MATEMATICKO-FYZIKÁLNÍ FAKULTA
Univerzita Karlova

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

David Němec

Předpověď/simulace blesků numerickým předpovědním modelem ALADIN

Katedra fyziky atmosféry

Vedoucí bakalářské práce: Mgr. Michal Žák, Ph.D.
Studijní program: Fyzika
Studijní obor: Obecná fyzika

Praha 2021

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval(a) samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů, literatury a dalších odborných zdrojů. Tato práce nebyla využita k získání jiného nebo stejného titulu.

Beru na vědomí, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorského zákona v platném znění, zejména skutečnost, že Univerzita Karlova má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle §60 odst. 1 autorského zákona.

V ..... dne ....

Podpis autora

Chtěl bych poděkovat Mgr. Michalu Žákovi, Ph.D. za nabídnutí, vedení a věcné připomínky k této bakalářské práci.

Rád bych velice poděkoval RNDr. Radmile Brožkové, CSc. za vpravení do tajů numerického modelování počasí a numerického modelu ALADIN, trpělivé vysvětlení mnoha problémů, opravdu velice nadstandardních možností konzultací a pomoc s tvorbou této práce.

Rovněž bych rád velice poděkoval Mgr. Jánu Maškovi, Ph.D. za velkou pomoc s tvorbou skriptů a nastavení prostředí pro zpracování dat, trpělivé vysvětlení mnoha problémů a principů a ukázání mnoha postupů při práci s modelem a zpracování jeho výsledků.

Dále bych chtěl poděkovat RNDr. Haně Kyznarové, Ph.D. za poskytnutí dat ze systému detekce blesků a Mgr. Stanislavu Rackovi za pomoc s výběrem modelových případů s výraznou bouřkou činností.

V neposlední řadě bych chtěl poděkovat mé rodině za vytrvalou podporu během studia a umožnění studia oboru, který mě baví.

Název práce: Předpověď/simulace blesků numerickým předpovědním modelem ALADIN

Autor: David Němec

Katedra: Katedra fyziky atmosféry

Vedoucí bakalářské práce: Mgr. Michal Žák, Ph.D., Katedra fyziky atmosféry

Abstrakt: Tato práce se zabývá modelováním a předpovědí bleskové aktivity numerickým modelem pro předpověď počasí ALADIN. Nejprve je stručně popsána fyzikální podstata vzniku blesků a principů jejich detekce. Dále jsou nastíněny některé principy modelu ALADIN týkající se modelování hluboké konvekce a fázových přechodů vody, na což navazuje popis diagnostického schématu pro předpověď blesků. V hlavní části práce je popsán průběh kalibrace schématu a předpovídané hodnoty jsou porovnány s daty ze systému detekce blesků LINET. Porovnává se prostorové i časové rozložení bleskové aktivity. Tato část se také obsahuje analýzu chování schématu během šesti dnů s výraznou bleskovou aktivitou nad územím České republiky.

Klíčová slova: detekce blesků, NWP diagnostiky, post-processing, konvekce

Title: Forecasting of lightning using numerical weather prediction model ALADIN

Author: David Němec

Department: Department of Atmospheric Physics

Supervisor: Mgr. Michal Žák, Ph.D., Department of Atmospheric Physics

Abstract: This thesis deals with modelling and forecasting lightning activity using NWP model ALADIN. The first part briefly describes physical processes involved in lightning initiation and principles of lightning detection. This part also outlines some basic principles of modelling deep convection and phase changes in ALADIN and continues with description of diagnostic scheme for forecasting of lightning activity. The main part describes calibration of the scheme as well as compares forecast with measured data from lightning detection system LINET. Both time and spatial distributions are considered. This part also contains analysis of scheme behaviour during six days with significant lightning activity over Czechia.

Keywords: lightning detection, NWP diagnostics, post-processing, convection

Obsah

Úvod **2**

1 Blesky a jejich detekce **3**
1.1 Blesky . . . 3
1.2 Systémy detekce blesků . . . 4
1.2.1 Systém detekce blesků LINET . . . 5

2 Numerický model pro předpověď počasí ALADIN **7**
2.1 Obecné informace o numerických modelech pro předpověď počasí 7
2.2 Numerický model ALADIN a jeho konfigurace v ČHMÚ . . . 8
2.3 Použitý souřadnicový systém . . . 9
2.4 Mikrofyzikální schéma . . . 10
2.5 Reprezentace oblaků a srážek . . . 12
2.6 Schéma konvekce 3MT . . . 13
2.7 Schéma diagnostiky blesků . . . 15

3 Nastavení simulace **17**

4 Kalibrace parametrů schématu blesků **18**
4.1 Postup kalibrace . . . 18
4.2 Výběr zdroje vertikální rychlosti . . . 20
4.3 Rozložení hustot bleskových výbojů v čase a prostoru . . . 21

5 Analýza modelovaných případů **30**
5.1 Situace 7. 6. 2020 . . . 30
5.2 Situace 13. 6. 2020 . . . 39
5.3 Situace 26. 6. 2020 . . . 46
5.4 Situace 14. 8. 2020 . . . 55
5.5 Situace 22. 8. 2020 . . . 62
5.6 Situace 29. 8. 2020 . . . 69

6 Diskuse **76**

7 Závěr **81**

Seznam použité literatury **82**

Seznam obrázků **85**

Seznam tabulek **88**

Úvod

Blesky fascinovaly lidstvo od nepaměti a často byly spojovány se sílou bohů. Staří Řekové považovali blesky za výraz Diovy zloby. Proti svým nepřátelům blesky využíval Thor v severské mytologii. Ve Slovanské mytologii se pak můžeme setkat s bohem bouře, hromu a blesku Perunem.

Poměrně v dávné minulosti začali lidé blesky zkoumat, k hlubšímu poznání však došlo až s rozvojem poznání o elektřině a magnetismu ve druhé polovině 19. století. Na přelomu 19. a 20. století se objevují první přístroje, které byly blesky schopné detekovat. Nyní je již možné blesky detekovat s velmi vysokou přesností v řádu stovek metrů díky systémům detekce blesků. Existují jak pozemní systémy detekce blesků, tak lze blesky detekovat i z družicových pozorování. Pozemní systémy pracují na principu detekce rádiových vln a vysoká přesnost určení polohy bleskového výboje je možná díky takřka dokonalé časové synchronizaci čidel podle globálního polohového systému (GPS).

Od poloviny 20. století se lidstvo snaží předpovídat počasí pomocí numerických modelů. Během této relativně krátké doby došlo k jejich výraznému rozvoji, a to díky rozšířeným poznatkům o dějích v atmosféře, kvalitním družicovým a radarovým pozorováním a zejména díky velkému rozvoji výpočetní techniky. Nyní již modely nabízí mnoho produktů užitečných pro předpověď počasí, od výskytu různých fází srážek přes hodnoty vertikální složky rychlosti proudění v jednotlivých hladinách až po radarové odrazivosti. Jedním z nových produktů pak může být i předpověď hustoty bleskových výbojů, které se tato práce věnuje. Tato diagnostika může být užitečná při předpovědi nebezpečných konvektivních jevů.

Práce je členěna do sedmi kapitol. V první kapitole se práce lehce dotýká problematiky vzniku blesků a jejich detekce. Ve druhé kapitole je pak stručně představen model ALADIN a jeho části, které souvisí se schématem diagnostiky blesků, tedy jeho mikrofyzikální schéma, parametrizace hluboké konvekce a je zde popsáno samotné schéma diagnostiky blesků. Ve třetí kapitole je popsáno experimentální nastavení. Ve čtvrté kapitole je dokumentován proces kalibrace parametrů schématu a jeho chování je porovnáno s měřenými daty z pozemního systému detekce blesků LINET. V páté kapitole je schopnost předpovědi bleskové aktivity analyzována s pomocí šesti vybraných případů s výraznou bleskovou aktivitou nad územím České republiky v roce 2020. Následuje diskuse výsledků a závěr.

1. Blesky a jejich detekce

1.1 Blesky

Blesk je komplex jiskrových výbojů, který vzniká mezi centry kladných a záporných nábojů v oblacích či mezi oblakem a zemí. Z tohoto hlediska dělíme blesky na blesky mezi oblaky či v rámci jednoho oblaku (dále oba případy značíme CC), blesky mezi oblakem a zemí (CG) a blesky mezi oblakem a okolním vzduchem (Česká meteorologická společnost (2021)).

Blesky vznikají obvykle v oblacích druhu kumulonimbus (Cb), výjimečně se mohou vyskytnout v oblacích cumulus congestus. Elektrické pole v Cb nemusí být vždy stejné, obecně se v horní části oblaku objevuje centrum kladného náboje, ve spodní části pak centrum náboje záporného (Řezáčová a kol. (2007)). Oblasti s kladným a záporným nábojem jsou však pravděpodobně poměrně intenzivně turbulentně promíchávána (Brothers a kol. (2018)). Centra kladného a záporného náboje jsou oddělena v oblasti mezi 4 až 6 km nad povrchem, kde se zároveň vyskytuje oblačná voda, oblačný led a sněhové krupky. Těžší sněhové krupky, které jsou nabité záporným nábojem, zůstávají v této oblasti nebo padají k zemi, zatímco lehčí krystalky ledu, které jsou nabité kladným elektrickým nábojem, jsou vynášeny vzestupnými proudy vzhůru a tvoří zde centrum kladného náboje (Füllekrug (2017)). Někdy, zejména v pozdějších fázích vývoje Cb, se může objevit omezená oblast kladného náboje i ve spodní části oblaku, která souvisí s táním ledové fáze (Řezáčová a kol. (2007)).

Obecně se Cb chová jako elektrický dipól. Je-li překročena hodnota průrazného napětí, které se v zemské atmosféře pohybuje kolem $3\,\mathrm{MV{\cdot}m^{-1}}$ (Füllekrug (2017)), dojde k výboji. Elektrické pole v Cb však bývá zhruba o dva řády slabší, proto je pro vznik blesku zapotřebí vzduch ionizovat ještě dalším vnějším působením. K inicializaci blesku pravděpodobně dochází lokální ionizací vzduchu způsobenou tzv. ubíhajícími elektrony pocházejícími ze spršek sekundárního kosmického záření. Ty jsou v elektrických polích urychlovány až na rychlosti, kdy se projevují relativistické efekty (Česká meteorologická společnost (2021)). Teorie vzniku center náboje i inicializace blesku ovšem ještě není zcela objasněna. To je způsobeno tím, že proces iniciace blesku probíhá v několika velmi rychle po sobě jdoucích krocích, které není jednoduché změřit, a zároveň ještě nemáme dostatek teoretických informací o samotných blescích.

Rison a kol. (2016) došel k závěru, že by mohly být blesky iniciovány vznikem úzkých bipolárních pulsů způsobených krátkým kladným elektrickým průrazem vzduchu. Úzký bipolární puls je druh elektrického výboje, který se vyskytuje v rámci bouřkového oblaku, má bipolární průběh signálu, trvá mezi 10-30 μs, jeho frekvence leží v oboru velmi krátkých vln a činí 60-66 MHz a energie jím nesená je velmi vysoká (jejich výkon dosahuje 30-300 kW) (Kostinskiy a kol. (2020)). Všechny blesky, jejichž příčina se podařila v práci Rison a kol. (2016) určit, byly spojeny právě s předcházejícím výskytem úzkých bipolárních pulsů. Nicméně se zdá, že většina blesků není způsobena úzkými bipolárními pulsy či jinými podobně intenzivními událostmi, ale kratšími a slabšími pulsy velmi krátkých vln (Kostinskiy a kol. (2020)), které trvají kolem 1 μs a mají výkon nižší než 1 W. Oba tyto procesy jsou dle Kostinskiy a kol. (2020) iniciovány sekundárními

emisemi ubíhajících elektronů, zatímco Rison a kol. (2016) žádnou souvislost s ubíhajícími elektrony nenašel. Dalším vlivem přispívajícím ke vzniku blesků mohou být lokálně zvýšené hodnoty elektrické intenzity způsobené turbulentním promícháváním vzduchu a tím i promícháváním elektricky nabitých aerosolů v rámci bouřkového oblaku (Brothers a kol. (2018)).

Samotný elektrický výboj mezi oblakem a zemí se skládá z několika částí, vůdčího výboje, vstřícného výboje a několika zpětných výbojů. Vůdčí výboj postupuje k zemi rychlostí kolem 200 km·s^{-1} v několika krocích, přičemž zastavení postupu je způsobeno dočasným lokálním snížením elektrické intenzity a trvá v řádu desítek mikrosekund (Řezáčová a kol. (2007)). Po přiblížení vůdčího výboje k zemi začne proti němu od země postupovat vstřícný výboj. Následně dojde k uzavření kanálu ionizovaného vzduchu, který je široký několik jednotek centimetrů. V tomto kanálu se pak začne vzhůru šířit první zpětný výboj. Ten postupuje rychlostí kolem 20 000 km·s^{-1} a protéká proud v řádu desítek kiloampérů. Teplota vzduchu v kanálu dosahuje hodnot kolem 30 000 K, čímž dochází k jeho velmi prudkému rozpínání, což má za následek zvukový efekt, nazývaný hrom. První zpětný výboj bývá následován dalšími vůdčími a zpětnými výboji v témže kanálu ionizovaného vzduchu, typicky třemi až pěti.

Blesk bývá spojen s emisí velkého množství energie v širokém frekvenčním rozsahu, tzv. atmosfériků (Řezáčová a kol. (2007)). Nejvíce energie je vyzářeno v oblasti dlouhých a velmi dlouhých radiových vln, které jsou emitovány zpětnými výboji blesku do země. Na jejich detekci je založen nejeden systém pozemní detekce blesků, včetně systému LINET, jehož data využívá i Český hydrometeorologický ústav (ČHMÚ).

Z hlediska náboje dělíme blesky mezi oblakem a zemí na negativní (CG-) a pozitivní (CG+). Obvykle tyto blesky mají vůdčí výboj z oblaku do země, méně často směřuje vůdčí výboj ze země vzhůru, děje se tak zejména v blízkosti vyvýšených objektů, například telekomunikačních vysílačů. Směr postupu vůdčího výboje lze určit z větvení blesku. Větví-li se blesk shora směrem dolů, vůdčí výboj postupuje dolů a vice versa (Česká meteorologická společnost (2021)).

1.2 Systémy detekce blesků

Blesky je možné detekovat několika způsoby pomocí meteorologických družic či pozemních detektorů. Dále se zaměříme na pozemní systémy detekce blesků. Ty obvykle využívají detekce dlouhých až velmi dlouhých rádiových vln emitovaných jednotlivými bleskovými výboji. Detekční systémy využívají sítě čidel, která jsou od sebe vzdálená desítky až stovky kilometrů a jsou přesně časově synchronizovaná, nejčastěji podle GPS.

Pro detekci bleskového výboje můžeme využívat dvou metod (Řezáčová a kol. (2007)). První metoda je založená na určení času příchodu elektromagnetického záření. Pro správné stanovení polohy výboje se využije dat alespoň ze tří čidel. Poloha blesku je pak vytyčena průsečíkem hyperbol konstantních časových změn. Druhá metoda je založená na určení směru příchodu blesku. Poloha blesku je pak stanovena průsečíkem přímek vedoucích od čidla ve směru, odkud byl signál zaznamenán. Pro zjištění polohy blesku je pak potřeba detekovat signál alespoň na dvou čidlech, pro uspokojivou přesnost změření polohy výboje však nesmí ležet spolu s bleskem v blízkosti jedné přímky. Obě metody je možné pro zvýšení

přesnosti kombinovat (Řezáčová a kol. (2007)). Chyba určení polohy výboje je dnes již i výrazně nižší než 500 m, přičemž větší přesnosti systém dosahuje u blesků, které se vyskytly uvnitř sítě detektorů než mimo ni. Přesnost stanovení polohy výboje také klesá s rostoucí vzájemnou vzdáleností čidel. Přesnost měření lze verifikovat s využitím známého cíle, kde můžeme snadno ověřit polohu a počet blesků, které do něj uhodily. Využít lze například výškové budovy (Betz a Meneux (2014)).

Protože v oboru dlouhých až velmi dlouhých rádiových vln vyzařují CG blesky nejvíce energie, jsou detekovány s velkou přesností. Naopak CC blesky v tomto oboru frekvencí emitují výrazně méně energie, a proto má jejich detekce nižší úspěšnost. CC blesky emitují velké množství energie v oboru velmi krátkých rádiových vln, proto se pro jejich detekci používá detekce v tomto oboru frekvencí elektromagnetického vlnění. Zcela výjimečně může dojít i k detekci neexistujícího blesku či detekce odrazu CC blesku od ionosféry (Řezáčová a kol. (2007)).

1.2.1 Systém detekce blesků LINET

LINET je pozemní systém detekce blesků vyvinutý na Univerzitě v Mnichově. Využívá detekce dlouhých až velmi dlouhých rádiových vln a poskytuje blesková data pro většinu území Evropy, v menší míře pak rovněž pro Austrálii, Asii a Jižní Ameriku (Betz a Meneux (2014)). Je schopen využívat jak metodu založenou na času příchodu signálu, tak metodu založenou na směru, odkud signál přišel. V běžném operačním provozu se využívá pouze první metoda, protože metoda založená na směru, odkud signál přišel, je méně přesná (Betz a kol. (2009)).

Systém je tvořen anténou, zařízením GPS a procesorem získaného signálu. Průměr antény činí 40 cm, je tvořena dvěma vzájemně kolmými smyčkami a ke svému provozu nepotřebuje zdroj elektrického napětí. Anténa měří magnetický tok, nedochází tedy k integraci signálu, jak by tomu bylo, kdyby se měřila změna magnetického pole, čímž se nezvyšuje hladina šumu v signálu. Magnetický tok generovaný bleskem je měřen přímo jako funkce času, měří se tedy indukovaný elektrický proud, nikoli indukované napětí, což umožňuje lépe zachytit signál skrytý v šumu, a tak dochází k identifikaci i výbojů s nižší amplitudou elektrického proudu. Poměrně úspěšně se daří detekovat i výboje s hodnotou amplitudy proudu méně než 5 kA, pokud vzdálenost čidel v síti nepřesahuje 250 km. Spodní hranice detekovatelných proudů se pohybuje kolem 1,5 kA (Betz a Meneux (2014)).

Systém LINET detekuje signál bez ohledu na jeho průběh, což umožňuje detekovat i krátce trvající výboje, které nemají dost vysoké amplitudy proudu jako obyčejně zpětné výboje mívají. Tyto pulsy se objevují mezi jednotlivými zpětnými výboji, nebo po nich a mohou dosahovat zemského povrchu, proto by měly být také započítány mezi platné bleskové výboje, přestože nesplňují tradiční filtrační kritéria pro průběh pulsu (Betz a Meneux (2014)).

Pro správné stanovení polohy blesku je teoreticky nutné využít data minimálně ze čtyř čidel, protože systém LINET provádí 3D detekci blesků na základě času příchodu signálu. V běžném provozu se využívá alespoň pět čidel (Betz a Meneux (2014)). Systém je tedy schopný detekovat polohu blesku nejen v rovině zemského povrchu, ale je schopen určit i výšku výboje nad zemí. Tohoto se využívá k rozlišení blesků CC a CG na základě toho, že CG blesky obvykle emitují nejvíce energie v oblasti dlouhých až velmi dlouhých rádiových vln v dolní části blesku blízko

povrchu, zatímco CC blesky, objevující se ve větší výšce nad zemí, musí nutně emitovat nejvíce energie výše. Aby 3D detekce blesků fungovala spolehlivě, je nutné, aby vzdálenost mezi bleskem a nejbližším detekčním čidlem byla kolem 125 km a aby byla přesnost vytyčení místa výskytu výboje určena přesněji než je rozdíl vzdáleností čidel od výboje (Betz a Meneux (2014)). Polarita blesku není přímo zaznamenána, ta je zjištěna až při následné analýze zpracovaného signálu ke stanovení polohy výboje z několika čidel (Betz a Meneux (2014)).

Uvnitř sítě čidel je možné určit čas příchodu elektromagnetického signálu s efektivní přesností pohybující se kolem 0,2 μs, což odpovídá 60 m uražené vzdálenosti signálem. Chyba měření polohy výboje se reálně pohybuje kolem 150 m. Pro dostatečnou přesnost detekování polohy výboje je vhodné, aby vzdálenost čidel v rámci jejich sítě nepřesahovala 200 km (Betz a kol. (2009)).

2. Numerický model pro předpověď počasí ALADIN

2.1 Obecné informace o numerických modelech pro předpověď počasí

S rozvojem výpočetní techniky v posledních desetiletích došlo k významnému rozvoji numerických modelů pro řešení úlohy předpovědi počasí, což přispívá k zpřesňování předpovědi počasí vydávaných národními meteorologickými ústavy. Úloha předpovědi počasí je čistě počáteční úloha, na rozdíl od klimatického modelování, kdy do hry vstupují další faktory, které se mění během výpočtu.

Meteorologické modely se dle velikosti oblasti, nad níž řeší úlohu předpovědi počasí, dělí do dvou základních druhů (Česká meteorologická společnost (2021)). Prvním druhem jsou globální modely, druhým jsou modely na omezené oblasti.

Globální modely řeší úlohu předpovědi počasí pro celou Zemi, obvykle na více než 7 následujících dní. Protože globální modely řeší úlohu předpovědi počasí na velkém území na dlouhou dobu, díky limitované výpočetní rychlosti nemají globální modely tak vysoké rozlišení jako modely na omezené oblasti, tudíž je nutná větší míra parametrizace meteorologických dějů.

Oproti tomu modely na omezené oblasti sice řeší úlohu předpovědi počasí na kratší dobu (obvykle v řádu několika málo následujících dnů) pro omezenou oblast, ale zase počítají v mnohem vyšším horizontálním rozlišení, které se nyní pohybuje v několika málo jednotkách kilometrů. Lze tak modelovat více dějů, které jsou menšího měřítka než rozlišení globálního modelu, typicky dokáží částečně rozlišit hlubokou konvekci.

Neboť modely na omezené oblasti řeší úlohu předpovědi počasí pouze nad ohraničenou oblastí, nikoli na celém glóbu, potřebují pro zdárný běh znát nejen počáteční podmínky, ale na rozdíl od globálního modelu také boční okrajové podmínky na řešené oblasti (u globálního modelu je nutné zadat okrajové podmínky pouze na horní a spodní hranici řešené oblasti). Okrajové podmínky pro modely na omezené oblasti se obvykle získávají propojením modelu na omezené oblasti s tzv. řídicím modelem, který okrajové podmínky dodá. Proto v okrajových oblastech (tzv. párovacích zónách) modelu na omezené oblasti předává řídicí model jím vyřešené hodnoty meteorologických veličin modelu na omezené oblasti. Jako řídicí model se obvykle používá některý z globálních modelů (Česká meteorologická společnost (2021)).

Aby byly počáteční podmínky co nejpřesnější a bylo pravděpodobné, že model vytvoří kvalitní předpověď, používá se tzv. asimilační cyklus. Cílem asimilace meteorologických dat je příprava co nejlepších počátečních podmínek pro běh modelu (Česká meteorologická společnost (2021)). Je využíváno kombinace předběžného odhadu vzniklého předpovědí modelu na kratší časový úsek a meteorologických pozorování. Následuje minimalizace funkcionálu, který vyjadřuje vzdálenost modelového stavu atmosféry k oběma informacím váženou jejich přesností. Výsledkem je optimální odhad, neboli analýza nových počátečních podmínek pro další integraci modelu. Integrační doba předběžného odhadu se pohybuje v řádu něko-

lika hodin, u provozní konfigurace modelu ALADIN používané v ČHMÚ je to 6 hodin (Brožková a kol. (2019)).

S postupným zvyšováním výpočetního výkonu se zvyšuje rozlišení modelu, tedy se snižuje vzdálenost uzlových bodů ve výpočetní síti. Dnes jsou modely na omezené oblasti obvykle provozovány v rozlišeních od 1 do 10 km, která dovolují částečně rozlišit hlubokou konvekci. V literatuře se pro tento obor rozlišení ustálil anglický termín „convection permitting scales“ (Gerard (2015)).

2.2 Numerický model ALADIN a jeho konfigurace v ČHMÚ

Numerický model ALADIN (Aire Limitée Adaptation Dynamique Développement International) je numerický systém pro předpověď počasí vyvíjený sdružením ALADIN a je využívaný v 16 zemích včetně České republiky, Slovenska, Rakouska či Francie (Termonia a kol. (2018)). Jedná se o model na omezené oblasti. Řídicím modelem může být buď globální model ARPEGE vyvíjený v Météo France, nebo model IFS vyvíjený Evropským centrem pro střednědobou předpověď počasí. Některé části zdrojového kódu modelu ALADIN jsou společné se zdrojovými kódy ARPEGE a IFS, což umožňuje snížení časové náročnosti vývoje modelů, snižuje riziko chyb vznikajících v párovacích zónách modelu na omezené oblasti a umožňuje použití nehydrostatického dynamického jádra i v globálních modelech ARPEGE a IFS (Termonia a kol. (2018)).

Model ALADIN je spektrální model, to znamená, že proměnné dynamického jádra modelu a orografie jsou uložené ve formě vlnových funkcí. Časové semiimplicitní schéma se řeší převedením dynamických rovnic na jedinou Helmholtzovu rovnici v divergenci, což umožňuje nalézt analytické řešení ve spektrálním prostoru, nedochází tedy k zaokrouhlovacím chybám, které by vznikaly, pokud by se operace prováděly numericky v rámci uzlových bodů modelu. Spektrální rozvoj polí umožňuje analyticky spočítat horizontální derivace. Tím se docílí přesnějšího výpočtu členů dynamických rovnic obsahujících gradienty, jako je síla gradientu tlaku. Většina výpočtů (například mikrofyzika oblaků a srážek) je provedena v rámci uzlových bodů, protože pro ně není výhodné vytvářet reprezentativní periodickou vlnovou funkci. V rámci časového kroku modelu se dynamické proměnné transformují ze spektrálního rozvoje do hodnot v uzlových bodech výpočetní sítě a pak zase zpět pomocí rychlé Fourierovy transformace.

Původně byl numerický model ALADIN vyvíjen jako varianta modelu na omezené oblasti globálního modelu ARPEGE. Se zvyšujícím se výpočetním výkonem však postupně meteorologické ústavy jednotlivých zemí zvyšují rozlišení modelu, a to až k měřítkům hluboké konvekce. Proto se vývoj numerického modelu soustředil na konstrukci nehydrostatického jádra ALADIN-NH. V systému ALADIN jsou dnes dvě konzistentní, tzv. kanonické modelové konfigurace (CMC, z anglického *Canonical Model Configuration*) AROME a ALARO (Termonia a kol. (2018)).

AROME je kanonická konfigurace využívající v operačním provozu nehydrostatické jádro ALADIN-NH a je vyvinutá pro běh v rozlišeních se vzdáleností sousedních bodů sítě menší než přibližně 2,5 km. Tomu jsou přizpůsobeny i fyzikální parametrizace, které pochází zejména z modelu Méso-NH research model. Hluboká konvekce není parametrizována, což je důvodem, proč tato konfigurace není

vhodná pro použití při výpočtech s větší vzdáleností uzlových bodů než přibližně 2,5 km. neboť pak často dochází k nadhodnocování vertikálního transportu Gerard a kol. (2009).

ALARO, jejíž název vznikl kombinací slov ALADIN a AROME, je kanonická modelová konfigurace ležící na pomezí mezi konfigurací AROME a konfigurací fyziky vyvíjené pro numerickou předpověď počasí. Používaná rozlišení jsou nyní v rozmezí od 2 do 10 km, tedy částečně rozlišují hlubokou konvekci, ta ale stále zůstává parametrizovaná. Používá se schéma 3MT, které je koncipováno jako multiměřítkové a lze ho použít i tehdy, je-li konvekce částečně rozlišená modelem (Brožková a kol. (2019)). ALARO může využívat jak hydrostatické dynamické jádro ARPEGE-ALADIN, tak nehydrostatické dynamické jádro ALADIN-NH.

V ČHMÚ je využívána konfigurace ALARO, na jejímž vývoji se ČHMÚ výrazně podílí. Jako řídicí model slouží model ARPEGE. Od března 2019 je v provozu konfigurace modelu ve vyšším rozlišení 2,325 km, se sítí o 1080x864 uzlových bodech (včetně rozšířených zón na okraji, samotná předpověď je pak dostupná v rozlišení 1069x853 bodů) a 87 vertikálních vrstvách. Nejníže položená vertikální vrstva leží přibližně 10 m nad zemí, nejvyšší leží v hladině tlaku 50 Pa, což odpovídá výšce přibližně 50 km nad zemským povrchem (Brožková a kol. (2019)). Vertikální vrstvy nejsou s výškou rovnoměrně rozmístěné, ale u povrchu jsou jednotlivé vrstvy blíže u sebe než ve vyšších vrstvách atmosféry.

Nedávným zvýšením horizontálního rozlišení modelu z 4,711 km na 2,325 km byla překonána hranice pro smysluplné nasazení nehydrostatického dynamického jádra ALADIN-NH. Horizontální měřítko nejmenších rozlišitelných jevů je srovnatelné s jejich vertikálním měřítkem, což vyžaduje uvažovat atmosféru plně stlačitelnou a přejít od rovnic zachovávajících hydrostatickou rovnováhu k Eulerovým rovnicím pro stlačitelné proudění, tedy k modelu plně stlačitelné atmosféry (Brožková a kol. (2019)).

2.3 Použitý souřadnicový systém

V ČHMÚ využívaná konfigurace modelu ALADIN používá izotropní horizontální rozlišení vztažené k rovině mapy, přičemž je použita tečná konformní Lambertova projekce, jejíž výhodou je malé délkojevné zkreslení v mírných šířkách (Baťka (2002)). Tato projekce se obvykle volí tečná ke středu oblasti či blízko středu oblasti.

Model ALADIN v konfiguraci s nehydrostatickým jádrem používá hybridní, terén kopírující, hmotnostně váženou vertikální souřadnici η (Laprise (1992)). Nejprve definujeme vertikální souřadnici π vztahem

$$\begin{aligned} \pi(x,y,z,t) &= \pi_T + \int_z^{z_T} \rho(x,y,z',t) g dz' \\ \pi_T &\equiv \pi(x,y,z_T,t), \end{aligned} \tag{2.1}$$

kde ρ je hustota vzduchu a g je tíhové zrychlení. Pokud $\pi_T = 0$ a $z_T = \infty$, pak je hodnota této souřadnice pro dané z shodná s hodnotou hydrostatického tlaku, odpovídá tedy hmotnosti sloupce vzduchu nad tímto bodem. Příjemnou vlastností této souřadnice je její monotónnost i v případě modelu zcela stlačitelné atmosféry, kdy skutečný tlak p nemusí být monotónní funkcí vertikální souřadnice z. Její další výhodou je velmi jednoduchý přechod mezi modelem atmosféry v hydrostatické

rovnováze (při využití klasické souřadnice η) a modelem zcela stlačitelné atmosféry. Terén kopírující souřadnice η odvozená ze souřadnice π je pak definovaná vztahem (Laprise (1992))

$$\pi(x,y,z,t) = A(\eta) + B(\eta)\pi_s(x,y,t), \tag{2.2}$$

kde π_s je hydrostatický tlak na zemském povrchu. Pokud bychom zaměnili souřadnici π a souřadnici p v případě modelu v hydrostatické rovnováze, pak bychom dostali obvyklou souřadnici η popsanou Simmons a Burridge (1981), což umožňuje snadný přechod mezi hydrostatickou a nehydrostatickou verzí.

Okrajové podmínky pro souřadnici η jsou pak

$$A(\eta_s) = 0,\ B(\eta_s) = 1, \tag{2.3}$$

aby souřadnice η na povrchu plně kopírovala terén, zatímco na stropě modelu je požadováno, aby souřadnice ležela v konstantní tlakové hladině, platí tedy okrajové podmínky

$$A(\eta_T) = \pi_T \geq 0,\ B(\eta_T) = 0, \tag{2.4}$$

v praxi se však uvažuje hodnota tlaku na stropě modelu nulová.

2.4 Mikrofyzikální schéma

Pro uvažované schéma diagnostiky blesků je důležité schéma mikrofyziky oblaků a srážek, proto ho zde stručně uvedeme.

Mikrofyzikální schéma modelu ALADIN je založeno, stejně jako celá fyzika modelu, na určování toků fyzikálních veličin mezi vertikálními vrstvami modelu (Catry a kol. (2007)). Všechny rovnice předpokládají použití vertikální souřadnice η, jejíž zavedení je popsané v sekci 2.3, jsou zapsány ve formě toku a tyto toky jsou vztažené k těžišťovému souřadnému systému. Vertikální rychlosti všech skupenství (kromě vypadávajících srážek) jsou v těžišťové soustavě shodné. Toky se mohou odehrávat pouze ve vertikálním směru, přičemž kladné znaménko má směr toku shora dolů. Boční toky se v rámci kroku fyziky uvažují nulové z důvodu výrazně delší vzdálenosti mezi uzlovými body modelu v horizontálním směru (v případě konfigurace modelu ALADIN v ČHMÚ 2,325 km) než ve vertikálním směru (v troposféře desítky až stovky metrů). Boční toky jsou tedy určeny pouze advekcí. Vertikální toky pak můžeme jednoduše spočítat pomocí dvojrozměrné Gauss-Ostrogradského věty. Výhodou uvažování všech rovnic ve formě toků je jednoduchá aditivita toků fyzikálních veličin, což je velká výhoda tohoto přístupu, protože hodnoty fyzikálních veličin mnohdy ovlivňuje více procesů, jejichž příspěvky je pak možné jednoduše sečíst.

Atmosféra se v rámci modelu obvykle skládá ze suchého vzduchu, vodní páry, oblačné vody, oblačného ledu, srážek v kapalné fázi a srážek ve formě sněhu. Nově model umožňuje prognostické řešení přítomnosti sněhových krupek. Množství sněhových krupek bylo dříve řešeno diagnosticky, ale postupně se implementuje jejich prognostická varianta, která je též vhodnější pro správné fungování schématu diagnostiky blesků. Sněhové krupky se vyznačují tím, že tlak vodních par nad nimi odpovídá tlaku vodní páry nad sněhem, zatímco statistická funkce jejich sedimentace je shodná se statistickou funkcí sedimentace deště. Naopak kroupy nejsou v rámci numerických předpovědních modelů obvykle reprezentovány, protože mechanismus jejich vzniku je složitý. Předpověď možného výskytu krup je

v rámci modelu ALADIN diagnostikována na základě překročení určité prahové hodnoty v množství určených krupek ve vertikálním sloupci.

Pro těchto sedm výše zmíněných složek atmosféry jsou v modelu vyhrazeny prognostické proměnné, které zavádíme hmotnostními poměry vůči celkové hmotnosti m_{celk} vybraného objemu vzduchu $q_d = m_d/m_{celk}$ pro suchý vzduch, dále $q_v = m_v/m_{celk}$ pro vodní páru, $q_l = m_l/m_{celk}$ pro oblačnou vodu, $q_i = m_i/m_{celk}$ pro oblačný led, $q_s = m_s/m_{celk}$ pro sníh, $q_r = m_r/m_{celk}$ pro srážky v kapalném skupenství a konečně $q_g = m_g/m_{celk}$ pro sněhové krupky. Samozřejmě platí $q_d + q_v + q_l + q_i + q_s + q_r + q_g = m_{celk}/m_{celk} = 1$.

Model obecně využívá sady termodynamických rovnic pro výpočet toků veličin, jejichž aproximace je založena na několika zjednodušujících předpokladech, a to (Catry a kol. (2007))

1. Atmosféra je v termodynamické rovnováze.

2. Kondenzované částice mají nulový objem, a tedy nekonečnou hustotu, jsou tedy dokonale nestlačitelné.

3. Obě plynné složky vzduchu (suchý vzduch a vodní pára) splňují Boyleův-Mariottův zákon (při konstantní teplotě v uzavřeném systému nevyměňujícím částice je součin tlaku a objemu vzduchu konstantní) a Daltonův zákon (celkový tlak je dán součtem tlaků parciálních).

4. Měrné tepelné kapacity všech složek vzduchu jsou nezávislé na jejich teplotě.

5. Všechny druhy srážek v jedné výpočetní buňce mají stejnou teplotu, a to včetně dolů propadávajícího deště či sněžení, u nějž lze předpokládat, že bude mít teplotu jinou (obvykle nižší, ale může být i vyšší, stačí uvážit případ mrznoucího deště) než je teplota suchého vzduchu v dané výpočetní buňce. Přínos ve snížení výpočetní náročnosti je při tomto řešení velký, zatímco vliv na přesnost řešení je velmi malý.

6. Úbytek hmotnosti způsobený vypadáváním srážek není dle Catry a kol. (2007) v ideálním případě kompenzován tokem suchého vzduchu. V praxi se však kompenzace tokem suchého vzduchu stále používá kvůli stabilnější integraci modelu. Experimentálně bylo zjištěno, že rozdíly ve výsledcích simulace jsou i v extrémních podmínkách minimální.

Algoritmus výpočtu všech fázových změn vody v rámci fyziky modelu probíhá jejich přeměnou na vodní páru, která se ihned přemění na danou fázi. Není tedy možné, aby se oblačný led přímo konvertoval na oblačnou vodu a obráceně. Vždy se nejdříve oblačný led konvertuje na vodní páru, která se záhy konvertuje na oblačnou vodu. V přírodě samozřejmě přímá přeměna oblačného ledu na oblačnou vodu existuje, ale v zájmu zjednodušení algoritmů v rámci modelu se toto neuvažuje, neboť obě cesty jsou termodynamicky ekvivalentní, takže nedochází k újmě na obecnosti. Oblačná voda se dále může konvertovat na srážkovou vodu, která se může vypařit a stát se z ní opět vodní pára. Obdobně oblačný led se může konvertovat na srážkový led, který může sublimovat, čímž vznikne vodní pára (Catry a kol. (2007)).

2.5 Reprezentace oblaků a srážek

Celkové pokrytí oblačností N vstupující do kroku mikrofyziky je uvažováno náhodným překryvem oblačnosti zavedené vztahem

$$(1 - N) = (1 - N_{str})(1 - N_{cv}), \tag{2.5}$$

kde N_{str} je pokrytí oblačností rozlišené modelem. Její dolní index *str* odkazuje na vrstevnatou oblačnost, neboť dříve modely měly nižší rozlišení a nebyly tak schopné rozlišit konvekci. Nyní již některé modely dokáží rozlišit konvekci alespoň částečně, a rovněž takto vzniklá kupovitá oblačnost je pak zahrnuta v tomto označení. Proto může být použití tohoto dolního indexu lehce matoucí. N_{cv} značí pokrytí oblačností parametrizované schématem hluboké konvekce, v případě modelu ALADIN je použito schéma 3MT, které bude více popsáno v sekci 2.6. Při výpočtu radiační bilance je ještě uvažováno pokrytí oblačností parametrizované schématem mělké konvekce, v rámci mikrofyziky se však tato oblačnost neuvažuje, neboť se u ní nepředpokládá vypadávání srážek.

Oblačnost určená vztahem (2.5) následně vstupuje do mikrofyziky modelu, která na nich společně provede jeden výpočet. Nejprve se určí množství srážkových a oblačných částic. Změna množství srážkových částic může probíhat několika způsoby.

1. Autokonverzí, kdy srážkové kapky vznikají koalescencí oblačné vody, respektive kdy srážkový led vzniká koalescencí oblačného ledu (Česká meteorologická společnost (2021)).

2. Sběrem oblačných částic, které na sebe nabaluje srážková voda, srážkový led, či krupky.

3. Táním či mrznutím srážek.

4. Výparem či sublimací.

Ke vzniku sněhových krupek pak v rámci modelu přispívá Wegenerův-Bergeronův-Findeisenův (WBF) proces, sběr a krupky jsou také produktem mrznutí deště.

Důležitým parametrem fázových přeměn je jejich rychlost, což je rozhodující pro určení skupenství srážek v dané hladině. Rychlost autokonverze je dána vztahem (Catry (2007))

$$\left(\frac{dq_{l/i}}{dt}\right)_{aconv} = \frac{q_{l/i}}{\tau_{l/i}(T)} \left\{1 - \exp\left[-\frac{\pi}{4}\left(\frac{q_{l/i}}{q^{cr}_{l/i}(T)}\right)^2\right]\right\}, \tag{2.6}$$

kde τ je charakteristický čas autokonverze závislý na termodynamické teplotě T, přičemž s rostoucí teplotou roste. Horní index *cr* značí kritickou hodnotu veličiny $q_{l/i}$, aby se zabránilo nežádoucí autokonverzi v případech, kdy by k ní nemělo docházet. Tato hodnota je pro autokonverzi oblačného ledu ve srážkový led tím nižší, čím jsou nižší teploty, od níž autokonverze probíhá. Oba tyto parametry jsou určeny empiricky, lze je nastavit tak, aby bylo dosaženo co nejrealističtějších výsledků. Parametr $\pi/4$ se v exponenciále vyskytuje z důvodu konzistence modelu

s definicí autokonverze dle vztahu představeného Sunqvistem a vztahu používaného Kesslerem. Zatímco Sunqvist používá spojitý přechod (za využití druhé mocniny exponenciály) mezi tím, kdy autokonverze probíhá a kdy nikoli, Kessler používá Heavisideovu přechodovou funkci (Liu a kol. (2006)). Parametr $\pi/4$ je pak dán z porovnání ploch pod křivkou v obou výrazech.

Obdobně pro rychlost změn hmotnostních poměrů v důsledku WBF procesu máme vztah (Catry (2007))

$$\left(\frac{dq_l}{dt}\right)_{WBF} = -F^a_{WBF}\frac{q_l}{\tau_l(T)}\frac{q_l \cdot q_i}{(q_l+q_i)^2} \left\{1 - \exp\left[-\frac{\pi}{4}\left(\frac{q_l \cdot q_i}{q_l^{cr}(T)\cdot q_i^{cr}(T)\cdot\left(F^b_{WBF}\right)^2}\right)\right]\right\}, \tag{2.7}$$

kde F^a_{WBF} a F^b_{WBF} jsou ladící parametry.

Pádovou rychlost vodní kapky (a tedy i krupky) můžeme určit ze vztahu (Ginderachter (2014))

$$\overline{w} = 2{,}25 \cdot \Omega \left(\frac{R}{\rho^{1,8}}\right)^{0,3}, \tag{2.8}$$

kde R je srážkový tok, ρ hustota vzduchu a $\Omega = 13{,}4$.

Množství vzniklých srážkových či oblačných vodních částic v dané výpočetní buňce se pak vyjadřuje tzv. *pseudotoky*, které slouží pouze k matematickému popisu problému, aby byla dodržena konzistence celého modelu založeném na určování toků mezi vertikálními vrstvami modelu a bylo možné použít sadu rovnic navrženou Catry a kol. (2007).

Sedimentace srážek se pak počítá postupně od stropu modelu směrem dolů v jednotlivých vertikálních vrstvách, přičemž se v každé vrstvě vyhodnotí toky jednotlivých prognostických veličin na jejím horním a dolním rozhraní, jejich hodnoty, příbytek a úbytek v každé vrstvě. V rámci výpočetní buňky může být přítomná srážková voda na počátku časového kroku, propadnout do ní z vrstvy výše, nebo se může jednat o nově vzniklé srážky ve výpočetní buňce v rámci daného časového kroku. Model ALADIN využívá schématu pro výpočet rychlostí pádů oblačných částic založeného na statistickém rozdělení rychlostí sedimentace (Geleyn a kol. (2008)), což umožňuje použít dlouhý časový krok, jehož délka v provozní konfiguraci modelu v ČHMÚ činí 90 s (Brožková a kol. (2019)).

Je teoreticky možné počítat sedimentaci srážkových částic explicitně, je to ale značně nepraktické. Nevýhodou tohoto přístupu je nutnost použít výrazně kratší časový krok, jinak by nemusela být splněna Courantova–Friedrichsova–Lewyho podmínka numerické stability, neboť srážková částice by překonala delší vzdálenost než je vzájemná vzdálenost dvou sousedních vertikálních vrstev modelu.

2.6 Schéma konvekce 3MT

Pro modely s rozlišením výpočetní sítě nižším než jsou rozměry výstupných konvektivních proudů je nutné konvekci parametrizovat. Parametrizace je označení pro souhrn matematických modelů, které popisují fyzikální procesy menšího časového a prostorového měřítka než je rozlišení modelu. Parametrizací jsou pak

upravovány hodnoty fyzikálních veličin v prognostických proměnných modelu. Typickými parametrizovanými jevy jsou nerozlišená konvekce, radiační přenos v atmosféře, turbulence či nerozlišená orografie (Česká meteorologická společnost (2021)).

Konfigurace modelu ALADIN v Českém hydrometeorologickém ústavu má horizontální vzdálenost uzlových bodů 2,325 km, což je rozlišení na spodní hranici výše zmíněných *convection permitting scales*. Byly provedeny testy modelu bez využití parametrizace hluboké konvekce, výsledky však nebyly tak dobré jako s jejím využitím. Hluboká konvekce tak zůstává parametrizována, je použito schéma 3MT popsané Gerard a kol. (2009), které je speciálně navrženo pro použití při rozlišení modelů s horizontálním rozlišením v řádu jednotek kilometrů. Tím se odlišuje od mnoha jiných schémat parametrizace hluboké konvekce, která jsou vytvořená pro rozlišení modelů, kdy není hluboká konvekce rozlišena ani částečně, a proto neposkytují uspokojivé výsledky pro modely, jejichž rozlišení leží v oblasti *convection permitting scales*. Není-li hluboká konvekce modelem dostatečně rozlišena, může dojít ke tvorbě tzv. *grid point storms*, tedy velice intenzivních bouří odehrávajících se v jediném vertikálním sloupci.

Schéma hluboké konvekce 3MT je specifické řazením jednotlivých výpočtů do tzv. kaskády, tedy sekvenčně za sebou. Jedním z důvodů tohoto přístupu je to, aby se zabránilo nežádoucím efektům způsobeným jednotlivými výpočty řešícími tentýž fyzikální proces. Organizace spouštění jednotlivých výpočtů v této výpočetní kaskádě je pak následující (Gerard a kol. (2009)). Ze stavu modelu, který je dán počátečním stavem systému z kroku dynamiky, dojde nejprve k termodynamickému přizpůsobení, kdy je Newtonovou iterační smyčkou určen tok rozlišené kondenzace a výparu a je určeno množství rozlišené oblačnosti. Rovněž dojde k úpravě proměnných q_v^*, q_i^*, q_l^* a T^*, kde hvězdička značí stav proměnných po každém individuálním výpočtu. Jsou-li splněny podmínky spuštění schématu hluboké konvekce, pak jsou nejprve vyhodnoceny parametry výstupného konvektivního proudu, z nichž jsou spočítány vertikální konvektivní toky kondenzace a transportu. Zde jsou opět modifikovány proměnné q_v^*, q_i^*, q_l^* a T^*. Kondenzační tok z výstupného konvektivního proudu je následně sečten s kondenzačním tokem určeným termodynamickým přizpůsobením. Následně je nad tímto celkovým tokem proveden výpočet mikrofyziky. Jedním z výstupů výpočtu mikrofyziky je i tok výparu padajících srážek, který je dále využit k formulaci uzávěru sestupného konvektivního proudu v rámci schématu 3MT. V rámci sestupného konvektivního proudu je určen další výpar padajících srážek a toky konvektivního transportu.

V další práci využijeme informaci o vertikálním transportu během konvektivního výstupu. Tok vertikálního transportu hmoty ve výstupném konvektivním proudu M_u je určen vztahem (Gerard a kol. (2009))

$$M_u = -\sigma_u \frac{\omega_u^*}{g}, \tag{2.9}$$

kde σ_u je poměrná část výpočetní buňky, kterou zaujímá výstupný konvektivní proud a $\omega_u^* = \omega_u - \omega_e$ je relativní rychlost výstupného konvektivního proudu vůči vertikální rychlosti okolí v p-systému. Tato vertikální rychlost je získána pomocí prognostické rovnice ve tvaru

$$\frac{\partial \omega_u^*}{\partial t} = B + D\omega_u^{*2} + A\frac{\partial \omega_u^{*2}}{\partial p}, \tag{2.10}$$

kde A je koeficient zahrnující advekci, B je vztlaková síla, v koeficientu D je zahrnuto vtahování vzduchu z okolí výstupného konvektivního proudu a odporový koeficient, t je čas a p je tlak. Odpovídající vertikální rychlost v z-systému získáme přibližně pomocí rovnice hydrostatické rovnováhy $dp = -\rho g dz$. Diferencujeme-li tuto rovnici podle času a vyjádříme-li hustotu vzduchu ze stavové rovnice ideálního plynu, získáme vztah

$$w_u = -\frac{RT\omega_u\sigma_u}{pg} = \frac{RTM_u}{p}, \tag{2.11}$$

kde R je měrná plynová konstanta. Přenásobení σ_u je zde z důvodu, že se uvažuje, že výstupný konvektivní proud zaujímá pouze určitou část výpočetní buňky.

2.7 Schéma diagnostiky blesků

Pro simulaci blesků bylo použito schéma navržené McCaul a kol. (2009). Toto schéma kombinuje dvě jednoduché metody.

První metoda využívá prognostické pole výstupních vertikálních rychlostí vynásobených směšovacím poměrem krupek v hladině o teplotě -15 °C, což je oblast, kde dochází k současnému výskytu vody v kapalném i tuhém skupenství v oblaku. Závislost množství simulovaných blesků na výstupném toku krupek v hladině o teplotě -15 °C lze zapsat vztahem

$$F_1 = f\left[(wq_g)_m\right], \tag{2.12}$$

kde f značí funkční závislost, w rychlost výstupného konvektivního proudu směrem vzhůru a dolní index m označuje, že se toto všechno vztahuje do smíšené oblasti oblaku o teplotě -15 °C. Funkční závislost f byla v McCaul a kol. (2009) určena jako lineární. Toto schéma dokáže velmi dobře určovat množství bleskových výbojů v čase, ovšem značně podhodnocuje jejich prostorové rozložení. To je způsobeno tím, že tato metoda je založena pouze na analýze výstupného konvektivního proudu, ale neuvažuje kovadlinu kumulonimbu, která také bývá bleskově aktivní.

Druhá metoda je založena na vertikálně integrovaném množství všech hydrometeorů v pevném skupenství v daném vertikálním sloupci vynásobeném hustotou vzduchu v dané hladině. Pro množství simulovaných blesků tak získáváme funkční závislost zapsanou vztahem

$$F_2 = h\left[\int_0^\infty \rho\left(q_g + q_s + q_i\right) dz\right], \tag{2.13}$$

kde h značí funkční závislost. I u této metody byla v McCaul a kol. (2009) nalezená funkční závislost h lineární. Toto schéma oproti prvnímu nedokáže tak dobře předpovídat bleskovou intenzitu, lépe však určuje prostorové rozložení blesků.

Aby bylo využito maximálního potenciálu obou metod a zároveň odstraněny jejich nedostatky, výsledné schéma je dáno lineární kombinací obou metod

$$F_3 = r_1F_1 + r_2F_2, \tag{2.14}$$

kde McCaul a kol. (2009) zvolili hodnoty $r_1 = 0{,}95$ a $r_2 = 0{,}05$. Takto zvolené hodnoty r_1 a r_2 umožňují velmi dobře předpovídat množství bleskových výbojů

v čase tak, jak to dokáže první metoda, a zároveň umožňují určit oblast nebezpečí bleskové aktivity, což je výhodou druhé metody.

Přestože se funkční závislosti f a h ukazují jako lineární, pro větší toky krupek tomu tak nemusí zcela být. Patrně již nedochází k tak vysokému nárůstu četnosti blesků při zvýšení toku krupek, jak ukazuje obrázek 1 v McCaul a kol. (2009). Ovšem z jednoho měření nelze udělat obecný závěr a tak je tato problematika otázkou dalšího výzkumu.

V testech provedených McCaul a kol. (2009) vykazuje toto schéma o něco vyšší hodnoty bleskové aktivity pro většinu časového úseku. Je-li cílem určit maximální hodnotu bleskové aktivity, které je vyhodnoceno přesněji, což je podstatné pro určení míry nebezpečí, kterou bouřka představuje, není toto příliš na škodu.

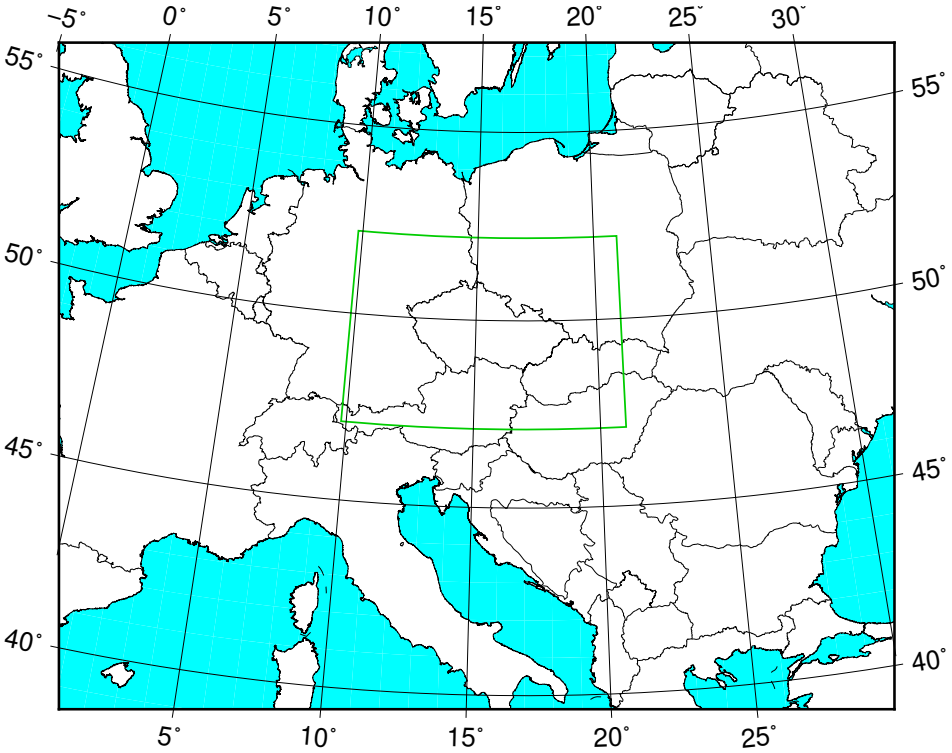
Dalším způsobem určení bleskové aktivity by mohla být analýza modelovaných hodnot konvektivní dostupné potenciální energie (CAPE). Oproti výše popsanému schématu je však při použití diagnostiky CAPE silně nadhodnocena oblast bleskové aktivity. Jinou možností je určování bleskové aktivity pomocí simulovaných radarových odrazivostí.

Výhodou tohoto schématu popsaného rovnicí (2.14) je jeho jednoduchost a nízká náročnost na výpočetní čas při zachování vysoké přesnosti předpovědi. Naopak jeho nevýhodou je nutnost kalibrace koeficientů f a h při každé změně konfigurace fyziky nebo rozlišení modelu či přechodu na novější verzi fyziky modelu.

3. Nastavení simulace

Pro všechny výpočty byl použit numerický model pro předpověď počasí ALADIN v provozní konfiguraci využívané v ČHMÚ (popsané v Brožková a kol. (2019)). Jedná se o konfiguraci ALARO z cyklu 43t2 s lokálními modifikacemi. V rámci experimentu došlo k lehkým úpravám, které nejsou využívány v operačním provozu modelu. Ty se týkají zejména využití prognostické varianty určování množství sněhových krupek a v souvislosti s tím úpravy koeficientu F^a_{WBF}, jehož hodnota byla změněna z 1600 na 300. Dále byla samozřejmě do modelu začleněna diagnostika blesků.

Model v této konfiguraci disponuje horizontálním rozlišením 2,325 km a předpověď je k dispozici v rozlišení 1069 bodů v zonálním směru a 853 bodů ve směru meridionálním.



Obrázek 3.1: Doména modelu. Zeleným obdélníkem je vyznačená oblast pokrytá měřenými daty z detekční sítě LINET.

Na obrázku 3.1 je zobrazena celá doména, pro níž jsou dostupná data z modelu a zeleným obdélníkem je pak vyznačena oblast pokrytá daty z detekční sítě LINET. Naměřená data z detekční sítě LINET byla dostupná pro oblast, jejíž hranice vedly po konstantních hodnotách rovnoběžek a poledníků, jihozápadní roh má souřadnice (9,8E, 47,1N), severovýchodní roh pak (21E, 52,2N). Modelová data jsou projektována v Lambertově konformní projekci a pokrývají výrazně větší oblast. Její jihozápadní roh má souřadnice přibližně (1,17E, 38,40N), severovýchodní roh má souřadnice přiblžně (34,68E, 56,28N), souřadnice referenčního poledníku je 17E a referenční rovnoběžky přibližně 46,25N. Pro kalibraci schématu diagnostiky blesků se tedy využívala pouze oblast, kde byla dostupná naměřená data.

4. Kalibrace parametrů schématu blesků

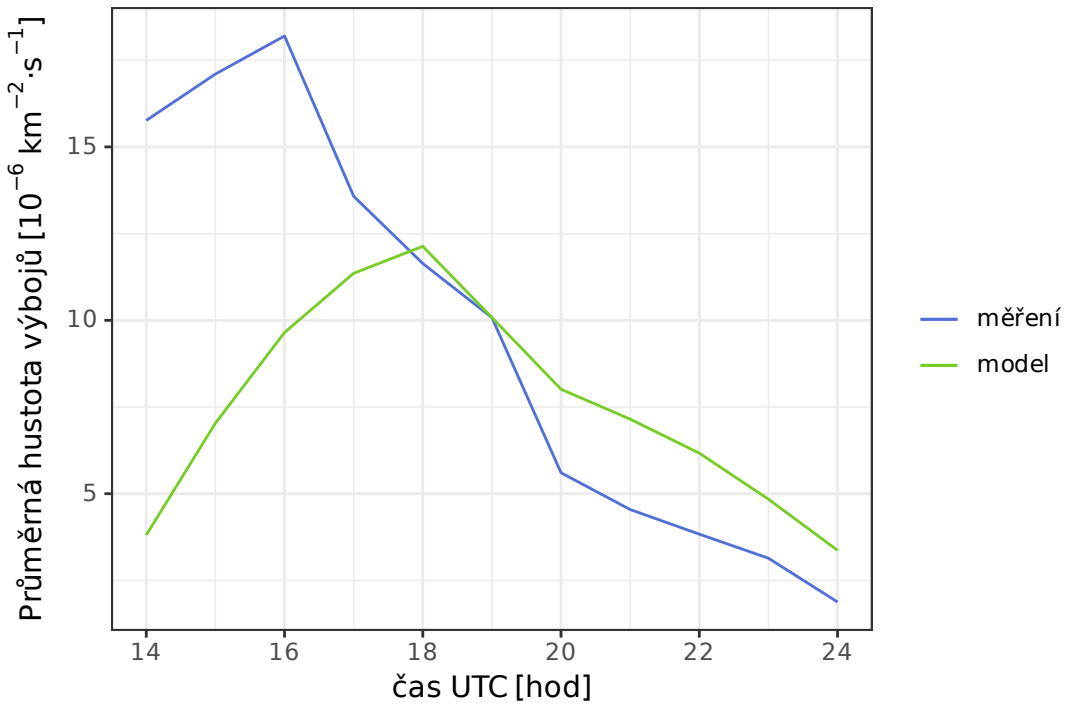
4.1 Postup kalibrace

Schéma pro předpověď blesků popsané v sekci 2.7 rovnicí (2.14) bylo nutné nejprve zkalibrovat pro realistické simulování hustoty bleskových výbojů v konfiguraci modelu ALADIN používané v ČHMÚ. Pro kalibraci bylo vybráno celkem šest dnů s výraznou bouřkovou činností v roce 2020. Případy byly doporučené na základě vydaných meteorologických výstrah centrálním předpovědním pracovištěm ČHMÚ. Zároveň proběhla kontrola, že předpověď vytvořená modelem byla blízká skutečnosti. Nedávné období bylo vybráno kvůli tomu, že již byla využívaná současná konfigurace modelu pro operační provoz s rozlišením výpočetní sítě 2,325 km, což usnadnilo přípravu simulace. Simulovaly se bouřkové situace ze dnů 7. 6., 13. 6., 26. 6., 14. 8., 22. 8. a 29. 8., vše v roce 2020. Pro každý den byly spuštěny dvě integrace, první s délkou integrace 24 h z analýzy v 00 UTC, druhá pak s délkou integrace 12 h z analýzy ve 12 UTC daného dne.

Kumulativní hodnoty simulované hustoty bleskových výbojů na ploše 1 km^2 byly zapisovány každou hodinu pro každý vertikální sloupec modelu. Tyto hodnoty byly následně zprůměrované přes celou oblast pokrytou měřeními a byly vyděleny 3600 s, čímž jsme získali hustotu výbojů za sekundu s jednotkou $km^{-2} \cdot s^{-1}$. Následně byly srovnány s obdobně zpracovanými daty z detekční sítě LINET. Naměřená data byla přepočítána tak, aby hustoty bleskových výbojů odpovídaly příslušným výpočetním buňkám modelu. Vlivem toho, že v rámci modelu může docházet k inicializaci konvekce v jiný čas a na jiném místě než ve skutečnosti, neporovnávali jsme simulovaná a naměřená data pro jednotlivé výpočetní buňky modelu. Proto byly následně naměřené a modelované hustoty bleskových výbojů zprůměrovány pro každou hodinu přes celou oblast, na níž byla naměřená data k dispozici. Následně bylo možné multidimenzionální lineární regresí procházející počátkem přes hodinové průměry určit koeficienty r_1 a r_2 ve vztahu (2.14), čímž byly jednoznačně určeny i koeficienty úměrnosti f ve vztahu (2.12) a h ve vztahu (2.13). Lineární regrese byla prováděna jen v hodiny, kdy naměřená průměrná hustota bleskových výbojů přesáhla $10^{-6}\,km^{-2} \cdot s^{-1}$, s pomocí programovacího jazyka R (R Core Team (2021)).

Kalibrace byla prováděna se započítáním všech typů bleskových výbojů, tedy CC, CG+ a CG-, mezi kterými nebylo nijak rozlišováno. Zároveň neproběhly žádné pokusy o přiřazování jednotlivých výbojů danému blesku, pokud měl více výbojů. V ideálním případě by tedy měly být simulované kumulativní hodnoty hustoty bleskových výbojů shodné s kumulativní hustotou bleskových výbojů detekovaných systémem LINET.

Porovnáme-li denní chody měřených a simulovaných hodnot hustoty bleskových výbojů, zjistíme, že na začátku běhu modelu existuje poměrně výrazný spin-up efekt. Ten značně zkresluje určené hodnoty průměrné hustoty bleskových výbojů v běhu modelu z analýzy ve 12 UTC, jak vidíme na obrázku 4.1. Díky tomu, že blesková aktivita v odpoledních hodinách bývá poměrně vysoká, dochází ke značnému podhodnocování modelované hustoty bleskových výbojů oproti

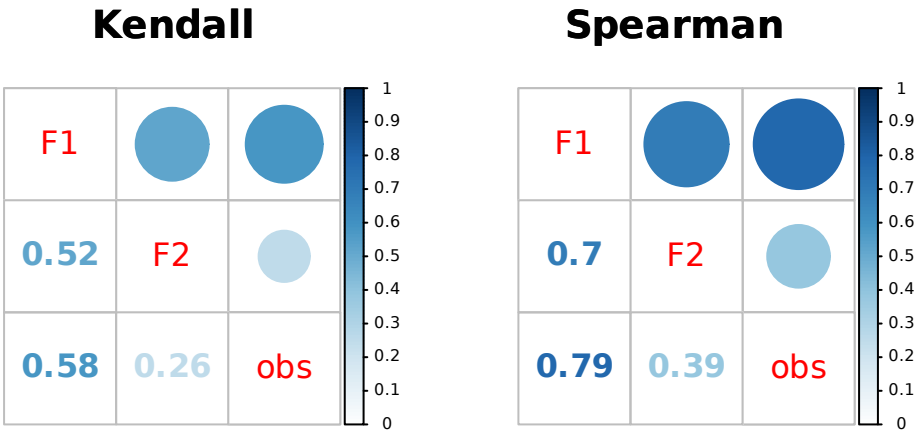


Obrázek 4.1: Chod průměrné bleskové aktivity. Průměr ze všech simulací z analýzy ve 12 UTC. Povšimněme si výrazného spin-up efektu v průběhu prvních pěti hodin simulace. Vykresleno pomocí knihovny ggplot2 (Wickham (2016)).

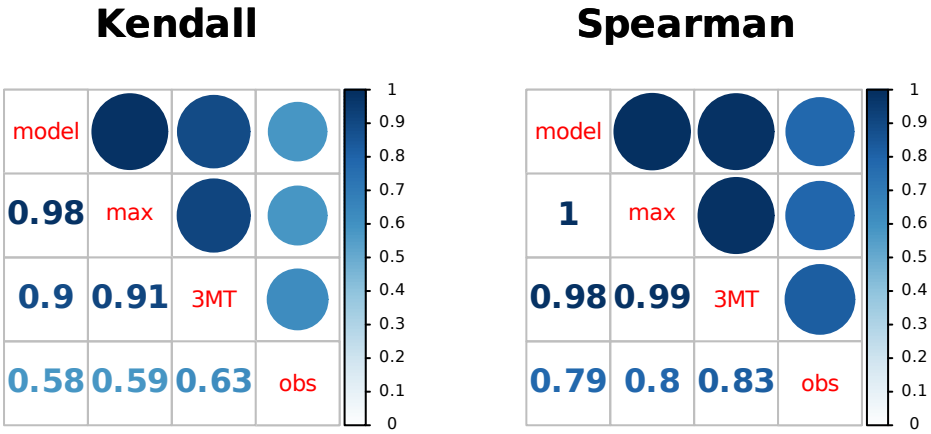
měřením. Tento spin-up efekt je způsoben tím, že počáteční množství sněhových krupek v modelu je zatím nulové, a tak byla dále kalibrace parametrů prováděna pouze s využitím běhu modelu z 00 UTC.

Podíváme-li se na korelaci jednotlivých schémat s měřeními, zjistíme, že korelace mezi schématem F_1 popsaným rovnicí (2.12) a měřeními je poměrně vysoká. Pro schéma F_2 popsané rovnicí (2.13) je korelace s měřeními nižší. To platí pro Spearmanův korelační koeficient i Kendallovo tau (zobrazeno na obrázku 4.2). Tyto korelační koeficienty byly vybrány, protože průměrné hustoty bleskových výbojů nejsou Gaussovsky rozložené, nýbrž mají poměrně výraznou kladnou šikmost. Spearmanův korelační koeficient či Kendallovo tau jsou v tomto případě vhodnější charakteristiky pro popis korelace mezi distribučními funkcemi než Pearsonův korelační koeficient (de Siqueira Santos a kol. (2013)). Navzdory tomu, že korelační koeficienty jsou pro schéma F_2 výrazně nižší než pro schéma F_1, testy statistické významnosti ukazují, že p-hodnota pro nulovou hypotézu, která říká, že hodnota korelačního koeficientu je nula, je pro toto schéma menší než 10^{-6} pro oba použité korelační koeficienty. Pro schéma F_1 je p-hodnota ještě nižší. Všechny korelace jsou tedy statisticky významné.

Po provedení multidimenzionální lineární regrese vycházel v rovnici (2.14) koeficient r_2 velmi malý. Rovněž na výsledné rozložení hustoty bleskových výbojů mělo ve srovnání s velice dominantním schématem F_1 na vzhled předpovídaného pole minimální vliv. Proto bylo od využití schématu F_2 (či jeho lineární kombinace se schématem F_1 ve schématu F_3) během procesu kalibrace parametrů upuštěno a dále bylo využíváno pouze čisté schéma F_1 popsané rovnicí (2.12). Dalším potenciálním rizikem použití schématu F_2 byla možnost předpovídání bleskové



Obrázek 4.2: Korelační koeficienty schémat F_1 a F_2 v porovnání s měřeními. Plochy kruhů ukazují absolutní hodnotu korelačních koeficientů (Wei a Simko (2017)).



Obrázek 4.3: Korelační koeficienty při využití různých vertikálních rychlostí. Plochy kruhů ukazují absolutní hodnotu korelačních koeficientů.

aktivity při intenzivnějším sněžení, protože vertikální integrál v rovnici (2.13) uvažuje všechny hydrometeory v tuhém skupenství včetně sněhu. Schéma diagnostiky blesků však může být užitečné i v chladném pololetí, protože i v zimě se nad Českou republikou občas vyskytují bouřky (vzpomenout můžeme například na bouřky, které se vyskytly v únoru 2020 v rámci tlakové níže, která dostala podle Meteorologického institutu Svobodné univerzity v Berlíně jméno Sabine). V tomto případě by schéma F_2 mohlo působit potíže. Koeficient f schématu F_1 ve vztahu (2.12) byl pak určen lineární regresí na datech zpracovaných způsobem popsaným výše.

4.2 Výběr zdroje vertikální rychlosti

Neboť parametrizace hluboké konvekce zůstává využitá, bylo možné porovnat rozdíly při vyžití vertikální rychlosti rozlišené dynamikou modelu a vertikální rychlosti určenou schématem 3MT. Zde se nabízejí tři možnosti výběru vertikální rychlosti pro schéma diagnostiky blesků. Využívat výhradně dynamikou modelu rozlišenou vertikální rychlost w_{dyn}, využít vertikální rychlost výstupného konvektivního proudu vypočítanou z hodnot určenými parametrizací hluboké konvekce

Tabulka 4.1: Hodnoty koeficientů úměrnosti pro různé zdroje vertikální rychlosti.

Zdroj	f [**km**$^{-3}$]	σ_f [**km**$^{-3}$]
w_{dyn}	1,29	0,08
w_u	1,86	0,10
w_{max}	1,17	0,07

w_u určenou vztahem (2.11), nebo využít maximální hodnoty z obou.

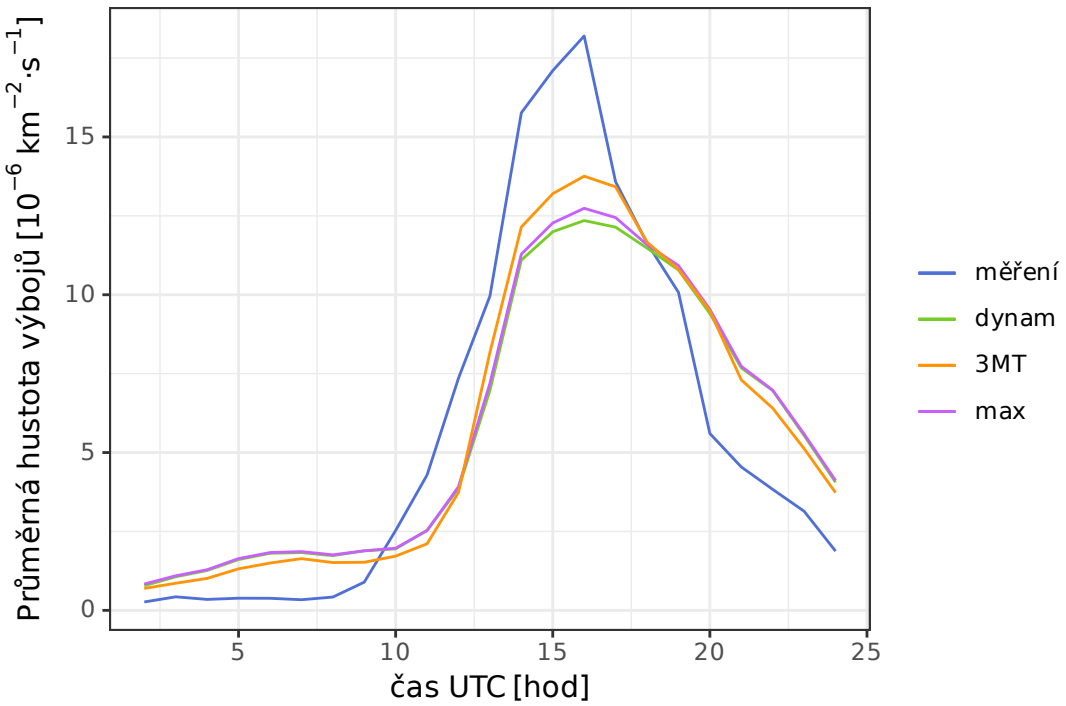
Pro každou z těchto tří možností byly provedeny simulace pro všechny výše uvedené dny pro běhy modelu z analýzy v 00 UTC daného dne. Koeficient f pak byl pro každou možnost určen lineární regresí přímkou procházející počátkem na datech upravených shodným postupem jako v sekci 4.1. V tabulce 4.1 můžeme porovnat koeficienty f při použití různých zdrojů vertikální rychlosti. Nejistota určení koeficientů $\sigma_f$je v tomto případě dána nejistotou lineární regrese.

Podívejme se nyní na korelace mezi modelovanými a měřenými hodnotami hustoty bleskových výbojů při využití různých zdrojů vertikální rychlosti. Na obrázku 4.3 jsou uvedeny korelace pro Spearmanův korelační koeficient a Kendallovo tau. Oba korelační koeficienty jsou nejvyšší při použití vertikální rychlosti w_u. Rozdíly při využití jednotlivých vertikálních rychlostí však nejsou velké. To není velkým překvapením, protože rozlišení modelu umožňuje docela dobře rozlišit hlubokou konvekci.

4.3 Rozložení hustot bleskových výbojů v čase a prostoru

Nejprve se zaměříme na časové rozložení hustot bleskových výbojů. Denní chody hustoty bleskových výbojů s použitím tří zdrojů vertikální rychlosti je možné porovnat na obrázku 4.4. Vidíme, že pro všechny způsoby výběru vertikální rychlosti je amplituda denního chodu o něco nižší než ukazují měření. To je způsobeno zejména déletrvající modelovanou bleskovou aktivitou a částečně také nenulovou průměrnou hustotou výbojů v nočních a ranních hodinách, která pochází zejména ze dne 22. 8., kdy se ale bouřky vyskytovaly nad naší oblastí zájmu a model simuloval vyšší průměrnou hustotu bleskových výbojů než byla naměřená.

Na obrázku 4.5 pozorujeme histogramy rozložení četnosti průměrné hustoty výbojů pro měřená a modelovaná data. Vidíme, že hustoty bleskových výbojů pro hodnoty mezi 0 a $6 \cdot 10^{-6}\,\mathrm{km}^{-2}\cdot\mathrm{s}^{-1}$ jsou více zastoupené v modelovaných datech, ale pro úplně nejnižší hodnoty je četnější zastoupení měřených dat (a to o 10 až 15 procent). Je zřejmé, že při nízké či nulové bleskové aktivitě ji model lehce nadhodnocuje. To souvisí s tím, že v noci, když bývá blesková aktivita velmi nízká, tak model občas předpovídá slabou bleskovou aktivitu, jak můžeme pozorovat na zprůměrovaných denních chodech průměrné hustoty bleskových výbojů na obrázku 4.4 či v rámci vybraných modelovaných situací detailně analyzovaných v kapitole 5. Naopak pro vyšší hodnoty průměrných hustot bleskových výbojů



Obrázek 4.4: Denní chod průměrné hustoty bleskových výbojů. Průměr ze všech simulací z analýzy v 00 UTC.

mezi $6 \cdot 10^{-6}\,\mathrm{km}^{-2}\cdot\mathrm{s}^{-1}$ a $24 \cdot 10^{-6}\,\mathrm{km}^{-2}\cdot\mathrm{s}^{-1}$ je rozložení pro měřená a modelovaná data téměř shodné. To je důležité, protože většina typické bouřkové činnosti v České republice se pohybuje v těchto hodnotách. Shoda je v tomto rozmezí velmi přesná zejména při využití vertikální rychlosti w_u. Pro hodnoty průměrné hustoty bleskových výbojů vyšší než $24 \cdot 10^{-6}\,\mathrm{km}^{-2}\cdot\mathrm{s}^{-1}$ už model nezaznamenal ani jeden případ, zatímco v naměřených datech nalezneme čtyři takové případy. Tři z nich pochází ze dne 13. 6. 2020, kdy model začal simulovat s lehkým (zhruba dvouhodinovým) zpožděním oproti měřením, přičemž blesková aktivita začala ve skutečnosti velmi prudce a model tento rychlý nástup nezachytil. Čtvrtý případ je ze dne 7. 6. 2020, kdy bylo modelované maximum průměrných hustot bleskových výbojů přibližně o deset procent nižší než naměřené, což není velký rozdíl. Podrobněji vybrané modelované situace popíšeme v kapitole 5.

Podíváme-li se na denní chody maximální hustoty bleskových výbojů na celé oblasti (obrázek 4.7), zjistíme, že modelované hodnoty jsou značně nižší než naměřené. Maximální hodnoty hustoty bleskových výbojů byly správně postihnuty pouze dva modelované dny. Na obrázku 4.6 pak pozorujeme histogramy rozložení četnosti maximální hustoty výbojů pro měřená a modelovaná data. Opět vidíme, že modelované maximální hodnoty hustoty výbojů jsou značně podhodnoceny pro všechny možné volby vertikální rychlosti.

Nabízí se tedy otázka, zda-li by nebylo vhodnější provést kalibraci pomocí maximálních hodnot hustoty bleskové aktivity, abychom lépe postihli nebezpečí, které mohou bouřky přinést. To lze diskutovat na situaci ze 7. 6. 2020 v 15 UTC, kdy byla modelovaná průměrná hustota bleskových výbojů velmi podobná té naměřené, zatímco maximální zaznamenaná hustota bleskových výbojů je značně podhodnocena, jak lze vyčíst z tabulky 4.2. Porovnáme-li tyto číselné hodnoty

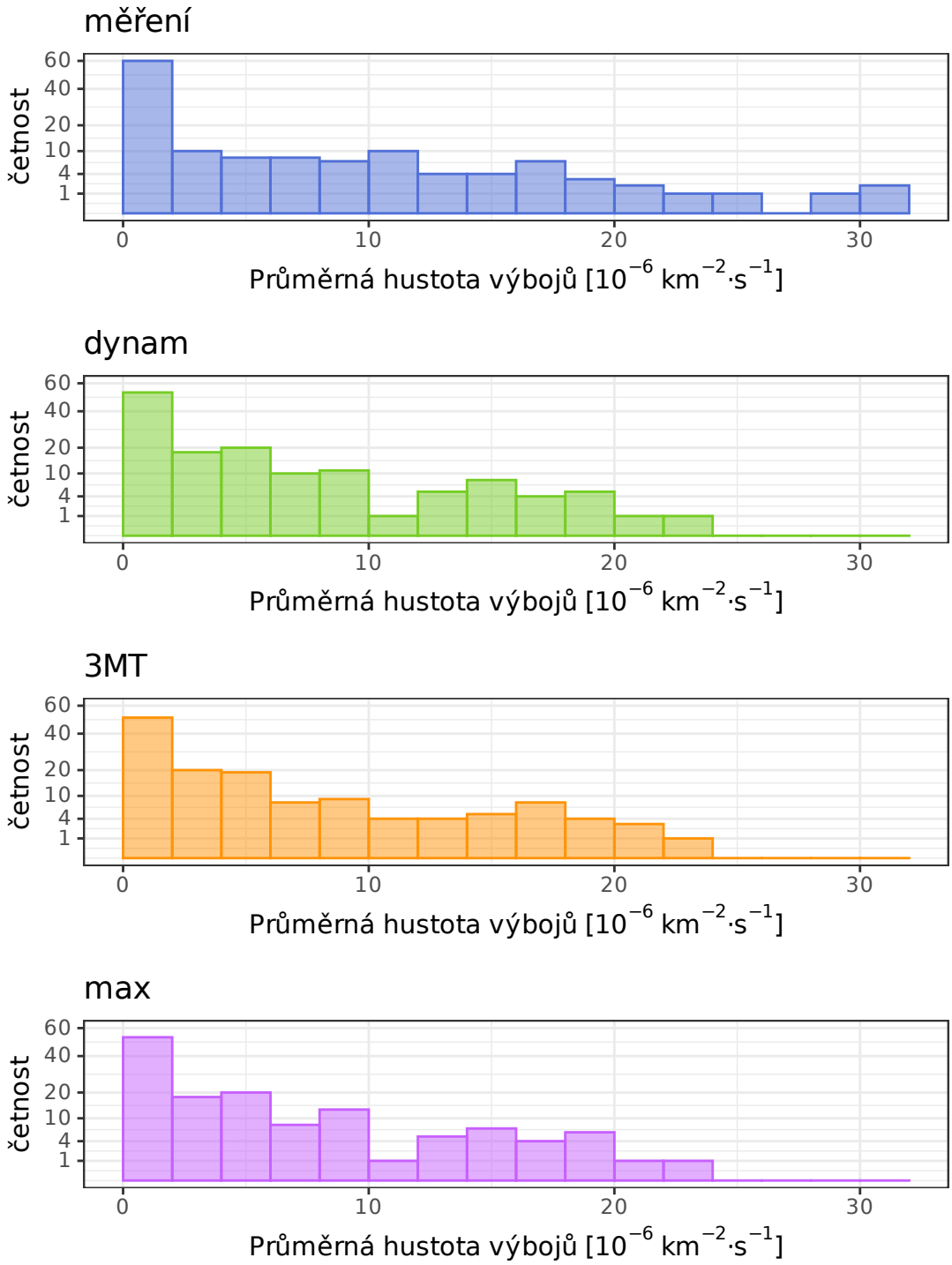
Tabulka 4.2: Kumulované hodnoty maximální a průměrné bleskové aktivity 7. 6. 2020 mezi 14 UTC a 15 UTC.

Zdroj	**průměr** $[10^{-5}\,\mathrm{km}^{-2}\cdot\mathrm{s}^{-1}]$	**maximum** $[10^{-3}\,\mathrm{km}^{-2}\cdot\mathrm{s}^{-1}]$
měření	2,34	7,97
model	2,02	3,27
max	2,03	3,04
3MT	2,23	3,37

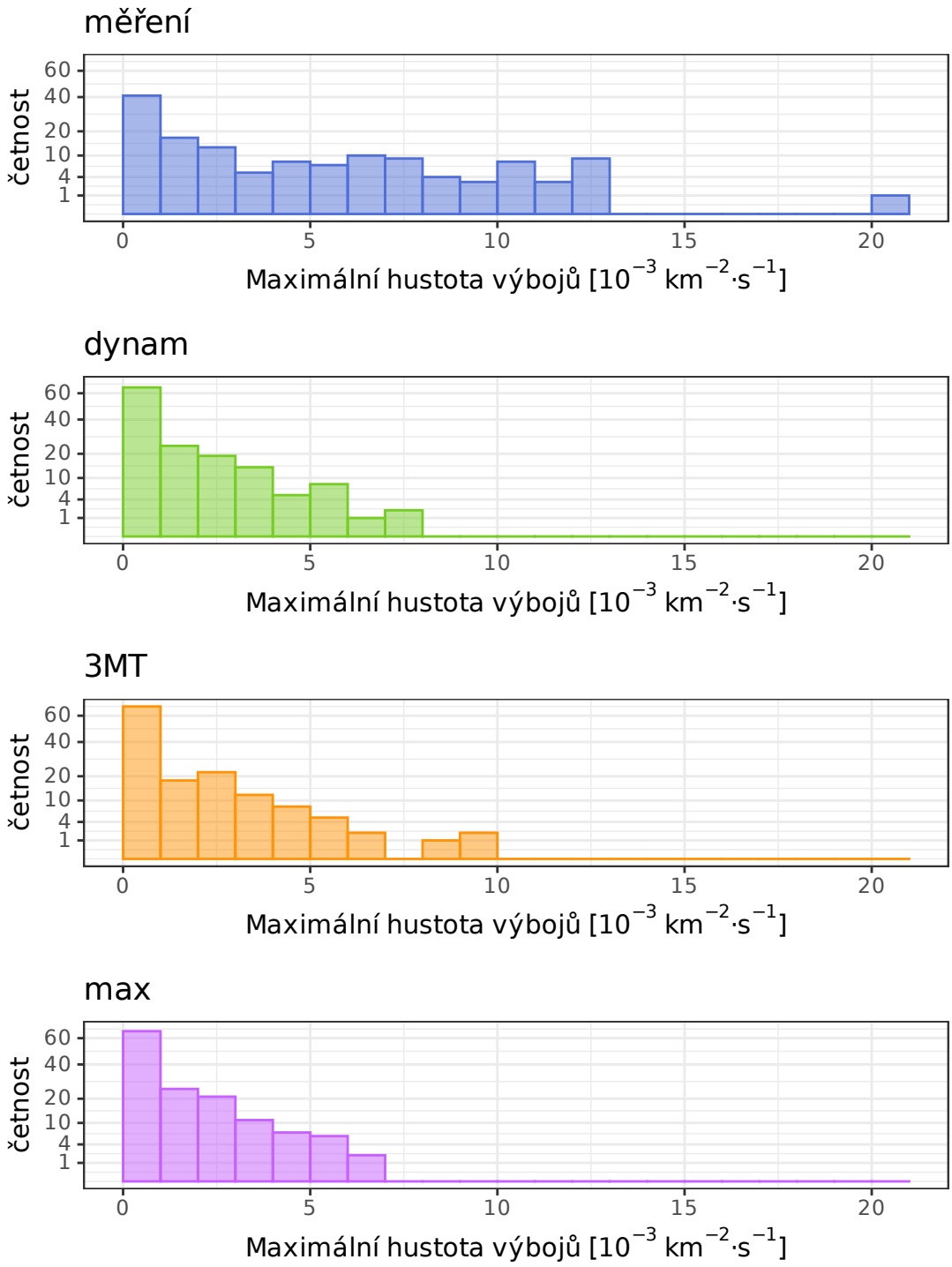
s obrázkem 4.8, vidíme, že vizuálně získáváme velmi podobný výstup modelovaných dat jako těch naměřených. Vysoká naměřená maximální hustota výbojů souvisí s intenzivní bleskovou aktivitou na česko-rakouských hranicích mezi Vyšším Brodem a Freistadtem, která na velice malém území značně převyšuje bleskovou aktivitu ostatních bouřek v tento čas. Pokud bychom upravili kalibraci tak, aby dobře simulovala podobná lokální maxima, ztratili bychom realistický obrázek bleskové aktivity na zbytku oblasti. Místo toho bychom spíše předpovídali maximální možnou hustotu bleskových výbojů než skutečnou bleskovou aktivitu nad těmito oblastmi, docházelo by tedy k systematickému nadhodnocování bleskové aktivity. Proto se pro kalibraci parametrů schématu F_1 jeví jako vhodnější metoda námi provedená metoda lineární regrese průměrných hodnot hustoty bleskových výbojů v čase, která poskytuje realističtější výstup. Maximální naměřené hodnoty hustoty také můžou ovlivňovat také například stavby, což samozřejmě model není schopen simulovat a mají zanedbatelný vliv na vertikální rychlost výstupného proudu či množství sněhových krupek.

Podíváme-li se na obrázku 4.9 na relativní velikost oblasti, kde je simulovaná a naměřená hustota bleskových výbojů vyšší než $10^{-4}\,\mathrm{km}^{-2}\cdot\mathrm{s}^{-1}$, zjistíme, že modelované a měřené hodnoty jsou takřka totožné. Navíc se jedná o nejnižší vykreslovanou hodnotu hustoty bleskových výbojů. Obrázek 4.10 ukazuje to, co obrázek 4.9, ale pro hustotu bleskových výbojů vyšší než $2 \cdot 10^{-4}\,\mathrm{km}^{-2}\cdot\mathrm{s}^{-1}$. Opět vidíme takřka totožné křivky pro měřená a modelovaná data, zejména při použití vertikální rychlosti ze schématu 3MT. Pro rychlost určenou dynamikou modelu je pak tato plocha velmi lehce podhodnocená po většinu dne, zejména pak odpoledne při nejvyšších hodnotách bleskové aktivity. Při dalším zvyšování hustoty bleskových výbojů pro hodnoty vyšší než $5 \cdot 10^{-4}\,\mathrm{km}^{-2}\cdot\mathrm{s}^{-1}$ a $10^{-3}\,\mathrm{km}^{-2}\cdot\mathrm{s}^{-1}$ na obrázcích 4.11 a 4.12, vidíme, že se zvyšujícími se hodnotami prahové hustoty výbojů jsou měřené hustoty bleskových výbojů postupně na větší ploše než modelované. Tento trend lze poměrně snadno předpokládat, protože již víme, že maximální hodnoty bleskové aktivity jsou značně podhodnocené.

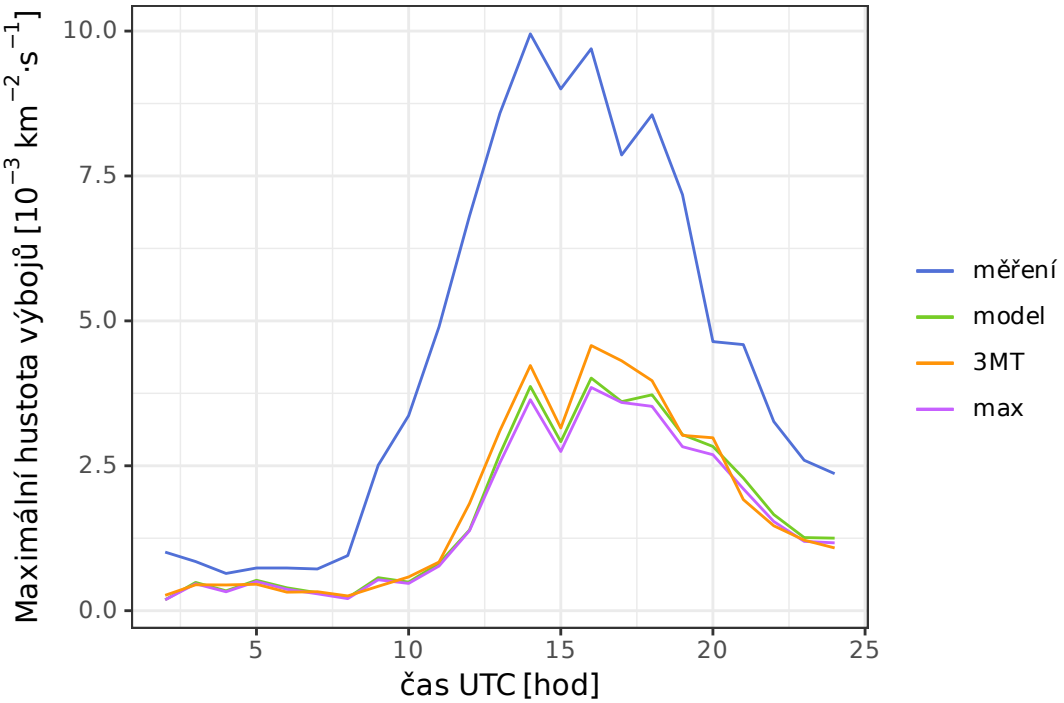
Z textu je zřejmé, že nejlepších výsledků ve většině testů dosahuje simulace s použitím vertikální rychlosti ze schématu 3MT získané vztahem (2.11). Proto se budeme dále zabývat jen simulacemi využívající právě tuto vertikální rychlost.



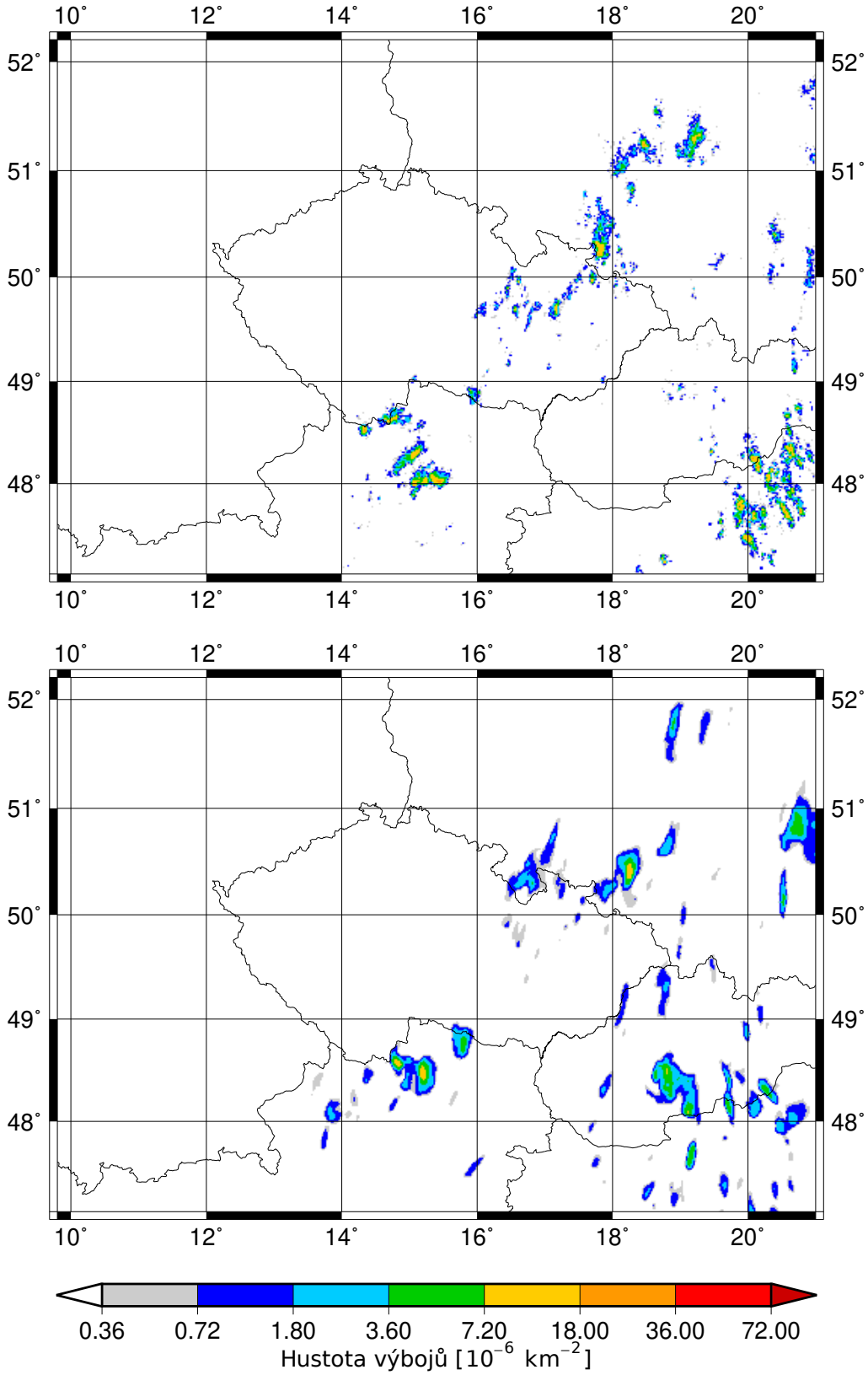
Obrázek 4.5: Histogramy rozložení četnosti průměrné hustoty výbojů pro měřená a modelovaná data s využitím různých vertikálních rychlostí.



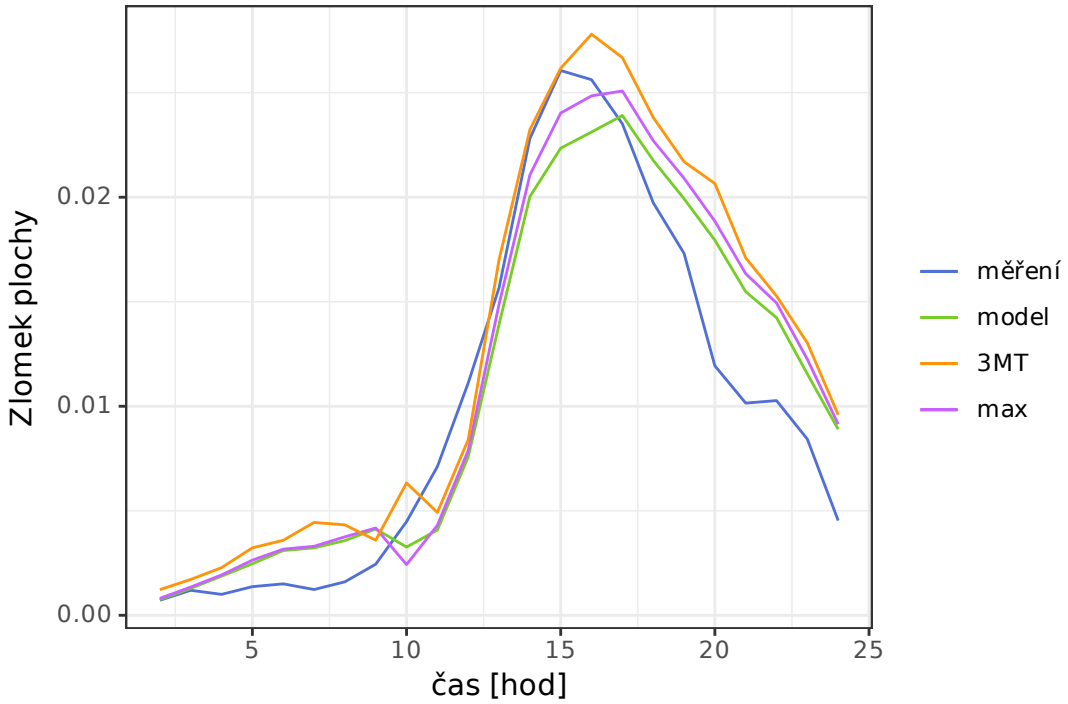
Obrázek 4.6: Histogramy rozložení četnosti maximální hustoty výbojů pro měřená a modelovaná data v rámci celé oblasti pokryté daty s využitím různých vertikálních rychlostí.



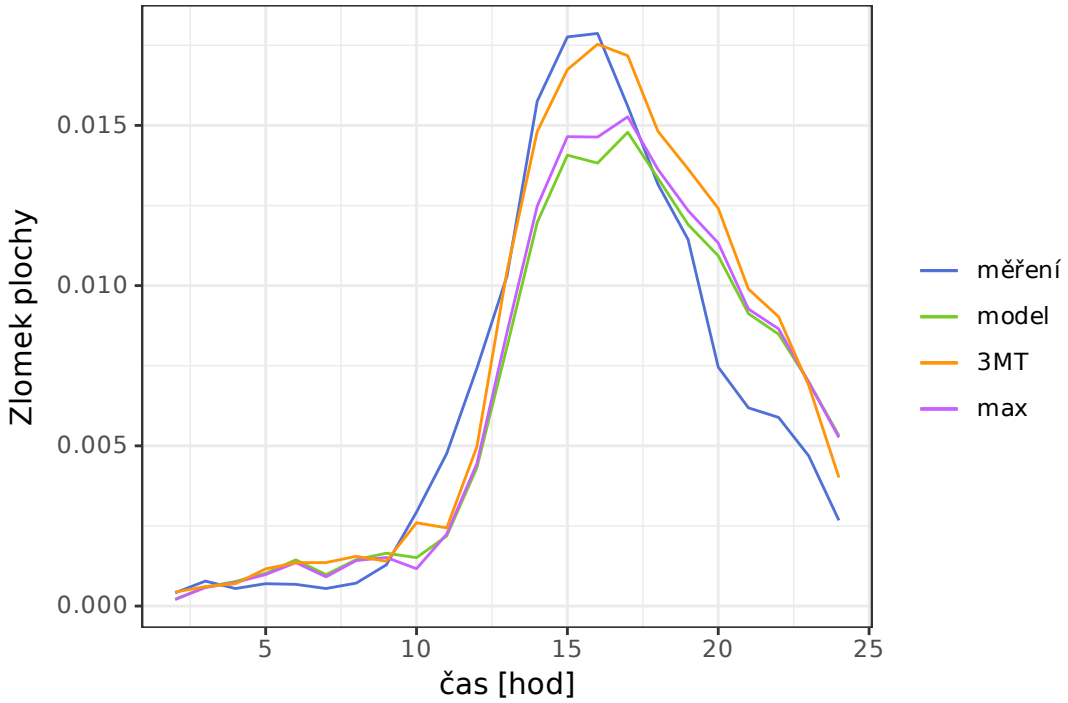
Obrázek 4.7: Denní chod maximální bleskové aktivity. Průměr ze všech simulací z analýzy v 00 UTC.



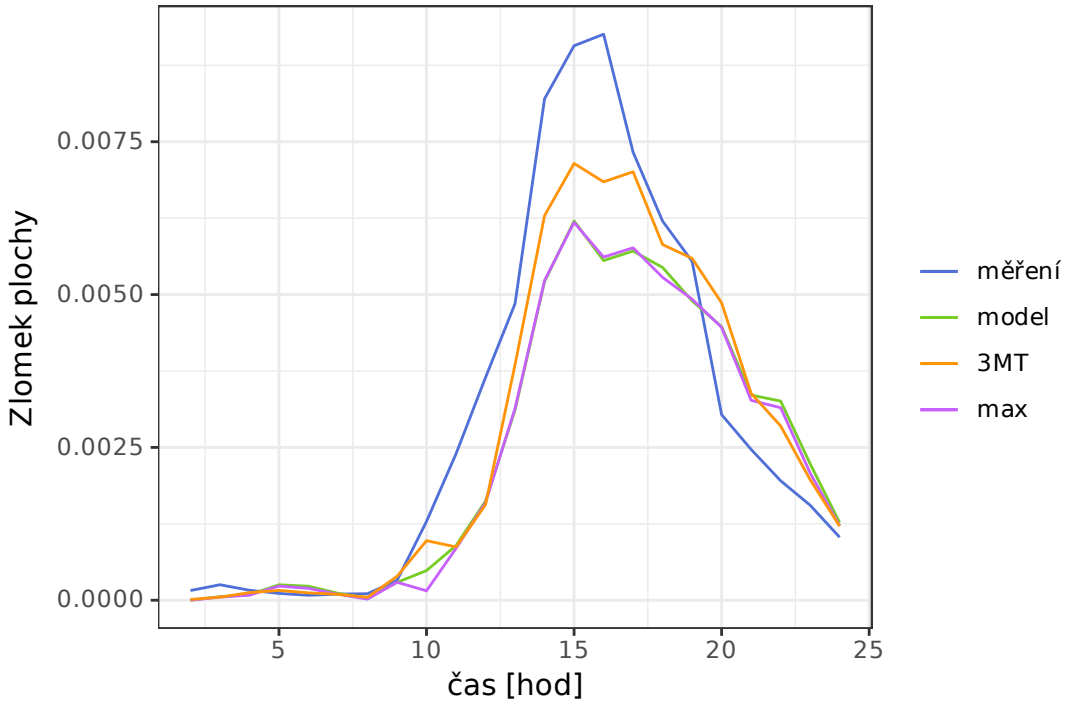
Obrázek 4.8: Hodinová kumulace hustoty bleskových výbojů končící dne 7. 6. v 15 UTC. Nahoře měření, dole model s využitím w_u.



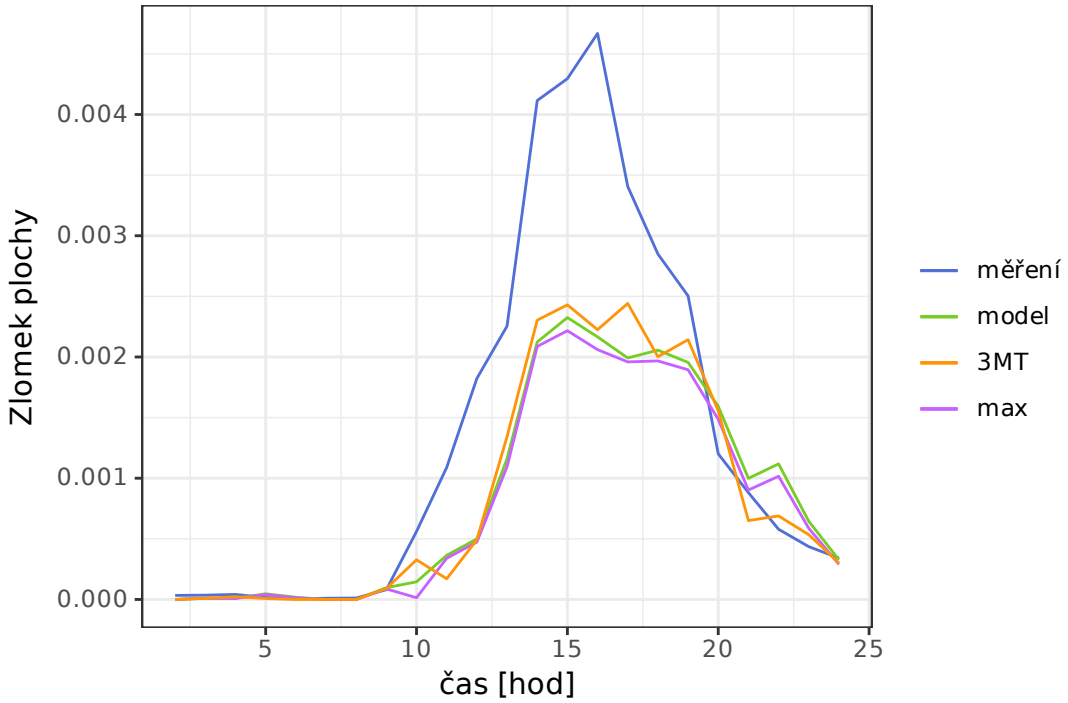
Obrázek 4.9: Denní chod relativní velikosti plochy s hustotou bleskové aktivity vyšší než $10^{-4}\,\mathrm{km}^{-2}\cdot\mathrm{s}^{-1}$. Průměr ze všech simulací z analýzy v 00 UTC.



Obrázek 4.10: Denní chod relativní velikosti plochy s hustotou bleskové aktivity vyšší než $2 \cdot 10^{-4}$ $\mathrm{km}^{-2}\cdot\mathrm{s}^{-1}$. Průměr ze všech simulací z analýzy v 00 UTC.



Obrázek 4.11: Denní chod relativní velikosti plochy s hustotou bleskové aktivity vyšší než $5 \cdot 10^{-4}$ km^{-2}·s^{-1}. Průměr ze všech simulací z analýzy v 00 UTC.



Obrázek 4.12: Denní chod relativní velikosti plochy s hustotou bleskové aktivity vyšší než 10^{-3} km^{-2}·s^{-1}. Průměr ze všech simulací z analýzy v 00 UTC.

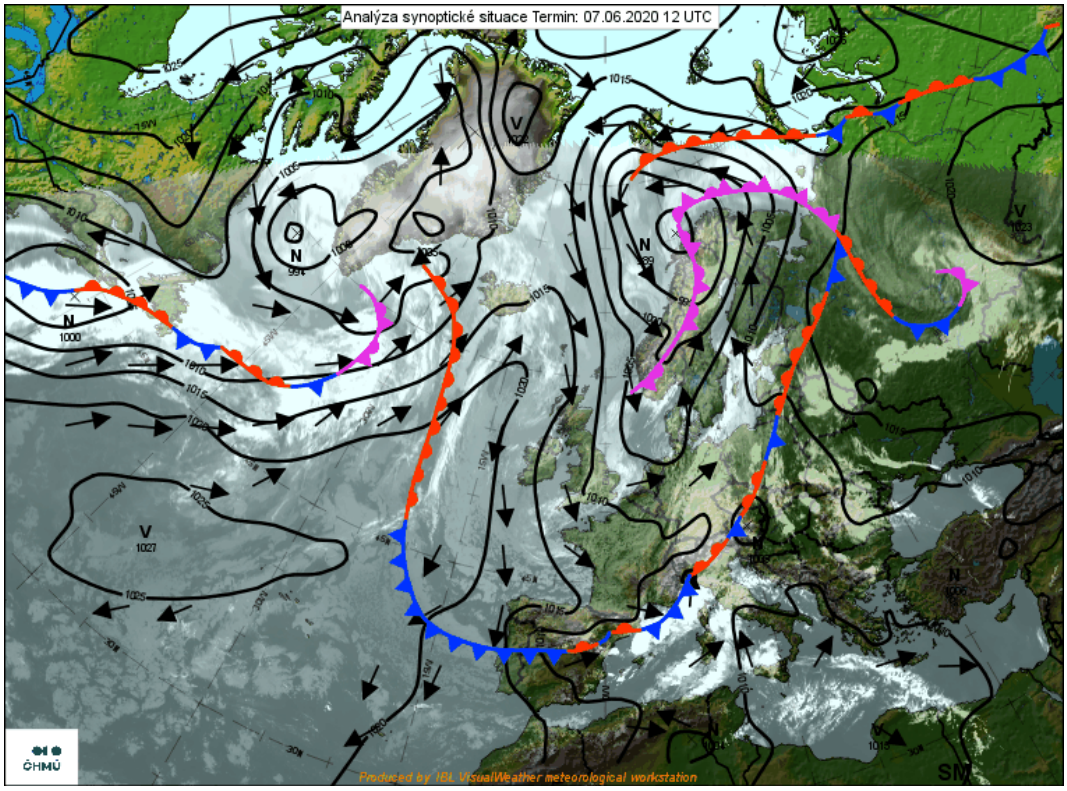
5. Analýza modelovaných případů

Nyní se budeme věnovat popisu jednotlivých modelovaných případů. Pro porovnání měřených a modelovaných dat budou využívány kumulace hustot bleskových výbojů za tři hodiny, aby byla co nejvíce dodržena konzistence s výstupy z modelu tak, jak jsou na předpovědních mapách prezentovány. Tato data jsou srovnána s naměřenými daty z detekční sítě LINET na mapách vykreslených pomocí Generic Mapping Tools (Wessel a kol. (2013)).

Bude vyhodnoceno celkem šest případů výrazné bouřkové aktivity. Tři z nich se vyskytly v nevýrazném tlakovém poli, přičemž odpoledne se ve dvou z nich zformovala čára instability nad Českou republikou. Zbylé tři případy souvisely s přechodem atmosférické fronty. V jednom případě přecházela přes Českou republiku studená fronta od západu, dvakrát se jednalo o zvlněnou studenou frontu bez výraznějšího pohybu ležící se nad územím České republiky.

5.1 Situace 7. 6. 2020

Dne 7. 6. 2020 bylo počasí nad Českou republikou ovlivňováno zvlněnou studenou frontou, jak můžeme vidět na synoptické situaci z 12 UTC na obrázku 5.1. Tato fronta se nad Českou republikou během dne výrazně nepohybovala. Na této frontě se tvořily četné konvektivní bouře doprovázené kroupami o průměru až 2 cm (Amatérská meteorologická společnost (2021a)) a poměrně výraznou bleskovou aktivitou, jak vidíme v tabulce 5.1, kde jsou uvedeny počty jednotlivých

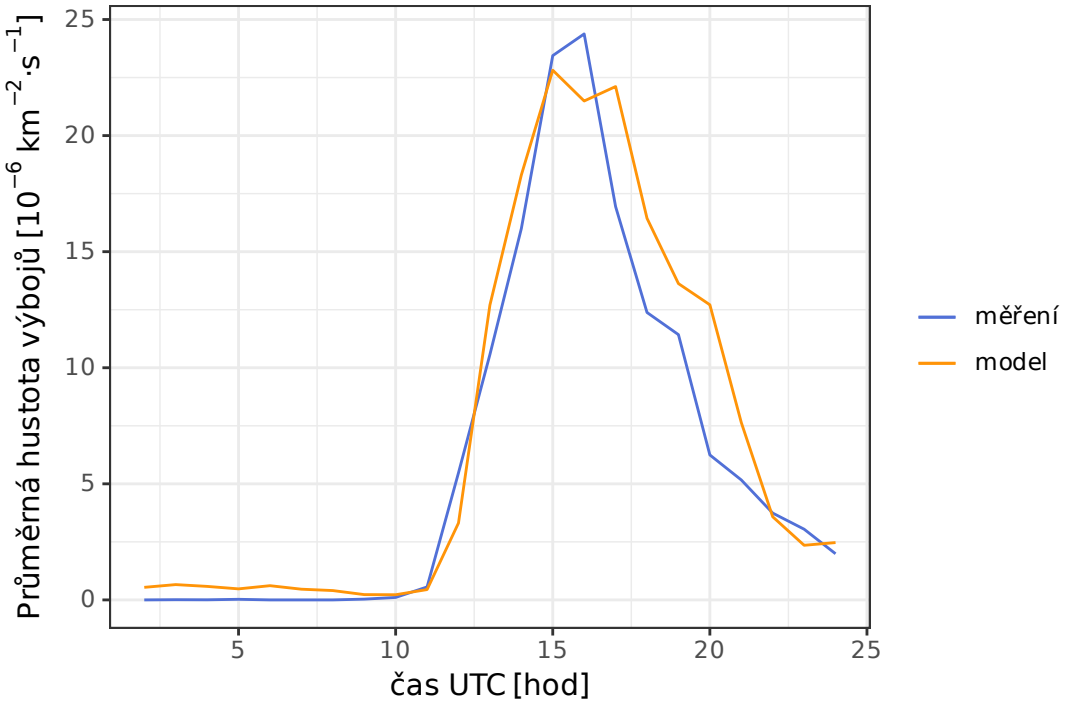


Obrázek 5.1: Synoptická situace ze dne 7. 6. 2020 ve 12 UTC (ČHMÚ (2020))

Tabulka 5.1: Počty jednotlivých druhů výbojů 7. 6. 2020 zaznamenaných systémem LINET.

Druh výboje	**počet**
CG+	57 695
CG-	117 747
CC	58 850

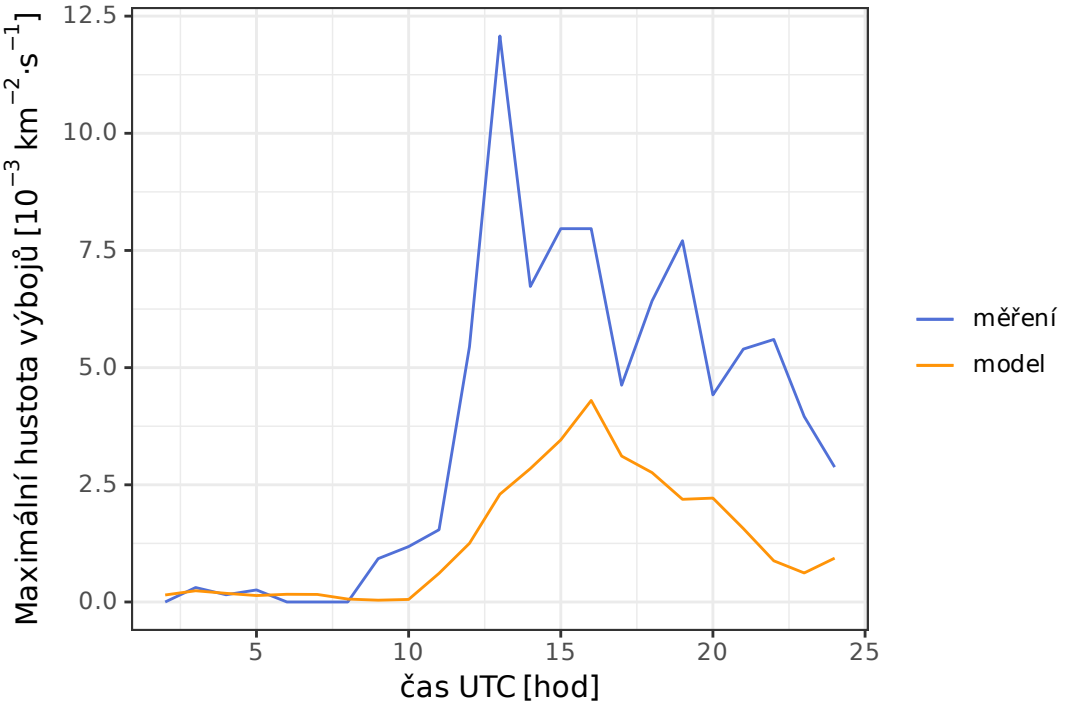
druhů zaznamenaných výbojů.



Obrázek 5.2: Denní chod průměrné hustoty bleskových výbojů za sekundu v rámci celé oblasti pokryté měřenými daty dne 7. 6. 2020.

Podíváme-li se na denní chod hustoty bleskových výbojů na obrázku 5.2, vidíme, že modelovaná data jsou takřka shodná s měřenými. Velmi podobný je jak čas nástupu výrazné bleskové aktivity, který je simulovaný naprosto přesně, tak její konec, který je lehce opožděný, ale rozdíl oproti měřením není velký. Maximální hodnoty hustoty bleskových výbojů, zobrazené na obrázku 5.3, jsou dle očekávání značně podhodnocené. Modelovaný denní chod je však podobný tomu měřenému, přestože můžeme pozorovat větší proměnlivost maxim hodinové kumulace hustoty bleskových výbojů v případě měření. Maxima simulovaná modelem mají plošší časový průběh.

Na obrázku 5.4, kde jsou zobrazeny kumulované hodnoty hustoty bleskových výbojů mezi 12 UTC a 15 UTC, vidíme počátek výraznější bleskové aktivity.



Obrázek 5.3: Denní chod maximální hustoty bleskových výbojů za sekundu v rámci celé oblasti pokryté měřenými daty dne 7. 6. 2020.

Poloha oblastí s vyšší bleskovou aktivitou v rámci modelu je velmi podobná té naměřené. Nejvyšší hodnoty hustoty bleskové aktivity jsou v rámci modelu lehce podhodnocené, čehož si můžeme všimnout zejména u intenzivní bouřky severně od Osoblažského výběžku, severně od Jeseníků. Zatímco model předpovídá maximální počty bleskových výbojů na 1 km^2 v rozmezí od 7 výbojů/km^2 do 18 výbojů/km^2, maximální naměřené počty bleskových výbojů jsou zhruba třikrát vyšší. Vidíme tedy, že inicializace konvekce nad Českou republikou v rámci modelu nastává o něco později než tomu bylo skutečně. Naopak bouřky nad Slovenskem a Rakouskem jsou předpovězeny velice přesně, a to jak plošně (nad Slovenskem je tato plocha trochu nadhodnocená), tak jsou přesněji určeny i intenzitou. Díky tomu pak je chod průměrné hustoty bleskových výbojů velmi podobný měřením.

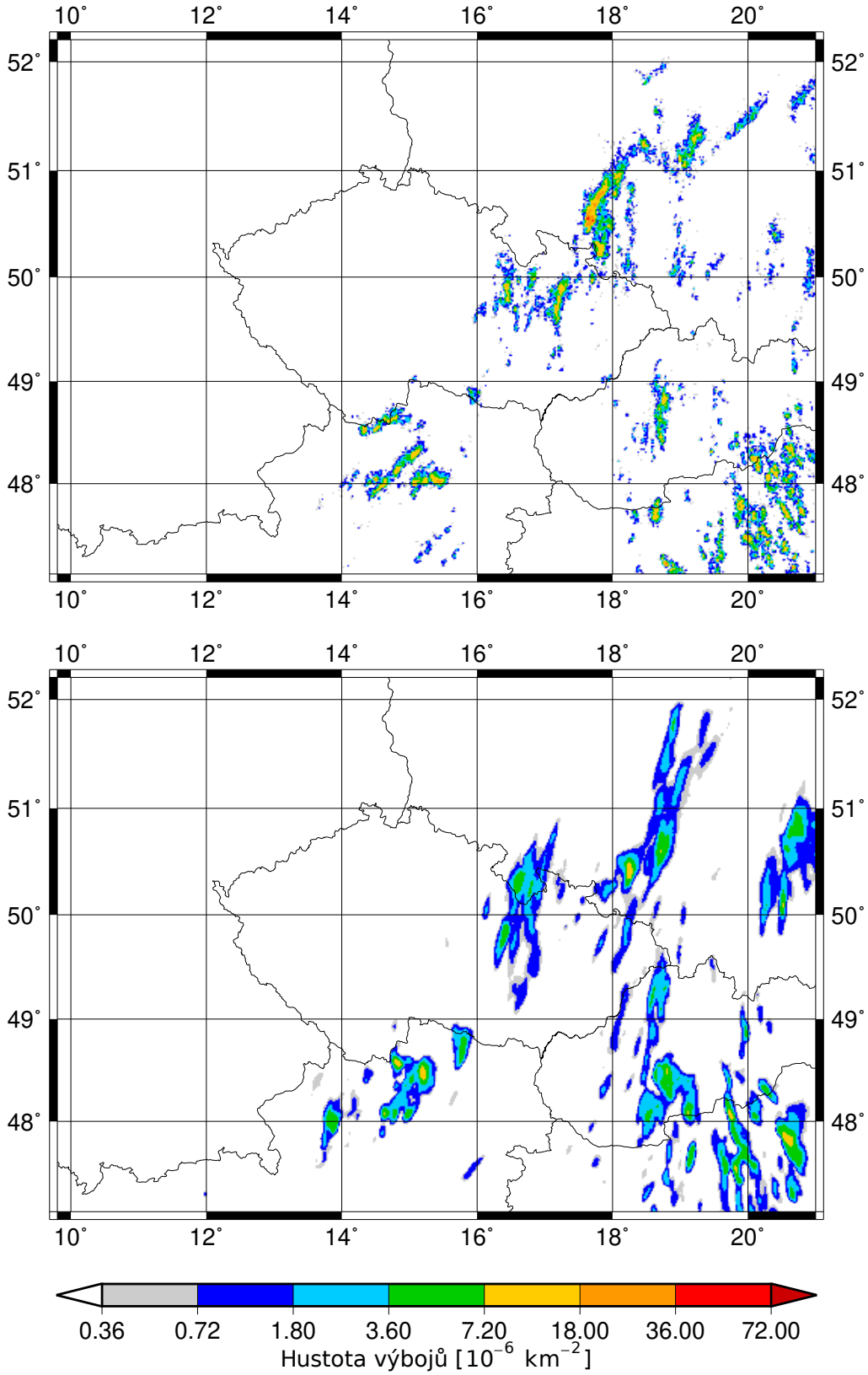
Na obrázku 5.5 pozorujeme naměřenou a modelovanou hustotu bleskových výbojů kumulovanou mezi 15 UTC a 18 UTC. Vidíme, že nad Českou republikou došlo k mnohem lepšímu vyrovnání maximální modelované hustoty bleskových výbojů s měřeními. Plocha pokrytá žlutou barvou značící hustotu bleskových výbojů překračující 7,2 výboje/km^2 je podobná pro měřená i modelovaná data. Zatímco na měřených datech vidíme velmi dobře uspořádanou linii bouřek vyskytující se mezi severním Rakouskem a Slezskem, model tuto linii přímo nemodeluje, předpovídá spíše tvorbu dvou oddělených center s vyšší bleskovou aktivitou.

V rámci tohoto případu navíc porovnáme předpověď srážek a předpověď hustoty bleskových výbojů. Na obrázku 5.6 je zobrazena tříhodinová kumulace srážek mezi 15 UTC a 18 UTC. Porovnáme-li tento obrázek s kumulací hustoty výbojů na obrázku 5.5, vidíme, že oblasti s vyšším úhrnem srážek velmi dobře korespondují s oblastmi s vyšší bleskovou aktivitou. K určitým rozdílům zde

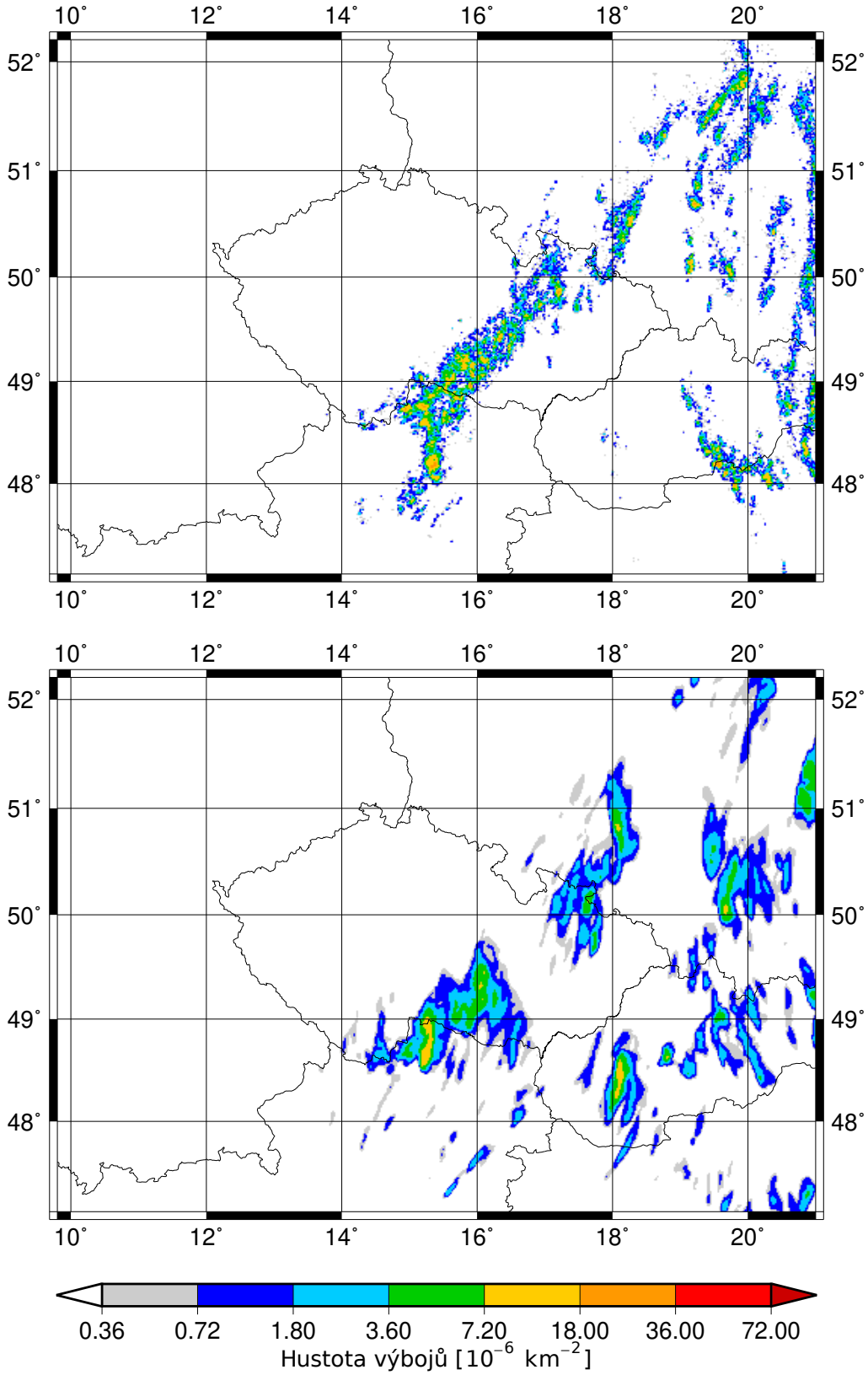
však dochází. Na předpovědi bleskových výbojů je o něco lépe vystižen výstupný konvektivní proud. Také si můžeme všimnout, že zatímco úhrny srážek jsou v oblasti Jeseníků a severního Rakouska srovnatelné, bleskových výbojů je více v severním Rakousku. To nejspíše souvisí s vlivem orografie na postup slabší konvektivní bouře v blízkosti Jeseníků, což dokládá i bouře v okolí 51. rovnoběžky a 18. poledníku, kde je předpovídán nižší úhrn srážek ale vyšší hustota bleskových výbojů. V oblasti Třebíče si pak můžeme všimnout lehkého posunu mezi oblastí nejvyšších srážkových úhrnů a nejvyšších hustot výbojů.

O tři hodiny později, v období mezi 18 UTC a 21 UTC na obrázku 5.5, vidíme, že plocha pokrytá bleskovou aktivitou je velmi podobná pro měřená i modelovaná data. Dochází jen k lehkému posunu modelovaných dat na západ oproti měřením. To je spojeno s lehce odlišnou polohou frontálního rozhraní v rámci modelu a ve skutečnosti. Nejvyšší hodnoty hustoty bleskových výbojů jsou lehce podhodnocené, rozdíl ale není velký. Plocha pokrytá zelenou barvou je však srovnatelná, v rámci modelu je dokonce o něco větší, což může souviset s rozdílným pohybem frontálního rozhraní. Celkově je však nárůst hustoty výbojů plošší v rámci modelu než v rámci měření.

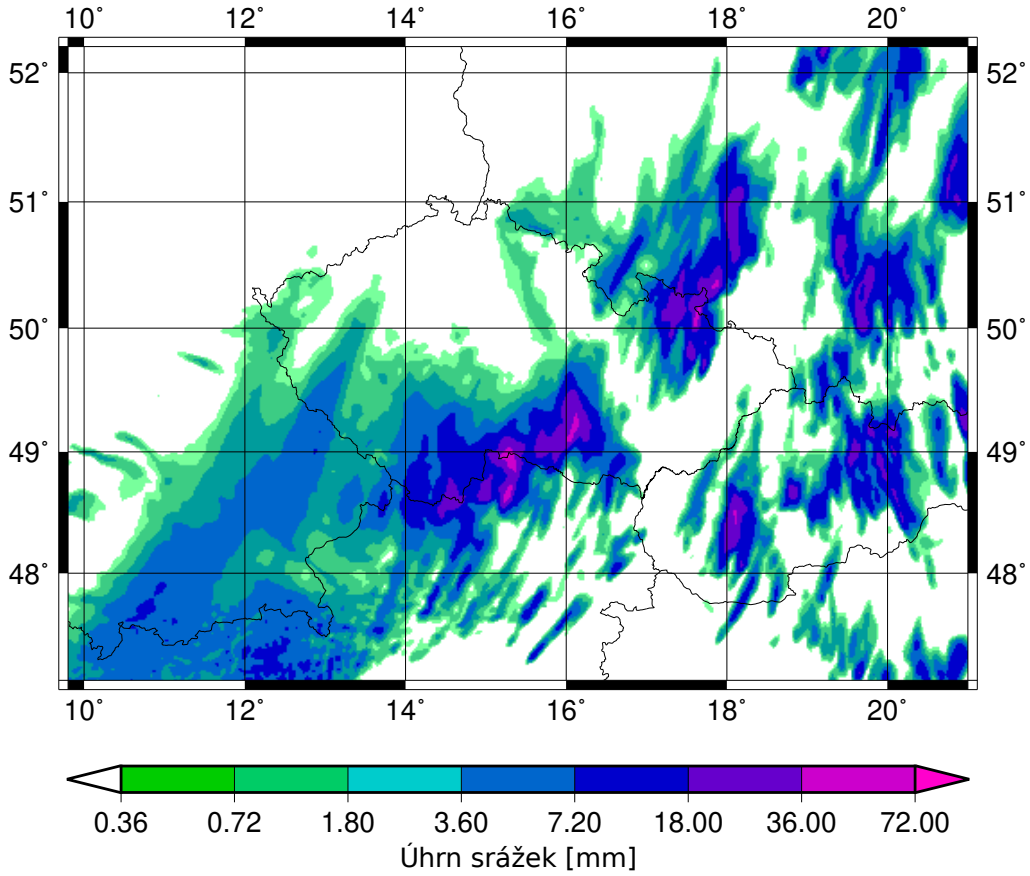
Na obrázku 5.8 pak vidíme kumulované hodnoty hustoty bleskových výbojů mezi 7. 6. 00 UTC a 8. 6. 00 UTC. I tento obrázek potvrzuje, že se tento den předpověď modelu při integraci z analýzy v 00 UTC velice vydařila. Modelovaná oblast s výskytem blesků v podstatě přesně kopíruje oblast měření. Poměrně dobře koresponduje i aktivita v rámci modelovaných a naměřených dat, jen v Rakousku byla pozorována výrazně vyšší hustota bleskových výbojů než je modelovaná hodnota.



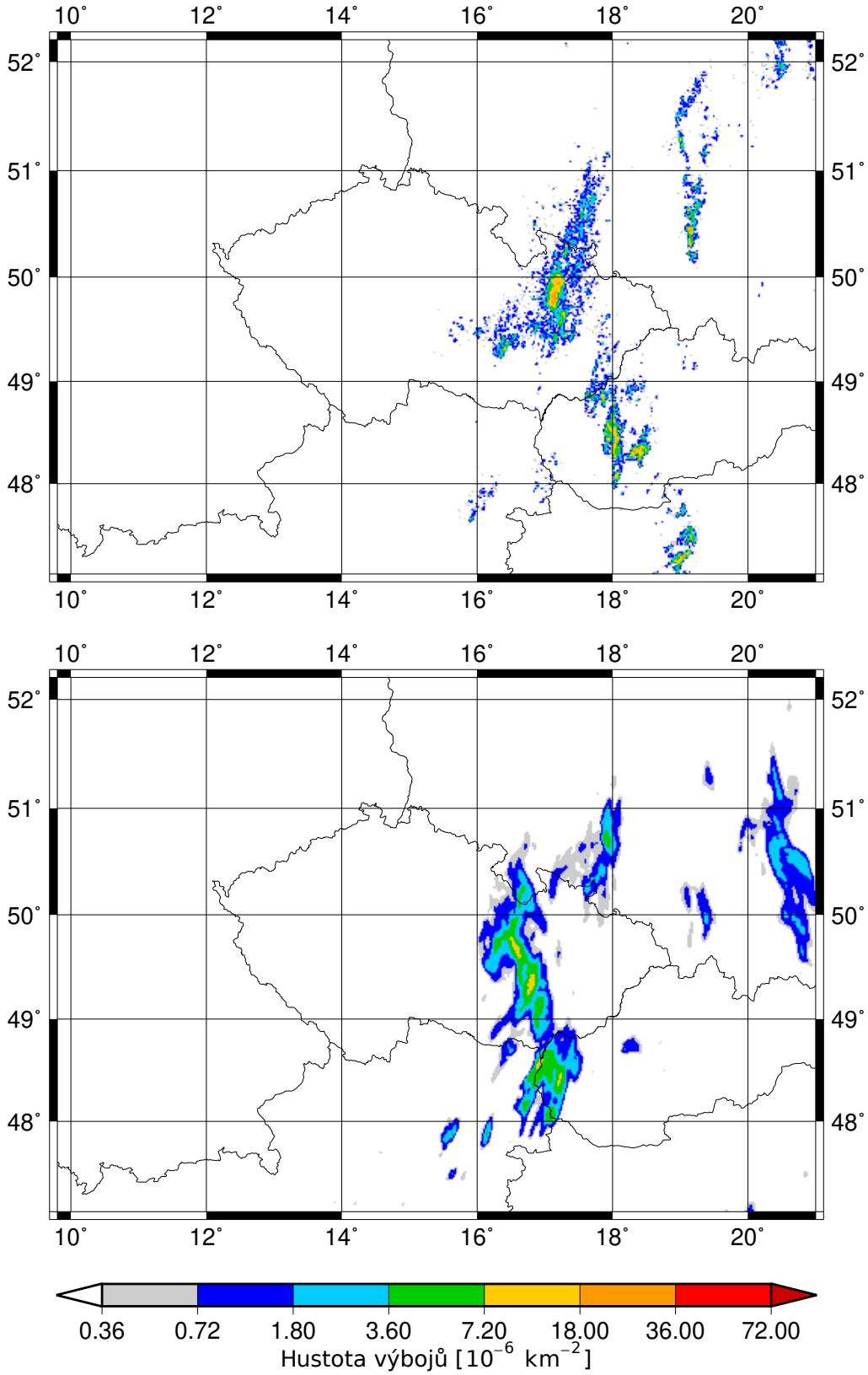
Obrázek 5.4: Tříhodinová kumulace hustoty bleskových výbojů končící dne 7.6. v 15 UTC. Nahoře měření, dole model.



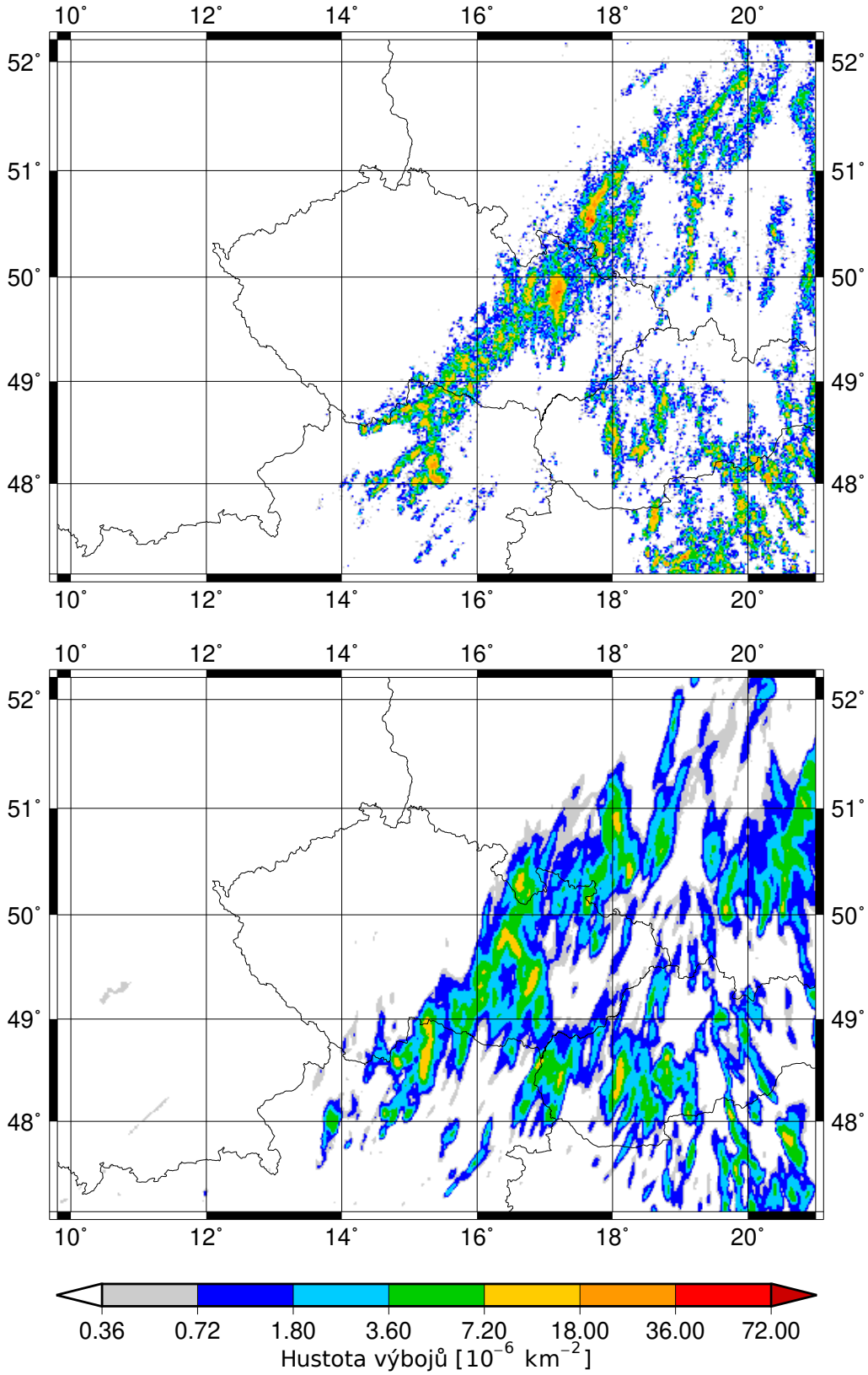
Obrázek 5.5: Tříhodinová kumulace hustoty bleskových výbojů končící dne 7.6. v 18 UTC. Nahoře měření, dole model.



Obrázek 5.6: Tříhodinová kumulace srážkových úhrnů končící 7.6. v 18 UTC.



Obrázek 5.7: Tříhodinová kumulace hustoty bleskových výbojů končící dne 7.6. v 21 UTC. Nahoře měření, dole model.



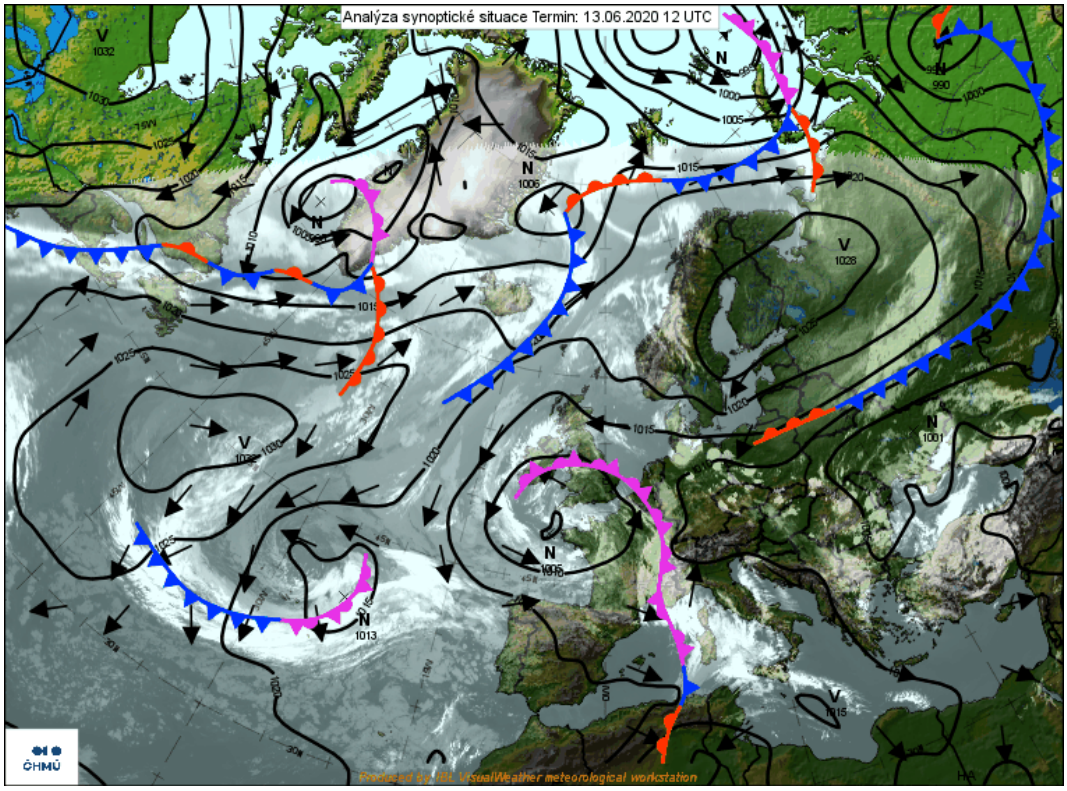
Obrázek 5.8: Celodenní kumulace hustoty bleskových výbojů ze dne 7.6. Nahoře měření, dole model.

5.2 Situace 13. 6. 2020

Na přízemní synoptické mapě dne 13. 6. 2020 ve 12 UTC vidíme, že se Česká republika nacházela v oblasti nevýrazného tlakového pole. Zároveň k nám od jihovýchodu proudil vlhký vzduch s instabilním vertikálním zvrstvením (Amatérská meteorologická společnost (2021b)). Tento den byla blesková aktivita nejvyšší v rámci vybraných modelových případů, jak se můžeme přesvědčit v tabulce 5.2.

Na obrázku 5.10 vidíme, že nástup bleskové aktivity byl předpovězen s lehkým, zhruba dvouhodinovým zpožděním. Konec bleskové aktivity pak byl předpovězen přesněji s přibližně hodinovým zpožděním. Modelovaná amplituda průměrné hustoty výbojů je nižší než ukazují měření. To může souviset i s pozdějším příchodem výraznější modelované bleskové aktivity, protože v rámci měření vidíme její velmi prudký vzestup hned po jejím počátku. Maximální hodnoty modelované hustoty bleskových výbojů na obrázku 5.11 pak ukazují podobný denní chod jako měřené hodnoty, poměrně dobře je vyjádřena i jejich amplituda, je jen o trochu nižší.

Na obrázku 5.12 pak pozorujeme měřenou a modelovanou hustotu bleskových výbojů kumulovanou mezi 12 UTC a 15 UTC. Pro západní Čechy bylo předpovídáno více bouřek s nižší bleskovou aktivitou, zatímco měření ukazují vyšší aktivitu těchto bouřek, zejména pak v případě bouřky, která se vyskytla blízko Prahy. Jinde nad Českou republikou se bouřky vyskytovaly spíše výjimečně s výjimkou Libereckého kraje, kde se vyskytovala bouřková činnost, která zde nebyla modelem předpovězena, a to ani v poli srážek. Proto není překvapením, že zde nebyla předpovězena ani blesková aktivita. Naopak bouřková činnost nad Polskem a Německem je předpovězena poměrně dobře, byť lehce plochou podhodnocená,



Obrázek 5.9: Synoptická situace ze dne 13. 6. 2020 ve 12 UTC (ČHMÚ (2020))

Tabulka 5.2: Počty jednotlivých druhů výbojů 13.6. 2020 zaznamenaných systémem LINET.

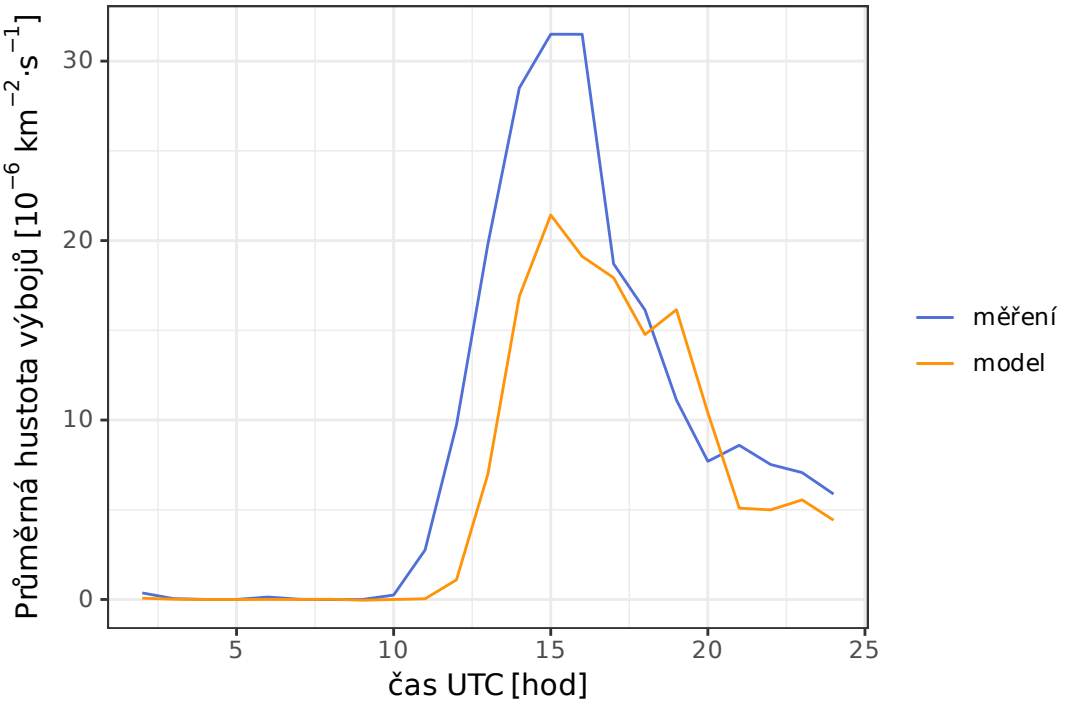
Druh výboje	**počet**
CG+	125 119
CG-	153 691
CC	66 599

tak intenzita je vystižena mnohem lépe. V oblasti západního Slovenska vidíme, že vznikla rozlehlejší výrazná blesková aktivita. Model ze předpovídal spíše výskyt mnoha izolovaných konvektivních buněk, tedy možná intenzivní blesková činnost zde předpovězena byla, zůstává ale plošně podhodnocená.

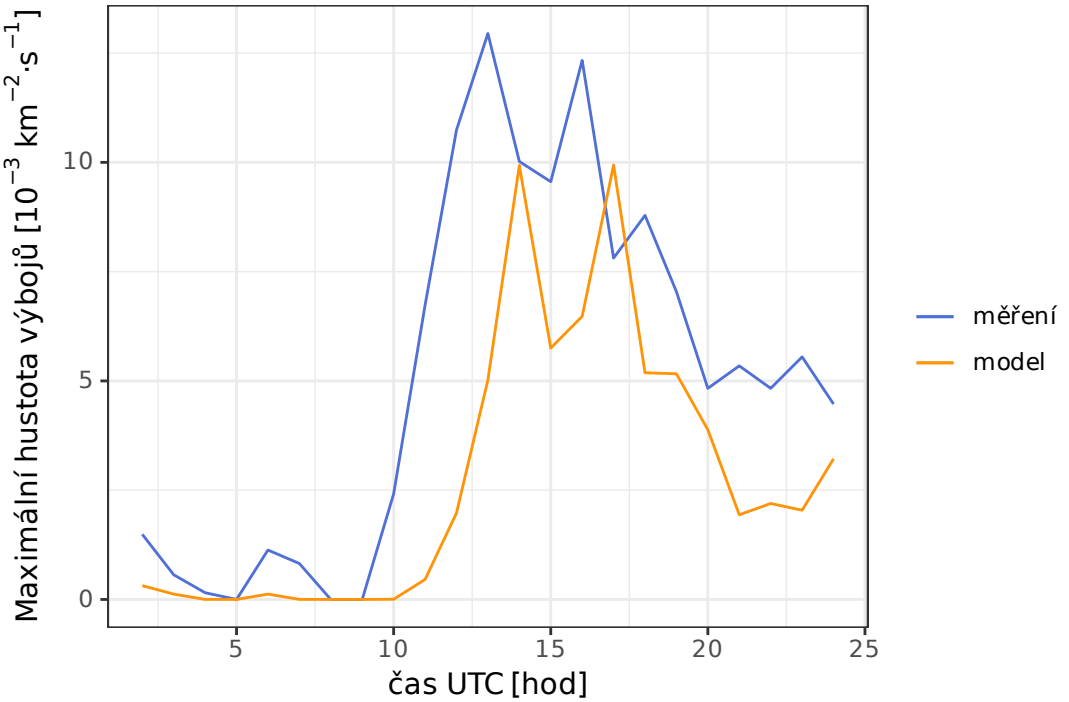
Obrázek 5.13 zobrazuje kumulovanou hustotu bleskových výbojů nad Českou republikou mezi 15 UTC a 18 UTC. Měření ukazují vznik poměrně dobře uspořádané linie bouřek nad Českou republikou, jejíž hustota bleskových výbojů na několika místech přesahuje hodnotu 18 výbojů/km^2, výjimečně i více než 36 výbojů/km^2. Model ukazuje několik izolovaných konvektivních bouří nad Českou republikou. Co se týče předpovídané intenzity bleskových výbojů, vidíme, že na několika místech je hustota bleskových výbojů vyšší než 18 výbojů/km^2. Zatímco prostorové rozložení nebylo předpovězeno zcela přesně, tak intenzivní blesková aktivita byla předpovězena mnohem lépe, zejména na jižní Moravě. Tam předpověď upozorňuje na možnou výraznou bleskovou aktivitu v rámci zde vzniklých konvektivních bouří. Lépe bylo prostorové rozložení hustoty výbojů předpovězeno nad Polskem a Německem. I zde je velmi dobře předpovězena intenzita bleskové aktivity, pouze s výjimkou německo-polských hranic na severu naší oblasti, kde je aktivita podhodnocená.

Podíváme-li se na kumulovanou hustotu výbojů mezi 18 UTC a 21 UTC na obrázku 5.14, vidíme, že zatímco blesková aktivita ustupuje, model dále předpovídá výraznou bleskovou aktivitu, která je dobře strukturovaná v linii nad Čechami. Porovnáme-li modelová data na obrázku 5.13 s měřeními kumulované hustoty výbojů o tři hodiny dříve na obrázku 5.13, zjistíme, že modelovaná data jsou za měřeními lehce opožděna, intenzita konvekce se ale příliš neliší. Model správně předpověděl vznik této linie bouřek, jen došlo k určitému zpoždění oproti skutečnosti.

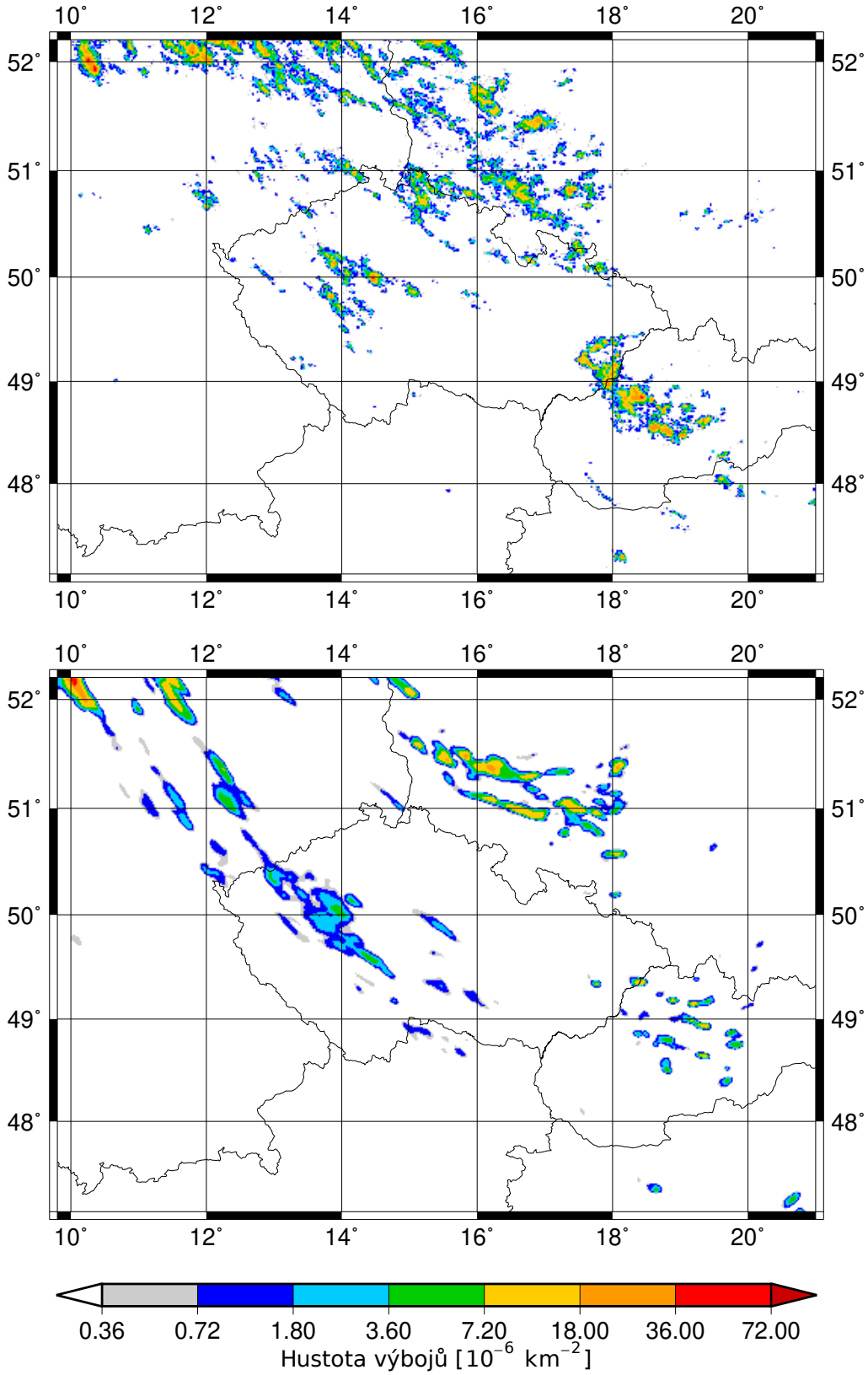
Na obrázku 5.15 pak vidíme porovnání naměřené a modelované kumulované bleskové aktivity mezi 13. 6. 00 UTC a 14. 6. 00 UTC. Model v tomto případě podhodnotil výskyt blesků v oblasti Moravy. Nicméně pás bouřek táhnoucí na napříč Českou republikou byl velmi dobře předpovězený, a to jak plošně, tak amplitudou, byť v západních Čechách byla amplituda slabě podhodnocena. Vznik tohoto pásu byl jen předpovězený o něco později než ukazují měření, jak jsme viděli dříve. Velmi dobře předpovězená je také oblast na úplném severu zobrazené domény s velmi vysokou bleskovou aktivitou. Naopak trochu jinak vypadá oblast jižního Německa, kde je tvar předpovídané oblasti s vysokou bleskovou aktivitou jiný než ukazují měření. Předpovídaná intenzita je však velmi podobná.



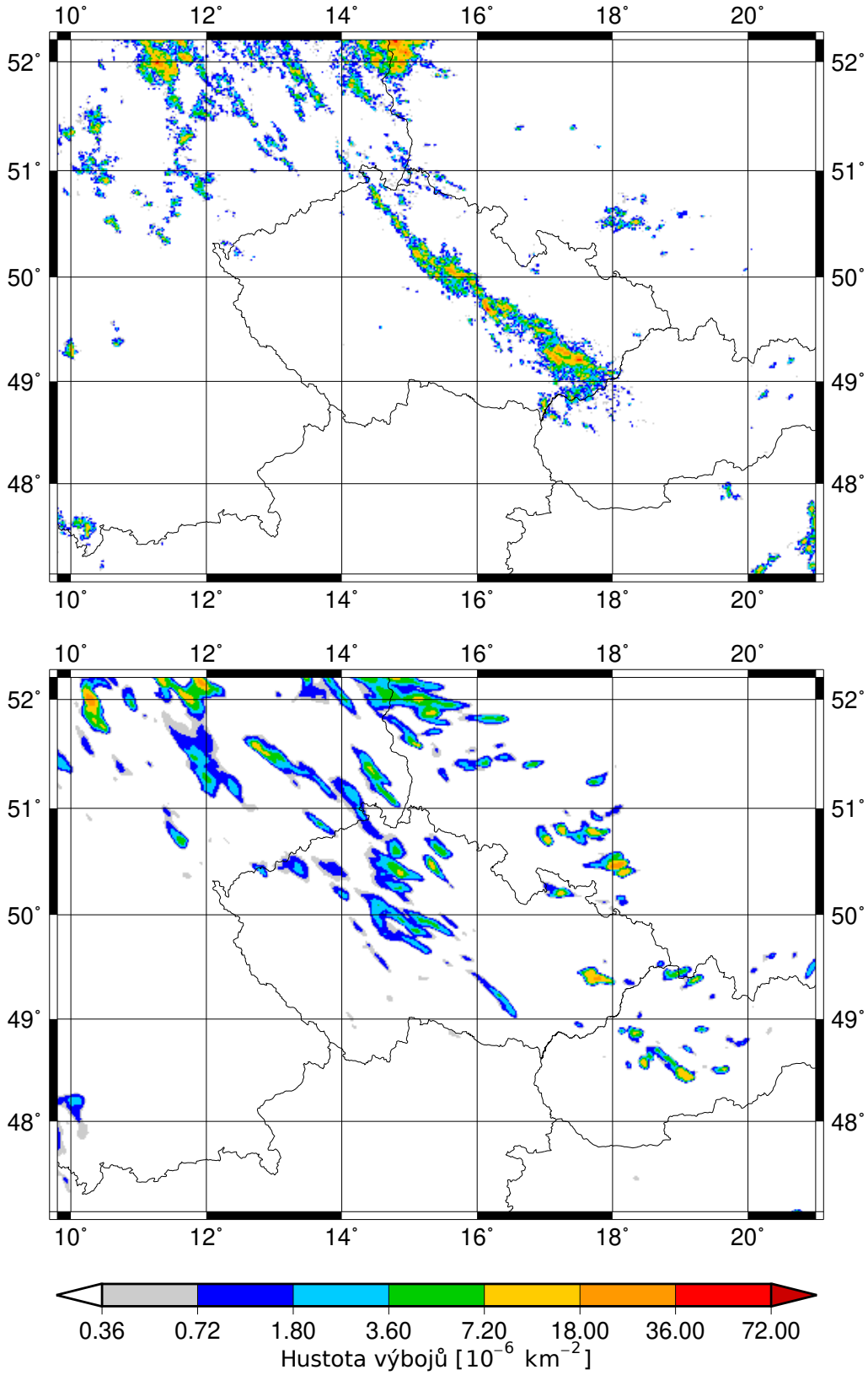
Obrázek 5.10: Denní chod průměrné hustoty bleskových výbojů za sekundu v rámci celé oblasti pokryté měřenými daty dne 13. 6. 2020.



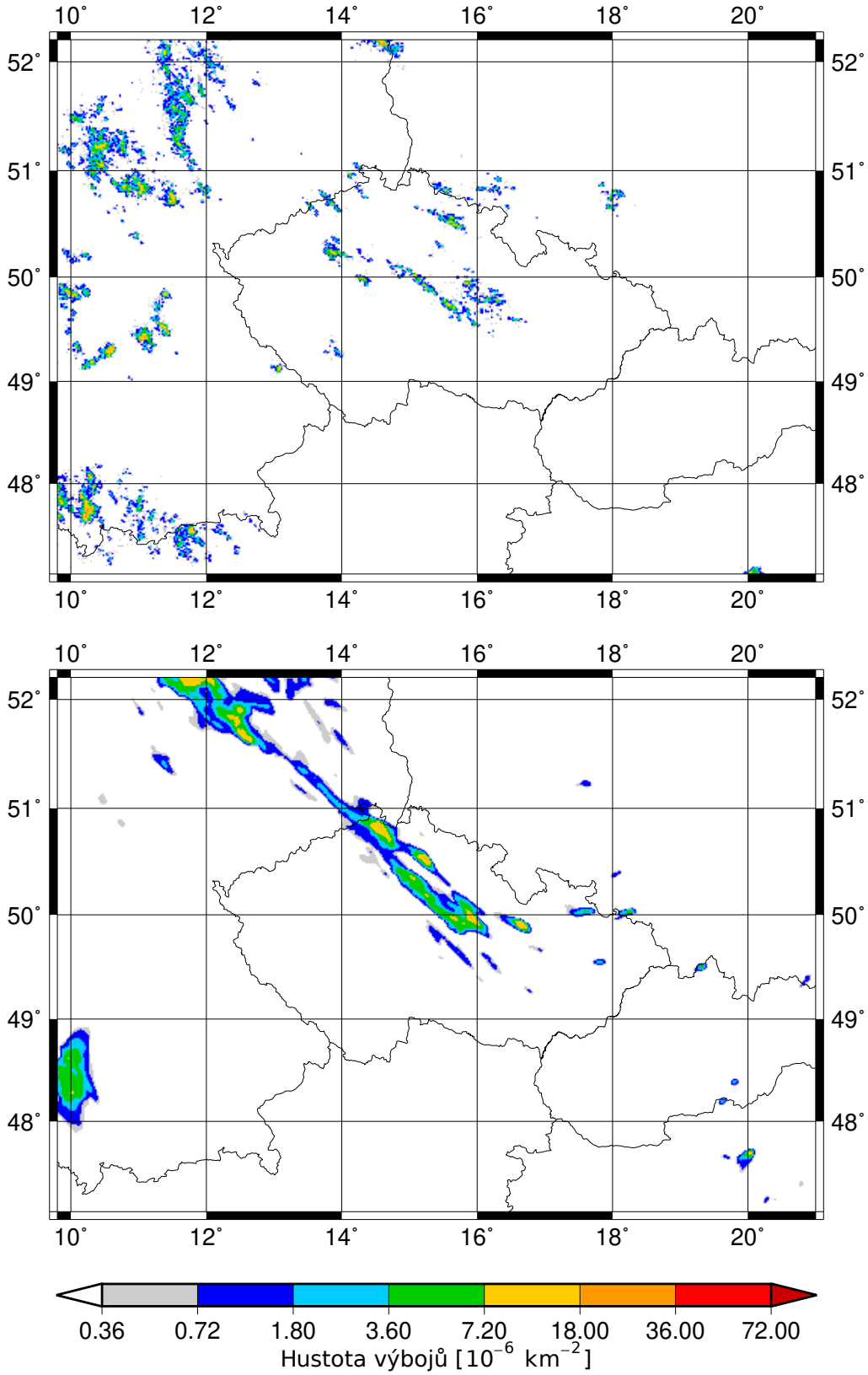
Obrázek 5.11: Denní chod maximální hustoty bleskových výbojů za sekundu v rámci celé oblasti pokryté měřenými daty dne 13. 6. 2020.



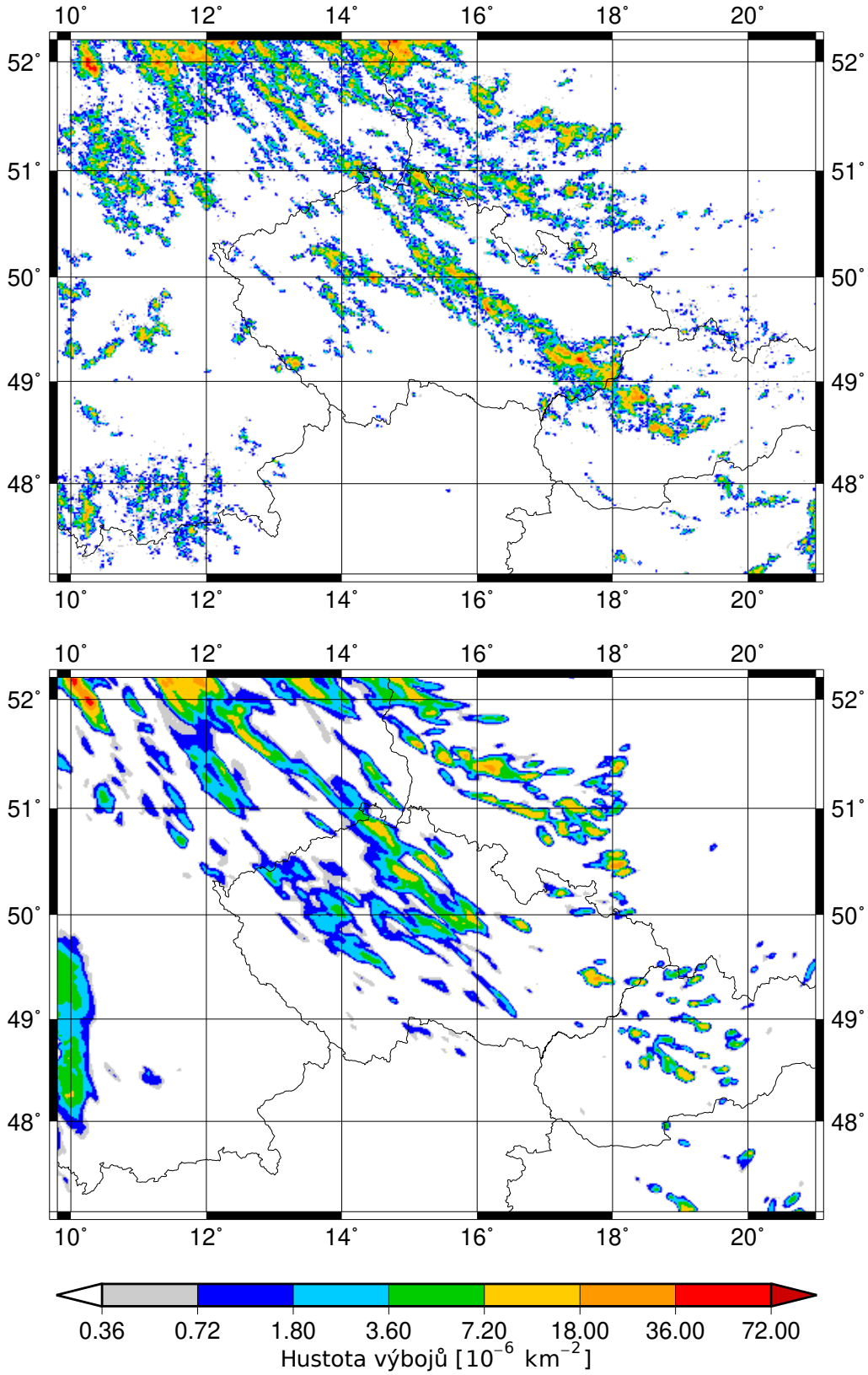
Obrázek 5.12: Tříhodinová kumulace hustoty bleskových výbojů končící 13.6. v 15 UTC. Nahoře měření, dole model.



Obrázek 5.13: Tříhodinová kumulace hustoty bleskových výbojů končící 13. 6. v 18 UTC. Nahoře měření, dole model.



Obrázek 5.14: Tříhodinová kumulace hustoty bleskových výbojů končící 13. 6. ve 21 UTC. Nahoře měření, dole model.



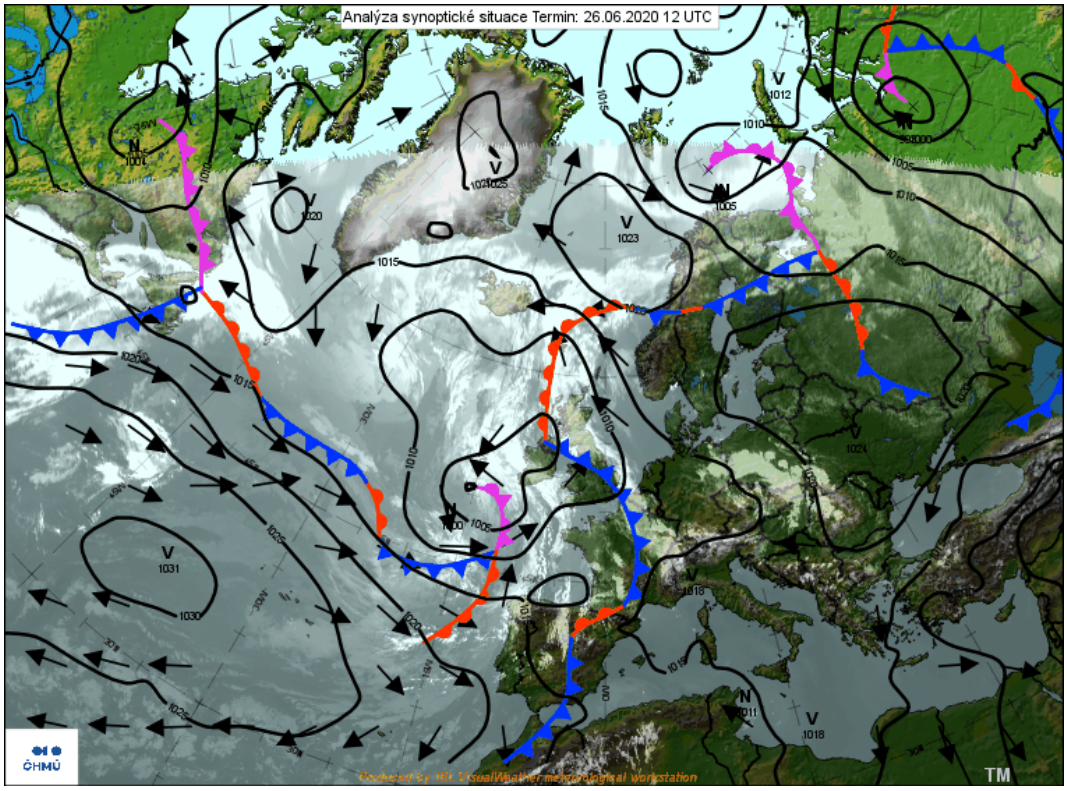
Obrázek 5.15: Celodenní kumulace hustoty bleskových výbojů ze dne 13.6. Nahoře měření, dole model.

5.3 Situace 26. 6. 2020

Podobně jako 13. 6. i tento den ležela Česká republika v nevýrazném tlakovém poli, jak si můžeme povšimnout na obrázku 5.16. Na přízemní synoptické situaci není vidět výšková tlaková níže, která přispívala v výrazně instabilnímu zvrstvení atmosféry a která je patrná na mapě relativní topografie mezi izobarickými hladinami 500 a 1000 hPa z analýzy modelu GFS na obrázku 5.17. V tabulce 5.3 vidíme, že i tento den byla blesková aktivita opravdu výrazná.

Na obrázku 5.18 vidíme denní chod průměrné hustoty bleskových výbojů. Vidíme, že již v noci a ráno se vyskytla slabá blesková aktivita. Dále pozorujeme pozdější a pozvolnější příchod intenzivnější bleskové aktivity během dopoledne v rámci modelu než bylo pozorováno. Denní chod měřených hodnot je dvojitý, dochází k poklesu bleskové aktivity v brzkých odpoledních hodinách, aby se aktivita zase zvýšila kolem 19 UTC. Denní chod v rámci modelu je spíše jednoduchý, během odpoledne plošší. Odpoledne dochází k dočasnému nadhodnocování průměrné hustoty bleskových výbojů. Večer pak předpovídaná průměrná hustota výbojů splývá s tou měřenou. Na obrázku 5.19 pak vidíme denní chod maximální hustoty výbojů. Vidíme, že maximální hodnoty jsou odpoledne vystiženy mnohem přesněji než ostatní dny a odpovídají velice dobře měřením, byť zůstávají lehce podhodnocené. Naopak výrazná blesková aktivita spojená s dopoledními bouřkami byla předpovídána až s určitým zpožděním.

Na obrázku 5.20 pak vidíme kumulovanou hustotu bleskových výbojů mezi 09 UTC a 12 UTC. Z obrázku 5.18 se zdá, že byly modelované hodnoty hustoty bleskových výbojů výrazně nižší než měřené. Pohled na obrázek 5.20 tuto tezi potvrzuje porovnáním výstupu z modelu s měřeními. Dochází k podhodnocení



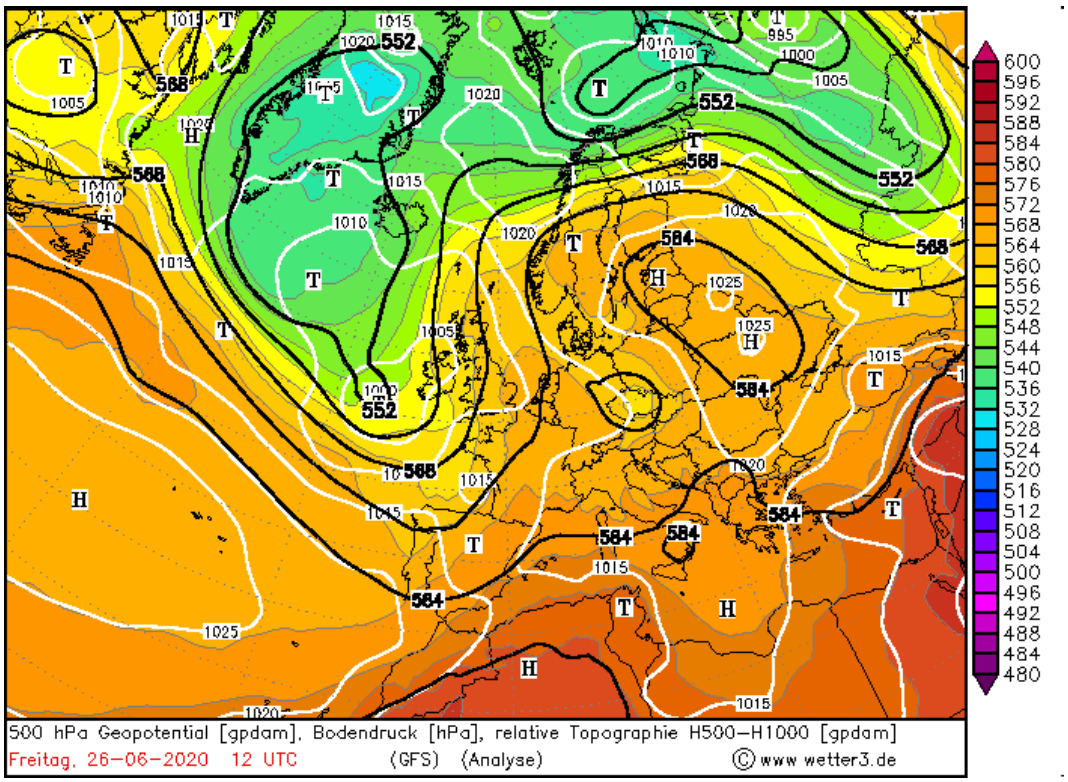
Obrázek 5.16: Synoptická situace ze dne 26. 6. 2020 ve 12 UTC (ČHMÚ (2020))

Tabulka 5.3: Počty jednotlivých druhů výbojů 26.6. 2020 zaznamenaných systémem LINET.

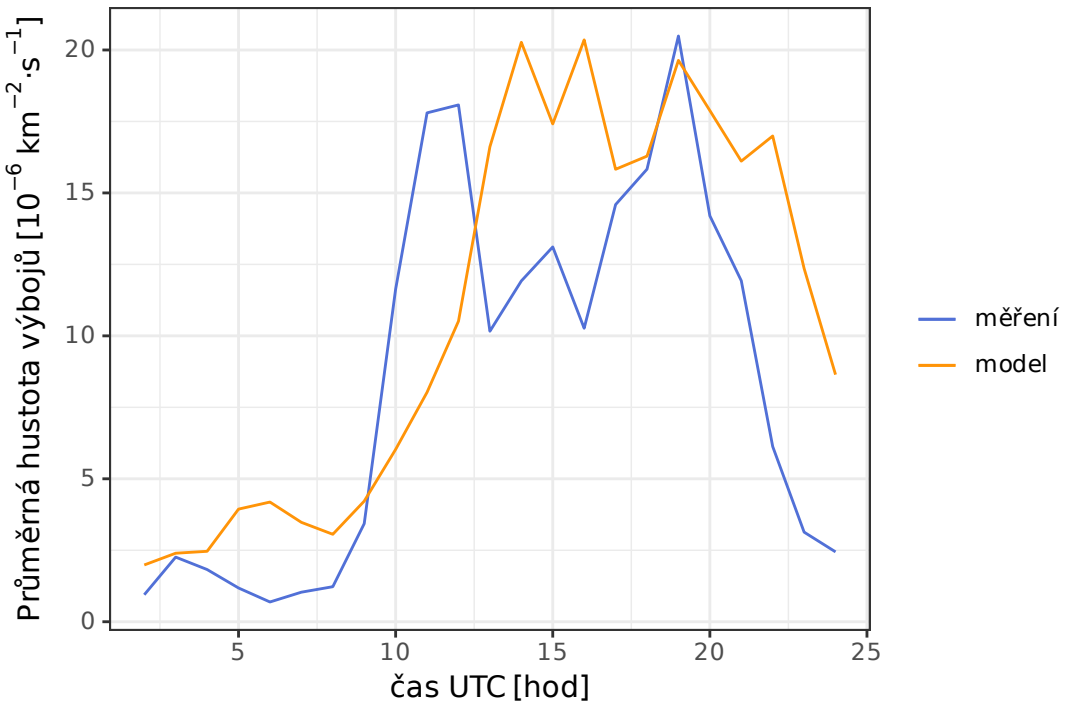
Druh výboje	**počet**
CG+	106 793
CG-	153 427
CC	61 695

výrazné bleskové aktivity nad Polskem i Slovenskem, rovněž v předpovědi chybí část oblasti blesků nad Polskem a nad Německem. Výstup z modelu však pokrývá výrazně větší oblast než je zobrazená, proto můžeme snadno zjistit, že podobně intenzivní bouřka byla modelována kousek za hranicí zobrazované oblasti. Za zmínku stojí velice přesně určený počátek bleskové aktivity nad Českou republikou.

Na obrázku 5.21 snadno nahlédneme, že zdrojem nadhodnocené bleskové aktivity v odpoledních hodinách je její nadhodnocení nad Polskem. Opět se zdá, že model předpovídal intenzivní bleskovou aktivitu o něco později, než se zde vyskytla. Naopak intenzita bouřek v severním Maďarsku a jižním Slovensku je předpovězena velmi přesně, jen se v rámci modelu vyskytuje severněji. Nad Českou republikou vidíme vznik prvních intenzivnějších bouřek, které jsou ale silně



Obrázek 5.17: Mapa relativní topografie mezi hladinami 500 a 1000 hPa ze dne 26. 6. 2020 ve 12 UTC z analýzy modelu GFS (Wetter 3 (2021))



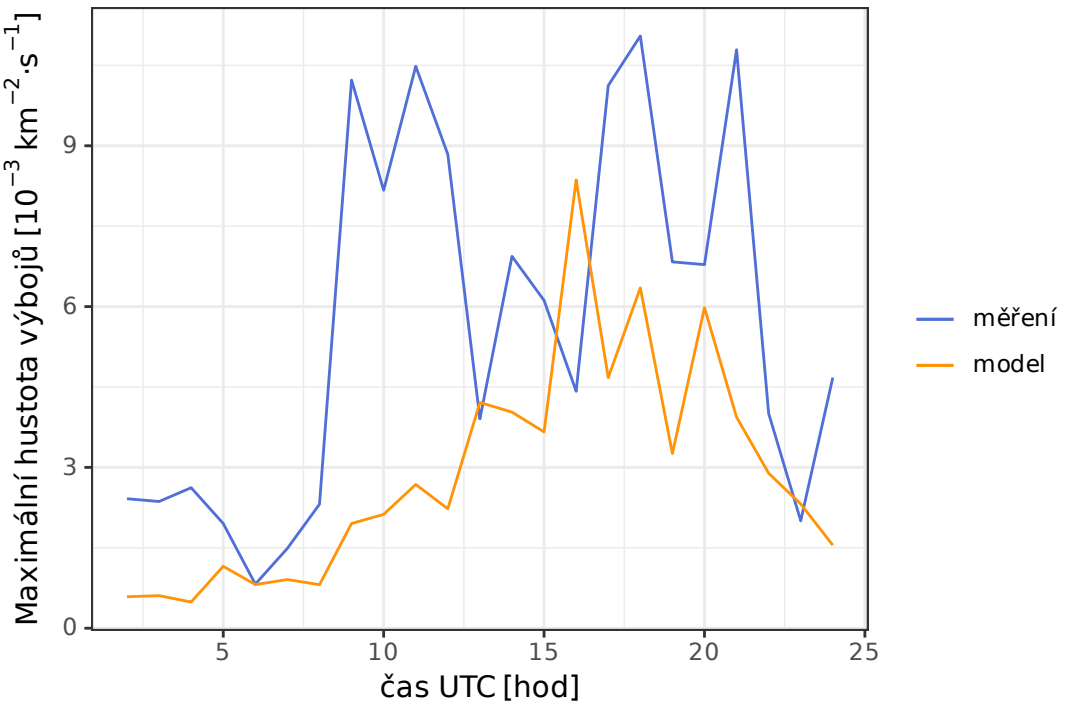
Obrázek 5.18: Denní chod průměrné hustoty bleskových výbojů za sekundu v rámci celé oblasti pokryté měřenými daty dne 26. 6. 2020.

lokalizované. Modelovaná data ukazují o něco menší oblast výskytu bouřek, zejména pak na severní Moravě a ve Slezsku. V případě nejintenzivnější bouřky, která se vyskytla severovýchodně od Prahy pak model předpovídá i nižší intenzitu, tato blesková aktivita je však velice malého prostorového rozsahu, což model nemůže zcela zachytit. Blesková aktivita vyskytující se nad středním Rakouskem je pak předpovídána západněji.

Na obrázku 5.22 pak vidíme hustotu bleskových výbojů kumulovanou mezi 15 UTC a 18 UTC. Model v tuto chvíli velmi dobře zachycuje bleskovou aktivitu nad Moravou, Slezskem a jižním Polskem. Jen bouřka v blízkosti Brna zůstala opomenuta a je posunuta o něco severněji. Velmi dobře je simulována situace nad jižním Německem, jen je slabě prostorově podhodnocena. Nad Slovenskem a Maďarskem pak je situace velmi dobře modelována. Bohužel měřená data na hranici této oblasti končí, z náznaku průběhu těchto dat je možné, že intenzivní předpovídaná blesková aktivita nad severním Maďarskem je ve skutečnosti pouze posunutá více na východ.

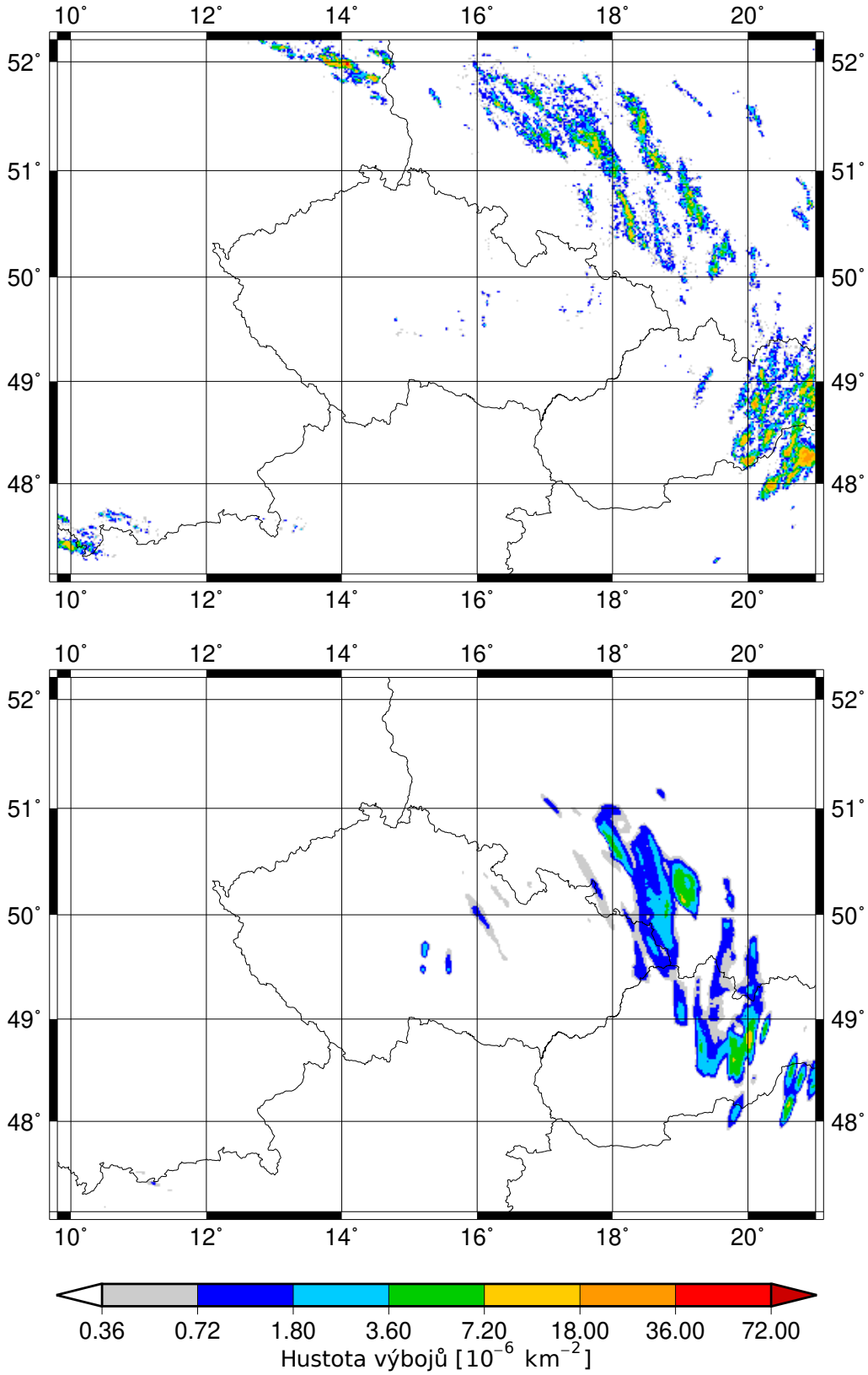
Podíváme-li se na kumulované hustoty bleskových výbojů mezi 18 UTC a 21 UTC na obrázku 5.23, zjistíme, že předpověď na tento časový úsek je velmi přesná. Dochází k nadhodnocení bleskové aktivity nad Moravou a Slezskem a k lehkému podhodnocení bleskové aktivity nad jižním Německem. Předpověď také ukazuje bouřku na hranicích Rakouska se Slovenskem, kde se ve skutečnosti žádná bouřka nevyskytla. Bouřková činnost je však celkově dobře předpovězena polohou, rozsahem i intenzitou.

Na obrázku 5.24 pak vidíme kumulované hodnoty hustoty bleskových výbojů po dobu celé integrace modelu. Zde v podstatě není co modelu vytknout, snad až na několik lokálních bouřek ve Středočeském kraji a intenzivní bouřky na úplném

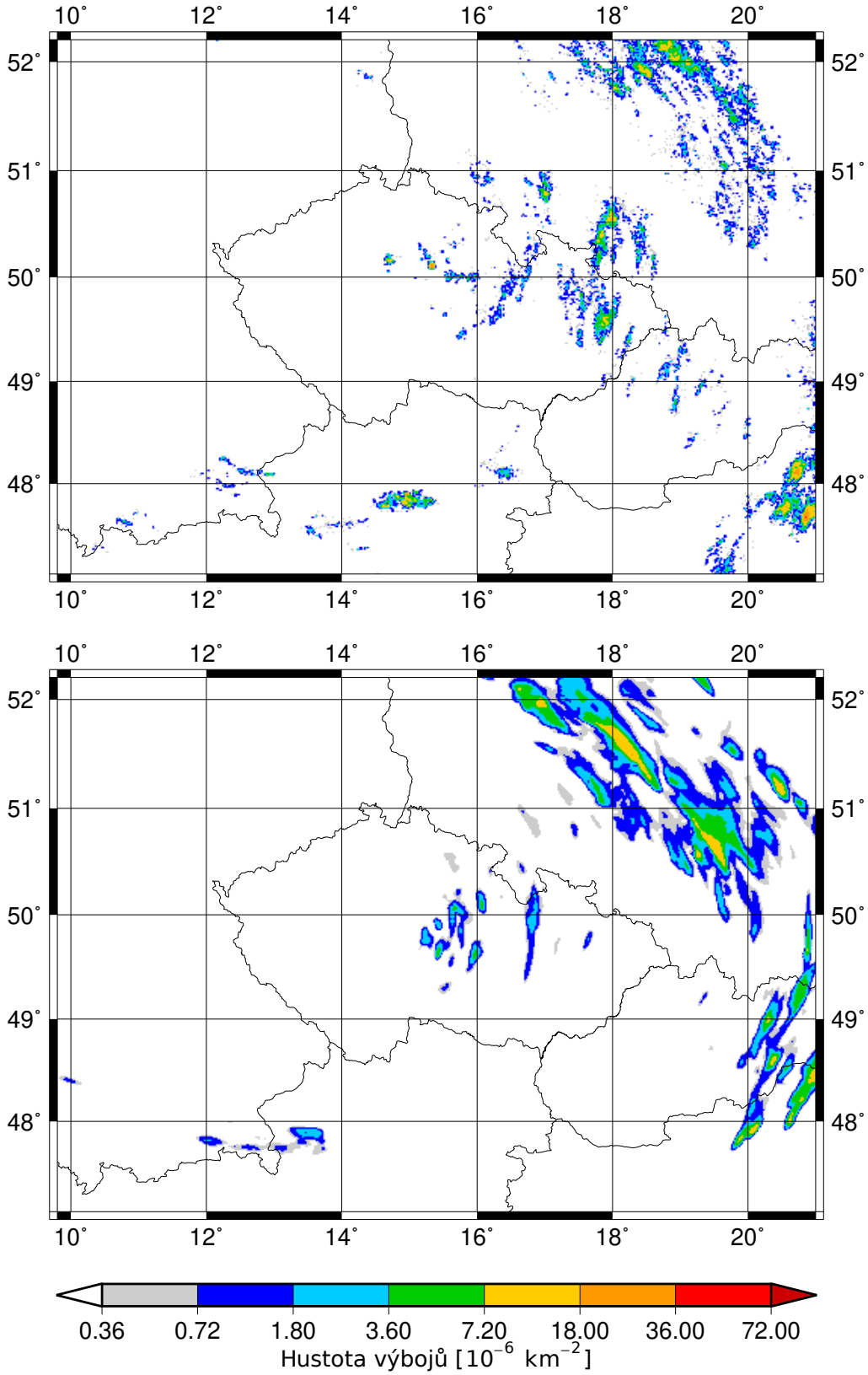


Obrázek 5.19: Denní chod maximální hustoty bleskových výbojů za sekundu v rámci celé oblasti pokryté měřenými daty dne 26. 6. 2020.

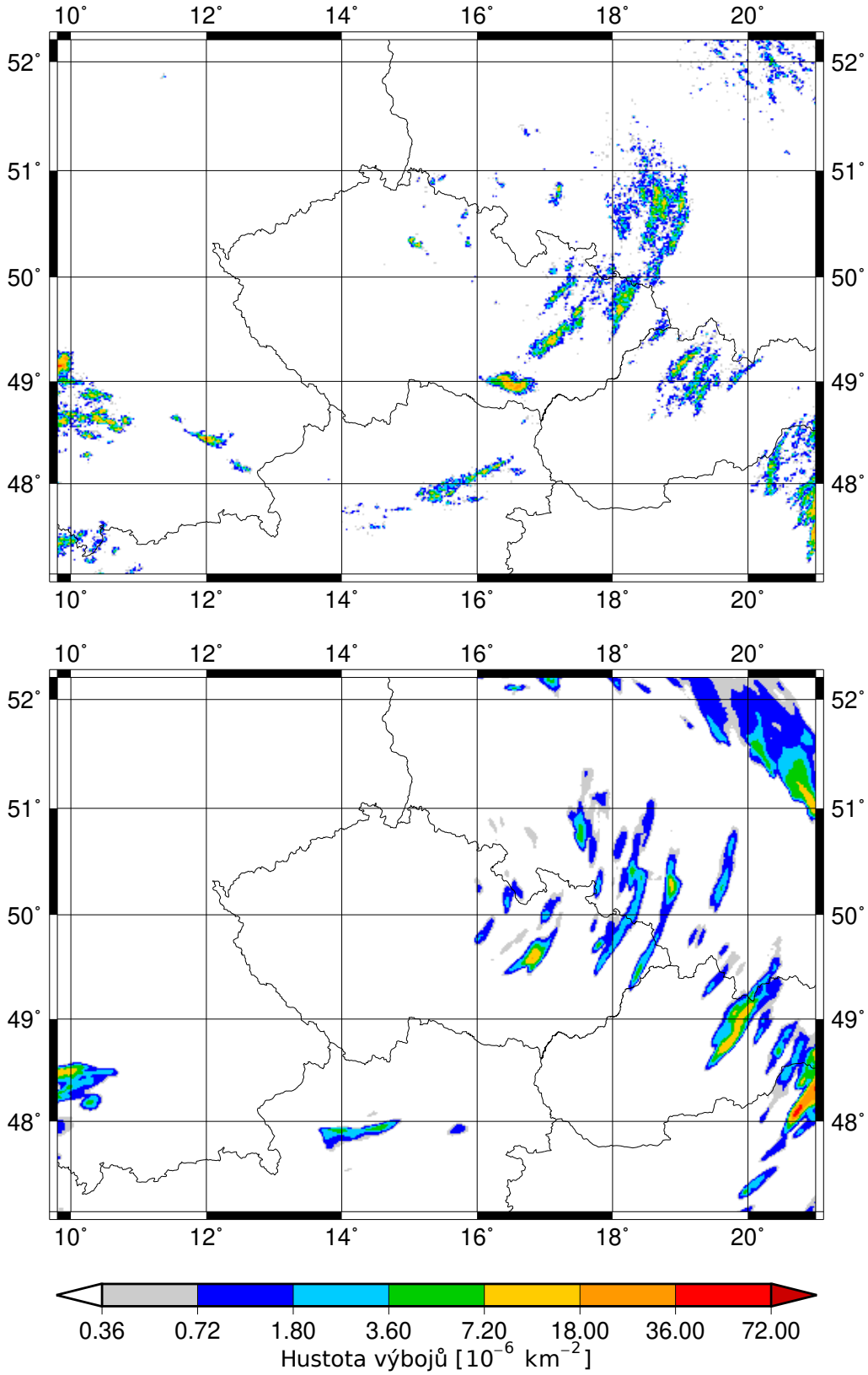
severu zobrazené oblasti v Německu, které byly předpovídané severněji. Jinak je velice dobře předpovězená blesková aktivita na celé oblasti jak prostorově, tak maximálními hodnotami hustoty bleskových výbojů. Také je velice dobře předpovězený tvar jakéhosi „banánu“ na Moravě a ve Slezsku.



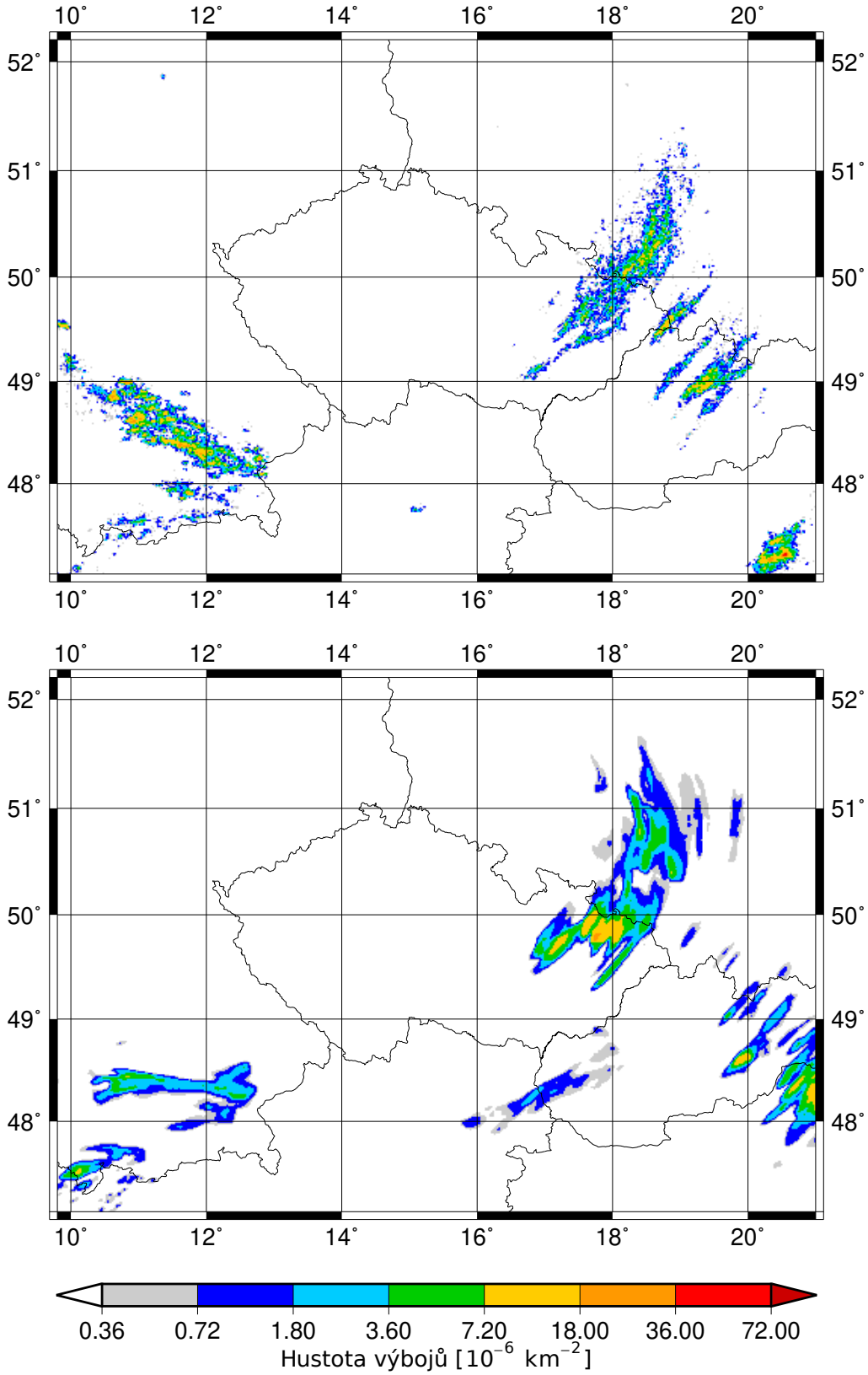
Obrázek 5.20: Tříhodinová kumulace hustoty bleskových výbojů končící 26. 6. ve 12 UTC. Nahoře měření, dole model.



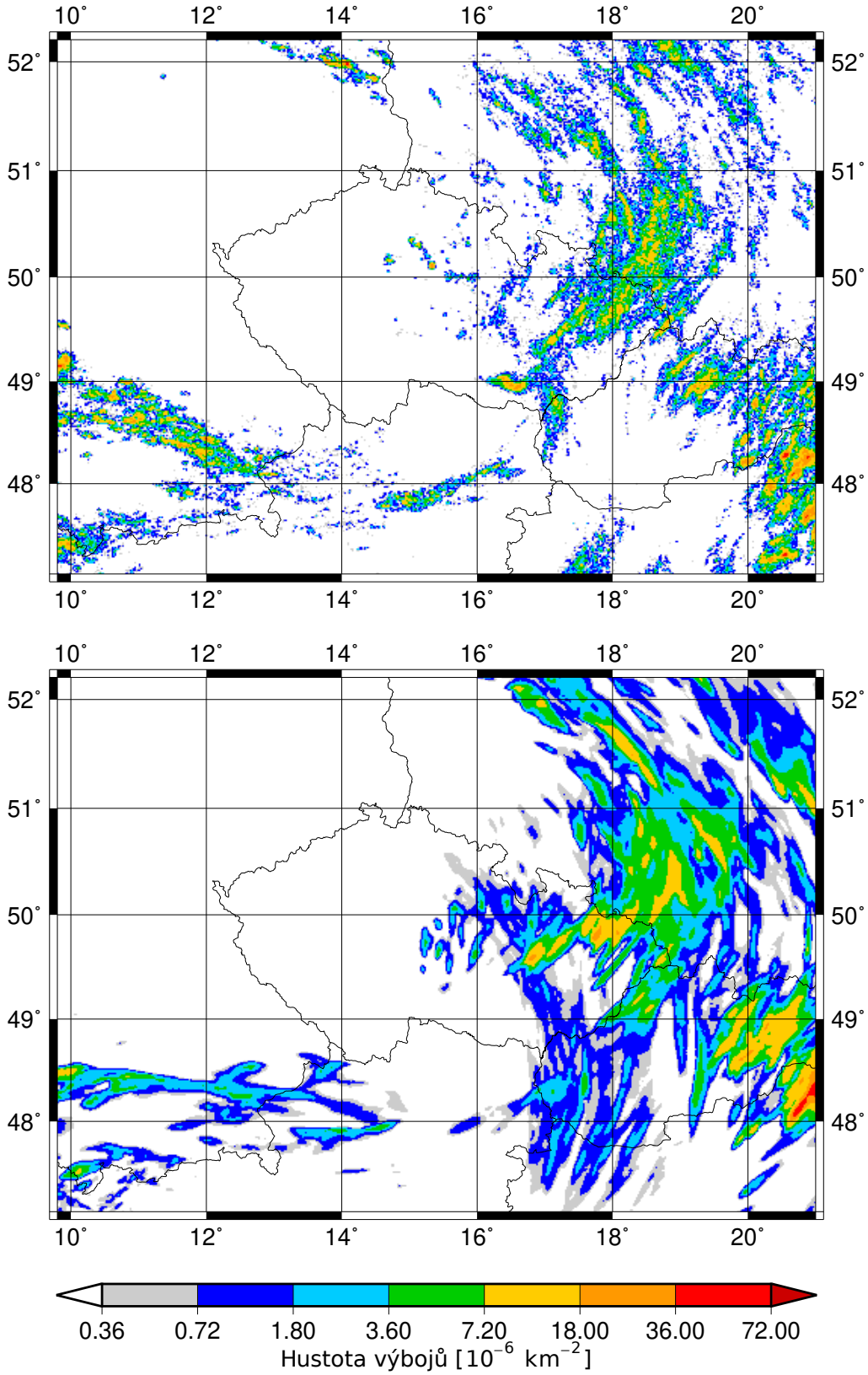
Obrázek 5.21: Tříhodinová kumulace hustoty bleskových výbojů končící 26. 6. v 15 UTC. Nahoře měření, dole model.



Obrázek 5.22: Tříhodinová kumulace hustoty bleskových výbojů končící 26. 6. v 18 UTC. Nahoře měření, dole model.



Obrázek 5.23: Tříhodinová kumulace hustoty bleskových výbojů končící 26. 6. ve 21 UTC. Nahoře měření, dole model.



Obrázek 5.24: Celodenní kumulace hustoty bleskových výbojů ze dne 26.6. Nahoře měření, dole model.

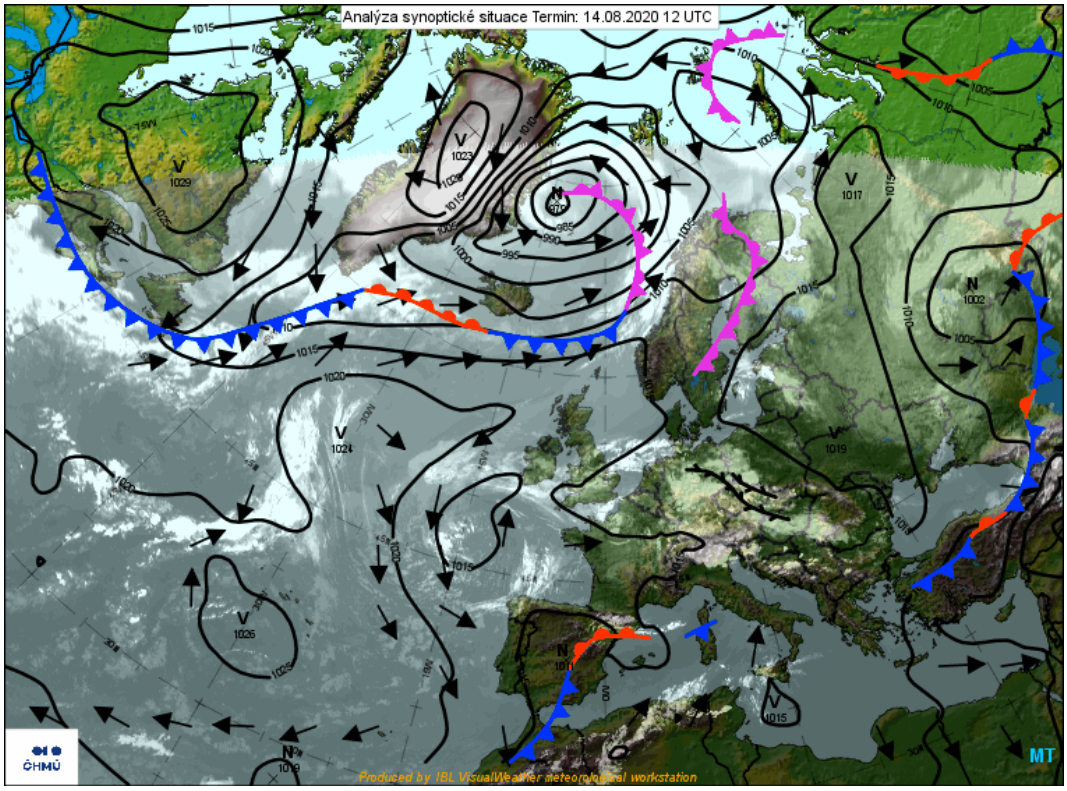
5.4 Situace 14. 8. 2020

Na synoptické mapě z 14. 8. 12 UTC zobrazené na obrázku 5.25, vidíme, že se nad Českou republikou rozkládá oblast nevýrazného tlaku vzduchu. V něm se během dne vytvořily dvě čáry instability. V tabulce 5.4 jsou pak uvedeny počty jednotlivých druhů bleskových výbojů zaznamenaných systémem detekce blesků LINET.

Na obrázku 5.26 pak vidíme denní chod průměrné hustoty bleskových výbojů zprůměrovaný nad celou oblastí. Výrazná blesková aktivita byla v tomto případě modelována až s určitým zpožděním. Amplituda modelovaných průměrných hustot pak byla výrazně nižší než ukazují naměřená data. Na konci období pak na modelovaných datech pozorujeme delší trvání bleskové aktivity ve srovnání s pozorováním. Na obrázku 5.27 pak vidíme, že maximální hodnoty hustoty bleskových výbojů jsou tento den podhodnoceny.

Na obrázku 5.28 je zobrazena měřená a modelovaná hustota bleskových výbojů kumulovaná mezi 12 UTC a 15 UTC. Na naměřených datech si můžeme všimnout hezky vyjádřených obou čar instability korespondující s jejich zakreslením na synoptické mapě. V rámci modelovaných dat pozorujeme rovněž tendenci k uspořádání konvekce podél linie. Tato linie je však jinak orientovaná než linie pozorovaná na naměřených datech. Nicméně model předpovídá vznik intenzivních bouřek v centrální oblasti České republiky, byť vyšší hodnoty hustoty bleskové aktivity zůstávají podhodnoceny. Všimněme si, že model rovněž pěkně předpovídá slabou a prostorově velmi omezenou bleskovou aktivitu na severu Rakouska a na Slovensku.

Na obrázku 5.29 vidíme, že model velmi hezky vyjádřil čáru instability. Na ní



Obrázek 5.25: Synoptická situace ze dne 14. 8. 2020 ve 12 UTC (ČHMÚ (2020))

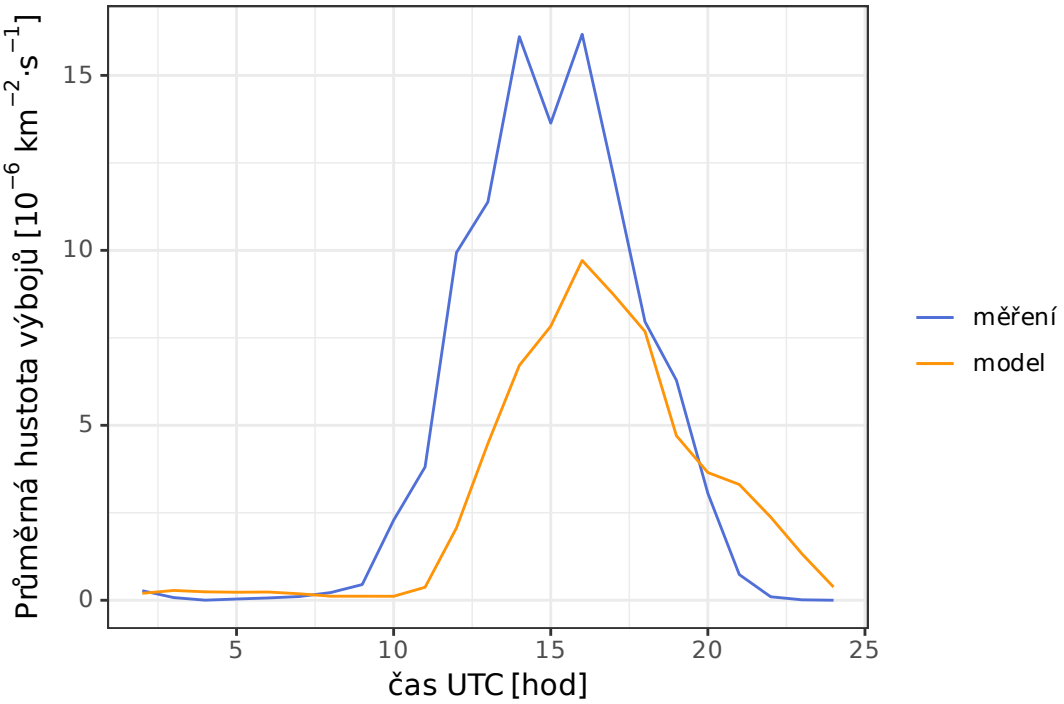
Tabulka 5.4: Počty jednotlivých druhů výbojů 14.8. 2020 zaznamenaných systémem LINET.

Druh výboje	**počet**
CG+	42 996
CG-	86 397
CC	44 134

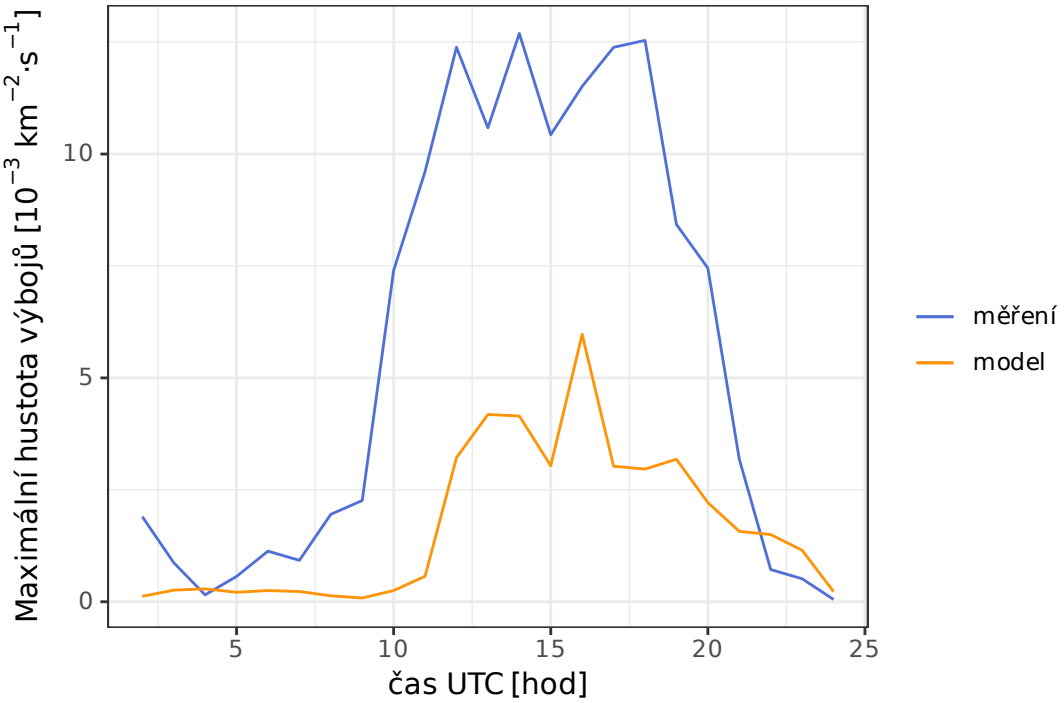
model správně předpovídá výskyt velmi intenzivních bouřek v souvislém pásu, který je v tomto případě již orientovaný podobně jako ukazují měření. Pouze dochází k posunutí čáry instability více na východ a její jižní část se stáčí více na sever a na východ. Model nyní lehce nadhodnocuje plochu s výskytem blesků. Maximální intenzita bouřek ležících kolem 50. rovnoběžky je poměrně dobře odhadnutá. Naopak intenzita bouřky vyskytující se u Tábora je vyšší než pro tuto oblast předpovídá model. Za zmínku stojí poměrně výrazná blesková aktivita v oblasti Šumavy, která mohla vzniknout v důsledku vynuceného výstupu vzduchu přes toto pohoří. Model očekával oproti měřením výskyt čáry instability východněji, což mohlo vést k tomu, proč žádná blesková aktivita v této oblasti nebyla modelována. Blesková aktivita nad Rakouskem je pak nadhodnocena plochou, ale podhodnocena intenzitou. To je převážně způsobeno tím, že bouřky byly ve skutečnosti takřka stacionární, zatímco model předpovídal lehký pohyb. Hodinová data pak ukazují větší podobnost mezi měřenými a modelovanými hodnotami.

Na obrázku 5.30 pak můžeme porovnat modelované hustoty bleskových výbojů kumulované mezi 18 UTC a 21 UTC s těmi měřenými. Vidíme, že blesková aktivita již ustává a model toto správně předpovídá. Doznívající vyšší blesková aktivita je pak předpovídána východněji, což souvisí s rozdílnou polohou čáry instability v rámci modelu a ve skutečnosti. Intenzita těchto bouřek je však velmi dobře předpovězená.

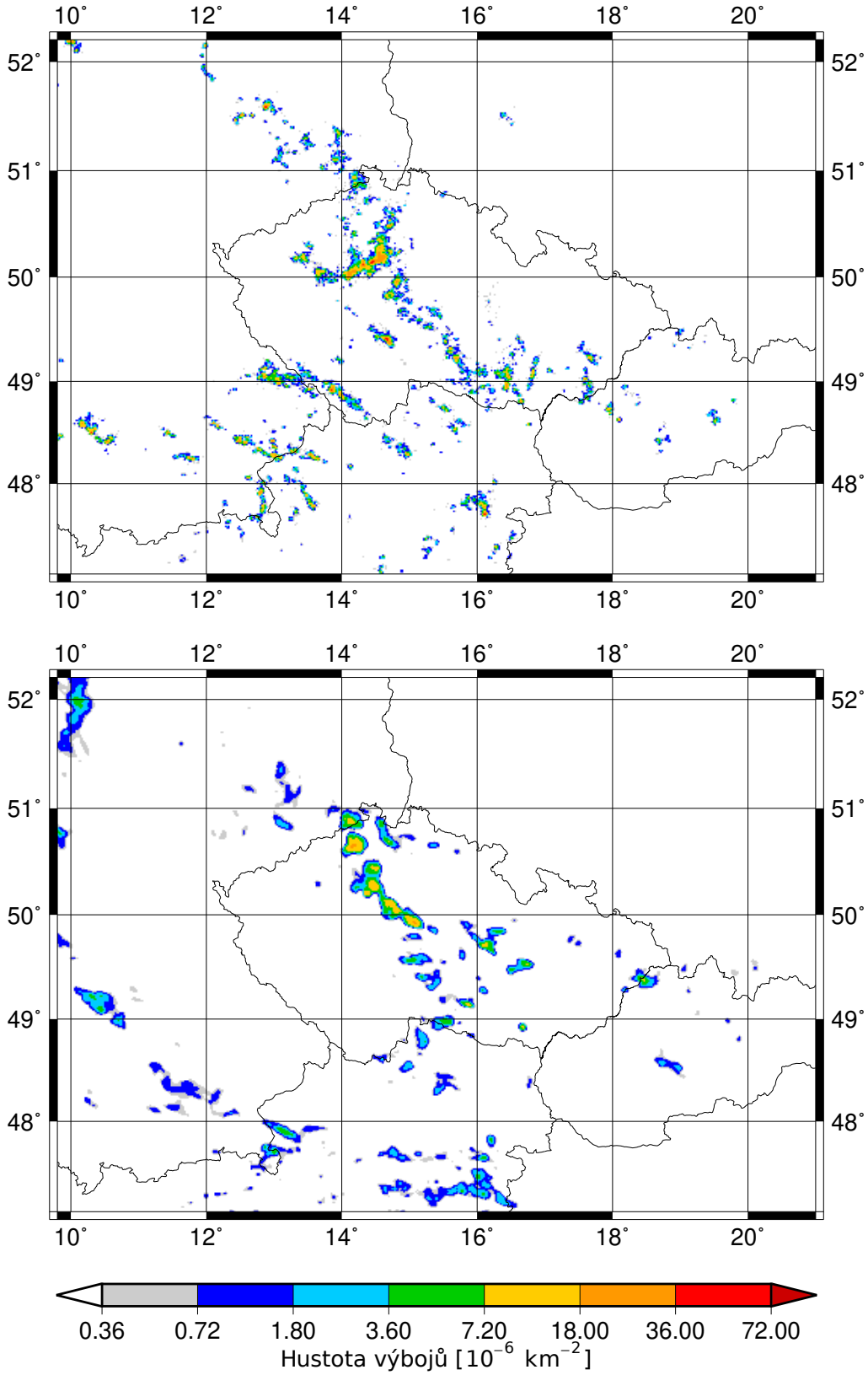
Tento den byla lokálně blesková aktivita velmi vysoká s prudkým nárůstem na jejích okrajích. To model nebyl schopen správně postihnout. Sice také předpovídal poměrně prudký prostorový nárůst hustot bleskových výbojů, ten byl ve srovnání s měřenými hodnotami stále příliš pozvolný. Na obrázku 5.31 jsou znázorněny kumulované modelované i měřené hustoty výbojů za celou dobu integrace modelu. Vidíme, že na Moravě a ve Slezsku dochází k podhodnocování bleskové aktivity, jak plochy, tak amplitudy. Celkově je blesková aktivita nad Českou republikou lehce podhodnocena. Povšimněme si ještě rozdílných hodnot simulovaných a naměřených nad jižním Německem. Z měřených dat se zdá, že se zde objevilo několik konvektivních buněk bez výraznějšího pohybu, čímž vznikly lokálně velmi vysoké kumulované hodnoty bleskových výbojů, zatímco model předpokládal výraznější pohyb.



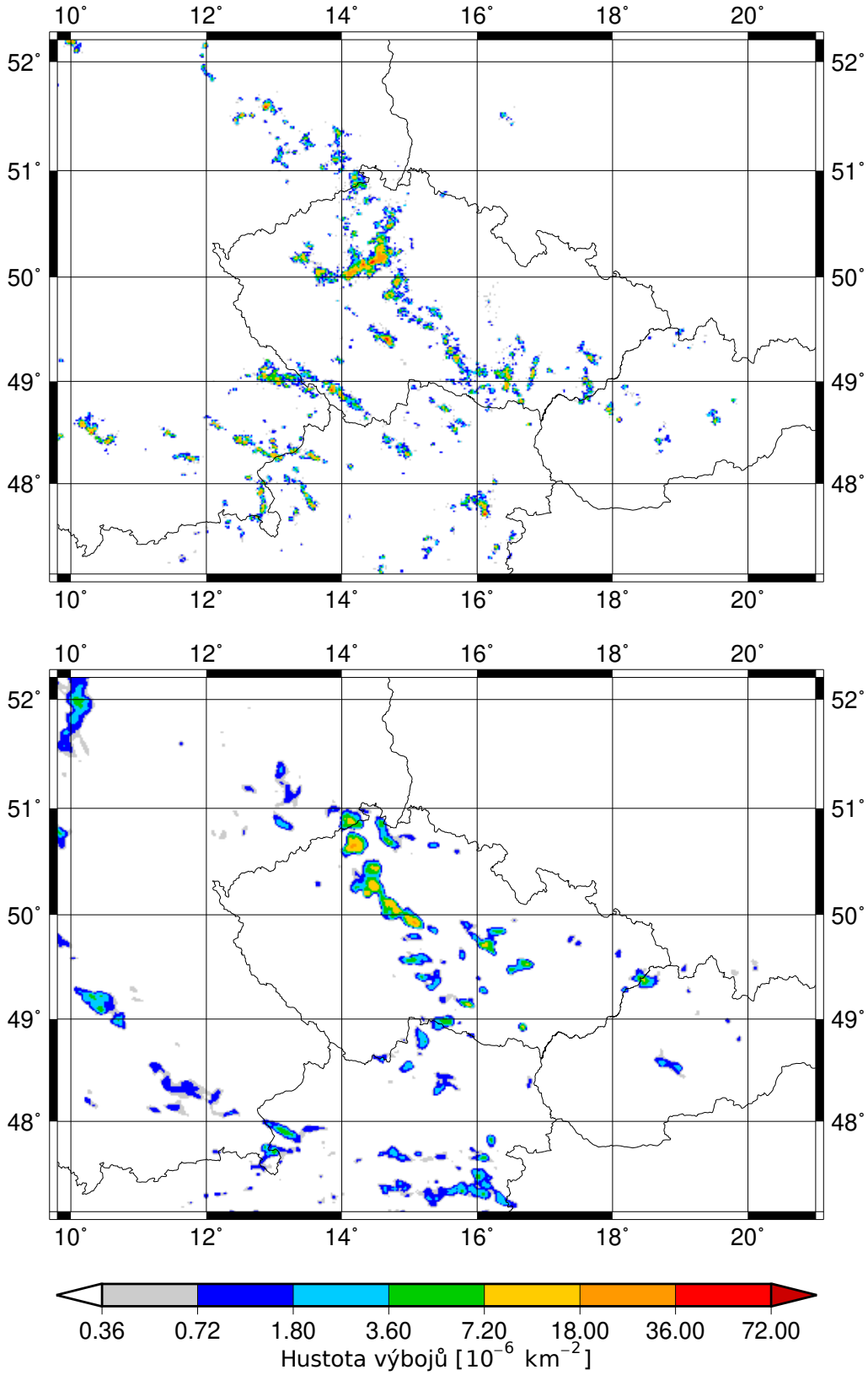
Obrázek 5.26: Denní chod průměrné hustoty bleskových výbojů za sekundu v rámci celé oblasti pokryté měřenými daty dne 14. 8. 2020.



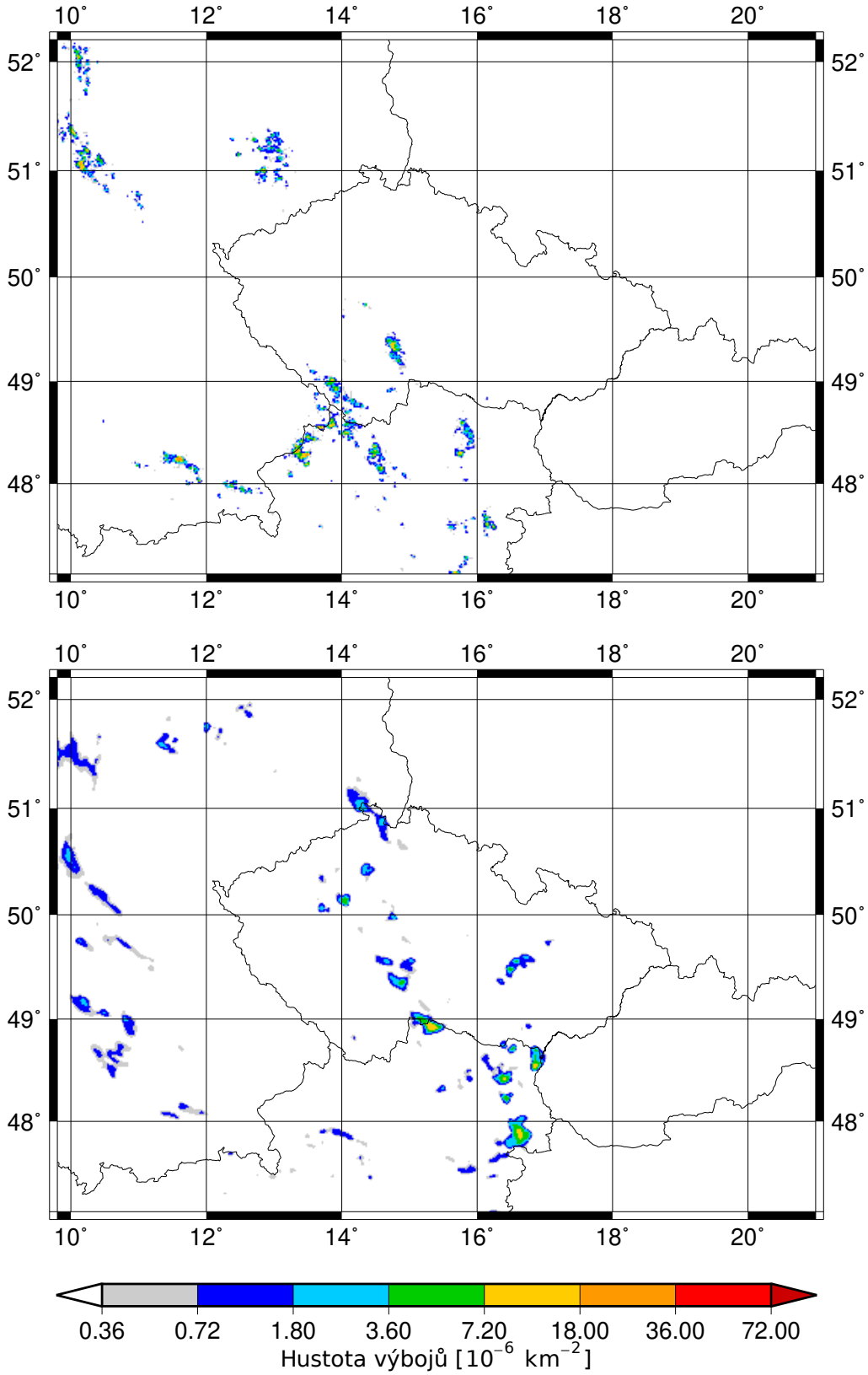
Obrázek 5.27: Denní chod maximální hustoty bleskových výbojů za sekundu v rámci celé oblasti pokryté měřenými daty dne 14. 8. 2020.



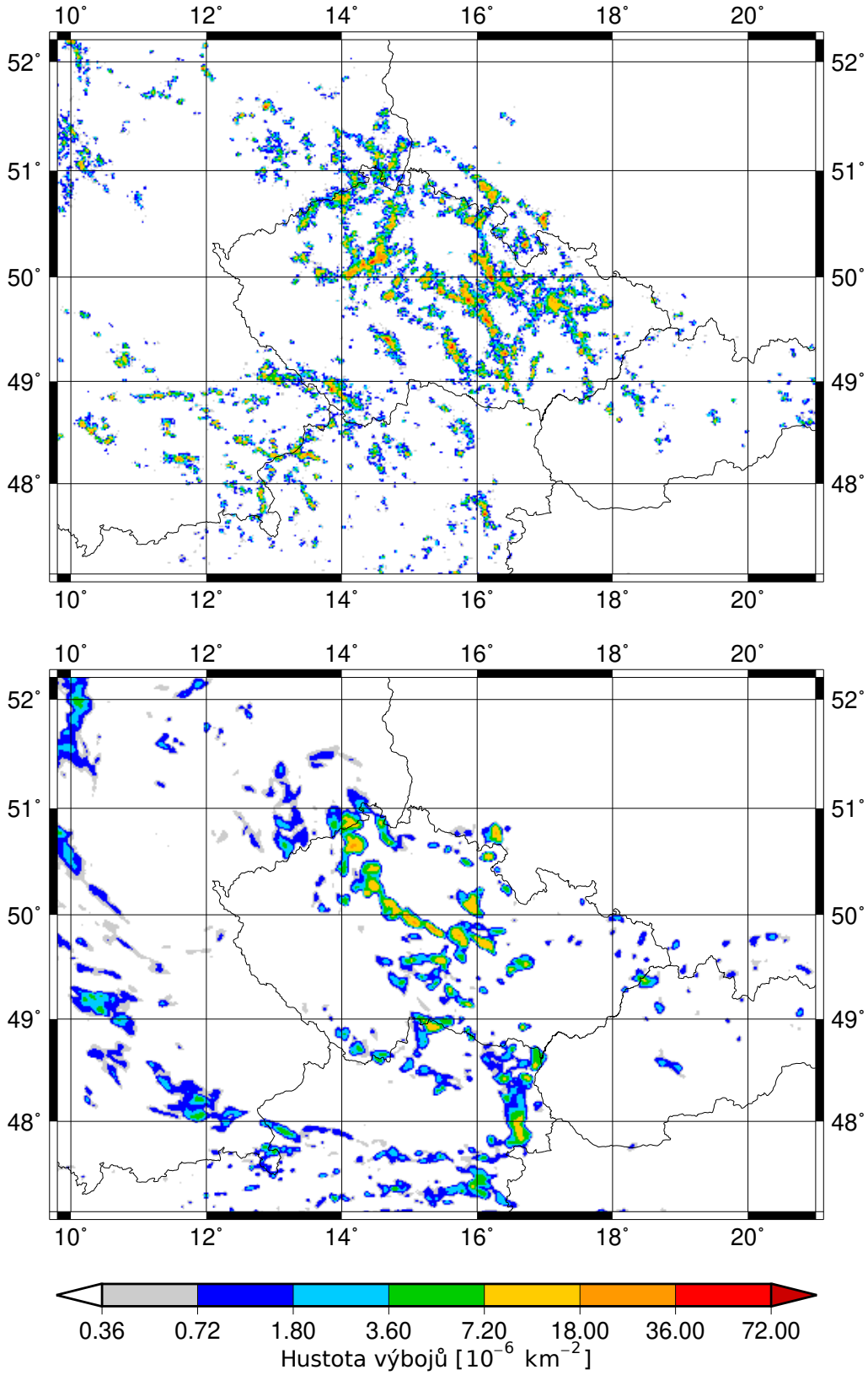
Obrázek 5.28: Tříhodinová kumulace hustoty bleskových výbojů končící 14. 8. v 15 UTC. Nahoře měření, dole model.



Obrázek 5.29: Tříhodinová kumulace hustoty bleskových výbojů končící 14. 8. v 18 UTC. Nahoře měření, dole model.



Obrázek 5.30: Tříhodinová kumulace hustoty bleskových výbojů končící 14. 8. ve 21 UTC. Nahoře měření, dole model.



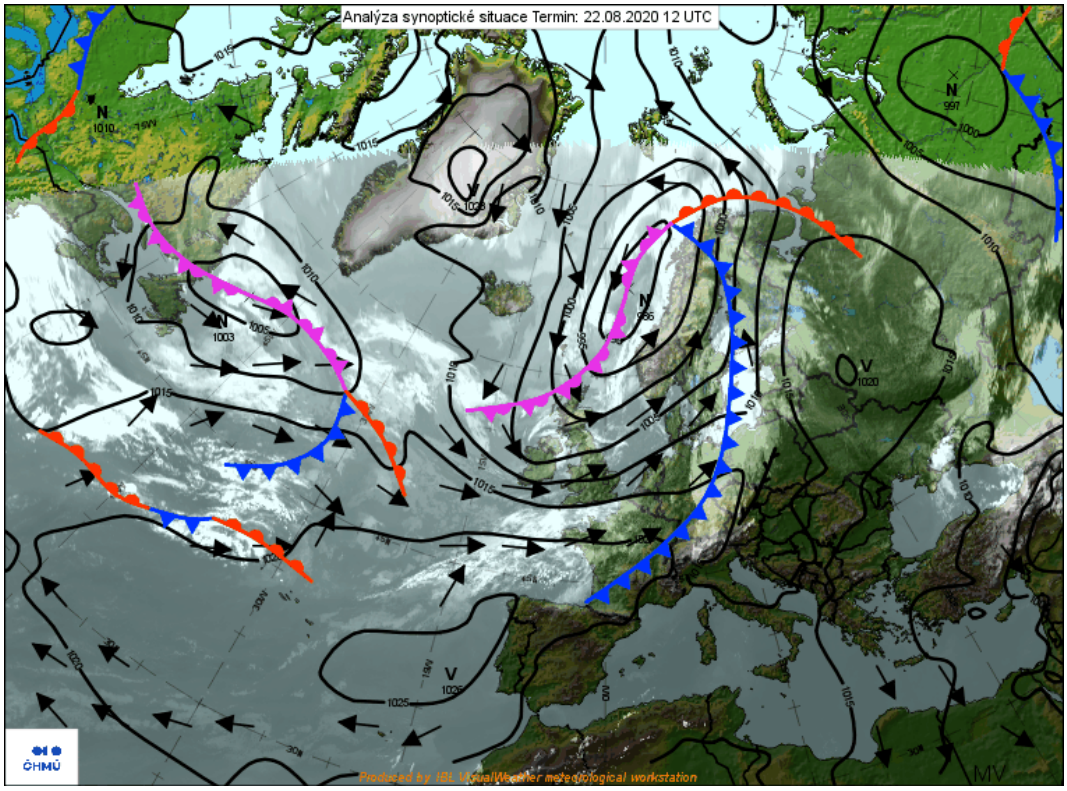
Obrázek 5.31: Celodenní kumulace hustoty bleskových výbojů ze dne 14.8. Nahoře měření, dole model.

5.5 Situace 22. 8. 2020

Dne 22.8. přecházela přes Českou republiku od západu studená fronta. Na této frontě se vyskytovaly bouřky zejména během noci. Během dne se před ní zformovala čára instability, na níž se tvořily multicelární bouřky. Synoptickou mapu z tohoto dne si můžeme prohlédnout na obrázku 5.32. Počty blesků zaznamenaných tento den detekční sítí LINET jsou pak uvedeny v tabulce 5.5

Podíváme-li se na denní chod bleskové aktivity na obrázku 5.33, pozorujeme, že v noci byla modelovaná průměrná hustota bleskových výbojů značně vyšší než ukazují měření. Denní chod je však tentokrát velmi dobře vyhodnocený, jen lehce předbíhá měření. Na obrázku 5.34 pak vidíme, že modelované maximální hodnoty hustoty bleskových výbojů byly opravdu výrazně podhodnocené, modelované hodnoty jsou v tomto případě nižší než čtvrtinové oproti pozorováním.

Během noci se v souvislosti s přechodem studené fronty vyskytla slabá bleskova aktivita nad Německem. Model ji v tomto případě poměrně dobře vystihl intenzitou (předpovídal jen o málo nižší intenzitu) a polohou, ale nadhodnotil plochu s nenulovou bleskovou aktivitou. Zatímco ráno blesková aktivita slábla, model dál určoval amplitudou nevýraznou, ale velmi rozsáhlou oblast bleskové aktivity nad Německem, jak je znázorněno na obrázku 5.35. Dle kombinace radarových snímků s daty z detekční sítě LINET se vyskytovaly na studené frontě bouřky, které byly poměrně bleskově aktivní, jejich trvání však v některých případech bylo velmi krátké. Model v tomto případě očekával jejich delší trvání. To patrně souvisí s výstupnými proudy v rámci studené fronty, kdy za použití schématu F_1 popsaného rovnicí 2.12 model dojde k určení možnosti výskytu výbojů na větší části tohoto frontálního rozhraní s delší dobou trvání bleskové



Obrázek 5.32: Synoptická situace ze dne 22. 8. 2020 ve 12 UTC (ČHMÚ (2020))

Tabulka 5.5: Počty jednotlivých druhů výbojů 22.8. 2020 zaznamenaných systémem LINET.

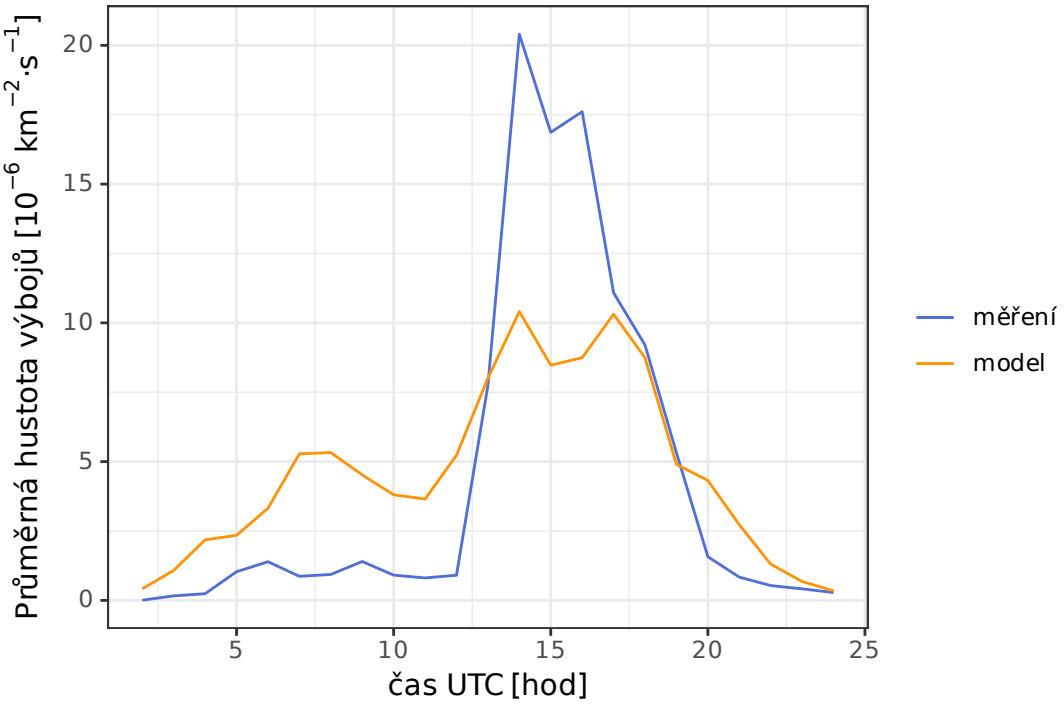
Druh výboje	**počet**
CG+	54 275
CG-	74 547
CC	37 671

aktivity.

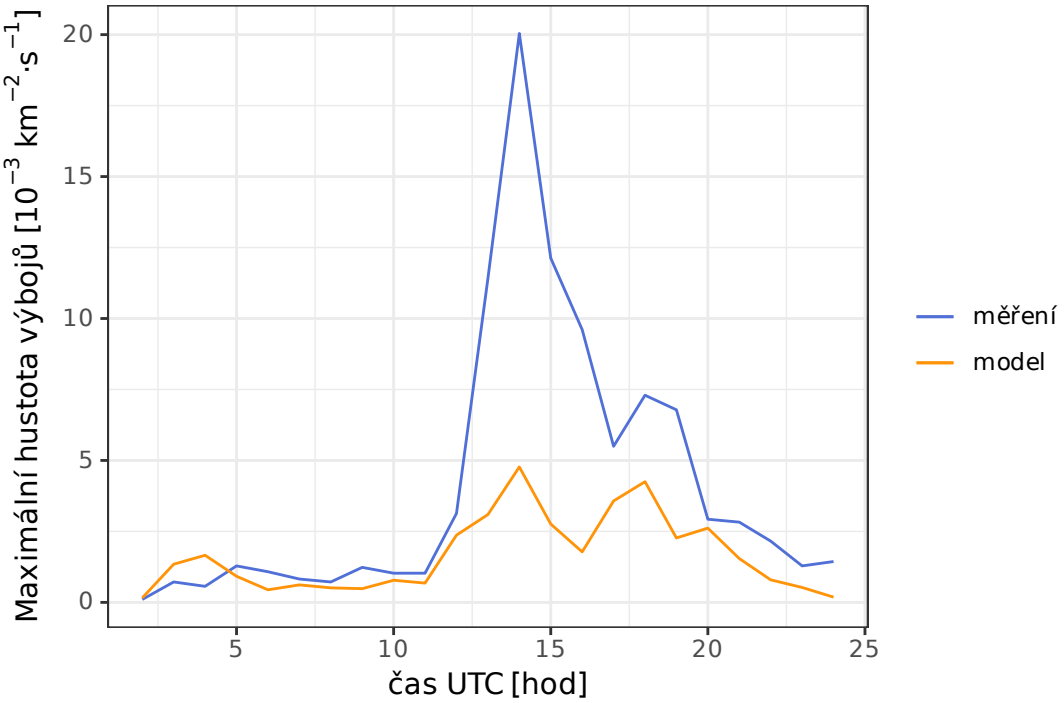
Na obrázku 5.36 pak vidíme hustotu bleskových výbojů kumulovanou mezi 12 UTC a 15 UTC. Nad Českou republikou se vyskytuje poměrně výrazná bouřková činnost v okolí Třebíče, kterou model značně podhodnotil. Naopak bouřky nad východním Rakouskem jsou předpovězeny poměrně přesně. V rámci modelu nejsou předpovídány konvektivní bouře související se severní částí čáry instability. V západních Čechách si opět můžeme všimnout amplitudou nevýrazné, ale plochou výrazné modelované bleskové aktivity poblíž studené fronty, zatímco měření ukazují velmi ojedinělý výskyt blesků pouze nad Německem. Slabší bouřková činnost nad Polskem je pak předpovězena velmi dobře amplitudou i plochou, jen je lehce posunuta severozápadním směrem.

Kumulované hustoty bleskových výbojů mezi 15 UTC a 18 UTC jsou zobrazeny na obrázku 5.37. Měřená data ukazují dvě centra nejvyšší bleskové aktivity, a to v okolí Vídně a ve Slezsku. Model pak velmi dobře předpovídá intenzivní bouřkovou činnost v okolí Vídně, značně podhodnocuje bleskovou aktivitu v okolí Ostravy a v jižním Polsku. Naopak poměrně dobře je předpovězena oblast výskytu slabší bleskové aktivity nad Polskem byť je podhodnocena amplitudou a je posunuta západněji oproti měřením, což souvisí s rozdílnou rychlostí postupu frontálního rozhraní v rámci modelu. Dobře předpovězena je nyní již výraznější blesková aktivita ve středním Rakousku. Rozložení hustot bleskových výbojů na mapě sice není přesně předpovězeno, v rámci kalibrace, kdy byla využita průměrná hodnota hustoty výbojů v rámci celého zobrazeného území, to však nevadí.

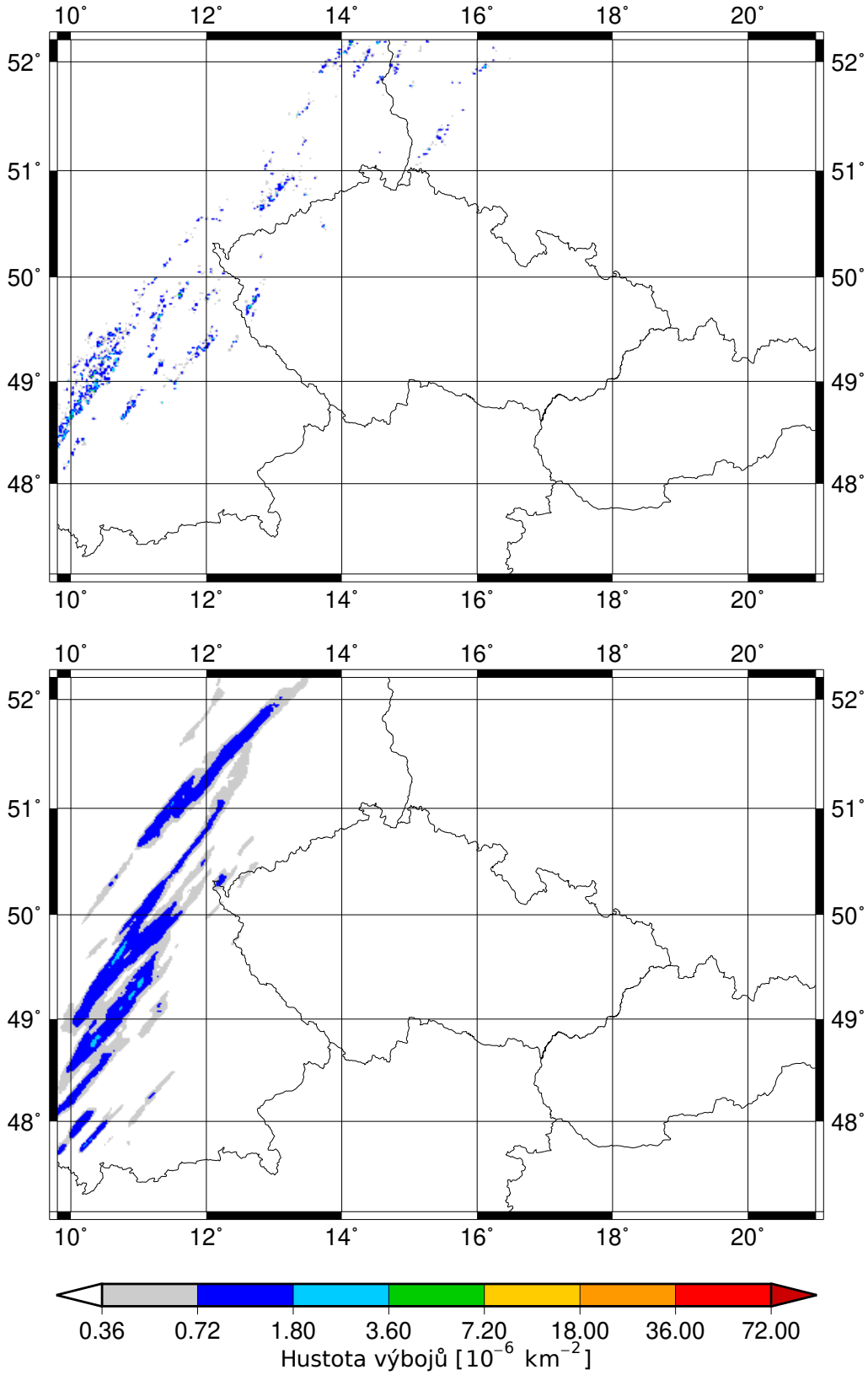
Podívejme se nyní na obrázek 5.38, na němž jsou znázorněny modelované i měřené kumulované hustoty výbojů za celou dobu integrace modelu. Zde vidíme již dříve zmiňované nadhodnocování rozlohy bleskové aktivity na studené frontě nad Německem a západem Čech. Naopak výrazně podhodnocená byla blesková aktivita na Vysočině. Podhodnocená byla také blesková aktivita v oblasti Slezska a jižního Polska, jak již vyplynulo výše. Naopak měřená a modelovaná data nad Rakouskem spolu korespondují velice dobře.



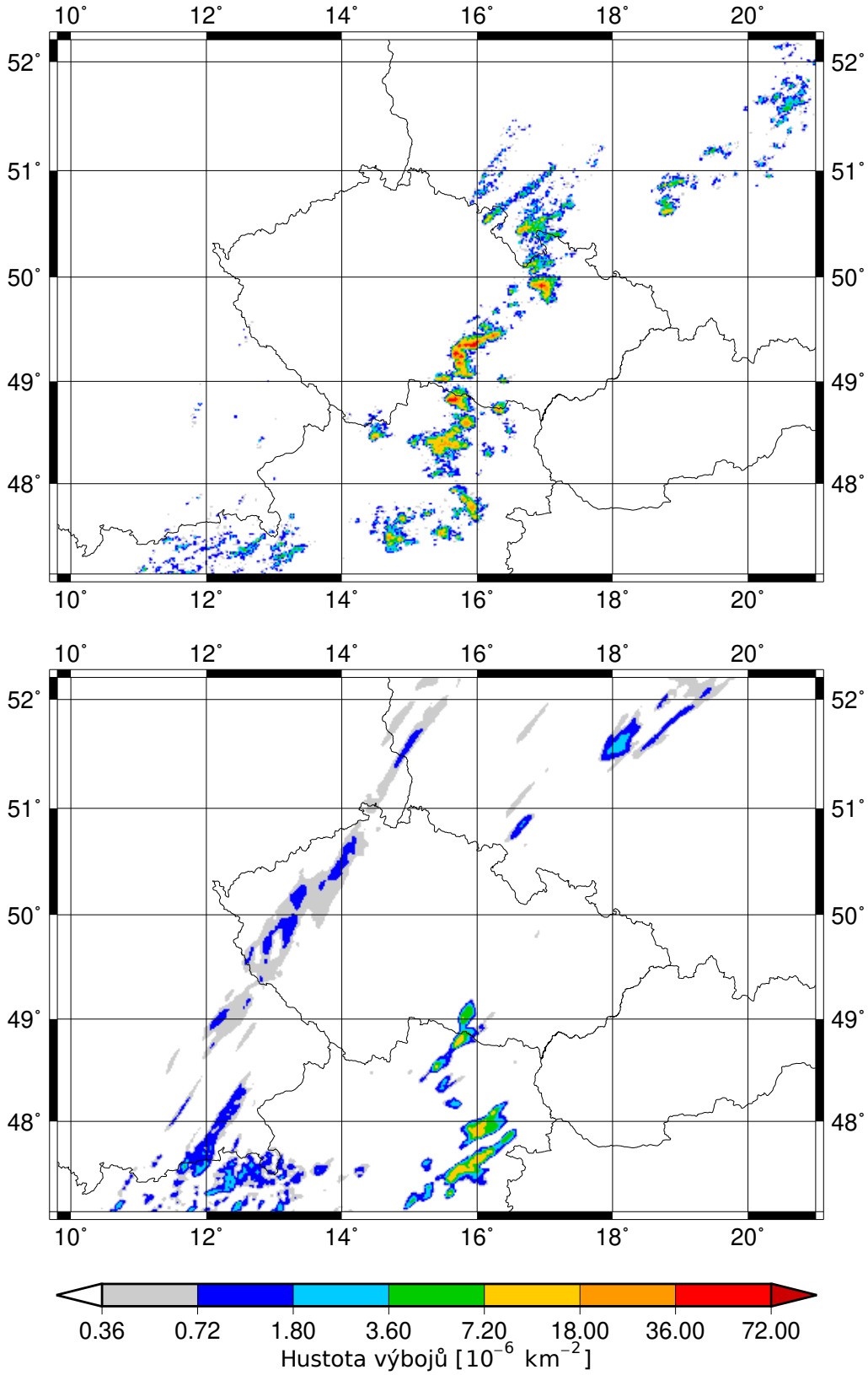
Obrázek 5.33: Denní chod průměrné hustoty bleskových výbojů za sekundu v rámci celé oblasti pokryté měřenými daty dne 22. 8. 2020.



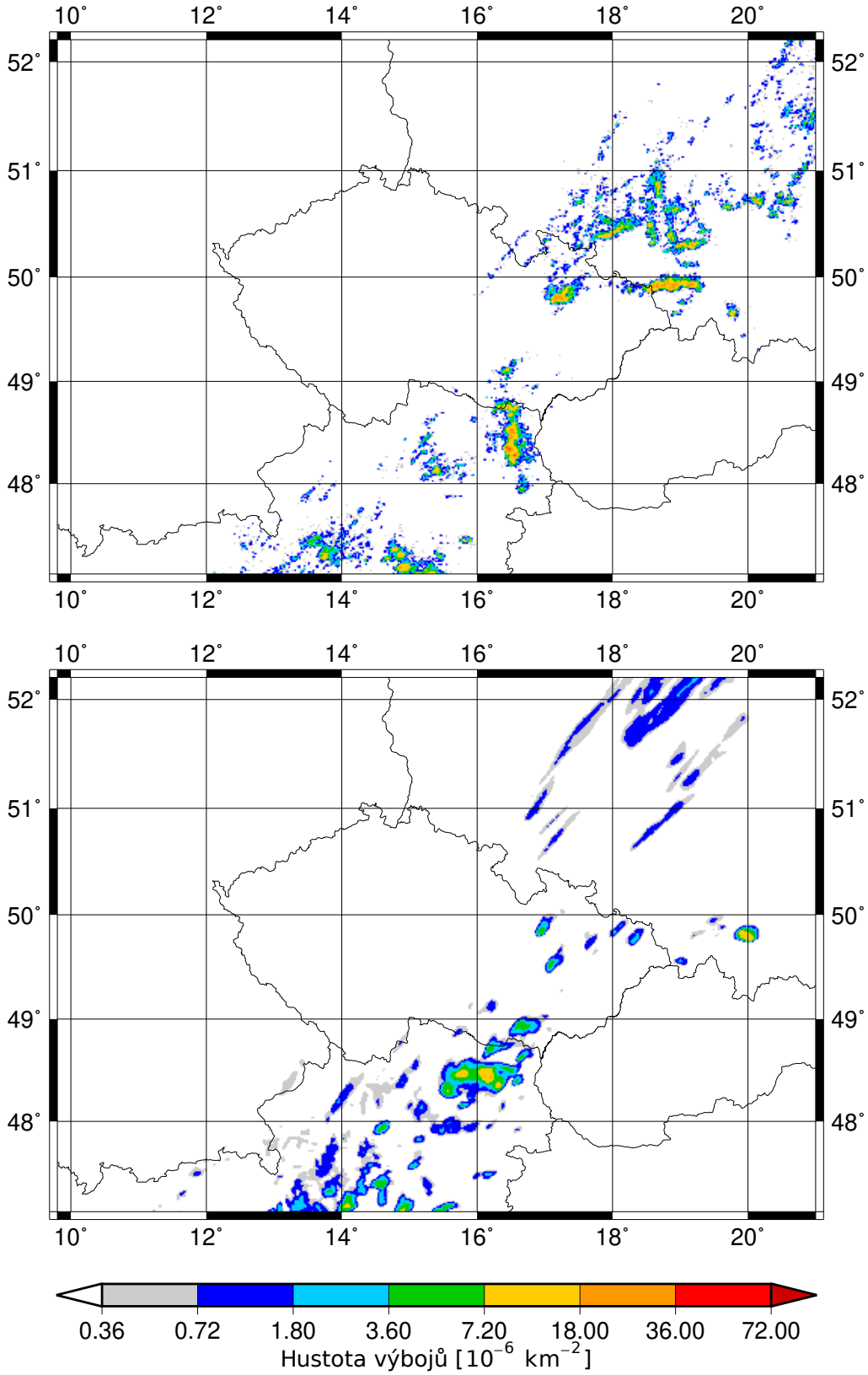
Obrázek 5.34: Denní chod maximální hustoty bleskových výbojů za sekundu v rámci celé oblasti pokryté měřenými daty dne 22. 8. 2020.



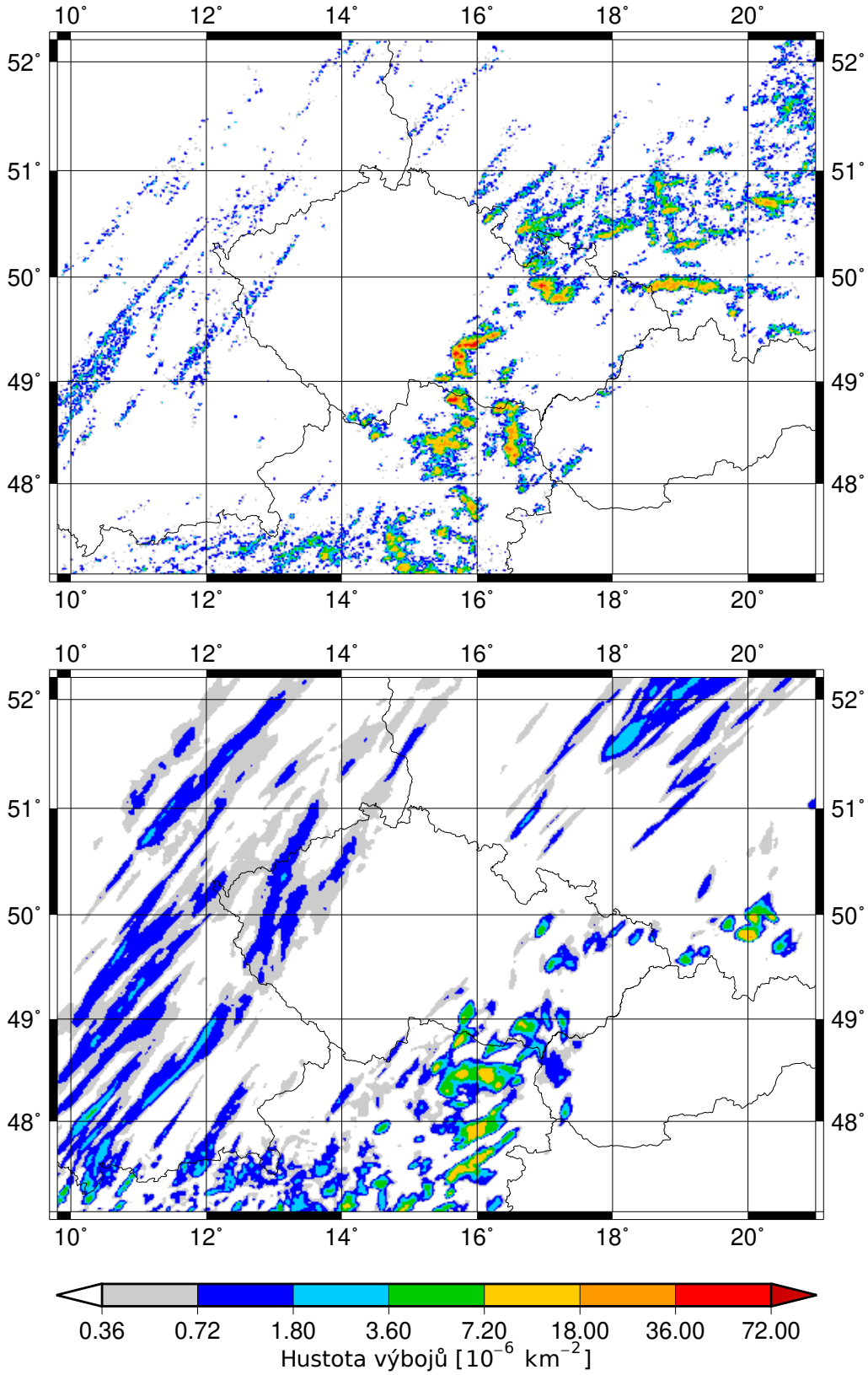
Obrázek 5.35: Tříhodinová kumulace hustoty bleskových výbojů končící 22. 8. v 09 UTC. Nahoře měření, dole model.



Obrázek 5.36: Tříhodinová kumulace hustoty bleskových výbojů končící 22. 8. v 15 UTC. Nahoře měření, dole model.



Obrázek 5.37: Tříhodinová kumulace hustoty bleskových výbojů končící 22. 8. v 18 UTC. Nahoře měření, dole model.



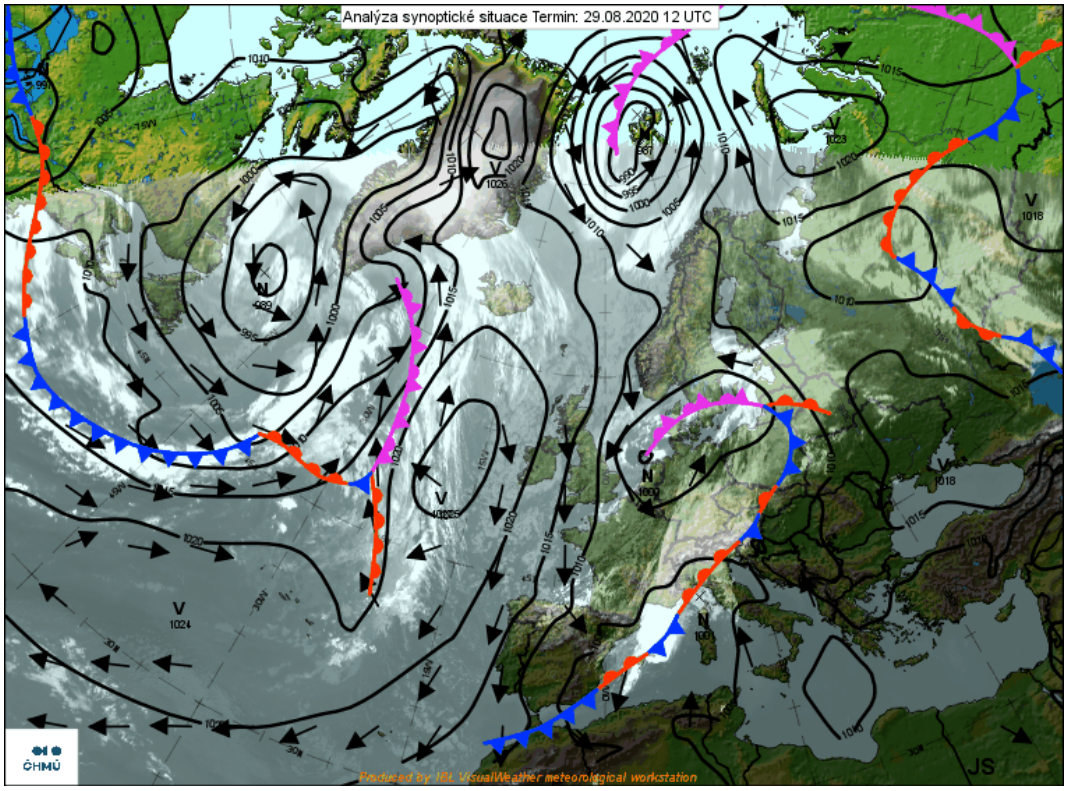
Obrázek 5.38: Celodenní kumulace hustoty bleskových výbojů ze dne 22.8. Nahoře měření, dole model.

5.6 Situace 29. 8. 2020

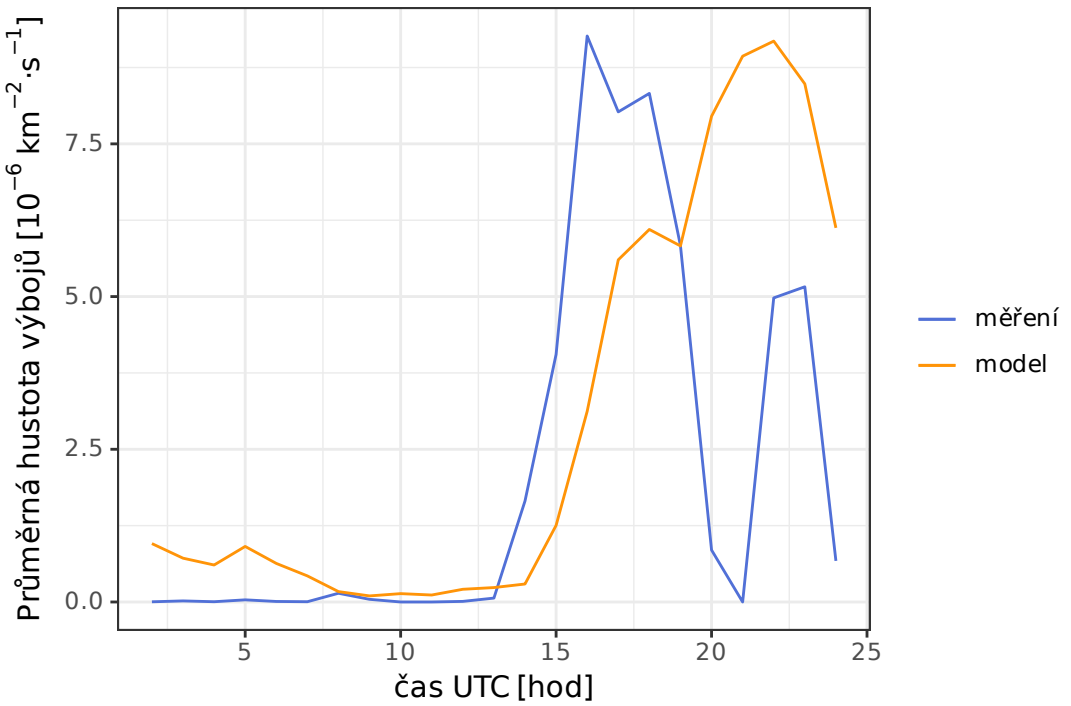
Podobná synoptická situace jako 6. 7. nastala 29. 8. (analýza synoptické situace z 12 UTC je na obrázku 5.39), kdy bylo počasí v České republice rovněž ovlivňováno zvlněnou studenou frontou. Frontální rozhraní se opět výrazněji nepohybovalo a procházelo nad Moravou. Nyní však bylo blíže centrum tlakové níže. Jak vidíme v tabulce 5.6, tento den byla průměrná hustota bleskových výbojů nejnižší z vybraných případů, což souvisí s tím, že se odpoledne vyskytla pouze jedna velmi intenzivní bouřka, nikoli mnoho bouřek, jako tomu bylo doposud. Až během noci bylo několik bouřek pozorovaných na Moravě a ve Slezsku.

Obrázek 5.40 ukazuje denní chod průměrné hustoty výbojů. Zde si můžeme všimnout pozdějšího nástupu modelované bleskové aktivity ve srovnání s měřeními, tudíž nebyla modelem zcela zachycena prvotní vysoká blesková aktivita. Nicméně v 16 UTC jsou již modelované a naměřené hodnoty velmi podobné, zpoždění modelu tedy činí přibližně dvě hodiny. Kolem 20 UTC blesková aktivita v podstatě zcela ustává, aby se kolem 22 UTC opět výrazně zvýšila. Modelované hodnoty jsou pak v tento čas značně nadhodnocené ve srovnání s měřeními. Všimněme si však, že tento den jsou maximální naměřené hodnoty průměrné hustoty bleskových výbojů zhruba poloviční než 14. 8., což je případ, kdy byla maximální hodnota průměrné hustoty výbojů druhá nejnižší. Na obrázku 5.41 si pak můžeme prohlédnout denní chod maximálních hustot výbojů. Vidíme, že model slabě podhodnocoval hodnoty maximální hustoty výbojů i ve chvíli, kdy průměrná hustota výbojů byla značně vyšší než ukazují měření.

Na obrázku 5.42 vidíme, že měření i model ukazují pouze jednu bouřku v rámci celého zobrazeného prostoru. Tato bouřka je však velmi intenzivní. Model předpo-



Obrázek 5.39: Synoptická situace ze dne 29. 8. 2020 ve 12 UTC (ČHMÚ (2020))



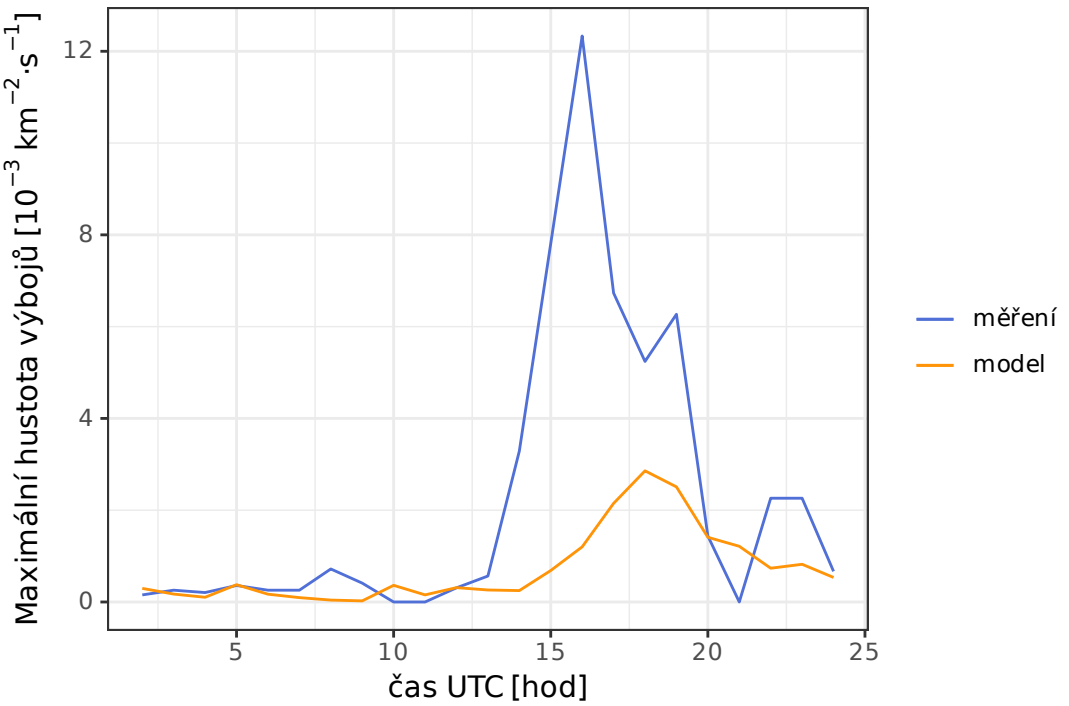
Obrázek 5.40: Denní chod průměrné hustoty bleskových výbojů za sekundu v rámci celé oblasti pokryté měřenými daty dne 29. 8. 2020.

kládal její výskyt nad středním až severním Rakouskem, zatímco měření ji lokalizují poblíž hranic Rakouska s Maďarskem. Navzdory tomu, že model předpovídá výraznou bleskovou aktivitu, její maximální hodnoty stále lehce podhodnocuje. Je však otázkou, do jaké míry toto podhodnocení souvisí s jinou lokalizací bouřky v rámci modelu.

Na obrázku 5.43 jsou zobrazeny kumulované hodnoty hustoty bleskových výbojů mezi 18 UTC a 21 UTC. Měření ukazují, že se bouřky vyskytují pouze ve východním Rakousku, zatímco model předpovídá navíc bouřky na Moravě a částečně také ve Slezsku. Intenzita bouřek ve východním Rakousku je pak modelem v této oblasti podhodnocená. Pokud bychom však porovnali intenzitu hustotu bleskových výbojů v rámci těchto bouřek s předpovídanými hodnotami pro jižní Moravu, maximální hustota bleskových výbojů by už byla srovnatelná.

Tabulka 5.6: Počty jednotlivých druhů výbojů 29.8. 2020 zaznamenaných systémem LINET.

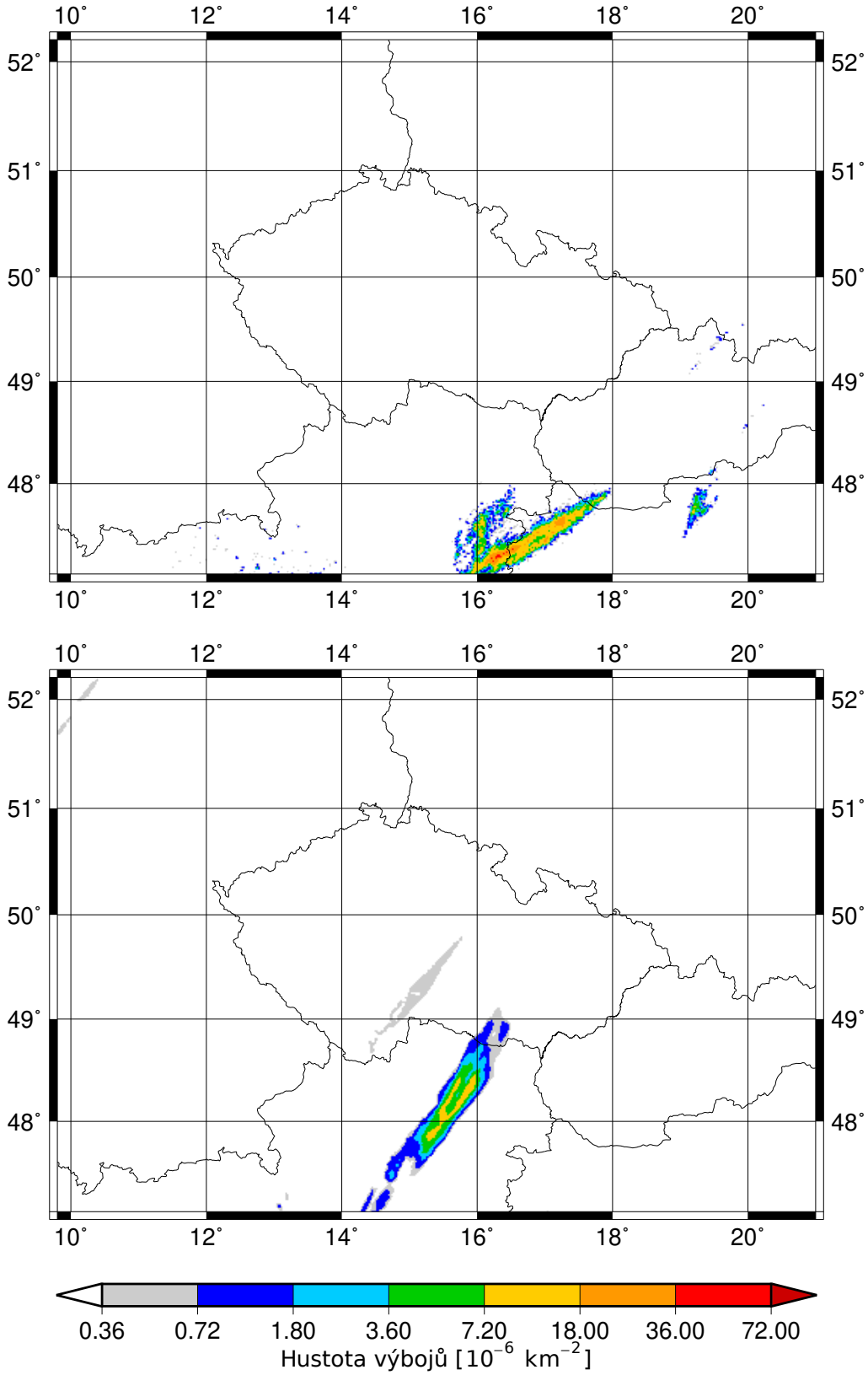
Druh výboje	**počet**
CG+	24 991
CG-	25 342
CC	30 985



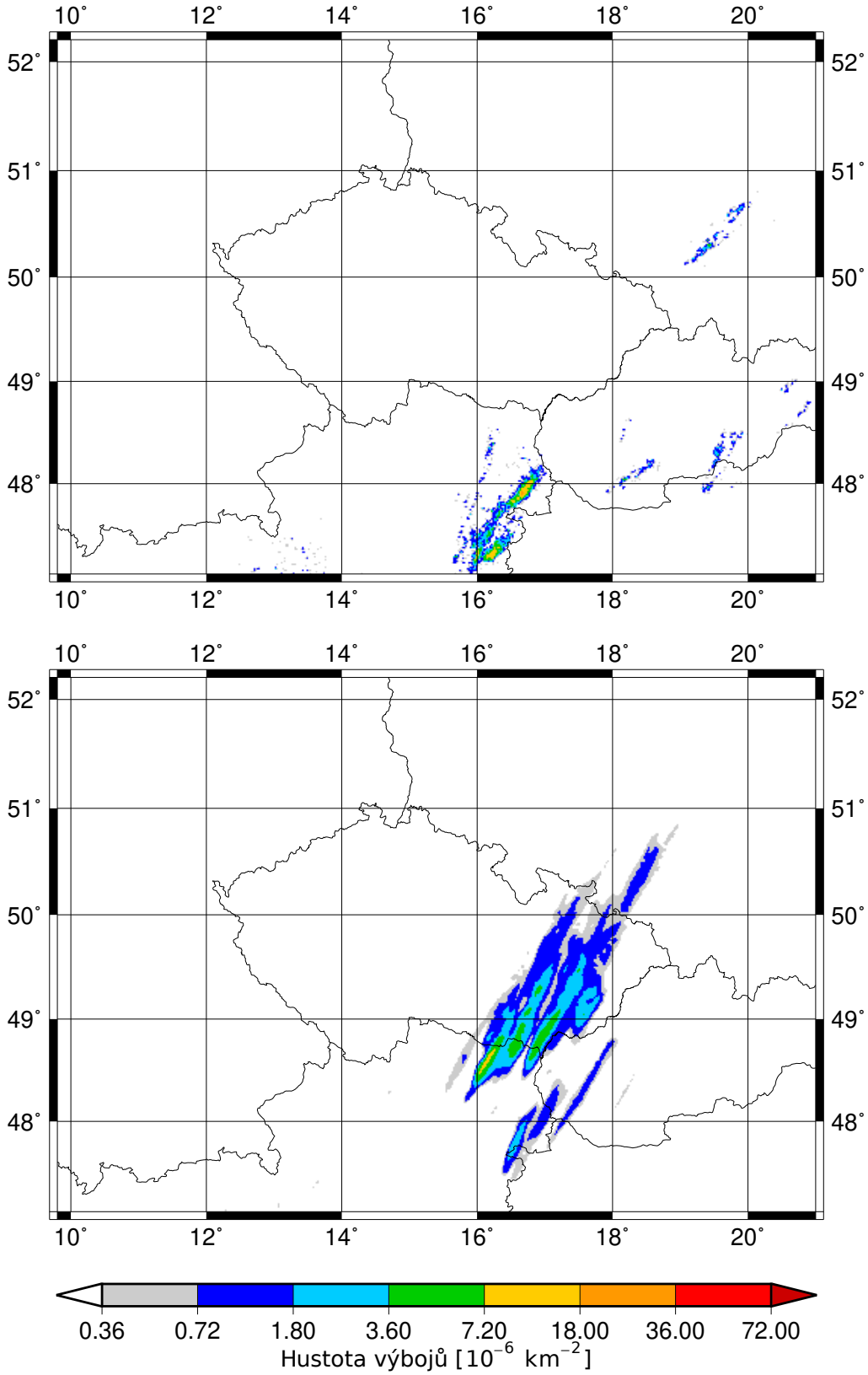
Obrázek 5.41: Denní chod maximální hustoty bleskových výbojů za sekundu v rámci celé oblasti pokryté měřenými daty dne 29. 8. 2020.

Na obrázku 5.44 pak vidíme, že bouřky, jejichž vznik model předpovídal již mezi 18 UTC a 21 UTC se na měřených datech objevují až nyní. Tyto bouřky vznikly během 21 UTC, tedy v noci ve 23 hodin středoevropského času. Tyto bouřky předpovídal model se zhruba hodinovým předstihem. Nicméně i nyní zde model nadhodnocuje oblast výskytu bleskových výbojů, což způsobuje nadhodnocování průměrné hustoty bleskových výbojů v tuto dobu. Předpovídaná i měřená intenzita je pak velice podobná.

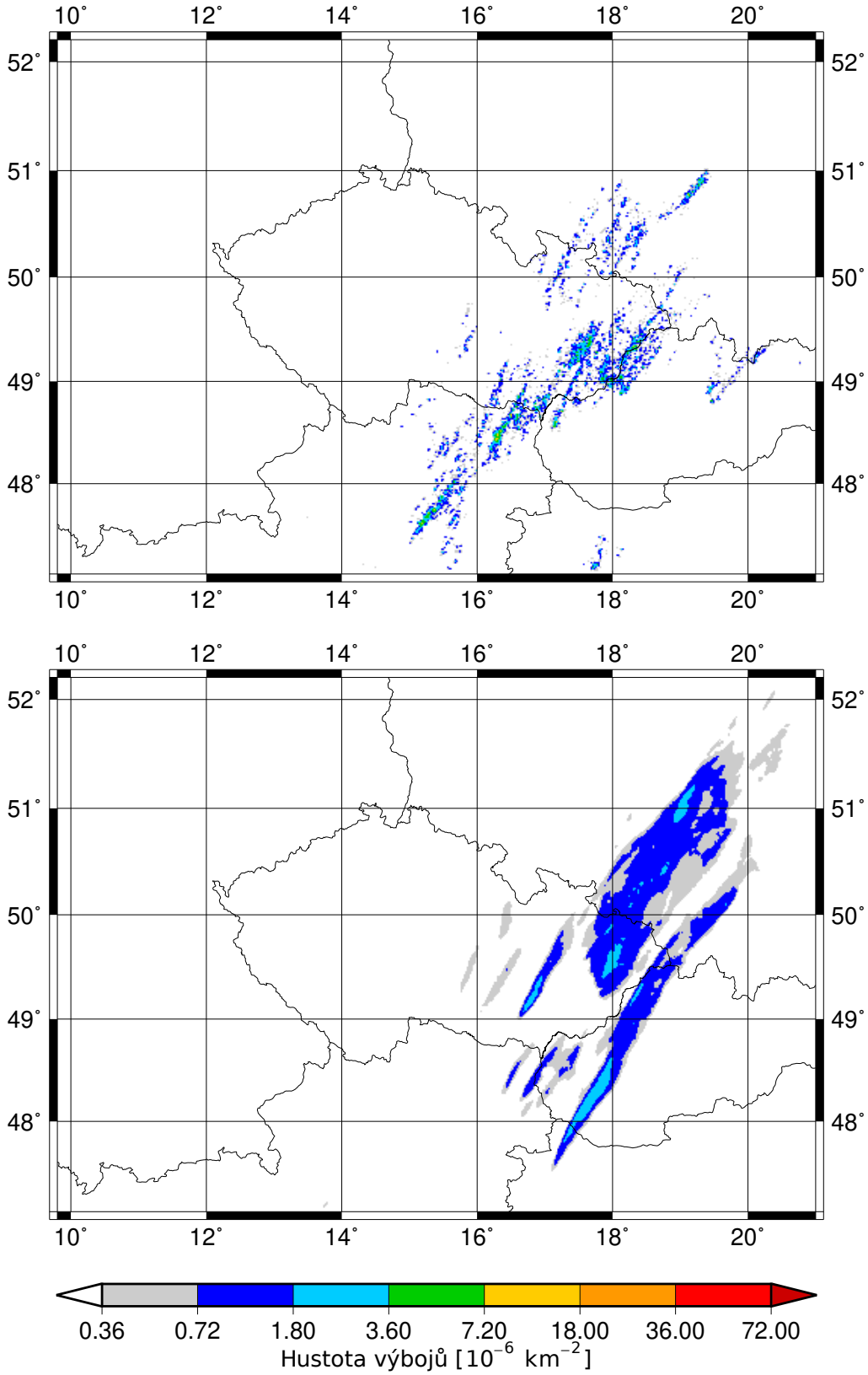
Podíváme-li se na kumulaci hustoty bleskových výbojů mezi 29. 8. 00 UTC a 30. 8. 00 UTC na obrázku 5.45, pak vidíme, že v tento den model nadhodnotil množství výbojů předpovídaných pro oblast Moravy. Plocha pokrytá bleskovými výboji je v rámci modelovaných dat také větší než ukazují měření. Podobně jako na studené frontě 22. 8. se opět ukazuje, že slabší bouřková činnost poblíž frontálního rozhraní bývá dobře postihnuta maximálními hodnotami, bývá však nadhodnocena plošným rozsahem. Dále vidíme, že model nesprávně simuloval oblast na hranicích Rakouska a Maďarska, kde se vyskytla velmi intenzivní bouřka, ale model ji zde nepředpovídal. Naopak předpovídané hustoty bleskových výbojů nad středním a severním Rakouskem jsou nadhodnocené, což souvisí s intenzivní bouřkou modelovanou během odpoledne. Velmi dobře je zachycena nevýrazná blesková aktivita mezi 11. a 14. stupněm východní délky zcela na jihu naší oblasti. Ještě si můžeme povšimnout rozdílného směru postupu bouřky detekované na hranicích Rakouska s Maďarskem, jejíž postup se od ostatních bouřek tohoto dne liší, přičemž jeho východní složka je výraznější. Směr postupu slabších bouřek pak byl předpovězen velmi dobře.



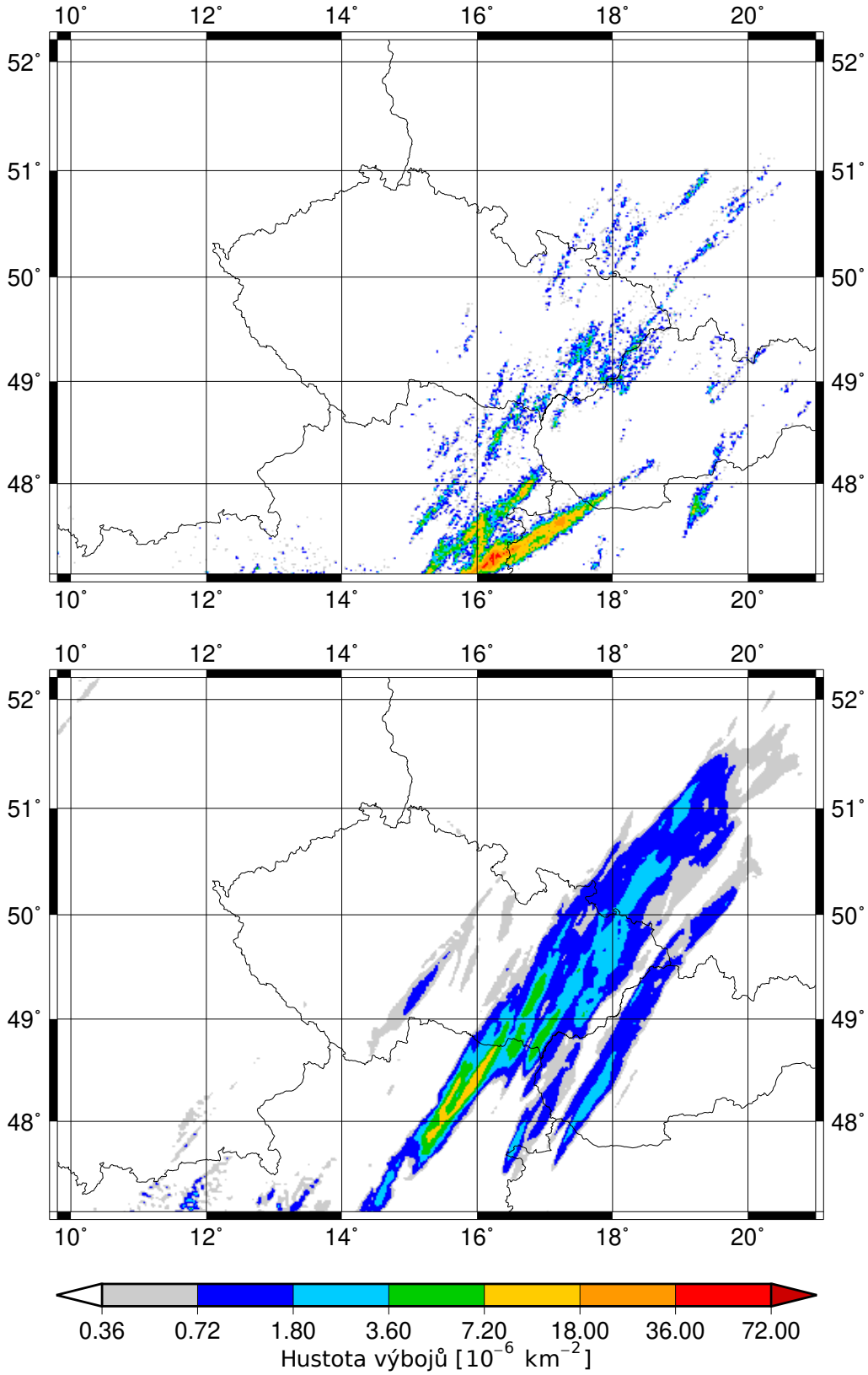
Obrázek 5.42: Tříhodinová kumulace hustoty bleskových výbojů končící 29. 8. v 18 UTC. Nahoře měření, dole model.



Obrázek 5.43: Tříhodinová kumulace hustoty bleskových výbojů končící 29. 8. ve 21 UTC. Nahoře měření, dole model.



Obrázek 5.44: Tříhodinová kumulace hustoty bleskových výbojů končící 30. 8. v 00 UTC. Nahoře měření, dole model.



Obrázek 5.45: Celodenní kumulace hustoty bleskových výbojů ze dne 29.8. Nahoře měření, dole model.

6. Diskuse

Námi využitý přístup k určení koeficientů úměrnosti ve schématu F_1 pomocí lineární regrese přes hustoty bleskových výbojů zprůměrované pro celou oblast se liší od přístupu využívaném v McCaul a kol. (2009). Tam byly koeficienty kalibrovány s pomocí maximální hodinové kumulace hustoty blesků v daný den a následně byla přes tato data provedena lineární regrese. Při pokusu o kalibraci na maximální hodnoty zaznamenané hustoty bleskových výbojů však docházelo k nadhodnocování hustoty bleskových výbojů pro většinu oblasti, proto byla kalibrace provedena výše zmíněným postupem. Maximální naměřená hustota bleskových výbojů může být navíc ovlivněna i objekty na povrchu, např. vysokými stožáry, které model nezaznamená, čímž může docházet ke zkreslení naměřených maximálních intenzit blesků, kdy je maximum vyšší, než by bylo bez terénních překážek.

V McCaul a kol. (2009) byla navíc naměřená data filtrována tak, aby byly zaznamenané výboje přiřazeny jednotlivým bleskům. Toto jsme neprováděli, čímž získáváme podobná výstupní pole jako ukazují měřená data z detekční sítě LINET.

Porovnáme-li hodnotu koeficientu úměrnosti f s koeficientem získaným McCaul a kol. (2009) a přepočítáme je do jednotek SI, zjistíme, že námi určený koeficient je výrazně vyšší. Konkrétně zhruba 30krát při využití vertikální rychlosti rozlišené dynamikou modelu a zhruba 45krát při využití w_u. To je způsobeno zejména tím, že v našem případě nebyly výboje přisuzovány jednotlivým bleskům. Částečně může k rozdílu přispět i jiné množství předpovídaných sněhových krupek v hladině izotermy -15°C či jiná velikost vertikální rychlostí v této výšce v rámci modelu ALADIN a WRF. Vertikální rychlosti rozlišené dynamikou modelu ALADIN se v této teplotní hladině pohybovaly kolem 6-10 $\mathrm{m{\cdot}s^{-1}}$, což je pro průměrnou kladnou vertikální rychlost realistická hodnota.

V konfiguraci modelu ALADIN používané v ČHMÚ je stále hluboká konvekce parametrizována, v McCaul a kol. (2009) však byla použitá pouze vertikální rychlost rozlišená dynamikou modelu (parametrizace hluboké konvekce zde nebyla použita ani v testech). Parametrizace pak opět může poměrně výrazně změnit koeficient úměrnosti, v našem případě ho zvýšila přibližně o tři poloviny ve srovnání s koeficientem získaným při použití vertikální rychlosti w_{dyn}. Rovněž výběr vertikální rychlosti ze schématu hluboké konvekce pro další výpočty značí, že ponechání parametrizace hluboké konvekce v modelu bylo správné rozhodnutí. Schéma diagnostiky blesků je nutné při každé změně fyziky modelu či jeho rozlišení opět zkalibrovat. Pokud by se parametrizace hluboké konvekce při zvýšení rozlišení již nevyužívala, jediná nutná úprava bude spočívat v úpravě koeficientu úměrnosti f.

Na šesti popsaných modelových případech bylo ukázáno, že model ALADIN je schopen velice dobře předpovídat hlubokou konvekci v prostoru a čase, což je jedna z obtížnějších situací, se kterými se numerická předpověď počasí potýká. Jak ukazují denní chody průměrné hustoty bleskových výbojů na obrázku 4.4, denní chody hluboké konvekce jsou v rámci těchto případů o něco opožděné oproti pozorováním. Denní chod hluboké konvekce však může být zkreslen přechodem front či jiným impulsem, který vynutí její vznik. Pro ověření rozdílů v denních chodech předpovídané a měřené konvekce by bylo vhodné využít jiných synoptic-

kých situací, kdy je konvekce určena pouze jejím denním chodem a není například vynucená výkluznými pohyby vzduchu na frontálním rozhraní. Rovněž by bylo vhodné použít jiný produkt než předpověď blesků, například simulaci radarových odrazivostí.

Na šesti vybraných případech byla demonstrována dobrá schopnost schématu popsaného v sekci 2.7 diagnostikovat množství bleskových výbojů. Přes jednoduchost schématu F_1 popsaného vztahem (2.12) se daří dosáhnout dobré korelace s měřeními. Navzdory očekáváním není plocha pokrytá nenulovou bleskovou aktivitou při použití samotného schématu F_1 podhodnocená. Zde se mohou projevovat rozdíly mezi projevy konvektivních bouří v Severní Americe a ve střední Evropě. Ve střední Evropě je (i s porovnáním s jinými bouřkami) blesková aktivita vázána převážně na oblasti výstupných konvektivních proudů, blesky iniciované dále od výstupného konvektivního proudu v rámci kovadliny jsou výrazně vzácnější. Potvrzuje se tedy, že schéma F_2 by v rámci lineární kombinace se schématem F_1 přineslo jen málo přidané hodnoty.

Červenou nití analýzy vybraných případů bylo podhodnocování maximálních hodnot bleskové aktivity a přílišná plochost modelovaných dat ve srovnání s měřeními. Řešením tohoto problému by mohlo být využití vertikální rychlosti ve vztahu 2.12 ve vyšší než 1. mocnině. Nabízely by se hodnoty kolem 2. Tím by se zvýraznila centra nejsilnějších výstupných proudů, kde se objevuje nejvíce blesků. Druhou možností je pak samozřejmě nelineární závislost na množství sněhových krupek. Testy ukázaly, že centra nejintenzivnějších výstupných proudů nejsou v některých případech zcela totožná s centry s nejvyšším množstvím sněhových krupek. Obě pole jsou však ve většině případů takřka totožná. Pro praktické výsledky by pak pravděpodobně stačila úprava jen jednoho z těchto parametrů.

Dalším faktorem ovlivňujícím předpověď počtu výbojů mohou být různé počty výbojů v rámci jednoho blesku při různé intenzitě bouře a také různé zastoupení druhů výbojů (CC, CG+, CG-). Tyto výboje se v průměrných hodnotách mohou lišit proudovou amplitudou, mohou tedy přenášet jiné množství náboje, jak ukazuje například Arnoštová (2020). Na základě analýzy těchto šesti vybraných případů se však zdá, že k velkým rozdílům mezi jednotlivými situacemi nedochází, přestože poměrné zastoupení druhů výbojů se mezi modelovými případy liší. Model vždy trochu podhodnocuje vysoké hodnoty hustot bleskových výbojů a naopak nadhodnocuje ty nízké, zejména plochou. I tento problém by bylo možné částečně odstranit zanesením nelinearity do vztahu (2.12), protože by docházelo ke strmějšímu nárůstu modelovaných hodnot v prostoru a tedy i plochá minima by mohla být odstraněna.

Samozřejmě zanesení nelinearity do vztahu (2.12) vede k zesložitění tohoto schématu. Při případné kalibraci by bylo nutné se zabývat ještě dalším koeficientem, který by reprezentoval příslušnou mocninu. Případně také může docházet horší předvídatelnosti takového schématu, protože malá změna vertikální rychlosti bude mít za následek větší změnu předpovídaných hodnot hustoty bleskových výbojů. Úprava schématu pro částečné zlepšení předpovědi pro určité dny tedy může vést k riziku výrazně horší předpovědi v jiné dny, kdy nebude konvekce modelem správně podchycena.

Kalibrace byla zkušebně provedena i pro úpravu schématu F_1, značeného $\widetilde{F_1}$, kdy byla použita vertikální rychlost ve druhé mocnině, jeho předpis byl tedy

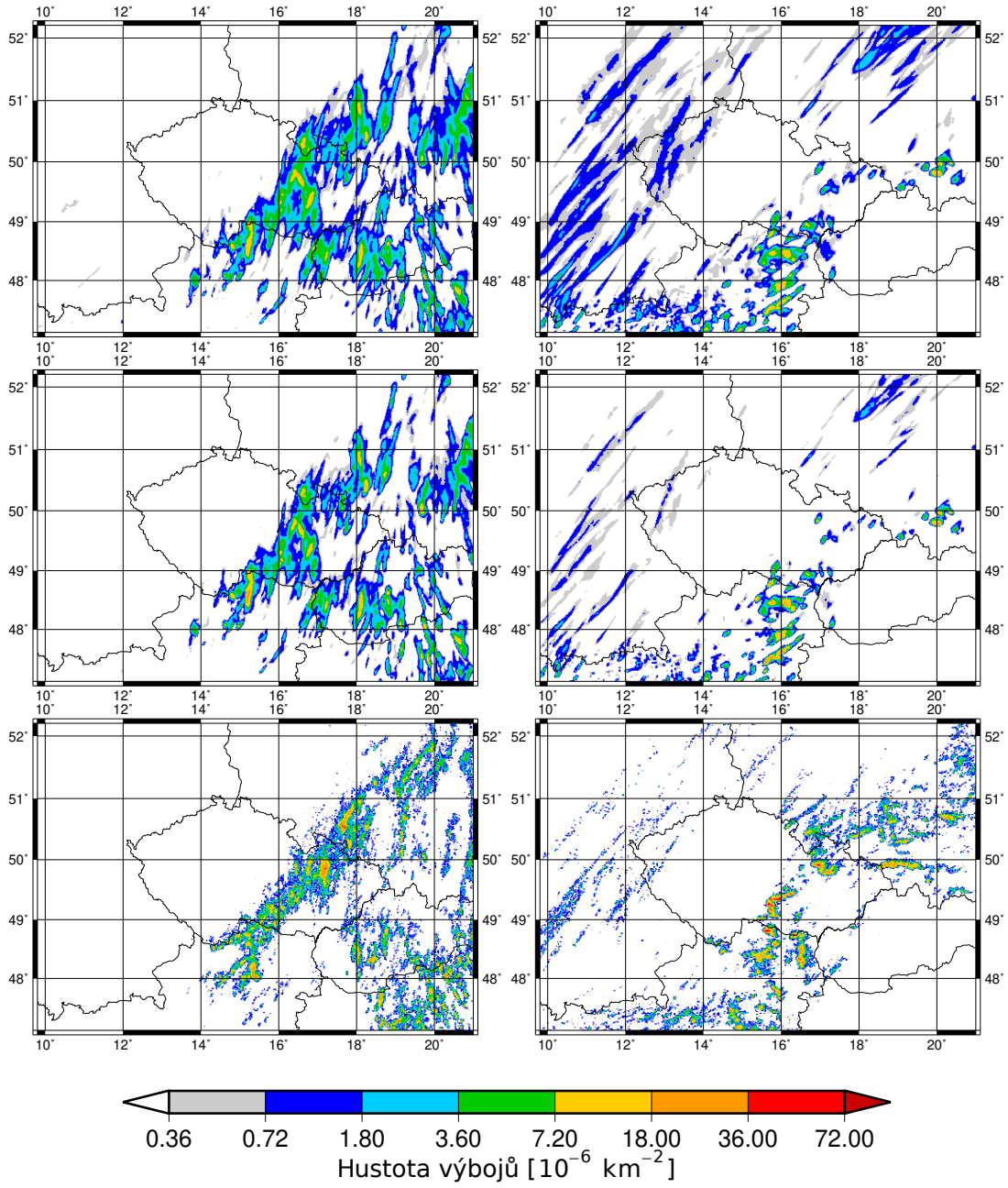
$$\widetilde{F_1} = g\left[\left(w^2 q_g\right)_m\right], \tag{6.1}$$

kdy koeficient úměrnosti $g = (7{,}6 \pm 0{,}4) \cdot 10^{-4}\,\mathrm{km}^{-4}\cdot\mathrm{s}$ byl určen obdobným způsobem jako koeficient f u schématu F_1 a vertikální rychlost byla vybrána ta, kterou můžeme získat ze schématu 3MT ze vztahu (2.11). Na obrázku 6.1 se můžeme podívat na porovnání denních kumulací hustoty bleskových výbojů určené schématem F_1 a jeho upravenou verzí, kde vystupuje rychlost ve druhé mocnině. Spíše než ke zvýraznění maxim dochází k lepšímu vyjádření nízkých hodnot bleskové aktivity, jak je vidět na případu nočních bouřek na studené frontě 22. 8. U maximálních hodnot dochází také k určitému zlepšení, je však méně výrazné. Naopak je podhodnocená plocha pokrytá nenulovou bleskovou aktivitou, zejména pak dochází ke zhoršení v oblasti severní Moravy a Polska. I denní chod je vyjádřen hůře v případě schématu $\widetilde{F_1}$, dokonce je malinko horší než při použití vertikální rychlosti dané dynamikou modelu.

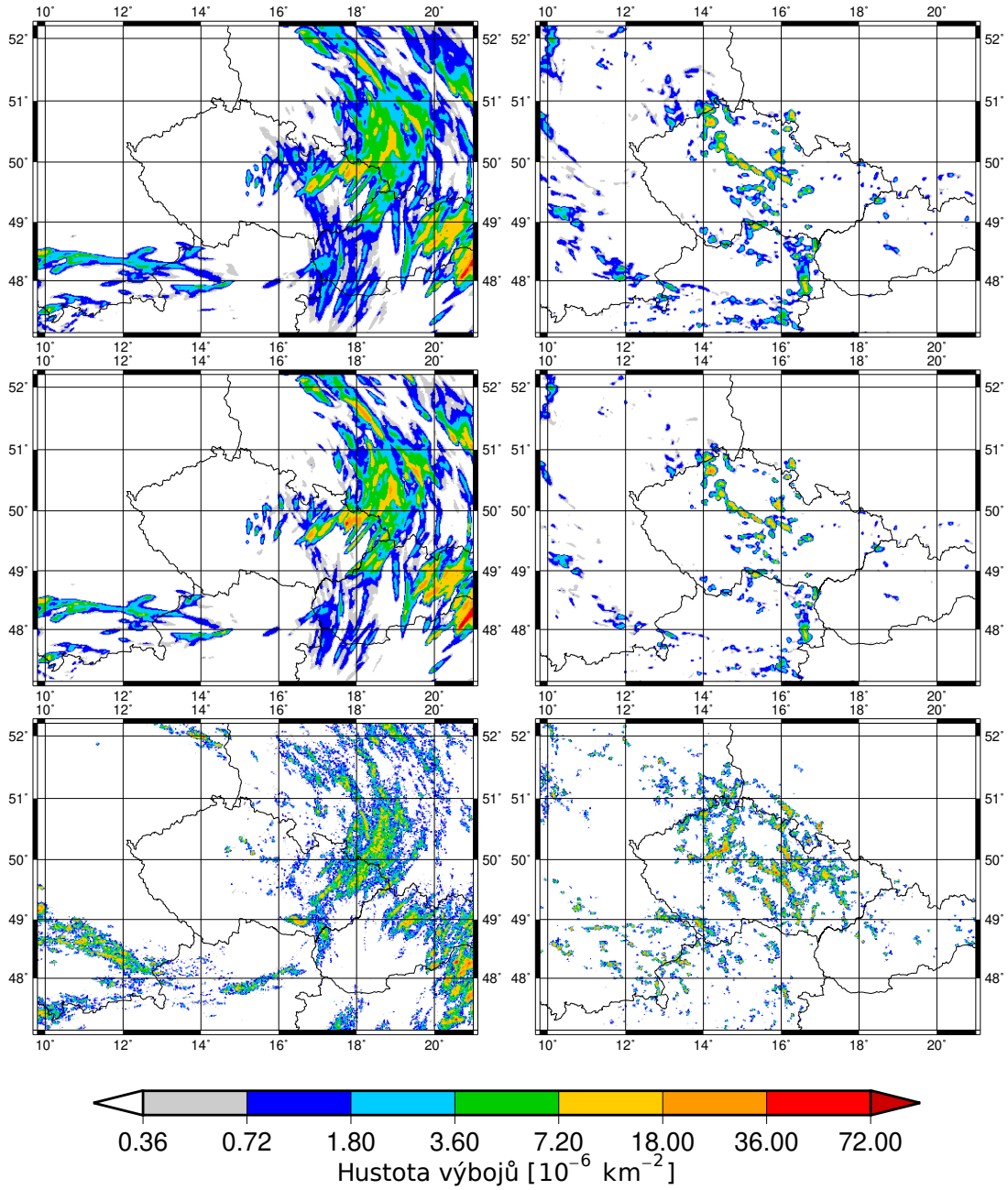
Na obrázku 6.2 pak vidíme ukázku dvou případů, kdy upravené schéma $\widetilde{F_1}$ nepřináší žádnou výhodu, naopak dochází k přílišnému zvýraznění intenzivních bouřek 26. 6., kdy jsou vertikální rychlosti velmi vysoké a jejich umocněním pak dochází k tomuto nadhodnocení. Na případu z 14. 8. pak zase vidíme jen nevýraznou úpravu maximálních hodnot hustoty bleskových výbojů, dochází však k dalšímu zmenšení plochy pokryté bleskovou aktivitou vyšší než $10^{-4}\,\mathrm{km}^{-2}\cdot\mathrm{s}^{-1}$.

Při využití schématu F_1 možné pozorovat, že i při ne zcela správně předpovězené situaci odpoledne 22. 8. 2020, kdy sice model nepostihl dostatečně dobře čáru instability nad Českou republikou, přesto poskytl určité indicie vedoucí k potenciální bleskové aktivitě na Moravě, zejména pak večer (obrázek 5.37). Jedná se tedy o vcelku robustní diagnostiku. Pokud bychom zanesli do schématu nelinearitu, mohli bychom o tuto robustnost přijít.

Analýza vybraných modelových případů rovněž ukazuje schopnost diagnostiky bleskové aktivity poměrně dobře vyjadřovat sílu konvekce. To vyplývá i ze vztahu (2.12), kterým je použité schéma popsáno, v němž se vyskytuje v součinu poměrné množství sněhových krupek a kladná složka vertikální rychlosti proudění. Překročení určité prahové hodnoty množství sněhových krupek je diagnostikou v modelu využíváno pro předpovídání výskytu krup, které bývají jedním z projevů intenzivních konvektivních bouří. Kladná vertikální složka rychlosti pak vyjadřuje intenzitu samotného výstupného konvektivního proudu. Samozřejmě není vhodné intenzitu konvekce předpovídat jen na základě výstupů z diagnostiky blesků, je nutné tyto informace porovnávat spolu s dalšími produkty modelu ALADIN či jiných modelů a také s daty z družic, radarů a detekce blesků. Výstup z diagnostiky blesků je pak dalším užitečným nástrojem pro kvantifikování hrozeb spojených s konvektivními bouřemi.



Obrázek 6.1: Srovnání schématu F_1 (nahoře) a jeho upravené verze s vertikální rychlostí ve 2. mocnině (uprostřed) s měřeními (dole). Celodenní kumulované hodnoty z 7. 6. 2020 (vlevo) a z 22. 8. 2020 (vpravo).



Obrázek 6.2: Srovnání schématu F_1 (nahoře) a jeho upravené verze s vertikální rychlostí ve 2. mocnině (uprostřed) s měřeními (dole). Celodenní kumulované hodnoty z 26. 6. 2020 (vlevo) a z 14. 8. 2020 (vpravo).

7. Závěr

V rámci této práce byly nejprve uvedeny základní informace týkající se numerických modelů pro předpověď počasí. Zejména se tato část zabývala popisem modelu na omezené oblasti ALADIN a jeho modelové konfigurace v ČHMÚ, která využívá nehydrostatického dynamického jádra. Dále se práce podrobněji věnuje popisu těch částí modelu ALADIN, které souvisely s parametrizací diagnostiky blesků. Také se dotýká použitého souřadnicového systému a mapového zobrazení. Taktéž byly stručně popsány základní principy reprezentace atmosféry v rámci modelu včetně fázových přechodů vody. Poněkud podrobněji byly vysvětleny charakteristiky sněhových krupek, jejichž sedimentace je shodná se sedimentací srážkové vody, zatímco tlak vodních par nad nimi je shodný s tlakem vodních par nad sněhem. Dále byly nastíněny základní charakteristiky používaného schématu hluboké konvekce s označením 3MT a nakonec bylo představeno použité schéma diagnostiky blesků. To je založeno na lineární kombinaci dvou schémat. První je založeno na vertikálním toku krupek v hladině konstantní teploty -15°C, druhé pak na vertikálně integrovaném množství všech hydrometeorů v tuhé fázi.

V kapitole 4 pak byl popsán postup kalibrace tohoto schématu diagnostiky blesků s použitím šesti vybraných situací. Kalibrace byla provedena pouze na 24hodinové integraci modelu z analýzy v 00 UTC daného dne, protože 12hodinová integrace z analýzy ve 12 UTC byla ovlivněna spin-up efektem v poli sněhových krupek. Bylo využito pouze schématu F_1 popsaného rovnicí (2.12) bez lineární kombinace se schématem F_2 popsaným rovnicí (2.12), protože schéma F_2 nepřináší zlepšení prostorového rozložení předpovídaných bleskových výbojů v rámci střední Evropy, což bylo jeho původním záměrem. Koeficient úměrnosti schématu F_1 pak byl určen lineární regresí procházející počátkem přes hodinové kumulace hustoty bleskových výbojů průměrovaných přes celou oblast pokrytou měřenými daty. Do kalibrace vstupovaly jen hodnoty, kdy naměřené průměrné hustoty bleskových výbojů byly vyšší než $10^{-6}\,\mathrm{km}^{-2}\cdot\mathrm{s}^{-1}$. Výsledný koeficient úměrnosti pak činil $f = (1{,}96 \pm 0{,}10)\,\mathrm{km}^{-3}$. Denní chody bleskové aktivity mají v rámci modelu průběh podobný měřením v prostoru i čase. Maximální hodnoty jsou oproti měřením podhodnocené.

V kapitole 5 pak byla správnost kalibrace ověřena na šesti modelových situacích, které zahrnovaly případy výskytu silných i slabších konvektivních bouří při přechodu front i v oblasti nevýrazného tlakového pole. Schéma diagnostiky blesků zde ukazuje poměrně dobrou schopnost předpovídání bleskové aktivity. Dochází však k lehkému plošnému nadhodnocování méně intenzivní bleskové aktivity v blízkosti atmosférických front a naopak k podhodnocování maximálních hodnot hustoty bleskových výbojů v rámci oblasti. Tato nerovnoměrnost by mohla být případně odstraněna zvýšením mocniny vertikální rychlosti v jejím součinu s množstvím sněhových krupek. Tím by se však schéma stalo složitějším a mohlo by případně docházet k velkým změnám předpovídané bleskové aktivity při malých změnách ve vertikální rychlosti proudění či množství sněhových krupek. S použitím druhé mocniny vertikální rychlosti se však ukazuje, že ke zlepšení mnohdy nedochází a naopak se mohou produkovat méně konzistentní předpovědi. Případné vylepšení schématu diagnostiky blesků může být předmětem dalšího výzkumu.

Seznam použité literatury

Amatérská meteorologická společnost (2021a). Bouřky 6. a 7. 6. na Moravě. URL https://bourky.com/bourky-6-a-7-6-na-morave/.

Amatérská meteorologická společnost (2021b). Bouřky 13.6. a 14.6. 2020 ve východních čechách a na Moravě. URL https://bourky.com/bourky-13-a-14-6-2020-ve-vychodnich-cechach-a-na-morave/.

Arnoštová, M. (2020). Aktivita blesků v Česku v oblastech MSC. Praha, 2020. Bakalářská práce. Univerzita Karlova, Matematicko-fyzikální fakulta, Katedra fyziky atmosféry. Vedoucí práce Žák, Michal.

Baťka, M. (2002). Optimalizace rozlišení LAM. Část II. Optimální volba parametrů Lambertova konformního zobrazení. *Meteorologické zprávy*, **55** (2), 33–39. URL https://www.chmi.cz/files/portal/docs/reditel/SIS/casmz/assets/2002/Meteo-2002-02.pdf.

Betz, H., Schmidt, K., Laroche, P., Blanchet, P., Oettinger, W., Defer, E., Dziewit, Z. a Konarski, J. (2009). LINET—An international lightning detection network in Europe. *Atmospheric Research*, **91**, 564–573. doi: 10.1016/j.atmosres.2008.06.012.

Betz, H. a Meneux, B. (2014). LINET systems - 10 years experience: 3D lightning detection in the VLF/LF regime. *2014 International Conference on Lightning Protection, ICLP 2014*, pages 1553–1557. doi: 10.1109/ICLP.2014.6973377.

Brothers, M. D., Bruning, E. C. a Mansell, E. R. (2018). Investigating the Relative Contributions of Charge Deposition and Turbulence in Organizing Charge within a Thunderstorm. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **75**(9), 3265 – 3284. doi: 10.1175/JAS-D-18-0007.1. URL https://journals.ametsoc.org/view/journals/atsc/75/9/jas-d-18-0007.1.xml.

Brožková, R., Bučánek, A., Mašek, J., Smolíková, P. a Trojáková, A. (2019). Nová provozní konfigurace modelu ALADIN ve vysokém rozlišení. *Meteorologické zprávy*, **72**(5), 129–139. URL http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/reditel/SIS/casmz/assets/2019/chmu_mz_5-19.pdf.

Catry, B., Geleyn, J.-F., Tudor, M., Bénard, P. a Trojáková, A. (2007). Flux-conservative thermodynamic equations in a mass-weighted framework. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, **59**(1), 71–79. doi: 10.1111/j.1600-0870.2006.00212.x. URL https://doi.org/10.1111/j.1600-0870.2006.00212.x.

Catry, B. (2007). Microphysical processes (L05). Presentation. ALARO Training Course, Radostovice. URL https://www.rclace.eu/File/ALARO/TCAO_Radostovice2007/L05_BC_microphys2.pdf.

Česká meteorologická společnost (2021). Elektronický meteorologický slovník výkladový a terminologický (eMS). URL http://slovnik.cmes.cz.

ČHMÚ (2020). Aktuální synoptická situace. URL https://www.chmi.cz/aktualni-situace/aktualni-stav-pocasi/evropa/synopticka-situace.

de Siqueira Santos, S., Takahashi, D. Y., Nakata, A. a Fujita, A. (2013). A comparative study of statistical methods used to identify dependencies between gene expression signals. *Briefings in Bioinformatics*, **15**(6), 906–918. ISSN 1467-5463. doi: 10.1093/bib/bbt051. URL https://doi.org/10.1093/bib/bbt051.

Füllekrug, M. (2017). Introduction to lightning detection. *Weather*, **72** (2), 32–35. doi: https://doi.org/10.1002/wea.2810. URL https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/wea.2810.

Geleyn, J., Catry, B., Bouteloup, Y. a Brožková, R. (2008). A statistical approach for sedimentation inside a microphysical precipitation scheme. *Tellus A*. doi: 10.3402/tellusa.v60i4.15375.

Gerard, L. (2015). *Model resolution issues and new approaches in the convection-permitting regimes*, chapter Chapter 19, pages 113–134. doi: 10.1142/9781783266913_0022. URL https://www.worldscientific.com/doi/abs/10.1142/9781783266913_0022.

Gerard, L., Piriou, J.-M., Brožková, R., Geleyn, J.-F. a Banciu, D. (2009). Cloud and Precipitation Parameterization in a Meso-Gamma-Scale Operational Weather Prediction Model. *Monthly Weather Review*, **137**(11), 3960 – 3977. doi: 10.1175/2009MWR2750.1. URL https://journals.ametsoc.org/view/journals/mwre/137/11/2009mwr2750.1.xml.

Ginderachter, M. V. (2014). Selected issues in Microphysics. Presentation. Alaro-1 Working Days, Vídeň. URL www.rclace.eu/File/ALARO/alaro1_wd14vi/alaro1wd_MvG_microphys_may14.pdf.

Kostinskiy, A. Y., Marshall, T. C. a Stolzenburg, M. (2020). The Mechanism of the Origin and Development of Lightning From Initiating Event to Initial Breakdown Pulses (v.2). *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **125** (22), e2020JD033191. doi: https://doi.org/10.1029/2020JD033191. URL https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2020JD033191.

Laprise, R. (1992). The Euler Equations of Motion with Hydrostatic Pressure as an Independent Variable. *Monthly Weather Review*, **120** (1), 197 – 207. doi: 10.1175/1520-0493(1992)120<0197:TEEOMW>2.0.CO;2. URL https://journals.ametsoc.org/view/journals/mwre/120/1/1520-0493_1992_120_0197_teeomw_2_0_co_2.xml.

Liu, Y., Daum, P., McGraw, R. a Wood, R. (2006). Parameterization of the Autoconversion Process. Part II: Generalization of Sundqvist-Type Parameterizations. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **63**, 1103–1109. doi: 10.1175/jas3675.1.

McCaul, Eugene W., J., Goodman, S. J., LaCasse, K. M. a Cecil, D. J. (2009). Forecasting Lightning Threat Using Cloud-Resolving Model Simulations. *Weather and Forecasting*, **24**(3), 709–729. ISSN 0882-8156. doi: 10.

1175/2008WAF2222152.1. URL https://doi.org/10.1175/2008WAF2222152.1.

R Core Team (2021). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL https://www.R-project.org/.

Řezáčová, D., Novák, P., Kašpar, M. a Setvák, M. (2007). *Fyzika oblaků a srážek*. Academia, Praha. ISBN 978-80-200-1505-1.

Rison, W., Krehbiel, P., Stock, M., Edens, H., Shao, X.-M., Thomas, R., Stanley, M. a Zhang, Y. (2016). Observations of narrow bipolar events reveal how lightning is initiated in thunderstorms. *Nature Communications*, **7**, 10721. doi: 10.1038/ncomms10721.

Simmons, A. J. a Burridge, D. M. (1981). An Energy and Angular-Momentum Conserving Vertical Finite-Difference Scheme and Hybrid Vertical Coordinates. *Monthly Weather Review*, **109**(4), 758 – 766. doi: 10.1175/1520-0493(1981)109<0758:AEAAMC>2.0.CO;2. URL https://journals.ametsoc.org/view/journals/mwre/109/4/1520-0493_1981_109_0758_aeaamc_2_0_co_2.xml.

Termonia, P., Fischer, C., Bazile, E., Bouyssel, F., Brožková, R., Bénard, P., Bochenek, B., Degrauwe, D., Derková, M., El Khatib, R., Hamdi, R., Mašek, J., Pottier, P., Pristov, N., Seity, Y., Smolíková, P., Španiel, O., Tudor, M., Wang, Y., Wittmann, C. a Joly, A. (2018). The ALADIN System and its canonical model configurations AROME CY41T1 and ALARO CY40T1. *Geoscientific Model Development*, **11**(1), 257–281. doi: 10.5194/gmd-11-257-2018. URL https://gmd.copernicus.org/articles/11/257/2018/.

Wei, T. a Simko, V. (2017). *R package "corrplot": Visualization of a Correlation Matrix*. URL https://github.com/taiyun/corrplot. (Version 0.84).

Wessel, P., Smith, W. H. F., Scharroo, R., Luis, J. a Wobbe, F. (2013). Generic Mapping Tools: Improved Version Released. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, **94**(45), 409–410. doi: https://doi.org/10.1002/2013EO450001. URL https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/2013EO450001.

Wetter 3 (2021). GFS Standardkarten (archiv). URL http://www1.wetter3.de/archiv_gfs_dt.html.

Wickham, H. (2016). *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. Springer-Verlag New York. ISBN 978-3-319-24277-4. URL https://ggplot2.tidyverse.org.

Seznam obrázků

3.1 Doména modelu. Zeleným obdélníkem je vyznačená oblast pokrytá měřenými daty z detekční sítě LINET. 17

4.1 Chod průměrné bleskové aktivity. Průměr ze všech simulací z analýzy ve 12 UTC. Povšimněme si výrazného spin-up efektu v průběhu prvních pěti hodin simulace. Vykresleno pomocí knihovny ggplot2 (Wickham (2016)). 19
4.2 Korelační koeficienty schémat F_1 a F_2 v porovnání s měřeními. Plochy kruhů ukazují absolutní hodnotu korelačních koeficientů (Wei a Simko (2017)). 20
4.3 Korelační koeficienty při využití různých vertikálních rychlostí. Plochy kruhů ukazují absolutní hodnotu korelačních koeficientů. . 20
4.4 Denní chod průměrné hustoty bleskových výbojů. Průměr ze všech simulací z analýzy v 00 UTC. 22
4.5 Histogramy rozložení četnosti průměrné hustoty výbojů pro měřená a modelovaná data s využitím různých vertikálních rychlostí. . . . 24
4.6 Histogramy rozložení četnosti maximální hustoty výbojů pro měřená a modelovaná data v rámci celé oblasti pokryté daty s využitím různých vertikálních rychlostí. 25
4.7 Denní chod maximální bleskové aktivity. Průměr ze všech simulací z analýzy v 00 UTC. 26
4.8 Hodinová kumulace hustoty bleskových výbojů končící dne 7. 6. v 15 UTC. Nahoře měření, dole model s využitím w_u. 27
4.9 Denní chod relativní velikosti plochy s hustotou bleskové aktivity vyšší než $10^{-4}\,\mathrm{km}^{-2}\cdot\mathrm{s}^{-1}$. Průměr ze všech simulací z analýzy v 00 UTC. 28
4.10 Denní chod relativní velikosti plochy s hustotou bleskové aktivity vyšší než $2 \cdot 10^{-4}\ \mathrm{km}^{-2}\cdot\mathrm{s}^{-1}$. Průměr ze všech simulací z analýzy v 00 UTC. 28
4.11 Denní chod relativní velikosti plochy s hustotou bleskové aktivity vyšší než $5 \cdot 10^{-4}\ \mathrm{km}^{-2}\cdot\mathrm{s}^{-1}$. Průměr ze všech simulací z analýzy v 00 UTC. 29
4.12 Denní chod relativní velikosti plochy s hustotou bleskové aktivity vyšší než $10^{-3}\,\mathrm{km}^{-2}\cdot\mathrm{s}^{-1}$. Průměr ze všech simulací z analýzy v 00 UTC. 29

5.1 Synoptická situace ze dne 7. 6. 2020 ve 12 UTC (ČHMÚ (2020)) . 30
5.2 Denní chod průměrné hustoty bleskových výbojů za sekundu v rámci celé oblasti pokryté měřenými daty dne 7. 6. 2020. 31
5.3 Denní chod maximální hustoty bleskových výbojů za sekundu v rámci celé oblasti pokryté měřenými daty dne 7. 6. 2020. 32
5.4 Tříhodinová kumulace hustoty bleskových výbojů končící dne 7.6. v 15 UTC. Nahoře měření, dole model. 34
5.5 Tříhodinová kumulace hustoty bleskových výbojů končící dne 7.6. v 18 UTC. Nahoře měření, dole model. 35
5.6 Tříhodinová kumulace srážkových úhrnů končící 7.6. v 18 UTC. . 36

5.7 Tříhodinová kumulace hustoty bleskových výbojů končící dne 7.6. v 21 UTC. Nahoře měření, dole model. 37
5.8 Celodenní kumulace hustoty bleskových výbojů ze dne 7.6. Nahoře měření, dole model. 38
5.9 Synoptická situace ze dne 13. 6. 2020 ve 12 UTC (ČHMÚ (2020)) 39
5.10 Denní chod průměrné hustoty bleskových výbojů za sekundu v rámci celé oblasti pokryté měřenými daty dne 13. 6. 2020. 41
5.11 Denní chod maximální hustoty bleskových výbojů za sekundu v rámci celé oblasti pokryté měřenými daty dne 13. 6. 2020. . . . 41
5.12 Tříhodinová kumulace hustoty bleskových výbojů končící 13.6. v 15 UTC. Nahoře měření, dole model. 42
5.13 Tříhodinová kumulace hustoty bleskových výbojů končící 13. 6. v 18 UTC. Nahoře měření, dole model. 43
5.14 Tříhodinová kumulace hustoty bleskových výbojů končící 13. 6. ve 21 UTC. Nahoře měření, dole model. 44
5.15 Celodenní kumulace hustoty bleskových výbojů ze dne 13.6. Nahoře měření, dole model. 45
5.16 Synoptická situace ze dne 26. 6. 2020 ve 12 UTC (ČHMÚ (2020)) 46
5.17 Mapa relativní topografie mezi hladinami 500 a 1000 hPa ze dne 26. 6. 2020 ve 12 UTC z analýzy modelu GFS (Wetter 3 (2021)) . 47
5.18 Denní chod průměrné hustoty bleskových výbojů za sekundu v rámci celé oblasti pokryté měřenými daty dne 26. 6. 2020. 48
5.19 Denní chod maximální hustoty bleskových výbojů za sekundu v rámci celé oblasti pokryté měřenými daty dne 26. 6. 2020. . . . 49
5.20 Tříhodinová kumulace hustoty bleskových výbojů končící 26. 6. ve 12 UTC. Nahoře měření, dole model. 50
5.21 Tříhodinová kumulace hustoty bleskových výbojů končící 26. 6. v 15 UTC. Nahoře měření, dole model. 51
5.22 Tříhodinová kumulace hustoty bleskových výbojů končící 26. 6. v 18 UTC. Nahoře měření, dole model. 52
5.23 Tříhodinová kumulace hustoty bleskových výbojů končící 26. 6. ve 21 UTC. Nahoře měření, dole model. 53
5.24 Celodenní kumulace hustoty bleskových výbojů ze dne 26.6. Nahoře měření, dole model. 54
5.25 Synoptická situace ze dne 14. 8. 2020 ve 12 UTC (ČHMÚ (2020)) 55
5.26 Denní chod průměrné hustoty bleskových výbojů za sekundu v rámci celé oblasti pokryté měřenými daty dne 14. 8. 2020. 57
5.27 Denní chod maximální hustoty bleskových výbojů za sekundu v rámci celé oblasti pokryté měřenými daty dne 14. 8. 2020. . . . 57
5.28 Tříhodinová kumulace hustoty bleskových výbojů končící 14. 8. v 15 UTC. Nahoře měření, dole model. 58
5.29 Tříhodinová kumulace hustoty bleskových výbojů končící 14. 8. v 18 UTC. Nahoře měření, dole model. 59
5.30 Tříhodinová kumulace hustoty bleskových výbojů končící 14. 8. ve 21 UTC. Nahoře měření, dole model. 60
5.31 Celodenní kumulace hustoty bleskových výbojů ze dne 14.8. Nahoře měření, dole model. 61
5.32 Synoptická situace ze dne 22. 8. 2020 ve 12 UTC (ČHMÚ (2020)) 62

5.33 Denní chod průměrné hustoty bleskových výbojů za sekundu v rámci celé oblasti pokryté měřenými daty dne 22. 8. 2020. 64
5.34 Denní chod maximální hustoty bleskových výbojů za sekundu v rámci celé oblasti pokryté měřenými daty dne 22. 8. 2020. . . . 64
5.35 Tříhodinová kumulace hustoty bleskových výbojů končící 22. 8. v 09 UTC. Nahoře měření, dole model. 65
5.36 Tříhodinová kumulace hustoty bleskových výbojů končící 22. 8. v 15 UTC. Nahoře měření, dole model. 66
5.37 Tříhodinová kumulace hustoty bleskových výbojů končící 22. 8. v 18 UTC. Nahoře měření, dole model. 67
5.38 Celodenní kumulace hustoty bleskových výbojů ze dne 22.8. Nahoře měření, dole model. 68
5.39 Synoptická situace ze dne 29. 8. 2020 ve 12 UTC (ČHMÚ (2020)) 69
5.40 Denní chod průměrné hustoty bleskových výbojů za sekundu v rámci celé oblasti pokryté měřenými daty dne 29. 8. 2020. 70
5.41 Denní chod maximální hustoty bleskových výbojů za sekundu v rámci celé oblasti pokryté měřenými daty dne 29. 8. 2020. . . . 71
5.42 Tříhodinová kumulace hustoty bleskových výbojů končící 29. 8. v 18 UTC. Nahoře měření, dole model. 72
5.43 Tříhodinová kumulace hustoty bleskových výbojů končící 29. 8. ve 21 UTC. Nahoře měření, dole model. 73
5.44 Tříhodinová kumulace hustoty bleskových výbojů končící 30. 8. v 00 UTC. Nahoře měření, dole model. 74
5.45 Celodenní kumulace hustoty bleskových výbojů ze dne 29.8. Nahoře měření, dole model. 75

6.1 Srovnání schématu F_1 (nahoře) a jeho upravené verze s vertikální rychlostí ve 2. mocnině (uprostřed) s měřeními (dole). Celodenní kumulované hodnoty z 7. 6. 2020 (vlevo) a z 22. 8. 2020 (vpravo). 79
6.2 Srovnání schématu F_1 (nahoře) a jeho upravené verze s vertikální rychlostí ve 2. mocnině (uprostřed) s měřeními (dole). Celodenní kumulované hodnoty z 26. 6. 2020 (vlevo) a z 14. 8. 2020 (vpravo). 80

Seznam tabulek

4.1 Hodnoty koeficientů úměrnosti pro různé zdroje vertikální rychlosti. 21
4.2 Kumulované hodnoty maximální a průměrné bleskové aktivity 7. 6. 2020 mezi 14 UTC a 15 UTC. 23

5.1 Počty jednotlivých druhů výbojů 7. 6. 2020 zaznamenaných systémem LINET. 31
5.2 Počty jednotlivých druhů výbojů 13.6. 2020 zaznamenaných systémem LINET. 40
5.3 Počty jednotlivých druhů výbojů 26.6. 2020 zaznamenaných systémem LINET. 47
5.4 Počty jednotlivých druhů výbojů 14.8. 2020 zaznamenaných systémem LINET. 56
5.5 Počty jednotlivých druhů výbojů 22.8. 2020 zaznamenaných systémem LINET. 63
5.6 Počty jednotlivých druhů výbojů 29.8. 2020 zaznamenaných systémem LINET. 70