.chmi.cz/>