

UNIVERZITA KARLOVA
Přírodovědecká fakulta

Studijní program: Geografie
Studijní obor: Fyzická geografie a geoekologie



Bc. Klára Sedláková

**KOVARIANTNÍ MODEL CHYB PRO ASIMILACI RADAROVÉ
ODRAZIVOSTI DO NUMERICKÉHO MODELU PŘEDPOVĚDI
POČASÍ**

**MODEL OF ERROR COVARIANCES FOR THE ASSIMILATION OF RADAR
REFLECTIVITY INTO A NWP MODEL**

Diplomová práce

Vedoucí práce: doc. RNDr. Zbyněk Sokol, CSc.

PRAHA 2018

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Název práce

Kovariantní model chyb pro asimilaci radarové odrazivosti do numerického modelu předpovědi počasí

Cíle práce

Cílem práce bude odvození kovariantního modelu chyb mezi naměřenou odrazivostí meteorologických radarů a modelovými veličinami numerického modelu pro předpověď počasí (NWP modelu). Kovariantní model bude vyvinut pro NWP model s horizontálním rozlišením 2,8 km a bude zaměřen na události se silnými konvektivními srážkami. Model bude připraven tak, aby mohl být využit pro asimilaci naměřené radarové odrazivosti do NWP modelu. Součástí práce bude prezentace funkčnosti kovariantního modelu na vybrané konkrétní předpovědi NWP modelem.

Použité pracovní metody, zájmové území, datové zdroje

Práce bude vycházet ze známých poznatků získaných rešerší odborné literatury. Při odvození kovariantního modelu budou použity výstupy integrací NWP modelu COSMO a radarová měření, které poskytne vedoucí práce. Práce se zaměří na území ČR, pro které jsou k dispozici data. K vývoji kovariantního modelu bude použit softwarový nástroj MATLAB a budou využity standardní statistické postupy analýzy dat. Bude navržen způsob implementace kovariantního modelu do NWP modelu COSMO. Ve spolupráci s vedoucím práce bude navržený postup realizován a otestován na vybrané předpovědi.

Datum zadání: 10. prosince 2015

Jméno studenta: Bc. Klára Sedláková

Podpis studenta:

Jméno vedoucího práce: doc. RNDr. Zbyněk Sokol, CSc.

Podpis vedoucího práce:

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze, 20.4.2018

.....

Bc. Klára Sedláková

Na tomto místě bych chtěla poděkovat vedoucímu práce doc. RNDr. Zbyňku Sokolovi, CSc. za věnovaný čas, odborné vedení a vstřícný přístup. Dále bych chtěla poděkovat konzultantovi RNDr. Miloslavovi Müllerovi Ph.D. za cenné rady a připomínky.

ABSTRAKT

KOVARIANTNÍ MODEL CHYB PRO ASIMILACI RADAROVÉ ODRAZIVOSTI DO NUMERICKÉHO MODELU PŘEDPOVĚDI POČASÍ

Předpověď událostí se silnou konvekcí není jednoduchá a to díky malému prostorovému měřítku a rychlému vývoji tohoto jevu. Umět předpovědět takovéto události je ale důležité z hlediska nebezpečných jevů, které tyto události doprovází jako jsou přívalové povodně, silný vítr, krupobití nebo atmosférická elektřina. Ke zlepšení předpovědi lze dosáhnout přesněji definovanými počátečními podmínkami, které vstupují do modelu asimilací dat. Tyto data musí odpovídat měřítku studovaného jevu. V jevu malého měřítka tedy přichází v úvahu radarová data. Ačkoli má model popisovat skutečné procesy díky zjednodušením a aproximacím chování modelu zcela neodpovídá skutečnosti. Proto pokud chceme, aby model generoval srážky musíme zajistit, aby hodnoty modelových proměnných a jejich vzájemný vztah byl takový, kdy je tento proces spuštěn. Ke zjištění těchto vztahů chceme využít kovariantní model.

V práci jsme se tedy zaměřili na analýzu korelačních vztahů v oblastech konvekce mezi radarovou odrazivostí, jejího přepočtu na intenzitu srážek a ostatních modelových veličin. K analýze byla využita data z modelu COSMO s horizontálním rozlišením 2,8 km, která popisovala přibližně 700 konvekčních bouří ve všech vertikálních hladinách. Na základě těchto vazeb byl vytvořen kovariantní model chyb, který byl otestován na dvou předpovědích s využitím asimilace navrženou metodou, na kterých bylo prokázáno zlepšení.

Klíčová slova: konvektivní srážky, kovariantní matice chyb, asimilace dat, numerický model předpovědi počasí

ABSTRACT

MODEL OF ERROR COVARIANCES FOR THE ASSIMILATION OF RADAR REFLECTIVITY INTO NWP MODEL

Predicting events with a severe convection is not easy due to the small spatial scale and rapid development of this phenomenon. But being able to predict such events is important in view of the dangerous phenomena that accompany these events, such as flash floods, strong winds, hailstorms or atmospheric electricity. Improved forecast can be achieved by more precisely defined initial conditions that enter the model. These data must match the scale of the studied phenomenon. Therefore, radar data is used in this case. Although the NWP model should describe real processes due to the simplifications and approximations the model's behavior does not entirely correspond the reality. Therefore, if we want the model to generate precipitation, we must ensure that the values of the model variables and their relationship are such that the process is started. To find out these relationships, we want to use a covariant model.

In this paper, we focused on the correlation analysis of the model variables in the regions of convection between radar reflection, its conversion to the intensity of precipitation and other model variables. The COSMO data with a horizontal resolution of 2.8 km were used, which were describing approximately 700 convection storms in all vertical levels. Based on these relations, a model of error covariances was constructed, which was tested on two predictions using assimilation method designed in this paper. The forecast showed improvement.

Key words: convective precipitation, error covariance matrix, data assimilation, numerical weather prediction model

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ	9
SEZNAM TABULEK	11
SEZNAM PŘÍLOH	11
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK	12
1 ÚVOD	13
2 ASIMILACE DAT	15
2.1 VÝVOJ ASIMILACE DAT	15
2.2 METODY ASIMILACE	16
2.3 KOVARIANTNÍ MATICE PŘEDBĚŽNÉHO POLE	16
2.3.1 <i>Analýza inovací</i>	17
2.3.2 <i>Rozdíl různě dlouhých předpovědí</i>	17
2.3.3 <i>Odhad chyby za použití předpovědi s časovými prodlevami</i>	18
2.3.4 <i>Ansámblová metoda (Monte Carlo)</i>	18
3 NUMERICKÁ PŘEDPOVĚĎ SILNÉ KONVEKCE	19
3.1 KONVEKCE A KONVEKTIVNÍ BOUŘE	19
3.2 KONVEKTIVNÍ PROSTŘEDÍ V MODELECH NWP	22
4 DATA A METODY	25
4.1 LM COSMO	25
4.2 RADAROVÁ DATA	26
4.3 PŘÍPRAVA DAT	28
4.4 ZPRACOVÁNÍ DAT	29
4.4.1 <i>Vztahy mezi modelovými veličinami</i>	29
4.4.2 <i>Kovariantní model chyb</i>	31
4.4.3 <i>Metoda asimilace I</i>	32
4.4.4 <i>Metoda asimilace II</i>	34
4.4.5 <i>Verifikace předpovědi</i>	34
5 VÝSLEDKY	36
5.1 ANALÝZA KORELAČNÍCH VZTAHŮ	36
5.1.1 <i>Významnost korelačních koeficientů</i>	36

5.1.2	<i>Korelace radarové odrazivosti a intenzity srážek s ostatními proměnnými</i>	37
5.1.3	<i>Korelace vertikálních rychlostí s ostatními proměnnými</i>	42
5.1.4	<i>Korelace teploty s ostatními proměnnými</i>	44
5.1.5	<i>Korelace vlhkosti s ostatními proměnnými</i>	45
5.1.6	<i>Korelace oblačné vody a ledových částic</i>	46
5.2	NÁVRH KOVARIANTNÍHO MODELU A ASIMILACE	47
5.3	TESTOVACÍ PŘEDPOVĚDI	49
5.3.1	<i>Předpověď na 28.5. 2016</i>	49
5.3.2	<i>Předpověď na 16.6. 2016</i>	51
6	DISKUZE	54
7	ZÁVĚR	57
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	58
	SEZNAM POUŽITÝCH ELEKTRONICKÝCH ZDROJŮ	60
	PŘÍLOHY	61

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Schematický řez konvektivní bouří..	20
Obr. 2: Schematické znázornění časového vývoje radarové odrazivosti během životního cyklu typické jednoduché cely.....	21
Obr. 3: Výpočetní oblast modelu COSMO s modelovou topografií.	25
Obr. 4: Ukázka meteorologických cílů konvektivního a vrstevnatého charakteru.	27
Obr. 5: Umístění radarů ČHMÚ, jejich maximální dosahy a dosahy do výšky 1500 m nad terénem pro určování intenzit srážek	27
Obr. 6: Grafy významnosti hodnot korelací pro jednotlivé hladiny a vzdálenosti od středového uzlového bodu.....	37
Obr. 7: Vertikální profily hodnot autokorelace radarové odrazivosti (Z) a její korelace s ostatními modelovým veličinami vertikální rychlost (W), teplota (T), směšovací poměr vodní páry (QV), obsah oblačné vody (QC) a obsah ledových částic (QIA).....	39
Obr. 8: Grafy hodnot autokorelace radarové odrazivosti (Z) a jejich korelací s ostatními modelovými veličinami vertikální rychlost (W), teplota (T), směšovací poměr vodní páry (QV), obsah oblačné vody (QC) a obsah ledových částic (QIA)	40
Obr. 9: Vertikální profily hodnot autokorelace intenzity srážek (I) a její korelace s ostatními modelovým veličinami vertikální rychlost (W), teplota (T), směšovací poměr vodní páry (QV), obsah oblačné vody (QC) a obsah ledových částic (QIA)	41
Obr. 10: Grafy hodnot autokorelace intenzity srážek (I) a jejich korelací s ostatními modelovými veličinami vertikální rychlost (W), teplota (T), směšovací poměr vodní páry (QV), obsah oblačné vody (QC) a obsah ledových částic (QIA)	42
Obr. 11: Vertikální profily hodnot autokorelací vertikální rychlosti a teploty a korelací vertikální rychlosti (W) s ostatními modelovými veličinami teplota (T), směšovací poměr vodní páry (QV), obsah oblačné vody (QC) a obsah ledových částic (QIA).....	43

Obr. 12: Grafy hodnot autokorelací vertikální rychlosti a teploty a korelací vertikální rychlosti (W) s ostatními modelovými veličinami vertikální rychlost (W), teplota (T), směšovací poměr vodní páry (QV), obsah oblačné vody (QC) a obsah ledových částic (QIA)	44
Obr. 13: Vertikální profily hodnot korelace teploty a ostatních modelových veličin směšovací poměr vodní páry (QV), obsah oblačné vody (QC) a obsah ledových částic (QIA), autokorelací směšovacího poměru vodní páry (QV) a její korelací s modelovými veličinami obsah oblačné vody (QC) a obsah ledových částic (QIA).	45
Obr. 14: Grafy hodnot korelací teploty a ostatních modelových veličin směšovací poměr vodní páry (QV), obsah oblačné vody (QC) a obsah ledových částic (QIA), autokorelací směšovacího poměru vodní páry (QV) a její korelací s modelovými veličinami obsah oblačné vody (QC) a obsah ledových částic (QIA)	46
Obr. 15: Vertikální profily hodnot autokorelací proměnných obsah oblačné vody (QC) a obsah ledových částic(QIA) a jejich vzájemné korelace	47
Obr. 16: Grafy hodnot autokorelací proměnných obsah oblačné vody (QC) a obsah ledových částic (QIA) a jejich vzájemné korelace.	47
Obr. 17: Příklad předpovědi s využitím asimilace I. ze dne 25.6.2016 pro 15-18 hodinu.....	49
Obr. 18: Příklad předpovědi s využitím asimilace II. ze dne 28.5.2016 pro 15-18 hodinu.....	50
Obr. 19 Vyhodnocení předpovědi ze dne 28.5.2016 metodou FSS	51
Obr. 20: Příklad předpovědi s využitím asimilace II ze dne 16.6.2016 pro 16-19 hodinu.....	52
Obr. 21 Vyhodnocení předpovědi ze dne 16.6.2016 metodou FSS.	53

SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Intervaly horizontálních vzdáleností, ve kterých byly počítány korelace.....	28
--	----

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1: Hodnota tlaku vzduchu a výšky jednotlivých vertikálních hladin.	56
Příloha 2: Kovariantní matice chyb pro jednotlivá patra pro metodu asimilace I. s použitím vyjádření srážek pomocí radarové odrazivosti.....	57
Příloha 3: Kovariantní matice chyb pro jednotlivá patra pro metodu asimilace I. s použitím vyjádření srážek pomocí intenzity srážek	58
Příloha 4: Kovariantní matice chyb pro jednotlivá patra pro metodu asimilace II. s použitím vyjádření srážek pomocí radarové odrazivosti.....	58
Příloha 5: Kovariantní matice chyb pro jednotlivá patra pro metodu asimilace II. s použitím vyjádření srážek pomocí intenzity srážek.....	58

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

3D-EnVar	třídídimenzionální ansámblová variační metoda asimilace
3D-VAR	třídídimenzionální variační metoda asimilace
4D-EnVar	čtyřdídimenzionální ansámblová variační metoda asimilace
4D-VAR	čtyřdídimenzionální variační metoda asimilace
CAPPI	constant altitude plan position indicator, pole odrazivosti v konstantní nadmořské výšce
CLIDATA	databáze klimatických dat
COSMO	Consortium for Small-scale Modeling, Konsorcium pro modelování v malém měřítku
CQ	Canadian quick, odhad chyby kovariantní matice chyb předběžného pole za použití předpovědi s časovými prodlevami
CZRAD	Česká radarová síť
CZRAD-EXT	Česká radarová síť rozšířená o blízké radary z okolních zemí
ČHMÚ	Český hydrometeorologický ústav
DWD	Deutscher Wetterdienst, Německá předpovědní služba
EA	elementární oblast
EKF	Extended Kalman Filter, zobecněný Kalmánův filtr
EnKF	Ensemble Kalman filtr, ansámblový Kalmánův filtr
LETKF	Local Ensemble Transform Kalman Filter, lokální ansámblový transformovaný Kalmánův filtr
LM	Lokal Modell, původní název modelu COSMO
MERGE2	systém pro kombinovaný plošný odhad srážkových úhrnů z radarů a srážkoměrů
NWP	Numerical weather prediction, numerická předpověď počasí

1 Úvod

Počasí velmi ovlivňuje fyzickou i socioekonomickou sféru Země. A to bylo impulzem pro člověka začít počasí zkoumat a snažit se ho předvídat. Úplně v počátcích bylo počasí předpovídáno na základě empirických pravidel a bylo zcela subjektivní. S vynálezem teploměru a barometru se začala sbírat data o počasí. Z počátku se data využívala jen k hledání souvislostí mezi veličinami. Až vynález telegrafu umožnil rychlejší sběr informací ze stanic po celém světě, a tak v roce 1820 H. W. Brandes publikoval první přízemní synoptickou mapu, která dala za vznik synoptické předpovědi počasí. Využívat údaje v celém vertikálním rozsahu atmosféry umožnil až vynález radiosondy v období mezi světovými válkami. V roce 1858 vyslovil H. Helmholtz myšlenku, že počasí lze předpovídat s použitím fyzikálních metod na základě řešení hydrodynamických a termodynamických rovnic (Helmholtz, 1858). První praktické výpočty byly však publikovány až v roce 1922 britským matematikem L.F. Richardsonem (1922). Protože však v tu dobu nebyla k dispozici dostatečně výkonná výpočetní technika ani vhodné numerické metody, jeho výpočty byly neúspěšné. Norský meteorolog V. Bjerknes definoval dvě základní podmínky numerické předpovědi počasí (dále NWP) už v roce 1904 a to jednak dostatečně přesnou znalost počátečních podmínek a znalost zákonů, jimiž se změny atmosféry řídí. Rozvoj metod numerické předpovědi nastal až po druhé světové válce díky rychlému vývoji výpočetní techniky a zahuštění sítě meteorologických stanic. Úspěšná předpověď se podařila teprve za použití počítače ENIAC v roce 1950 Charneyovi za velmi zjednodušených předpokladů a hrubém rozlišení na omezené oblasti, a to vedlo k tomu, že se od roku 1955 začaly počítače k předpovědi počasí využívat pravidelně. Od té doby prošly numerické modely dlouhým vývojem a v současné době je numerická předpověď používána pro všechny krátkodobé, střednědobé a některé dlouhodobé předpovědi. I přes to je stále co zdokonalovat. Další rozvoj probíhá v oblastech parametrizací fyzikálních procesů, zmenšení časového a prostorového měřítka, zdokonalování metod numerické integrace a pozornost se věnuje také asimilaci dat, tj. přípravě počátečních podmínek vstupujících do NWP (Meteorologický slovník, 2017).

Asimilací dat se bude zabývat také tato práce. Konkrétně asimilací radarových dat (radarové odrazivosti) a jejího přepočtu na intenzitu srážek zaměřené na předpověď silné konvekce. Dále v této práci pod pojmem radarová data budeme rozumět radarová měření odrazivosti. Přesná

předpověď takovýchto událostí je velmi důležitá z hlediska nebezpečných jevů, jako jsou například přívalové povodně, silný vítr, krupobití nebo atmosférická elektřina, které konvektivní bouře mohou způsobit. Předpovědět skutečné rozložení jednotlivých konvektivních buněk je ale obtížné díky jejich malému plošnému měřítku a rychlému vývoji. Cílem práce je vytvoření kovariantního modelu chyb, popisujícího vztahy mezi modelovými veličinami v oblastech konvekce, který bude využit k asimilaci radarových dat nebo jejího přepočtu na intenzitu srážek do numerického modelu COSMO. Předpokládáme, že využitím prostorových vazeb dokážeme zpřesnit počáteční podmínky a tím zlepšit výsledek předpovědi.

V rešeršní části práce se seznámíme s procesem asimilace dat, jejím stručným vývojem a popisem nejpoužívanějších metod asimilace v dnešní době. Větší pozornost je věnována metodám modelování kovariantních matic předběžného pole, které se využívají v mnoha metodách asimilace. Dále se zaměříme na numerickou předpověď silné konvekce. Jedna z částí je věnovaná konvekci a konvektivním bouřím, jejich definici, struktuře a vývoji. Následně jsou popsány současné metody využívané k její předpovědi a konvektivní prostředí v modelech NWP, které za poslední půl století prošlo výrazným vývojem.

V druhé části práce se již věnujeme analýze korelačních vztahů v podmínkách silné konvekce. Na základě výsledků této analýzy je vytvářen kovariantní model chyb tak, aby na základě rozdílu modelové a naměřené hodnoty radarové odrazivosti, resp. intenzity srážek dokázal upravit hodnoty ostatních proměnných, aby lépe odpovídaly skutečnosti. Tento kovariantní model je poté využit pro asimilaci radarové odrazivosti do NWP modelu a otestován na konkrétní předpovědi modelem.

2 ASIMILACE DAT

Asimilace meteorologických dat je proces využívaný pro přípravu počátečních podmínek numerických modelů předpovědi počasí. Získání co nejpřesnějších hodnot počátečních podmínek výrazně pomáhá ke zlepšení kvality předpovědi. Hlavním cílem asimilace meteorologických dat je na základě informací z naměřených meteorologických dat ze zvoleného časového intervalu, který se zpravidla nazývá asimilačním oknem, upravit počáteční podmínky tak, aby co nejlépe odpovídaly aktuálnímu stavu atmosféry. To se provádí tak, že v asimilačním okně integrujeme meteorologický model a v průběhu integrace modelu dodáváme nová naměřená data. Po skončení integrace v asimilačním okně již následuje volná integrace modelu v čase. Jako vstupní data se využívají nejenom data z pozemních meteorologických stanic, lodí nebo bójí, ale i data výšková, z radiosondážních měření či letadlových měření. Jako zdroj informace lze použít i radarová nebo satelitní data. Druhými základními vstupními daty jsou 6hodinové nebo 12hodinové modelové předpovědi počasí, které se nazývají předběžná pole. Tyto informace se využívají hlavně kvůli tomu, že obsahují data ve všech uzlových bodech, ve kterých je počítána i následná předpověď. To je důležité hlavně v oblastech s nedostatkem naměřených dat (např. v oblastech oceánů). Počáteční podmínky tedy vznikají modifikací předběžného pole na základě informací získaných z naměřených dat.

2.1 Vývoj asimilace dat

Vývoj asimilace dat pro globální numerickou předpověď počasí začal jednoduchými horizontálními interpolačními metodami, které se postupně vyvinuly až do třídimenzionálních variačních metod, které dokonce začaly počítat se vztahy mezi veličinami (Lorenz, 1986). Postupem času začaly variační metody využívat dynamiku modelu v procesu asimilace a dnes využíváme čtyřdimenzionální variační metodu, kde čtvrtým rozměrem je čas. Na rozdíl od třídimenzionálních metod čtyřdimenzionální metoda optimalizuje běh modelu již v asimilačním okně na základě asimilovaných dat. Abychom byli schopni zohlednit vývoj chyb předpovědi v procesu asimilace, využívají se ansámblové Kalmánovy filtry. Poslední dobou se vyvíjejí a používají kombinované metody, které kombinují ansámblové a variační metody tzv. hybrid

methods (pro více informací např. viz.: Bannister, 2017). Cílem těchto kombinovaných metod je využít přednosti ansámblových a variačních metod a naopak minimalizovat jejich nedostatky. Tyto metody se dnes stávají hlavním proudem v asimilaci dat do globálních NWP (Gustafsson, 2017).

2.2 Metody asimilace

Většina asimilačních metod je založena na teoriích pravděpodobnosti, konkrétně na Bayesovu teorému o podmíněné pravděpodobnosti. Variační metody (3D-VAR nebo 4D-VAR) využívají algoritmus minimalizující funkcionál, který je součtem rozdílu výsledného (analyzovaného) pole od měření a předběžného pole a jeho váhy jsou určovány kovariantními maticemi jejich chyb. Metoda 4D-VAR na rozdíl od metody 3D-VAR umožňuje práci se všemi naměřenými daty v asimilačním okně a zohledňuje vývoj modelových proměnných v asimilačním okně. Kalmánův filtr je založen na minimalizaci střední kvadratické chyby stavového vektoru lineárního dynamického systému za předpokladu že chyba lineárního modelu a chyba naměřené hodnoty stavového vektoru mají Gaussovo rozdělení. Protože jsou modely předpovědi silně nelineární používají se různé modifikace Kalmánova filtru. Například ansámblový Kalmánův filtr (EnKF), který je aplikován na ansámbl počátečních podmínek a odhad chyby se určuje vyhodnocením získaného ansámblu předpovědí. Zobecněný Kalmánův filtr (EKF) se aplikuje pouze na zlinearizované okolí stavového vektoru. Podrobnější popis metod nalezneme například v publikaci od E. Kalnay (2003).

2.3 Kovariantní matice předběžného pole

V mnoha asimilačních metodách jako jsou 3D-variační metoda, 4D-variační metoda, optimální interpolace nebo Kalmánův filtr je požadovaná znalost vztahů mezi modelovými veličinami. Tato informace je zahrnuta krom jiného v tzv. kovariantní matici předběžného pole. Ta popisuje charakteristiky hustoty rozdělení pravděpodobnosti chyb předpovědi. Určuje důležitost použitého předběžného pole a sféru vlivu naměřených dat v prostoru. Zároveň definuje vzájemné působení modelových proměnných a udržuje rovnovážný stav (Bannister, 2008). Neznalost hodnot skutečného stavu atmosféry, kdy jsou jednotlivé prvky matice definované jako rozdíl hodnoty předběžného pole od skutečného stavu atmosféry, nám

neumožňuje matici definovat explicitně a je třeba ji odhadovat pomocí různých aproximací. Odhady lze získat více způsoby. Buď můžeme získat informace o statistice chyb předběžného pole z dostupných informací (analýza inovací) nebo se můžeme pokusit nalézt jinou veličinu, u které můžeme předpokládat podobnou statistiku chyb jako u chyby předběžného pole. Do této kategorie spadá metoda různě dlouhých předpovědí, použití předpovědi s časovou prodlevou a ansámblová metoda.

2.3.1 Analýza inovací

Kovariance chyb jsou v tomto případě získávány analýzou inovací neboli rozdílem mezi naměřenou hodnotou (y_o) a hodnotou předběžného pole (x_b) ve stejném místě. Tato metoda je ale využitelná pouze v oblastech dostatečně pokrytými měřeními. Úspěšnost je totiž silně závislá na množství na sobě nezávislých měření bez systematické chyby (Fisher, 2003). Kovariance chyb (matici \mathbf{B}) definujeme jako:

$$\mathbf{B} = \langle (y_o - K_n(x_b))(y_o - K_n(x_b))^T \rangle, \quad (2.1)$$

kde K_n je operátor který popisuje přechod mezi hodnotami v uzlových bodech a daty v místech měření. Je třeba poznamenat, že K_n může být obecný operátor, a tedy y_o a x_b nemusí být stejné veličiny.

2.3.2 Rozdíl různě dlouhých předpovědí

Metoda počítá chyby předběžného pole pomocí rozdílu dvou předpovědí platných pro stejný čas, které byly spuštěny s časovou prodlevou. Aby byl eliminován denní chod počasí používá se zpravidla rozdíl 24 hodin. Tyto rozdíly jsou poté průměrovány přes různé případy v čase, typicky 1 měsíc a matice \mathbf{B} je pak definovaná jako

$$\mathbf{B} \approx \frac{1}{2} \langle (x^{48} - x^{24})(x^{48} - x^{24})^T \rangle, \quad (2.2)$$

kde x^{24} a x^{48} jsou předpovědi na 24, resp. 48 hodin a lomené závorky značí průměrování.

Problémem této metody jsou stejně jako u analýzy inovací oblasti s malým množstvím naměřených hodnot. V těchto místech jsou většinou jen malé rozdíly mezi předpověďmi, a proto dochází k podceňování střední kvadratické odchylky. Rozdíly předpovědí jsou počítány průměrem za delší dobu, zpravidla měsíc nebo i roční období. Za tuto dobu se počasí v daném

místě velmi mění, proto je tato metoda využitelná spíše pro odhad klimatologických kovariancí (Bannister, 2008).

2.3.3 Odhad chyby za použití předpovědi s časovými prodlevami.

Tato metoda, někdy nazývaná také jako canadian quick (CQ) používá k výpočtu matice rozdíl předpovědi po 6 hodinách od spuštění. Matici \mathbf{B} vyjádříme jako:

$$\mathbf{B} \approx \frac{1}{2} \langle \{x^b(t+6) - x^b(t)\} \{x^b(t+6) - x^b(t)\}^T \rangle, \quad (2.3)$$

kde $x^b(t)$ je předpověď v čase t a $x^b(t+6)$ předpověď v čase $t+6$.

Je s oblibou využívána v případech, kdy potřebujeme rychle zjistit matici \mathbf{B} a nemáme k dispozici nic než volný běh modelu, ale stejně jako u předchozí metody je vhodná jen ke zjištění klimatologických kovariancí. Dalšími nevýhodami této metody je to, že chyby předpovědi kopírují její tendence. Výsledek bude záviset na rychlosti vývoje analyzovaného pole v dané oblasti a v daném čase. Místům s pomalým vývojem se přiřadí neopodstatněně malé rozdíly. Stejný problém nastává u oscilací se stejnou periodou jako je délka předpovědi (Bannister, 2008).

2.3.4 Ansámblová metoda (Monte Carlo)

Oblíbenou metodou pro získání chyb předběžného pole je ansámblová metoda. Ta se počítá generováním ansámblu předpovědí, kde se předpokládá stejná hustota pravděpodobnosti jako je tomu u skutečné chyby předpovědi. Existují dva základní přístupy vytváření ansámblu, jak píše Bannister (2008). Ten první je použití ansámblu vytvořeného jako část již existujícího ansámblového systému (například ansámblový Kalmánův filtr). Druhou, oblíbenější možností je vypočítat ansámbl předpovědí za účelem nasimulovat všechny důležité zdroje chyb. Výslednou matici \mathbf{B} lze pak získat buď jako odchylku každého členu ansámblu od průměru (lomené závorky),

$$\mathbf{B} \approx \langle (x^b - \langle x^b \rangle) (x^b - \langle x^b \rangle)^T \rangle \quad (2.4)$$

nebo jako rozdíl mezi dvojicemi členů ansámblu.

$$\mathbf{B} \approx \frac{1}{2} \langle (x_i^b - x_j^b) (x_i^b - x_j^b)^T \rangle. \quad (2.5)$$

Indexy i a j reprezentují dva členy ansámblu. Takovýchto členů existuje $N-1$ kde N je počet ansámblů.

3 NUMERICKÁ PŘEDPOVĚĎ SILNÉ KONVEKCE

Celá práce má za cíl zlepšení předpovědi událostí se silnými konvektivními srážkami. Předpověď takovýchto událostí je velmi obtížná, protože tyto konvektivní události mají malý prostorový rozsah (jsou to jevy malého horizontálního měřítka) a rychlý nelineární vývoj. Metody předpovědi konvektivních bouří se liší podle délky předpovědního intervalu. Na velmi krátkou dobu (do 2-6 hodin) se využívá družicových a radiolokačních pozorování a tzv. metody nowcastingu, které jsou zpravidla založeny na extrapolaci radarového (popř. družicového) echa podél Lagrangeových trajektorií s využitím pohybového pole (více viz. Řezáčová a kol, 2007). Předpověď na delší dobu se získává z modelů numerické předpovědi počasí využívají se také informace z analýz křivky teplotního zvrstvení, vertikálního stříhu větru a indexů stability získaných z aerologického měření (Meteorologický slovník, 2017). Jako u každé předpovědi, přesnost klesá s její délkou a u předpovědi konvektivních bouří to platí o to víc.

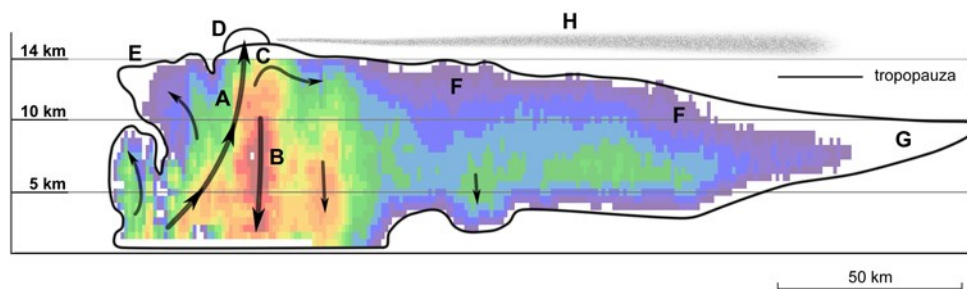
Předpovědět přesné rozložení jednotlivých konvektivních buněk není možné. Modelování konvekce (konvektivních oblaků) a předpověď jejího vývoje je limitovaná několika základními faktory. Prvním z nich je výkonnost výpočetní techniky. I když výkonnost výpočetní techniky rychle roste, modely se zdokonalují a stávají se složitějšími a s tím rostou nároky na výpočet. Druhý problém spočívá v dostatečně přesné formulaci modelových rovnic popisující dynamické a mikrofyzikální oblačné procesy, což zatím stále není vyřešeno. Zcela zásadní je také otázka zajištění přesných počátečních a okrajových podmínek pro modelový výpočet (Řezáčová a kol., 2007).

3.1 Konvekce a konvektivní bouře

Atmosférickou konvekcí označujeme v meteorologii horizontálně omezené vzestupné a kompenzační sestupné pohyby vzduchu vyvolávané archimedovskými vztlakovými silami, které vznikají následkem nehomogenit hustoty vzduchu při zemském povrchu a ve volné atmosféře. Zdroji těchto nehomogenit může být nerovnoměrné ohřívání povrchu země, což označujeme jako termickou konvekci, ale také proudění přes orografické překážky nebo také oblasti studených front, které tvoří rozhraní mezi dvěma odlišnými vzduchovými hmotami s odlišnými hustotami. V tomto případě se pak jedná o vynucenou konvekci. Atmosférická konvekce se

výrazně podílí na vertikální výměně tepla a vlhkosti v atmosféře (Meteorologický slovník, 2017). K vývoji konvektivní oblačnosti je potřeba kromě iniciačního mechanismu výstupných proudů vzduchu, jakým je konvekce nebo přízemní konvergence vzduchu, zapotřebí dostatečná vlhkost v přízemních hladinách a instabilní zvrstvení atmosféry (Řezáčová a kol, 2007).

Termínem konvektivní bouře označujeme souhrn konvektivních procesů a jevů, které probíhají při vývoji vertikálně mohutných, srážkových konvektivních oblaků druhu cumulonimbus (Cb). Těmito jevy myslíme srážky ve formě přivalového deště či krup, vítr, silný nárazovitý vítr, downburst nebo microburst či tornádo, elektrickou aktivitu jako je výboj, blesk či hřmění. (Řezáčová a kol, 2007)



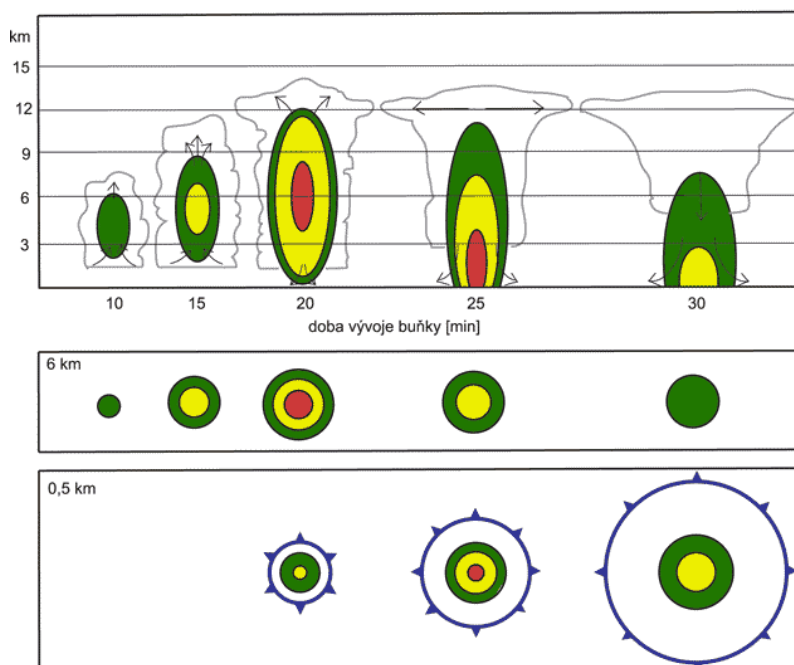
Obr. 1: Schematický řez konvektivní bouří. A- hlavní výstupný proud bouře (updraft), B- hlavní sestupný proud bouře (downdraft), C- vyvýšená horní hranice oblačnosti nad oblastí updraftu, D- přestřelující vrchol, E- část kovadliny orientovaná proti směru relativního výškového proudění, F- kovadlina bouře protažená ve směru relativního výškového proudění, G- transparentní, řídká, část kovadliny bouře, H- vlečka cirů vertikálně oddělená od horní hranice oblačnosti kovadliny bouře. Zdroj: Řezáčová a kol., 2007.

Konvektivní bouře je složena z jedné nebo více konvektivních cel. Tato jednoduchá strukturní jednotka je určena výstupným proudem a následným kompenzačním sestupným prouděním, které má úzkou souvislost s vypadáváním srážek (viz obrázek 1). Trojrozměrné proudění vzduchu v konvektivní cele umožňuje transport vlastností ze spodních vrstev troposféry do horních troposférických hladin, v určitých případech i do spodní stratosféry, a následný transport zpět k zemskému povrchu. Nejjednodušším modelem bouře je *jednoduchá cela* složená z jedné konvektivní cely. Druhým případem je *supercela*, také tvořena jednou cirkulační buňkou, ve které ale dochází k dlouhotrvající znovuobnovující se cirkulaci. Posledním typem konvektivní bouře se nazývá *multicelární bouře*. Je složena z více konvektivních cel, které se mohou navzájem ovlivňovat a tvořit více či méně organizovanou strukturu. V následujícím odstavci si více popíšeme strukturu jednoduché konvektivní cely. Pro

podrobnější popis ostatních druhů konvektivní bouře lze odkázat například na (Řezáčová a kol, 2007).

Pojem konvektivní cely byl zaveden dvojicí Byers a Braham v roce 1949, kdy byl na Floridě a v Ohiu prováděn rozsáhlý experiment „The thunderstorm“, který měl za cíl zmapovat konvektivní oblačnost s využitím veškeré soudobé techniky, radarů i letecké techniky. Díky tomuto výzkumu bylo zjištěno, že konvektivní oblaky se skládají z jedné nebo více jednotek oblačné cirkulace. A proto lze jednoduchou konvektivní celu považovat za elementární jednotku konvektivní bouře na níž můžeme demonstrovat základní vlastnosti oblačné konvekce. Vývoj životního cyklu jednoduché cely lze rozdělit na tři části. Na obrázku 2 lze vidět vývoj radarové odrazivosti během cyklu jednoduché cely.

1. *Stadium kumulu*, kdy v cele převládá výstupný proud transportující vlhký a teplý vzduch do výšky. Trvá typicky 10-15 minut.
2. *Stadium zralosti*, které charakterizujeme současnou přítomností výstupného i sestupného proudu s vypadávajícími srážkami. Cela zůstává ve stadiu zralosti v průměru 15-30 minut.
3. *Stadium rozpadu*, které je typické převládajícími sestupnými proudy způsobující rozpad cely. Zánik sestupného proudu trvá obvykle kolem 30 minut.



Obr. 2: Schematické znázornění časového vývoje radarové odrazivosti během životního cyklu typické jednoduché cely. Horní obrázek znázorňuje vertikální řez, spodní dva obrázky horizontální řezy ve výšce 6 a 0,5 km. Radarová odrazivost je znázorněna ve stupnici zelená-žlutá-červená, kde červená značí nejvyšší odrazivost. Symbolem studené fronty je zobrazen výtok chladného vzduchu. Zdroj: Řezáčová a kol., 2007.

Je tedy vidět, že proudění v konvektivní cirkulaci se v čase proměňuje. Na počátku vývoje v důsledku výstupného proudění vzduchu dochází ke vzniku a dalšímu růstu vodních kapek (ve vyšších hladinách ledových krystalků). S pokračujícím výstupným prouděním dochází ke kondenzaci značného množství vodní páry, které je vynášeno vzhůru. V momentě kdy kapky nebo ledové krystalky dosáhnou hmotnosti, kdy jejich pádová rychlost je větší než rychlost výstupného proudu, začne docházet k vypadávání srážek. Srážkové částice sebou strhávají chladný vzduch z vyšších hladin, a při propadávání nenasycenými oblastmi se pod oblakem vypařují. Obě tyto skutečnosti vedou k ochlazení sestupujícího vzduchu a vzniku sestupného proudu. Při dosažení zemského povrchu dochází k výtoku chladného vzduchu, který se roztéká podél povrchu a mění vlastnosti proudění v okolí. Na čele chladného výtoku dochází často k silným nárazům větru, tzv. gust frontě. Roztékající se chladný vzduch může odříznout oblak od teplého a vlhkého vzduchu vtékajícího do oblaku a tím odstranit zdroj vody pro vývoj srážek. Sestupný proud poté slábne a následně úplně zaniká. (Řezáčová a kol, 2007)

3.2 Konvektivní prostředí v modelech NWP

Za poslední půl století došlo k velmi výraznému rozvoji a zdokonalení numerické předpovědi počasí. Došlo k zvětšení rozlišení modelu (zmenšení vzdálenosti uzlových bodů), přechodu od hydrostatických modelů k modelům nehydrostatickým, zavedení složitějšího popisu fyzikálních procesů a parametrizace a k vývoji nových metod pro přípravu počátečních podmínek. Rychlý vývoj byl možný zejména díky exponenciálnímu nárůstu výkonu počítačů. Díky dnešním technickým možnostem a velkému prostorovému rozlišení, které se dnes pohybuje v rozmezí 1-4 km, může být konvekce v NWP už explicitně modelována místo původně využívané parametrizace. Například model COSMO chce do roku 2020 zmenšit rozlišení modelu na 500 m (Yano a kol, 2017). Dříve parametrizace byla nezbytná kvůli nedostatečně jemnému rozlišení. Výsledkem byly zjednodušené matematické vztahy, které popisovaly vliv konvekce na prognostické proměnné a také jejich interakci s ostatními proměnnými (Meteorologický slovník, 2017).

Explicitní modelování konvekce vyžaduje odlišný přístup, než byl využíván doteď a přináší mnoho úkolů k vyřešení. NWP modely v konvektivním měřítku jsou komplexnější a naše teoretické porozumění procesům probíhající v tomto měřítku je mnohem menší než pochopení synoptického režimu počasí. Hlavní úkoly, které musí být vyřešeny, jsou v první řadě

porozumění dynamiky a parciálních diferenciálních rovnic popisující tento režim. Řada zjednodušení využívaných v synoptickém měřítku, jako například hydrostatická rovnováha, v konvektivním prostředí použít nelze. Toto prostředí vyžaduje využití dynamiky tekutin, termodynamiku a dostatečně podrobný mikrofyzikální popis oblaků.

Skutečnost že lze konvekci dnes již explicitně modelovat nám přináší další možnosti v rozvoji parametrizace. Je třeba zdokonalit již existující parametrizace (hluboká a mělká konvekce, popis mezní vrstvy). Modely, které explicitně modelují konvekci nám dávají možnost parametrizovat děje ještě menšího měřítka, jako jsou například konvektivní procesy uvnitř oblaků. Je přirozené, že bude nutné definovat vztahy mezi existujícími a novými parametrizacemi.

Prediktabilita atmosférických dějů je limitovaná v důsledku nárůstu chyby momentem, kdy chyba je větší než měřítko předpovídaného jevu. V tomto okamžiku ztrácí předpověď hodnotu i přes to, že předpověď může být počítána dál. Turbulentní charakter počasí v konvektivním měřítku ztrácí předpověditelnost rychleji než například nízko-dimenzionální chaotické proudění. V chaotickém systému můžeme zlepšit předpověditelnost přesnějšími počátečními podmínkami. To ale neplatí v plně turbulentním prostředí (Sun a Zhang, 2016). Zde můžeme do jisté míry vylepšit předpověditelnost hustší sítí pozorování, ale předpověditelnost bude stále v řádu několika hodin (Hoheneger a Schär, 2007).

Asimilace dat v konvektivním prostředí je také specifická. Aby byla samotná asimilace efektivní potřebujeme asimilovat data, která mají dostatečné prostorové a časové rozlišení schopné konvektivní prostředí popsat. Díky vysokému rozlišení modelu je také požadována hustší síť pozorování. Gustafsson a kol. (2017) ukazuje, že kvalita předpovědí založených na vstupních datech získaných asimilací dat konvektivního měřítka je výrazně lepší než při použití dat vzniklých downscalingem vstupních dat většího měřítka. Proto jsou potřebná družicová a především radarová data. Radarová odrazivost je již v dnešní době asimilována metodou latent heat nudging nebo 1D-Bayesovou inverzí vertikálních profilů vlhkosti. Problémy, se kterými se musíme vyrovnat je rychlejší nárůst chyb předpovědi a nelineární a ne-Gausovský charakter dynamiky konvekce a její statistiky chyb. V dnešní době jsou v operačních centrech nejvíce využívány pro asimilaci metody 3D-VAR, 4D-VAR ansámblové metody jako je LETKF (Local Ensemble Transform Kalman Filter), využívá se také kombinace variačních a ansámblových metod, hybridní metody 3D-EnVar a 4D-EnVar (Bannister, 2017). V některých operačních centrech se využívají také doplňkové asimilační algoritmy jako metoda latent heat nudging,

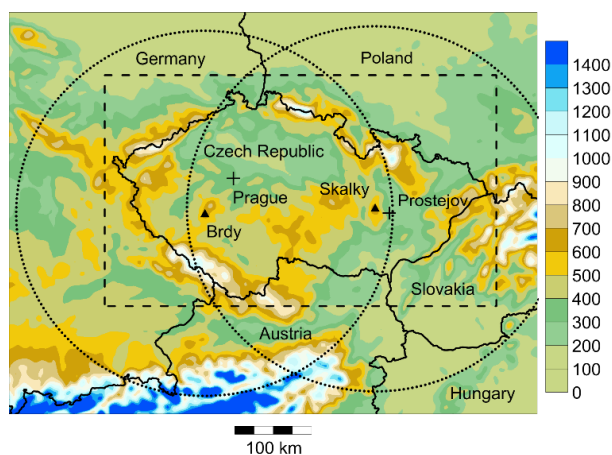
kteřá se využívá k vylepšení počátečních podmínek modelu s důrazem na konvektivní měřítko. Délka pozitivního vlivu asimilace záleží na typu počasí, velikosti výpočetní domény a na datech, které jsou asimilovány. V momentě kdy potřebujeme asimilovat současně data s řidší sítí pozorování, jako například radiosondážní měření, a data s hustší sítí, jako jsou radarová data, narážíme na problém rozdílných měříttek. Proto je potřeba využít víceměřítkovou metodu asimilace při které dochází nejprve k asimilaci řidších dat a následně až k asimilaci dat s hustší sítí měření (Xu a kol., 2016, Xie a kol., 2011). Oddělením asimilací jednotlivých měříttek přicházíme o informace, které obsahují data menšího měřítka o datech většího měřítka a naopak. Buehner a Shlyueva (2015) proto navrhli metodu, která využívá kovariantní matici předběžného pole závislou na měřítku. Přestává být nutné data podle měřítka rozdělovat.

4 DATA A METODY

4.1 LM COSMO

Data použitá pro zjišťování korelačních vazeb byla připravena z prognostických polí numerického modelu COSMO. Na stejném modelu byl pak kovariantní model testován. Model COSMO je nehydrostatický model předpovědi počasí vyvinutý německou předpovědní službou DWD. V současnosti jeho vývoj zajišťuje konsorcium COSMO. Model byl navržený jak pro provozní numerickou předpověď, tak pro různé vědecké aplikace v mezo β a mezo γ měřítku. Model je založen na primitivních termodynamických rovnicích popisujících stlačitelné proudění v atmosféře. Rovnice jsou definované v rotačním geografickém systému souřadnic a výškové souřadnice kopírují terén. Horizontální rozlišení modelu je 2,8 km a využívá 51 vertikálních hladin. Řada fyzikálních procesů malého měřítka je i tak parametrizována. Kromě samotného modelu LM COSMO obsahuje schéma asimilace dat, interpolaci okrajových podmínek z řídicího modelu, nástroje postprocessingu a další (COSMO, 2011).

Prognostickými proměnnými modelu jsou horizontální a vertikální složky větru, teplota, tlak, směšovací poměr vodní páry a směšovací poměr oblačné vody. V závislosti na zvolené konfiguraci modelu také směšovací poměr oblačného ledu, deště, sněhu, krupek a krup. Diagnostickými proměnnými jsou například hustota vzduchu, teplota ve 2 m, rychlost větru v 10 metrech, maximální nárazy větru v 10 metrech, radarová odrazivost a intenzita srážek (Doms, Baldauf, 2015). Výpočetní oblast modelu je znázorněna na obr. 3.



Obr. 3: Výpočetní oblast modelu COSMO s modelovou topografií (zobrazené v metrech). Trojúhelníky zobrazují umístění radarů a kruhy dosah radaru. Modelová oblast je vymezena čárkovaným obdélníkem. Zdroj: autor.

4.2 Radarová data

Meteorologický radar je zařízení, které vysílá vysokoenergetické pulsy elektromagnetických vln s vlnovou délkou v řádu jednotek centimetrů a přijímá zpět část vyslaného záření, které se zpětně rozptýlilo od meteorologických cílů (oblačných a srážkových částic) nebo cílů nemeteorologických (terénní útvary, letadla apod.). Zaznamenává se tedy výkon přijatého záření, čas od vyslání pulsu a v případě dopplerovských radarů také změna fáze, ze které se zjišťuje radiální rychlost meteorologických cílů. Radar snímá okolí v posloupnosti několika elevačních úhlů, aby zajistil co nejlepší trojrozměrné pokrytí sledované oblasti. Z těchto trojrozměrných dat jsou poté vytvářeny uživatelské produkty. Podle informací o množství odražené energie pak lze vypočítat množství srážkových částic v cílové oblasti. Vzdálenost či přesná poloha se vypočítá pomocí zpoždění odraženého pulzu a hodnoty azimutu a elevace antény. Hlavní výhodou radaru je možnost detekce srážkové oblačnosti na velkém území s prostorovým rozlišením až 1x1 km (Řezáčová a kol, 2007).

Radarová odrazivost je definovaná jako suma průměrů kapek D_i v jednotkovém objemu.

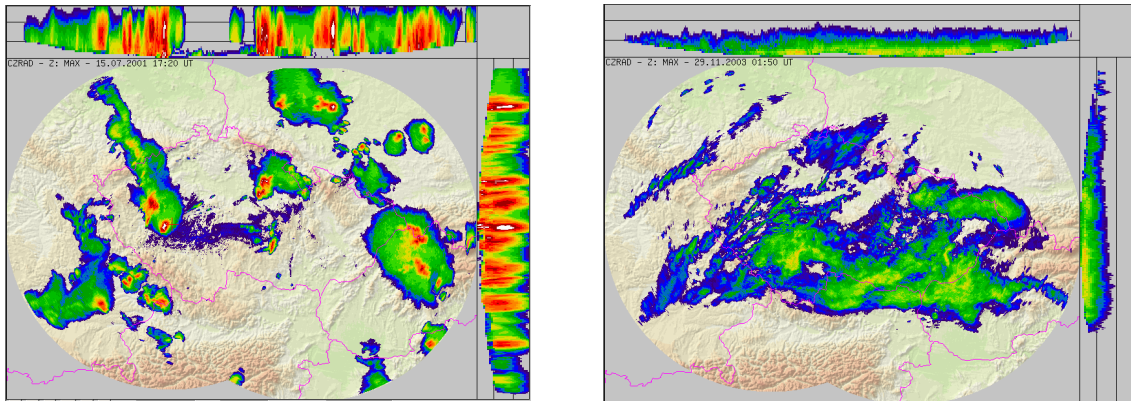
$$Z = \sum_{i \in 1V} D_i^6. \quad (4.1)$$

Základní jednotkou radarové odrazivosti je $\text{mm}^6 \cdot \text{m}^{-3}$. Častěji se však používá její logaritmické vyjádření $10 \log Z$ v jednotkách dBZ. Hodnota radarové odrazivosti je závislá na velikosti kapek a díky této skutečnosti jsme pomocí Marshallova a Palmerova rozdělení velikosti kapek (Marshall a Palmer, 1948) schopni radarovou odrazivost Z převést na intenzitu srážek I_R podle vztahu

$$Z = a I_R^b, \quad (4.2)$$

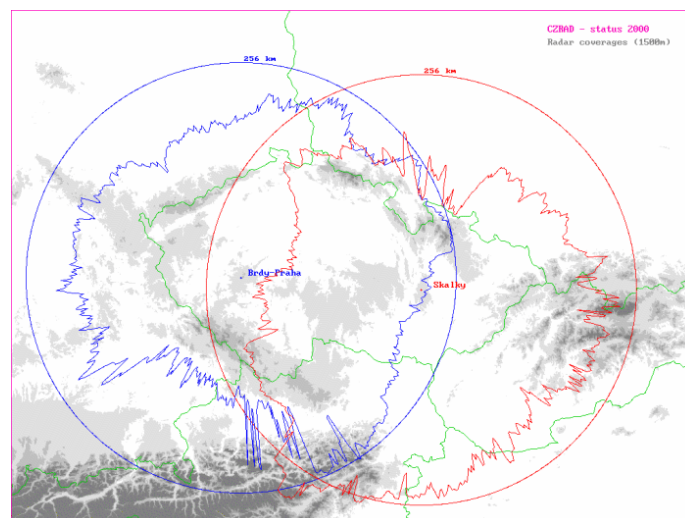
kde Z je vyjádřeno v jednotkách $\text{mm}^6 \cdot \text{m}^{-3}$, a i b jsou bezrozměrné koeficienty, které jsou určeny empiricky pro různé geografické oblasti a typy srážek. Pro oblast Evropy jsou nejčastěji používány hodnoty $a=200$, $b=1,6$, odvozené pro vrstevnaté srážky v oblastech středních zeměpisných šířek (Battan, 1973).

V praxi se nejvíce využívá radarových měření ve formě maximální odrazivosti s bočními průměty (viz obrázek 4). Meteorologické cíle konvektivního charakteru jsou charakteristické existencí výrazných jader s vyšší odrazivostí a buněčnou strukturou. Typická je pro ně velká časová proměnlivost. Na bočních průmětech je poznáme větší výškou horní hranice, než tomu je u vrstevnaté oblačnosti. Vrstevnatá oblačnost má naopak plošný jednotvárný vzhled bez výraznějších gradientů odrazivosti a pozvolným vývojem (Řezáčová a kol, 2007)



Obr. 4: Ukázka meteorologických cílů konvektivního (vlevo) a vrstevnatého charakteru (vpravo). Zdroj: CHMI.

V současné době v České Republice fungují v operativním režimu dva meteorologické radiolokátory (viz obr. 5), Skalky u Protivanova a Brdy-Praha (Radarová síť CZRAD, 2011). Tyto radiolokátory v pětiminutovém intervalu ve frekvenčním pásmu C a s vlnovou délkou 5,3 cm detekují srážkové oblaky až do vzdálenosti maximálně 260 km.



Obr. 5: Umístění radarů ČHMÚ, jejich maximální dosahy (kruhy) a dosahy do výšky 1500 m nad terénem pro určování intenzit srážek. Zdroj: Radarová síť CZRAD, 2011

Data, která byla asimilována do modelu námi navrženou metodou byly radarové odrazivosti naměřené každých 5 minut z hladin CAPPI 1000 m až 14000 m s krokem 500 m s horizontálním rozlišením 1x1 km. K verifikaci předpovědí srážek byla použita data vytvořená systémem MERGE2, což je systém pro kombinovaný plošný odhad srážkových úhrnů z radarů a srážkoměrů. Jako vstupní data využívá sloučenou radarovou informaci CZRAD-EXT počítanou z českých radarů a rozšířenou o blízké radary z okolních zemí a srážkoměrná data z databáze CLIDATA, kde jsou k dispozici 10minutové úhrny srážek ze stanic ČHMÚ a ostatních

spolupracujících organizací. Vlastní výpočet kombinovaného odhadu je popsán Novákem a Kyznarovou (2016).

4.3 Příprava dat

Data použitá pro zjišťování korelačních vazeb byla připravena z prognostických polí získaných integrací numerického modelu COSMO s horizontálním rozlišením 2,8 km a s 51 vertikálními hladinami. Integrace modelu byla prováděna pro 6 letních termínů z roků 2012 a 2013, kde byla pozorována významná konvektivní aktivita. Pro 2 z těchto termínů byly použity integrace spuštěné v 6 i 12 hodin. Z provedených integrací modelu se zpracovávaly předpovědi pro předpovědní časy 2, 3, 4, 5 až 12 hodin.

Výpočet probíhal pro modelovou oblast pokrývající Českou Republiku a její přilehlé okolí (viz. obr. 3). Vertikální souřadnice modelu COSMO kopírují terén, aktuální výška uzlového bodu tedy závisí na nadmořské výšce daného místa. Přibližná výška nad povrchem jednotlivých hladin je uvedena v příloze 1.

Samotný výběr dat se soustředil na oblasti, kde model generoval konvektivní bouři. Tyto oblasti byly definovány jako místa, kde maximální vertikální rychlost ve sloupci překročila hodnotu 2,5 m/s. Hodnoty byly zapisovány pro tyto proměnné: radarová odrazivost (Z) v jednotkách dBZ a její přepočtení na intenzitu srážek v mm/h (I), vertikální rychlost v m/s (W), teplota v °K (T), směšovací poměr vodní páry v jednotkách g/kg (QV), obsah oblačné vody v jednotkách g/kg (QC) a obsah ledových částic v jednotkách g/kg (QIA), která byla získána jako součet všech modelovaných ledových částic (oblačný led, sníh, krupky a kroupy). Hodnoty radarové odrazivosti Z byly na intenzitu srážek I přepočteny pomocí vztahu

$$I = \left(\frac{10^{0,1*Z}}{200} \right)^{\frac{1}{1,6}} \quad (4.3)$$

Konkrétní výběr dat byl proveden podle následujícího algoritmu:

1. Pro danou předpověď se vypočetly maximální vertikální rychlosti v uzlových bodech přes všech 51 modelových hladin. Modelová oblast se zúžila o 40 okrajových uzlových bodů z každé strany, aby data byla minimálně ovlivněná okrajovými podmínkami.

2. Vypočtené maximální rychlosti v bodě 2 se seřadily podle velikosti. Pokud všechny byly menší než 2,5 m/s nebyla data pro danou předpověď vybrána a pokračovalo se další předpovědí.
3. Vybralo se maximálně 8 souborů dat (konvektivních bouří) takto:
 - a. V prvním kole se vybral uzel s maximální vertikální rychlostí a data z 11 x 11 okolních uzlů se středem ve vybraném uzlu se zapsala do souboru. Zápis se prováděl pro výše vyjmenované modelové veličiny a pro všechny modelové hladiny.
 - b. V dalších kolech se vybral uzel s další maximální vertikální rychlostí, který byl vzdálen od všech dosud vybraných uzlů alespoň 84 km a zároveň maximální vertikální rychlost byla alespoň 2,5 m/s. Pokud takový uzel existoval, data byla zapsána do databáze. Pokud neexistoval, výběr skončil a zpracovávala se pole z jiných termínů.

4.4 Zpracování dat

4.4.1 Vztahy mezi modelovými veličinami

Pro tvorbu kovariantního modelu bylo nutné zjistit vztahy mezi modelovými proměnnými. K tomu byl využit Pearsonův korelační koeficient. Vztahy byly počítány pro všechny dvojice proměnných a jejich autokorelace. Vybrané hodnoty modelových veličin byly rozděleny do intervalů podle vzdálenosti od středového uzlového bodu takto:

Tab. 1: Intervaly horizontálních vzdáleností, ve kterých byly počítány korelace.

číslo intervalu	vzdálenost v jednotkách uzlových bodů	vzdálenost v km
1	<0;1)	<0;2,8)
2	<1;2)	<2,8;5,6)
3	<2;3)	<5,6;8,4)
4	<3;4)	<8,4;11,2)
5	<4;5)	<11,2;14)
6	<5;6)	<14;16,8)
7	<6;7)	<16,8;19,6)
8	<7;8)	<19,6;22,4)

Zdroj: autor

Pearsonův korelační koeficient mezi proměnnými a, b označen jako $\langle a, b \rangle$ je definován jako:

$$\langle a, b \rangle = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \left(\frac{a_i - \bar{a}}{\text{std}(a)} \right) \left(\frac{b_i - \bar{b}}{\text{std}(b)} \right), \quad (4.4)$$

kde pruh nad proměnou značí její průměr a std směrodatnou odchylku, N je počet dat.

Korelace byly potom vypočteny pro jednotlivé intervaly ve všech vertikálních hladinách. Pro získání robustnějších výsledků byly hodnoty korelací seskupeny do tří skupin odpovídající části na sebe navazujících vertikálních hladin. Nízké patro odpovídá tedy hladinám 31-43, přibližně 500-3000 metrů, střední patro hladinám 22-30, 3000-7000 metrů a patro vysoké hladinám 12-21 což odpovídá 7000-12500 metrům. Zde musíme upozornit, že hodnoty výšek nad povrchem Země jsou pouze přibližné, odpovídají rovnému povrchu začínajícím na hladině moře (viz příloha 1). Korelace byly subjektivně kontrolovány pomocí scatterplotů, a proto u korelací s proměnnou QC - směšovací poměr oblačné vody je vysoké patro omezeno pouze na hladiny 15-21, oblačná voda se ve vyšších hladinách nevyskytovala v dostatečném množství, aby mohla být statisticky zpracována. Stejně tak došlo k odebrání celého nízkého patra u dvojic korelací s proměnnou QIA , vzhledem k tomu, že ledové částice se v těchto vertikálních hladinách zpravidla nevyskytují. Dvojice korelací $QIA-QC$ nebyla díky nízkým hodnotám korelací v celém vertikálním rozsahu uvažována vůbec. Modelová veličina radarové odrazivosti byla zahrnuta do kovariantního modelu ve dvou variantách. V první řadě jako hodnoty odrazivosti v jednotkách dBZ a za druhé byl proveden přepočítání na intenzitu srážek v mm/h . V případě korelací v jednotkách mm/h byly oproti druhé variantě z modelu korelace dvojice $DBZ-QC$ položeny rovné nule pro nedostatečně velké hodnoty korelací. Pomocí metody bootstrap (popsaná níže) byl také vypočítán průměr, směrodatná odchylka, maxima a minima hodnot korelací pro jednotlivá patra a vzdálenosti a také zjišťována statistická významnost korelací.

Metoda bootstrap je intenzivní počítačovou metodou sloužící k odhadnutí parametrů rozdělení za předpokladu, že neznáme rozdělení náhodného výběru nebo v případech, kdy rozdělení známe, ale jeho analytické odvození je náročné nebo zdlouhavé. V našem případě jsme využili vícerozměrný bootstrapový výběr z k -tic, který je definován takto.

Nechť (X_{1i}, \dots, X_{ki}) , kde $i = 1, 2, \dots, n$, je náhodný výběr o rozsahu n z k -rozměrného náhodného vektoru (X_1, \dots, X_k) . Potom k -rozměrným bootstrapovým výběrem z k -tic rozumíme náhodný výběr s opakováním z k -tic (X_{1i}, \dots, X_{ki}) , tj. $(X_{1b_1}, \dots, X_{kb_1}), \dots, (X_{1b_n}, \dots, X_{kb_n})$, kde b_1, \dots, b_n je náhodný výběr s opakováním z čísel $1, \dots, n$. Takto získaný k -rozměrný

bootstrapový náhodný výběr se používá zejména pro $k = 2$. K výpočtům konfidenčních intervalů dvojnásobných charakteristik, jako jsou kovariance, koeficient korelace nebo poměr středních hodnot. Je také vhodný pro lineární a zejména nelineární regresní analýzu. Pro získání konfidenčního intervalu pro koeficient korelace realizujeme B bootstrapových náhodných výběrů z pozorovaných hodnot náhodného vektoru (X_1, X_2) . Zvolili jsme $B = 10000$. A pro každý bootstrapový výběr spočítáme pozorovanou hodnotu výběrového koeficientu korelace $R_{b,i}$, $i = 1, \dots, B$. Pro takovýto výběr hodnot koeficientu korelace již můžeme spočítat jakékoli statistiky. Významnost korelačního koeficientu byla počítána pomocí t-testu pro hodnoty korelací získané průměrem $R_{b,i}$ (Davison a Hinkley, 2003).

4.4.2 Kovariantní model chyb

Další fází práce bylo za pomoci zjištěných vztahů mezi proměnnými vytvořit kovariantní model chyb, který by na základě rozdílu modelové a naměřené hodnoty radarové odrazivosti, resp. intenzity srážek dokázal upravit hodnoty ostatních proměnných, aby lépe odpovídaly skutečnosti. Model byl sestavován ve dvou variantách. V první variantě byly využity korelační vztahy mezi radarovou odrazivostí nebo jejího přepočtu na intenzitu srážek souhrnně nazvanou P s ostatními modelovými proměnnými (vektor b) a také vztahy mezi proměnnými W , T , QV , QC a QIA (matice \mathbf{A}). Tento model byl využit v metodě asimilace I. Vektor b byl definován jako

$$\begin{pmatrix} \langle P, W \rangle \\ \dots \\ \langle P, QIA \rangle \end{pmatrix} \quad (4.5)$$

a matice \mathbf{A} definovaná jako

$$\begin{pmatrix} \langle W, W \rangle & \dots & \langle QIA, P \rangle \\ \dots & \dots & \dots \\ \langle W, QIA \rangle & \dots & \langle QIA, QIA \rangle \end{pmatrix}, \quad (4.6)$$

kde lomené závorky značí korelaci mezi veličinami x , y ve středovém bodě.

V druhé variantě, která se použila v metodě asimilace II. se využily pouze vztahy mezi radarovou odrazivostí, resp. jejího přepočtu na intenzitu srážek s ostatními modelovými proměnnými (vektor b) definovaný jako

$$\begin{pmatrix} \langle P, W \rangle \\ \dots \\ \langle P, QIA \rangle \end{pmatrix}. \quad (4.7)$$

V obou variantách se počítalo pouze s korelacemi ve středovém uzlovém bodě a kovarianční matice byly sestavovány jednotlivě pro všechny tři analyzovaná patra. Využití korelací pouze v jednom (středovém) bodě vycházela ze snahy maximálně zjednodušit modelové výpočty a získat první poznatky o vlastnostech asimilační metody. Výpočty korelací i v dalších bodech byly provedeny proto, aby bylo zřejmé kolik okolních bodů je možné v budoucnosti využít. Jejich využití se ovšem předpokládá pouze pro metody asimilace, které budou funkční pro jeden bod. Zde je třeba poznamenat, že vzhledem k náročnosti asimilačních metod z hlediska výpočetního času, bude v každém případě počet využitých bodů omezen.

4.4.3 Metoda asimilace I.

Byly spočítány autokorelace a vzájemné korelace mezi veličinami P , W , T , QV , QC , QIA s využitím dat z integrací numerického modelu COSMO v oblastech konvektivních bouří definovaných doplnit kde. Veličina P je buď radarová odrazivost (dBz), nebo intenzita srážek (mm/h).

Korelaci mezi veličinami budeme označovat $\langle a, b \rangle$:

$$\langle a, b \rangle = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \left(\frac{a_i - \bar{a}}{\text{std}(a)} \right) \left(\frac{b_i - \bar{b}}{\text{std}(b)} \right), \quad (4.8)$$

kde pruh nad proměnou značí průměr a std směrodatnou odchylku, N je počet dat. V našich výpočtech bylo N rovno 770 pro centrální bod a pro ostatní výrazně více. V případě veličin, které se nemusí vyskytovat současně (QC a QIA) to bylo méně.

Budeme předpokládat, že v daném uzlu platí, že

$$P' = \alpha_1 W' + \alpha_2 T' + \alpha_3 QV' + \alpha_4 QC' + \alpha_5 QIA', \quad (4.9)$$

kde α_i , $i=1, \dots, 5$ jsou neznámé konstanty a x' je normovaná hodnota x

$$x' = \left(\frac{x - \bar{x}}{\text{std}(x)} \right). \quad (4.10)$$

Hodnoty α_i vypočteme s využitím znalostí korelací. Rovnici (4.9) postupně vynásobíme hodnotami normovaných proměnných W , T , QV , QC , QIA a aplikujeme operátor $\langle \cdot \rangle$.

Dostaneme soustavu rovnic

$$\begin{pmatrix} \langle P, W \rangle \\ \dots \\ \langle P, QIA \rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \langle W, W \rangle & \dots & \langle QIA, P \rangle \\ \dots & \dots & \dots \\ \langle W, QIA \rangle & \dots & \langle QIA, QIA \rangle \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \dots \\ \alpha_5 \end{pmatrix} \quad (4.11)$$

pro α_i . Tím získáme závislost hodnoty P na odchylkách hodnot W, T, QV, QC, QIA od průměrů (vztah 4.9).

Naše úloha je ale opačná: chceme na základě změny P vypočítat změny W, T, QV, QC, QIA . Použijeme následující jednoduchý postup. Předpokládáme, že korelace známe pro libovolnou výšku z , tj. pro libovolnou modelovou hladinu k .

Algoritmus:

1. Máme k dispozici modelové výstupy v daném gridovém bodě (i, j, k) , tj. hodnoty $P_M, W_M, T_M, QV_M, QC_M, QIA_M$.
2. P_O je naměřená hodnota (intenzita srážek nebo radarová odrazivost) v daném gridu.
3. Vypočteme pro všechny proměnné $P_M, W_M, T_M, QV_M, QC_M, QIA_M$ průměry a směrodatnou odchylku tak, že použijeme modelové výstupy ze sousedních gridů v dané modelové hladině následujícím způsobem

$$\bar{x} = \frac{1}{9} \sum_{i'=-1, j'=-1}^{i'=1, j'=1} x_{i+i', j+j'} \quad (4.12)$$

$$std(x) = \sqrt{\frac{1}{8} \sum_{i'=-1, j'=-1}^{i'=1, j'=1} (x_{i+i', j+j'} - \bar{x})^2} \quad (4.13)$$

4. Pro danou hladinu k sestavíme a vyřešíme soustavu (4.11).
5. Předpokládáme, že změna v P se stejně promítne do odchylek normovaných proměnných k proměnným W, T, QV, QC, QIA . To znamená, že

$$\frac{P_M - P_O}{5 \cdot std(P)} = \alpha_1 \frac{W_M - W}{std(W)}, \quad (4.14)$$

a tedy nová hodnota W po asimilaci bude

$$W = W_M - \frac{std(W)}{5 \alpha_1 std(P)} (P_M - P_O) \quad (4.15)$$

Stejně se bude postupovat pro ostatní veličiny.

Výše uvedený algoritmus lze různě modifikovat. Klíčové vlastnosti, které se předpokládají, jsou:

- Linearita (rovnice 4.9)
- Normální rozdělení odchylek (všude)
- Bod 5 algoritmu vychází z předpokladu normality rozdělení
- Algoritmus je lineární a nebere v úvahu fyzikální souvislosti mezi proměnnými, např. přesycení. Proto změna veličin v absolutní hodnotě během časového kroku modelu (30

s) byla omezena následujícím způsobem: změna $W < 0,1$ m/s, $T < 0,1$ K, $QV < 0,005$, $QC < 0,002$, $QIA < 0,002$. Tyto hodnoty byly vybrány subjektivně.

4.4.4 Metoda asimilace II.

Metoda II je velmi podobná metodě I. Rozdíl je v tom, že se místo vypočtených koeficientů α_i používají přímo korelace mezi radarovou odrazivostí (intenzitou srážek) a příslušnou veličinou tj. $\alpha_1 = \langle P, W \rangle$, $\alpha_2 = \langle P, T \rangle$ atd. Obdobně jako v případě metody I se využívají maximální hodnoty změny v absolutní hodnotě: změna $W < 0,1$ m/s, $T < 0,1$ K, $QV < 0,005$, $QC < 0,002$, $QIA < 0,002$.

V případě, že model výrazně nadhodnocuje srážkové intenzity (o více jak 10 mm/h), dodatečně se snižuje QV tak, aby relativní vlhkost při nových hodnotách T a QV byla maximálně 1,05. Tato úprava vychází ze zkušeností s aplikací asimilace radarových dat (Sokol, 2011).

4.4.5 Verifikace předpovědi

Pro metodu asimilace byly vypočteny testovací předpovědi, které měly ověřit funkčnost metody. Vypočtené předpovědi byly nejprve zhodnoceny subjektivně a následně verifikovány metodou Fractions Skill Score, dále již FSS (Roberts a Lean, 2008). Tato metoda popisuje změnu kvality předpovědi s prostorovým měřítkem a využívá se pro předpovědi s vysokým rozlišením. Při verifikaci se využívají radarová měření doplněná o informace ze srážkoměrných stanic, protože samotná data ze srážkoměrných stanic nemají dostatečné plošné pokrytí. Kvalita předpovědi se zjišťuje porovnáním frakce výskytu nadprahového srážkového úhrnu P uvnitř definované elementární oblasti (dále již EA) u předpovězeného i měřeného pole srážek. Výpočet se provádí ve dvou krocích. Pro každý pixel předpovědi ve verifikační doméně a poli srážek se vypočítá frakce pokrytí definovaného okolí pixelu nadprahovou srážkou. Tento proces se pak provede pro různě velká okolí pixelu a srážkových prahů. Tímto získáme pole hodnot frakcí předpovědi a měřeného pole srážek pro různé EA a srážkové úhrny. Samotný výpočet pak probíhá podle vzorce

$$FSS = 1 - \frac{FBS}{FBS_{WORST}} \quad (4.16)$$

kde FBS je dáno vztahem

$$FBS = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (O_j - M_j)^2 \quad (4.17)$$

přičemž M_j a O_j jsou frakce předpovědi (M) a pozorování (O) v jednotlivých pixelech pole j a N je počet pixelů a FBS_{WORST} je definovaná jako nejhorší hodnota FBS pro $O_j + M_j \leq 1$ vyjadřující nulový přesah frakcí v EA a vypočítáme ji pomocí vzorce:

$$FBS_{WORST} = \frac{1}{N} \left[\sum_{j=1}^N O_j^2 + \sum_{j=1}^N M_j^2 \right] \quad (4.18)$$

Tím jak narůstá velikost okolí, dochází k filtrování předpovědi i měření a časová i prostorová shoda je pak volnější. S rostoucí EA vzrůstá hodnota FSS asymptoticky k hodnotě, která je závislá na celkovém biasu předpovědi dané nadprahové srážky.

5 VÝSLEDKY

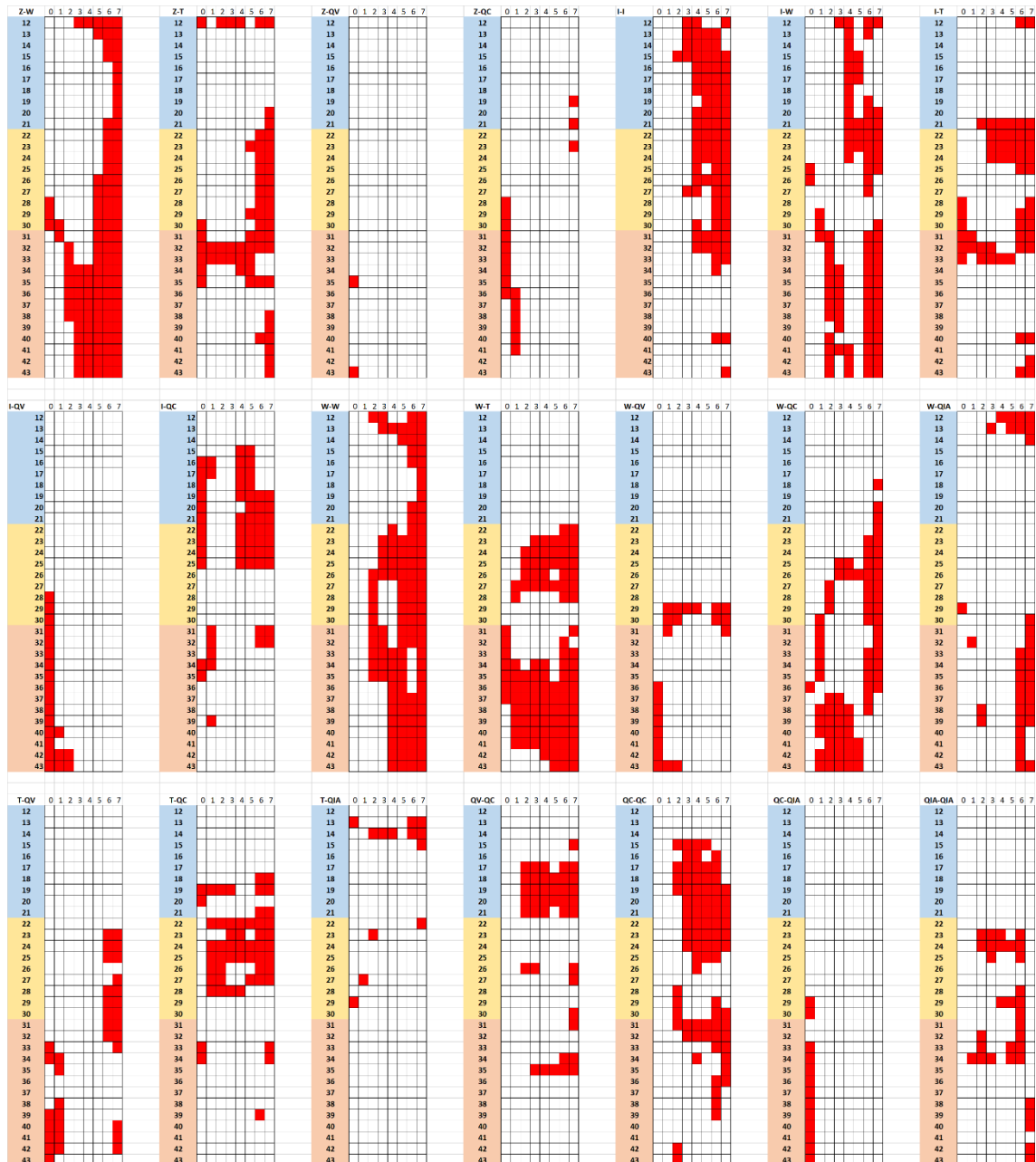
5.1 Analýza korelačních vztahů

Znalost korelačních vztahů mezi modelovými veličinami je pro sestavení kovariantního modelu chyb klíčová. V následující podkapitole si popíšeme, jak se mění hodnoty s výškou a v závislosti na vzdálenosti od středového uzlového bodu (viz obrázky 7-16). Nalezneme zde také výsledky analýzy významnosti korelací metodou bootstrap. Nejprve se zaměříme na vztahy s veličinou vyjadřující množství spadlých srážek (radarová odrazivost, resp. intenzita srážek) a následně na vztahy mezi ostatními modelovými veličinami.

5.1.1 Významnost korelačních koeficientů

Na obrázku 6 vidíme grafy, kde červeně označená políčka znázorňují místa, kde je hodnota korelace nevýznamná. Dvojice korelací $Z-Z$, $Z-QIA$, $I-QIA$, $T-T$, $QV-QV$, $QV-QIA$ mají hodnoty významné v celém vertikálním i horizontálním rozsahu. Nejsou tedy na obrázku 6 zobrazeny. Na základě těchto výsledků se rozhodovalo, zda se daná hodnota použije do kovariantního modelu. Většina nevýznamných hodnot se nachází až ve větších vzdálenostech od středového uzlového bodu. Když se podíváme na grafy změny korelací se vzdáleností pro jednotlivá patra (obr 7,9,11,13,15), na většině z nich ve vzdálenosti 3 dochází k prudké změně sklonu křivky. Tato skutečnost může nasvědčovat tomu, že hodnoty ve větších vzdálenostech se již nenachází v prostředí konvektivní buňky. Musíme vzít v potaz fakt, že konvektivní buňka je většinou protažena v jednom směru, a proto korelace nejsou funkcí jenom vzdálenosti. To však z důvodu zjednodušení zanedbáváme. Vzhledem ke velké výpočetní složitosti asimilační metody jsme nakonec do námi vytvářeného kovariantního modelu použili pouze hodnoty z uzlového bodu tj. ve vzdálenosti 0. Proto jsme označili jako statisticky nevýznamné vysoké patro ve dvojici proměnných intenzita srážek (I) - obsah oblačné vody ($I-QC$), a v nízkém patře radarovou odrazivost (Z) s obsahem oblačné vody ($Z-QC$), intenzitu srážek - obsah vodní páry ($I-QV$) a obsah oblačné vody korelovanou s obsahem ledových částic ($QC-QIA$) a vertikální rychlost obsah vodní páry ($W-QV$). Protože u hodnot korelací v nízkém patře v případě dvojice $W-T$ dochází k prudkému poklesu hodnot až do hodnot statisticky nevýznamných byla pro

kovariantní model použita průměrná hodnota korelací za nízké patro. Výsledek pro dvojici $T-QV$ je diskutabilní, protože hodnota korelace vypočítaná na základě reálných modelových dat a vypočítaná metodou bootstrap se velmi liší. Pravděpodobnou příčinou je silně nelineární vztah mezi těmito veličinami daný změnou skupenství.



Obr. 6: Grafy významnosti hodnot korelací pro jednotlivé hladiny a vzdálenosti od středového uzlového bodu. Jednotlivá patra jsou vyznačena barevně (modrá- vysoké patro, žlutá- střední patro, červená- nízké patro). Červeně označená políčka znázorňují statisticky nevýznamné hodnoty. Zdroj: autor.

5.1.2 Korelace radarové odrazivosti a intenzity srážek s ostatními proměnnými

Pojem korelace nebo kovariance se ve fyzikálních vědách používá ke zjednodušenému popisu složitých závislostí. Používá se i v případech, kdy je zjevné, že korelované veličiny nemají

normované rozdělení a nelze tedy spoléhat na teoretické vlastnosti korelace ve statistických postupech. Přesto zkušenost ukazuje, že i takto použité korelace dávají užitečné informace o vzájemném chování korelovaných veličin. V tomto smyslu se korelace používá i zde.

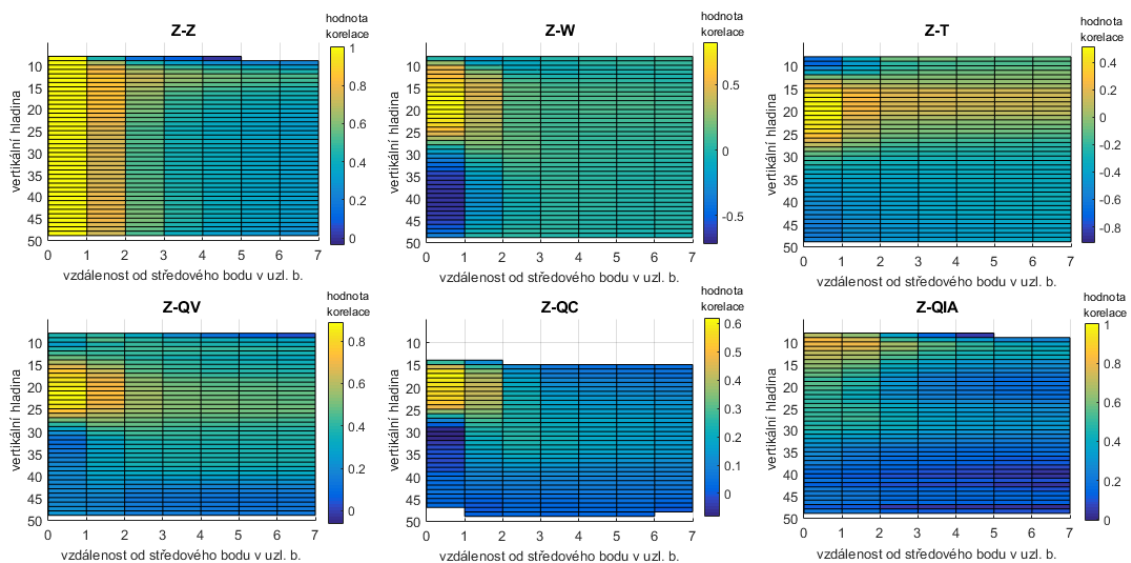
Korelace proměnných ukazující na množství srážek byly, jak již bylo zmíněno výše, počítány ve dvou variantách. Buď tedy jako radarová odrazivost Z (jednotka dBz) nebo intenzita srážek I (jednotka mm/h). Obecně můžeme říct, že hodnoty korelací radarové odrazivosti jsou vyšší než hodnoty intenzity srážek. Obecným problémem u kvantitativního vyjadřování množství srážek je vysoká četnost nulových hodnot. Intenzita srážek tak nemá normální rozdělení. Fakt že radarová odrazivost je logaritmem intenzity srážek (viz rovnice 4.3) by měla radarovou odrazivost více přibližovat normalitě. U radarem vypočtené radarové odrazivosti je kvůli logaritmickému vyjádření vztahu uměle nastavena nejmenší hodnota na -150. Musíme počítat s tím, že tato skutečnost může výsledné vztahy ovlivňovat.

Z-Z/I-I

U autokorelace radarové odrazivosti, resp. intenzity srážek najdeme jen malé rozdíly mezi korelacemi pro jednotlivá patra. Křivka má exponenciální tvar a u intenzity srážek klesá strměji se vzdáleností. Tento charakter odpovídá struktuře konvektivní buňky, která má malý vertikální rozsah a maximální hodnoty odrazivosti i intenzity srážek se nacházejí ve středu buňky.

Z-W/I-W

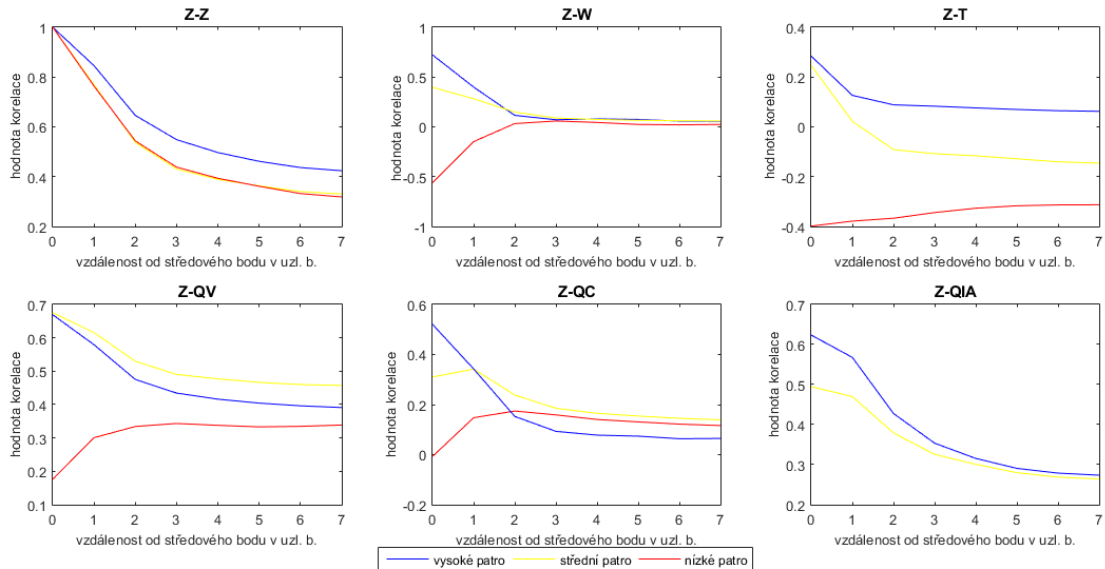
Když se podíváme na vertikální profily $Z-W$ a $I-W$, hodnoty korelací pro vzdálenost 0 jsou pro nízké hladiny záporné ve výšce jsou pak hodnoty korelací kladné. V obou případech se hodnoty korelací se vzdáleností přibližují k nule. Tomuto charakteru tedy odpovídají také křivky vypočítané průměrem pro jednotlivá patra. Vysoké patro má maximum u odrazivosti 0,72 a u srážek 0,45 ve vzdálenosti 3 jsou již korelace téměř nulové. U středního patra jsou extrémně menší pro odrazivost 0,4 a u srážek 0,16. U nízkého patra je charakter opačný, korelace se zvyšují se vzdáleností a minima jsou -0,56 resp. -0,28. Záporné korelace nelze jednoznačně vysvětlit, ale patrně se jedná o vypadávání srážek kombinované s nasáváním vzduchu v důsledku vzestupného pohybu vzduchu ve středu konvektivní buňky.



Obr. 7: Vertikální profily hodnot autokorelace radarové odrazivosti (Z) a její korelace s ostatními modelovými veličinami vertikální rychlost (W), teplota (T), směšovací poměr vodní páry (QV), obsah oblačné vody (QC) a obsah ledových částic (QIA). Na ose x vzdálenost od středového bodu v jednotkách uzlových bodů. Vypočtená hodnota korelace pro daný interval definovaný v tabulce 1. byla přiřazena jeho horní hranici. Totéž platí pro obrázky 8-16. Na ose y číslo vertikální hladiny, jejich přibližnou hodnotu v metrech lze vidět v příloze 1. Zdroj: autor.

Z-T/I-T

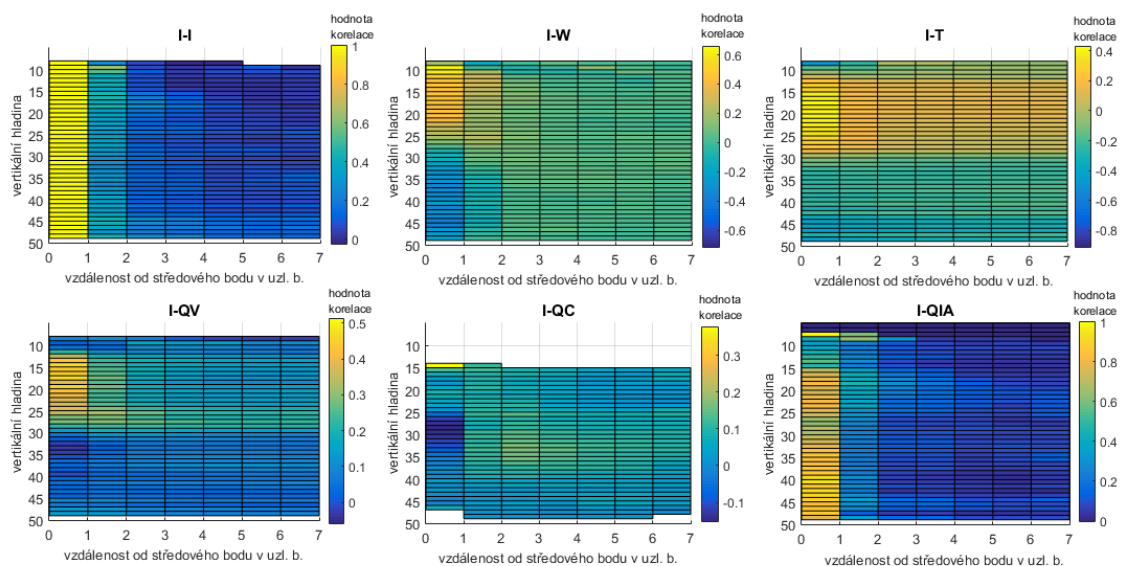
Vzájemná závislost proměnných Z/I a T je stejně jako u korelace s vertikální rychlostí záporná pro nízké patro. Pro srážky má téměř konstantní hodnotu a to -0,2 a pro odrazivost korelační koeficient stoupá z hodnoty -0,4 na -0,3. U středního patra v hodnotách odrazivosti se korelace dostávají od vzdálenosti 3 do záporných hodnot. Není tomu tak u srážek, kde jsou hodnoty kladné pro všechny vzdálenosti. Korelace opět rostou s výškou a maximální hodnoty nalezneme ve vysokém patře. Záporné hodnoty v nízkém patře můžeme dát do souvislosti s faktem, díky silnému výstupnému proudu musí být odebraný vzduch v přízemních hladinách kompenzován chladnějším vzduchem z okolí z downdraftu. Záporné hodnoty ve větších vzdálenostech od středového bodu jsou následkem sestupného proudu, který transportuje chladný vzduch s větších výšek



Obr. 8: Grafy hodnot autokorelace radarové odrazivosti (Z) a jejich korelací s ostatními modelovými veličinami vertikální rychlost (W), teplota (T), směšovací poměr vodní páry (QV), obsah oblačné vody (QC) a obsah ledových částic (QIA) pro jednotlivá patra v závislosti na vzdálenosti od středového bodu v jednotkách uzlových bodů (osa x). Zdroj: autor.

Z-QV/I-QV

Když se podíváme na vztah radarové odrazivosti a směšovacího poměru vodní páry vidíme, že hodnoty korelací jsou relativně vysoké. Pro nízké patro hodnoty stoupají se vzdáleností z hodnoty 0,18 až k hodnotě 0,34. U pater středního a vysokého hodnoty se vzdáleností klesají a to z hodnoty 0,67 na hodnotu 0,39 pro střední patro a 0,46 pro patro vysoké. Skutečnost, kterou lze vysvětlit vazby je advekce vlhkého vzduchu, která ovlivňuje množství vlhkosti. Dochází ke kondenzaci vodní páry, a tak ke zvyšování oblačných či ledových částic což má přímý následek zvyšování odrazivosti. Ve variantě intenzita srážek-směšovací poměr vodní páry jsou hodnoty korelací obecně menší. Pro nízké patro korelace nepřekročí hodnotu 0,08. Pro nízké patro jsou tedy tyto dvě proměnné nekorelované. U středního a vysokého patra jsou již korelace výraznější. U vysokého patra je pokles strmější a to z 0,41 na 0,12 než u patra středního kde jsou maximální hodnoty 0,312 a minimum 0,121.



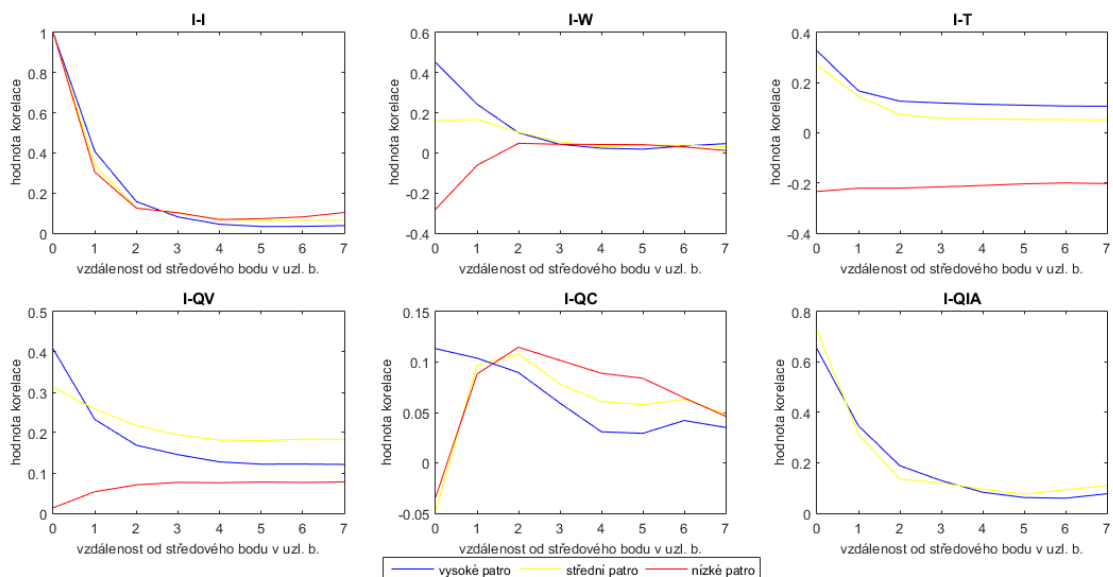
Obr. 9: Vertikální profily hodnot autokorelace intenzity srážek (I) a její korelace s ostatními modelovými veličinami vertikální rychlost (W), teplota (T), směšovací poměr vodní páry (QV), obsah oblačné vody (QC) a obsah ledových částic (QIA). Na ose x vzdálenost od středového bodu v jednotkách uzlových bodů. Na ose y číslo vertikální hladiny, jejichž přibližnou hodnotu v metrech lze vidět v příloze 1. Zdroj: autor.

Z-QC/I-QC

Obsah oblačné vody souvisí s výstupnými proudy, které transportují teplý vzduch do vyšších hladin kde dochází ke kondenzaci vodní páry. Ve variantě intenzita srážek směšovací poměr oblačné vody jsou proměnně nekorelované. U korelací odrazivost obsah oblačné vody jsou již korelace ve vyšších patrech významnější. Ve vysokém patře korelace klesají z maxima 0,52 v bodě 1 k hodnotě 0,06. Ve středních hladinách nalezneme maximum až v bodě 2, což přičítáme menšímu množství korelovaných dat než u větších vzdáleností. Nízké patro pro tuto dvojici proměnných není korelované. Maximální hodnoty jsou 0,15.

Z-QIA/I-QIA

Průběh křivek těchto veličin je značně odlišný pro obě varianty vyjádření množství srážek. Korelace u intenzity srážek vykazuje jen nepatrný rozdíl mezi hodnotami pro jednotlivá patra. Maximum je v bodě 1 s hodnotou 0,67 pro vysoké patro a 0,73 pro střední. Hodnoty strmě klesají k nule. Korelace u odrazivosti klesá pozvolněji, než tomu bylo u srážek a rozdíl mezi hodnotami ve středovém bodě pro vysoké a střední patro je 0,13. Vztahy v nízkém patře nebyly počítány z důvodu absence ledových částic v těchto vertikálních hladinách.



Obr. 10: Grafy hodnot autokorelace intenzity srážek (I) a jejich korelací s ostatními modelovými veličinami vertikální rychlost (W), teplota (T), směšovací poměr vodní páry (QV), obsah oblačné vody (QC) a obsah ledových částic (QIA) pro jednotlivá patra v závislosti na vzdálenosti od středového bodu v jednotkách uzlových bodů (osa x). Zdroj: autor.

5.1.3 Korelace vertikálních rychlostí s ostatními proměnnými

W-W

Konvektivní buňka je charakteristická výstupným proudem v celém jejím vertikálním rozsahu, který je ve větší vzdálenosti od středu kompenzován proudy sestupnými. To je patrné ve výsledcích hodnot korelací, které prudce klesají se vzdáleností až do mírně záporných hodnot a rozdíly mezi hodnotami v jednotlivých patrech jsou nepatrné.

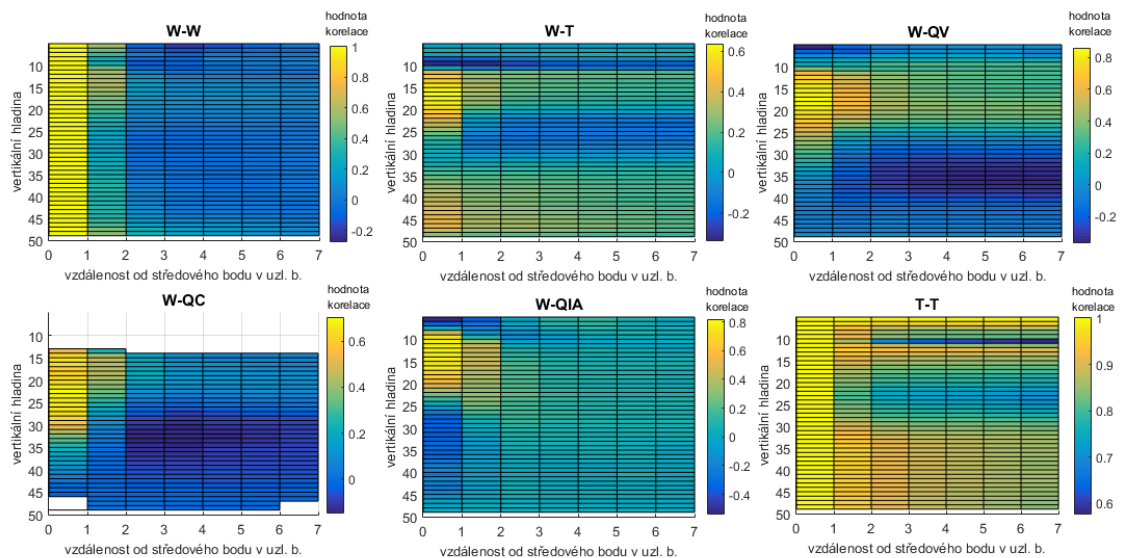
W-T

Ve výsledcích korelací vertikální rychlosti a teploty se odráží fakt, že díky vysokým vertikálním rychlostem zde probíhá advekce teplého vzduchu do vyšších hladin. Průběh křivky pro nízké patro má téměř konstantní hodnotu, a to pravděpodobně díky konvekci v mezní vrstvě, která se projevuje nejen v oblasti bouří. Křivky pro střední a vysoké patro klesají se vzdáleností, v případě středního patra až do záporných hodnot. Tento fakt může mít souvislost se sestupnými proudy, které kompenzující proudy vzestupné ve větší vzdálenosti od středu buňky a transportují chladnější vzduch z větších výšek.

W-QV

Výstupné a sestupné proudy se projevují i u dvojice proměnných W - QV . Díky výstupným proudům dochází k transportu vlhkého vzduchu do větších výšek. Hodnoty korelací stoupají

s výškou a klesají se vzdáleností. U vysokého patra jsou korelace významné i pro větší vzdálenosti, hodnoty neklesnou pod 0,3. V nízkém patře jsou hodnoty korelací od vzdálenosti 2 záporné. Sestupné proudy transportují sušší vzduch z větších výšek, a tato skutečnost může vysvětlit záporné korelace.



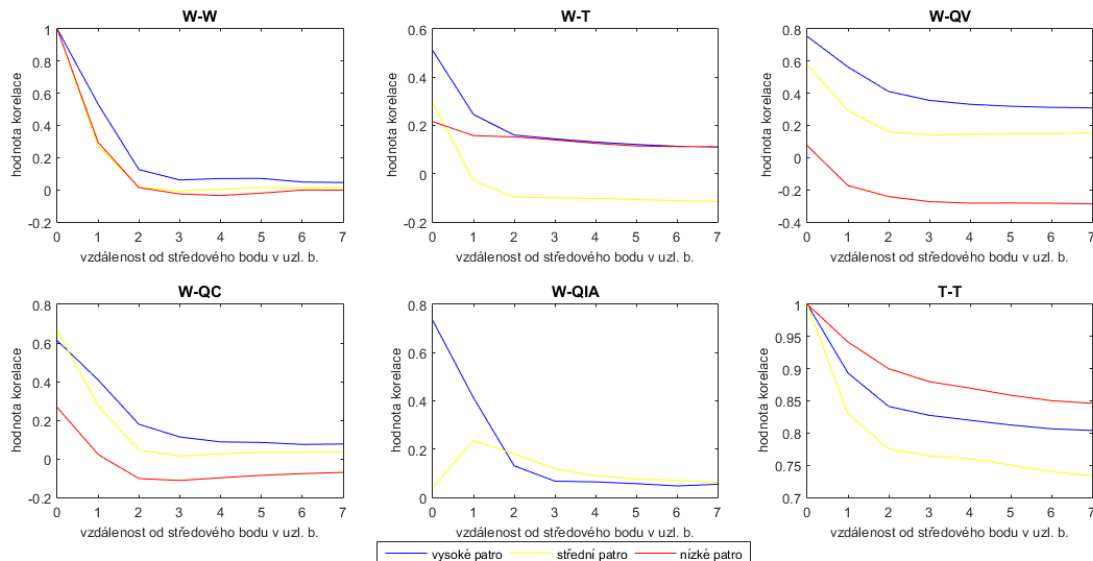
Obr. 11: Vertikální profily hodnot autokorelací vertikální rychlosti a teploty a korelací vertikální rychlosti (W) s ostatními modelovými veličinami teplota (T), směšovací poměr vodní páry (QV), obsah oblačné vody (QC) a obsah ledových částic (QIA). Na ose x vzdálenost od středového bodu v uzl. b. Na ose y číslo vertikální hladiny, jejich přibližnou hodnotu v metrech lze vidět v příloze 1. Zdroj: autor.

W-QC

Vztahy mezi dvojicí proměnných W - QC mají exponenciální charakter. Hodnoty klesají pro střední a vysoké patro z hodnoty 0,6 se vzdáleností k nule. Pro střední patro je pokles strmější. Nízké patro vykazuje nižší hodnoty korelací a se vzdáleností klesá až do mírně záporných hodnot, což má patrně souvislost s vypadáváním srážek.

W-QIA

Oproti bakalářské práci (Sedláková, 2015) bylo již v této verzi počítáno nejen s obsahem ledových částic, ale se sumou ledových částic, sněhu, krupek a krup. Tato skutečnost se pozitivně ukázala na výsledcích korelací pro vysoké patro. Hodnoty klesají se vzdáleností k nule a maximum je v bodě nula rovné 0,73. Pro střední patro jsou korelace i tak nevýrazné. Není zřejmé, jak explicitně tuto skutečnost vysvětlit.



Obr. 12: Grafy hodnot autokorelací vertikální rychlosti a teploty a korelací vertikální rychlosti (W) s ostatními modelovými veličinami vertikální rychlost (W), teplota (T), směšovací poměr vodní páry (QV), obsah oblačné vody (QC) a obsah ledových částic (QIA) pro jednotlivá patra v závislosti na vzdálenosti od středového bodu v jednotkách uzlových bodů (osa x). Zdroj: autor.

5.1.4 Korelace teploty s ostatními proměnnými

$T-T$

Autokorelace teploty jsou v celém zkoumaném horizontálním rozsahu vysoké. Minimem je hodnota 0,73 a to pro střední patro ve vzdálenosti 8. Nejvyšší hodnoty korelací vykazuje nízké patro. Tuto skutečnost vysvětlujeme advekcí teplého vzduchu do vyšších hladin.

$T-QV$

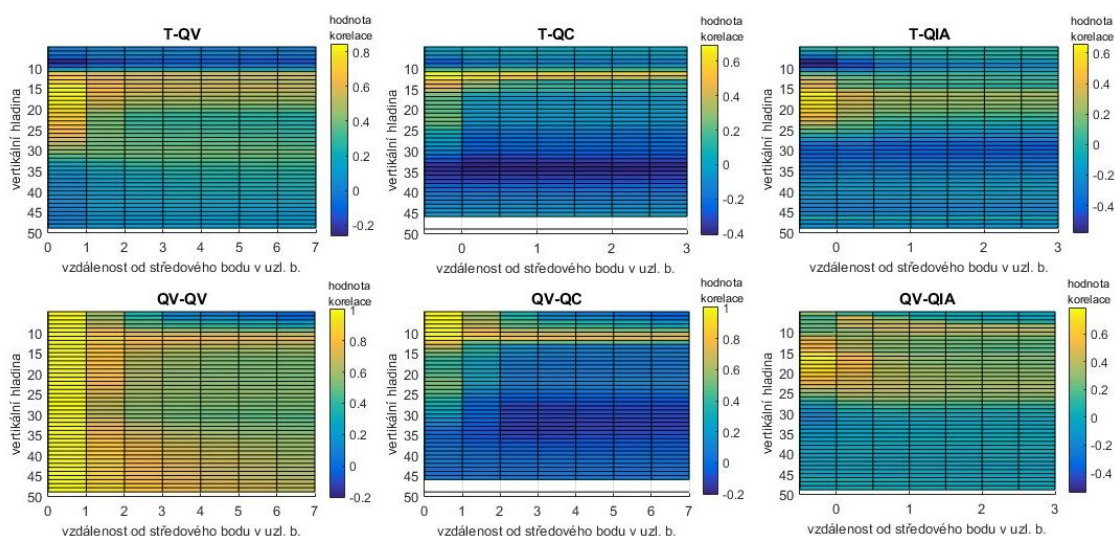
Tyto dvě veličiny jsou velmi dobře korelované i ve větších vzdálenostech. Pro nízké patro se hodnoty se vzdáleností nemění tak extrémně jako u středního a vysokého patra. Oproti střednímu a vysokému patru hodnoty korelací pro nízké patro mírně rostou se vzrůstající vzdáleností. Takto silné vazby vysvětlujeme vertikální advekcí, při které dochází k přenosu tepla i vlhkosti do vyšších pater. Nižší korelace v nízkém patře mohou být následkem kondenzace vodní páry či tání ledových částic. Tyto změny skupenství jsou silně nelineární a ovlivňují současně více veličin.

T-QC

Korelace dvojice proměnných T-QC jsou pro nízké patro a pro patro střední pro větší vzdálenosti než 2 záporné. Tato skutečnost má patrně souvislost s vypadáváním srážek. Pro vysoké patro jsou hodnoty kladné s maximem 0,31 klesající se vzdáleností k nule.

T-QIA

Také u této dvojice nebylo počítáno s nízkým patrem. Největší korelace nalezneme v nejvyšším patře, hodnoty zde exponenciálně klesají se vzdáleností v hodnoty 0,4 na hodnotu 0,15. V patře středním hodnoty klesají se vzdáleností až do záporných hodnot. I zde můžeme hledat analogii ve vypadáváním srážek, kdy dochází k poklesu množství ledových částic.



Obr. 13: Vertikální profily hodnot korelace teploty a ostatních modelových veličin směšovací poměr vodní páry (QV), obsah oblačné vody (QC) a obsah ledových částic (QIA), autokorelací směšovacího poměru vodní páry (QV) a její korelací s modelovými veličinami obsah oblačné vody (QC) a obsah ledových částic (QIA). Na ose x vzdálenost od středového bodu v jednotkách uzlových bodů. Na ose y číslo vertikální hladiny, jejich přibližnou hodnotu v metrech lze vidět v příloze 1. Zdroj: autor.

5.1.5 Korelace vlhkosti s ostatními proměnnými

QV-QV

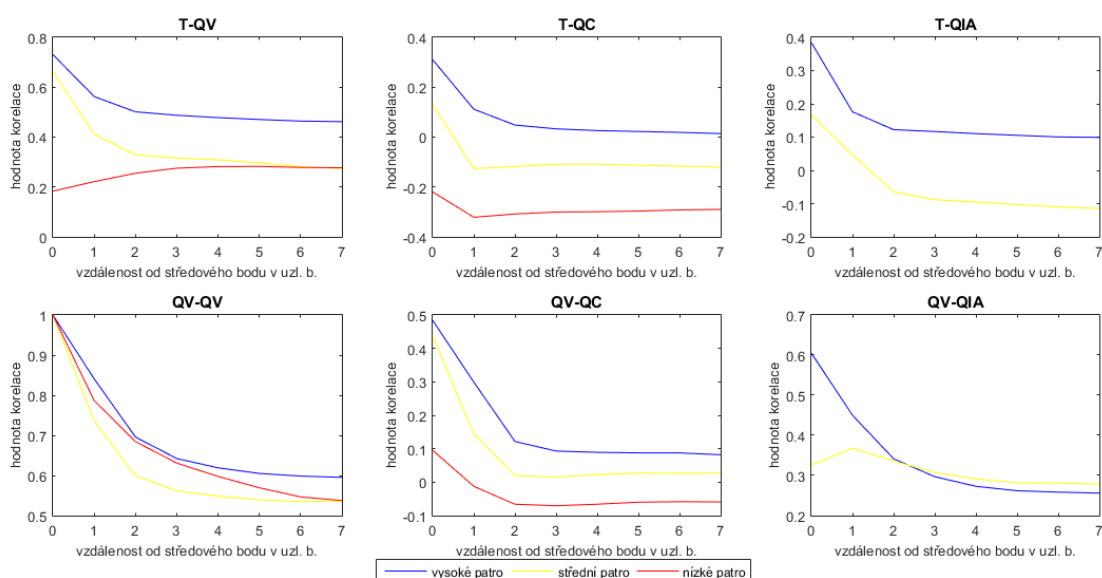
Na silnou závislost ukazují i hodnoty autokorelací směšovací poměr vodní páry. Rozdíly mezi jednotlivými hladinami jsou minimální a klesají se vzrůstající vzdáleností k hodnotě 0,55. Takto vysoké hodnoty v celém horizontálním i vertikálním měřítku ukazují, že silný vztah nalezneme i mimo oblasti konvektivních buněk.

QV-QC

Korelace veličin vodní pára a oblačná voda stoupají s výškou. Nejvyšší hodnoty korelací nalezneme ve vzdálenosti 1 pro vysoké patro a to 0,48. Střední hladiny mají maximum v bodě 1 rovné 0,44. Hodnoty se se vzdáleností přibližují nule. Pro vysoké patro se hodnoty asymptoticky blíží hodnotě 0,15. U nižších hladin jsou hodnoty korelací nevýrazné, s větší vzdáleností dokonce záporné, což můžeme přičítat faktu vypadávání srážek.

QV-QIA

V nízkých hladinách nebyly korelace počítány a to kvůli nepřítomnosti ledových částic. Počítáno bylo tedy až od hladiny 30 odpovídající 3295 metrům. Ve středním patře se hodnoty se vzrůstající vzdáleností mění méně patrně než ve vysokých patrech, kde klesají z maxima 0,6 v bodě 1 k hodnotě 0,26.



Obr. 14: Grafy hodnot korelací teploty a ostatních modelových veličin směšovací poměr vodní páry (QV), obsah oblačné vody (QC) a obsah ledových částic (QIA), autokorelací směšovacího poměru vodní páry (QV) a její korelací s modelovými veličinami obsah oblačné vody (QC) a obsah ledových částic (QIA) pro jednotlivá patra v závislosti na vzdálenosti od středového bodu v jednotkách uzlových bodů (osa x). Zdroj: autor.

5.1.6 Korelace oblačné vody a ledových částic

QC-QC

Hodnoty korelací se pro jednotlivá patra neliší. Průběh křivky má exponenciální charakter, velmi rychle klesá se vzdáleností a asymptoticky se blíží k nule. A to už ve vzdálenosti 2. Tato

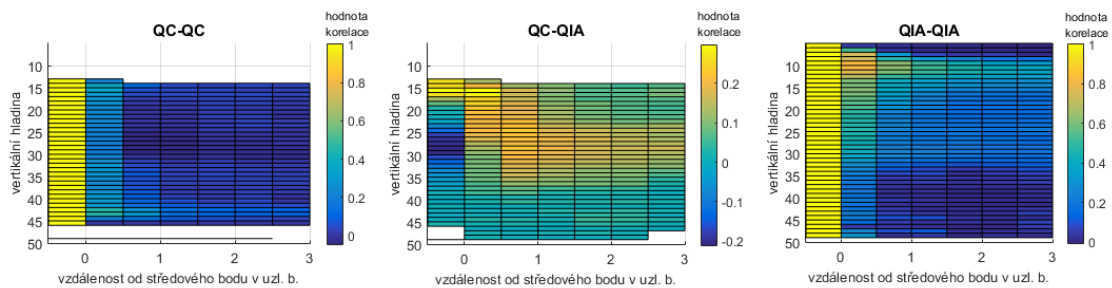
skutečnost poukazuje na fakt, že ve větších vzdálenostech jsou proměnné obsah oblačné vody nekorelované.

QC-QIA

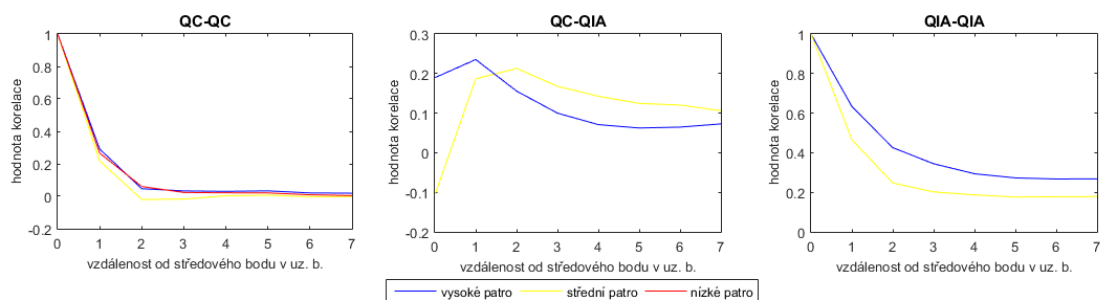
Korelovat tuto dvojici proměnných je bezpředmětné díky jejich charakteristickému rozdělení ve vertikálním sloupci. Jen malá oblast obsahuje jak oblačnou vodu, tak ledové částice. Mezi těmito proměnnými se vztah nevyskytuje.

QIA-QIA

Autokorelace proměnné směšovací poměr ledových částic má pro všechna patra exponenciální charakter průběhu korelací se vzdáleností. Hodnoty klesají extrémněji ve středním patře.



Obr. 15: Vertikální profily hodnot autokorelací proměnných obsah oblačné vody (QC) a obsah ledových částic (QIA) a jejich vzájemné korelace. Na ose x vzdálenost od středového bodu v jednotkách uzlových bodů. Na ose y číslo vertikální hladiny, jejich přibližnou hodnotu v metrech lze vidět v příloze 1. Zdroj: autor.



Obr. 16: Grafy hodnot autokorelací (osa y) proměnných obsah oblačné vody (QC) a obsah ledových částic (QIA) a jejich vzájemné korelace pro jednotlivá patra v závislosti na vzdálenosti od středového bodu v jednotkách uzlových bodů (osa x). Zdroj: autor.

5.2 Návrh kovariantního modelu a asimilace

Základní myšlenka asimilace spočívala v následujícím. Ačkoli model má popisovat skutečné procesy, vzhledem k použitým aproximacím a zjednodušením, chování modelu neodpovídá zcela skutečnosti. Proto, pokud chceme, aby z modelu vypadávaly pozorované srážky, musíme

zajistit, aby hodnoty modelových proměnných a jejich vzájemný vztah byl takový, kdy v modelu je spuštěn proces vypadávání srážek. K tomu, abychom věděli, kdy jsou tyto podmínky splněny a abychom uměli modelová data upravit tak, aby byly tyto podmínky splněny, chceme použít kovariantní model. Ten přibližně, ve smyslu kovariancí, popisuje, jak jednotlivé hodnoty veličin upravit, aby bylo dosaženo zadaného cíle. To je také důvod, proč se kovariantní model vyvíjel na modelových datech z reálných předpovědí. Kromě toho takto podrobná skutečná naměřená data obdobných veličin, nejsou reálně dostupná.

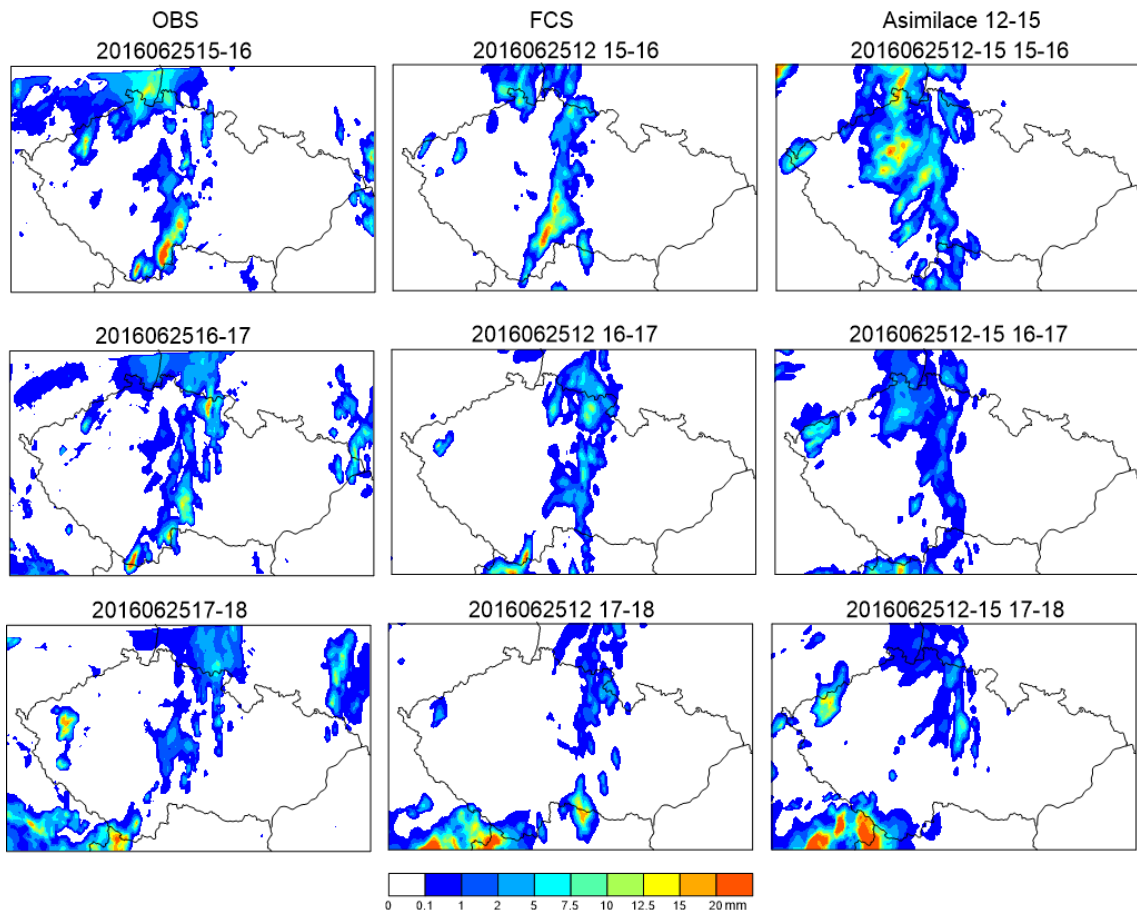
Bylo testováno dvě metody asimilace. Pro každou z nich byl sestaven kovariantní model chyb (příloha 2, 3, 4). Nejprve jsme se zaměřili na postup, který se snažil zčásti analyticky řešit optimální způsob asimilace radarové odrazivosti spočívající v úpravě následujících modelových veličin: W , T , QV , QC a QIA (metoda asimilace I.). Tento postup se však ukázal jako nevhodný bez ohledu na to, zda byla při asimilaci použita odrazivost nebo intenzita srážek (viz obrázek 17). Vypočtené vztahy α_i , které měly upravovat hodnoty modelových veličin byly nelogické, měly opačné znaménko, než se očekávalo. Proto byl aplikován jiný postup založený na technice podobné metodě nudging (metoda asimilace II.).

Obrázek 17 ukazuje neuspokojivé výsledky předpovědi srážek metodou asimilace I., na příkladu předpovědi, která začíná 25.6.2016 ve 12 UTC, radarová data 3D se asimilují do 15 UTC a potom následuje předpověď v rozmezí 15-18 UTC.

Metoda II je podobná metodě I. Zásadní rozdíl je, že v této metodě nevyužíváme vztahy mezi proměnnými W , T , QV , QC a QIA ale jen korelace mezi radarovou odrazivostí (intenzitou srážek) a příslušnou veličinou. Zaměřili jsme se pouze na použití radarové odrazivosti, protože hodnoty korelací v případě intenzity srážek byly menší a v některých případech dokonce nulové (viz příloha 5.). Použití radarové odrazivosti se zpravidla používá, což může vyplývat z faktu, že statistické rozdělení odrazivosti je bližší k normálnímu rozdělení než rozdělení intenzit srážek.

Metoda asimilace II. byla otestovaná na dvou předpovědích. Jedná se o předpovědi, kdy byly srážky vyjádřeny pomocí radarové odrazivosti.

1. Předpověď začíná 28.5.2016 ve 12 UTC, radarová data 3D se asimilují do 15 UTC a potom následuje předpověď v rozmezí 15-18 UTC.
2. Předpověď začíná 16.6.2016 ve 12 UTC, radarová data 3D se asimilují do 16 UTC a potom následuje předpověď v rozmezí 16-19 UTC.



Obr. 17: Příklad předpovědi s využitím asimilace I. ze dne 25.6.2016 pro 15-18 hodinu. V levém sloupci je zobrazen odhad hodinových srážek odvozený od radarových a srážkoměrných měření, tzv. MERGE produkt ČHMU. V prostředním sloupci předpověď bez asimilace. V pravém sloupci je zobrazena předpověď s asimilací. Zdroj: autor.

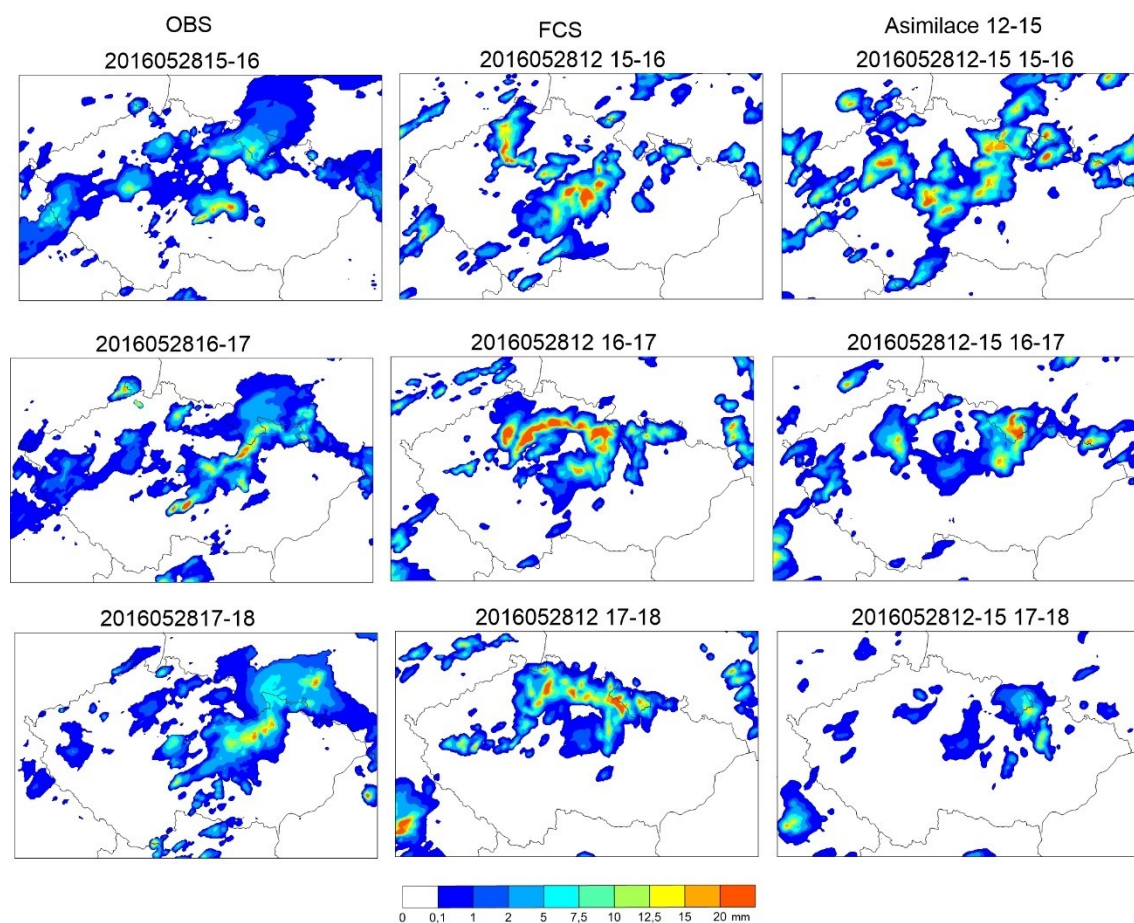
5.3 Testovací předpovědi

V následující podkapitole jsou popsány výsledky předpovědi s využitím asimilační metody II. a jejich verifikace. Na obrázcích 18. a 20 Jsou znázorněny hodinové úhrny srážek z radarů a srážkoměrů, MERGE 2 (levý sloupec) a modelových srážek bez asimilace (prostřední sloupec) a s asimilací (pravý sloupec). Na obrázcích 19 a 21 pak vyhodnocení pomocí metody FSS.

5.3.1 Předpověď na 28.5. 2016

Pro situaci ze dne 28.5. 2016 je patrné zlepšení předpovědi pro hodiny 16-17 a 17-18. U předpovědi na 15-16 hodin lze vidět lepší prostorové rozmístění srážek než u předpovědi bez asimilace. Objem srážek je však nadhodnocený. U předpovědi na 16-17 hodin lze vidět zlepšení předpovědi jak v lokalizaci, tak v objemu srážek, nicméně celkový rozsah srážek je podhodnocený. Model s asimilací již falešně negeneruje pás silné konvekce v oblasti Polabí. U

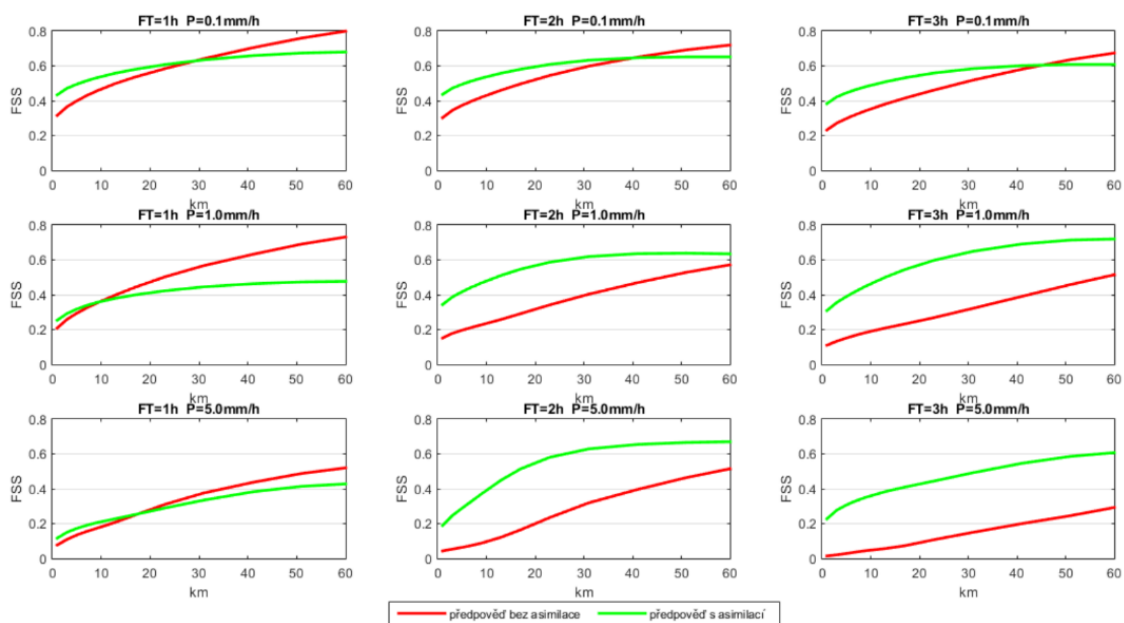
předpovědi na 17-18 hodin vidíme zlepšení v lokalizaci srážek, úhrn srážek je však významně podhodnocen. Výrazným zlepšením je fakt, že model s využitím asimilace již negeneruje falešnou srážku v severovýchodní oblasti Čech. Významné srážky na hranici Čech a Moravy však nezachytil jak model bez asimilace, tak model s ní. Model s asimilací poměrně dobře lokalizuje srážkové pole v okolí Javornického výběžku, podceňuje ale celkový rozsah. Ani využitím asimilace se nepodařilo zlepšit předpověď v JV Německu, kde i přesto model generuje falešnou srážku.



Obr. 18: Příklad předpovědi s využitím asimilace II. ze dne 28.5.2016 pro 15-18 hodinu. V levém sloupci je zobrazen odhad hodinových srážek odvozený od radarových a srážkoměrných měření, tzv. MERGE produkt ČHMU. V prostředním sloupci předpověď bez asimilace. V pravém sloupci je zobrazena předpověď s asimilací. Zdroj: autor.

Při pohledu na grafy vyhodnocení předpovědi metodou FSS (obr 19) pro první hodinu (15-16) vidíme pro všechny tři prahové hodnoty srážek 0,1 mm/h 1 mm/h a 5 mm/h jen nepatrné zlepšení předpovědi pro malé EA. Pro větší hodnoty elementární oblasti hodnoty FSS dokonce dosahují lepších výsledků, (tj. vyšších hodnot) v případě předpovědi bez asimilace. Tato skutečnost je dána nadhodnocením srážkových úhrnů v případě předpovědi s asimilací. Předpověď na 2 hodiny již podle hodnot FSS přináší výraznější zlepšení. Zvláště pak pro

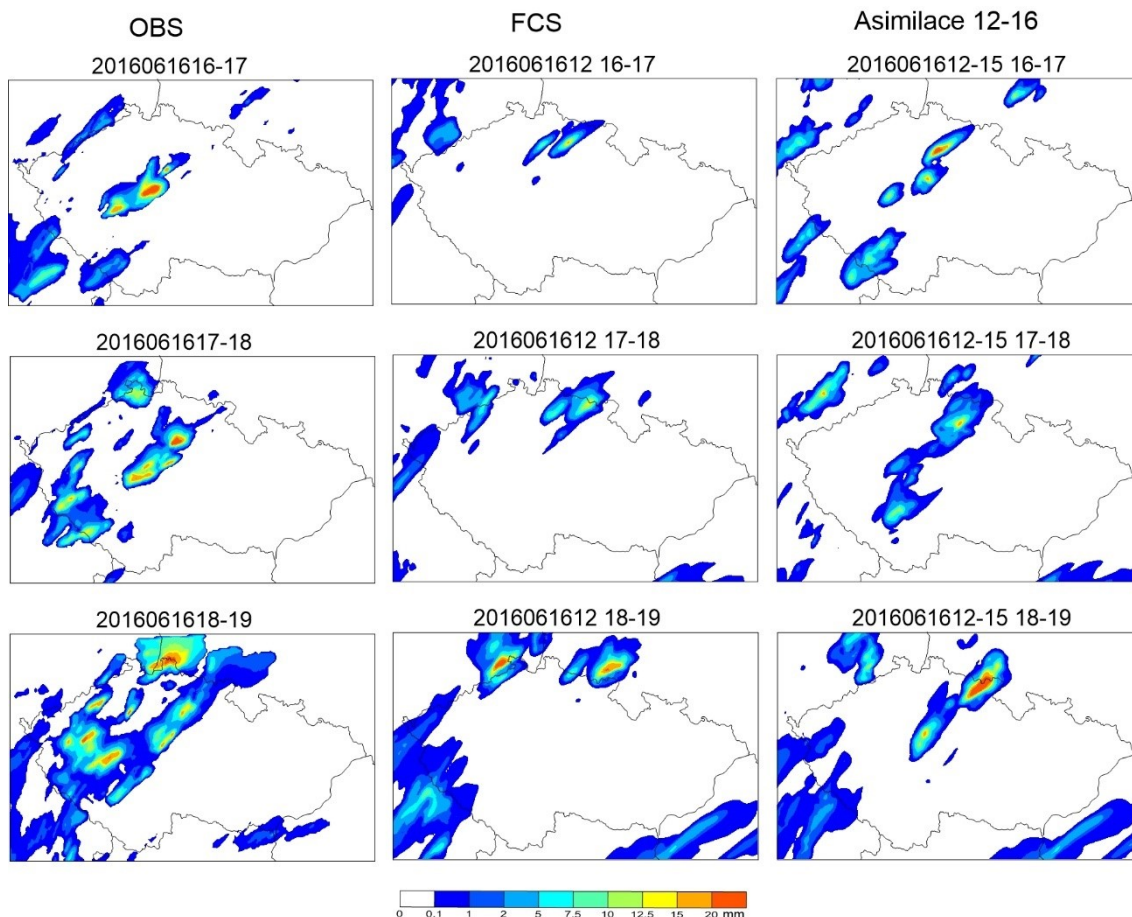
prahové hodnoty 1 a 5 mm/h. A to díky tomu, že model s využitím asimilace již negeneruje velmi výraznou falešnou srážku v oblasti Polabí. U předpovědi na 3 hodiny je zlepšení pro malé úhrny srážek menší než v případě prahové hodnoty 1 a 5 mm/h. Pro vyšší úhrny srážek je zlepšení výrazné, zvláště pak u hodnoty 5 mm/h. Tato skutečnost je stejně jako v případě předpovědi na 2 hodiny způsobena tím, že model s využitím asimilace negeneruje falešnou srážku v severovýchodní oblasti Čech.



Obr. 19 Vyhodnocení předpovědi ze dne 28.5.2016 metodou FSS. Výsledky jsou počítané pro první tři hodiny předpovědi FT=1;2;3 a tři prahové hodnoty P=0,1; 1 a 5 mm/h. Zdroj: autor.

5.3:2 Předpověď na 16.6. 2016

Druhým termínem pro verifikaci předpovědi bylo 16.6.2016, asimilace probíhala v rozmezí 12-16 hodin, samotná předpověď pak byla počítána pro 3 následující hodiny. Také v tomto případě je patrné zlepšení předpovědi. Předpověď pro 16-17 hodin s využitím asimilace má oproti modelu bez asimilace lepší prostorové rozmístění srážek ovšem s výraznou chybou v lokalizaci maximálních úhrnů. Konvektivní srážky v oblasti středních Čech jsou podhodnocené, model navíc generuje výraznou oblast srážek navazující na srážky ve středních Čechách protaženou v severovýchodním směru až k hranicím České Republiky. Srážkové pole předpovědi pro 17-18 hodin je posunutě severovýchodním směrem. Model nicméně negeneruje srážky v oblasti Šluknovského výběžku, naopak generuje falešné srážky v Sasku. Také v předpovědi na 18-19 hodin jsou chybně lokalizované maximální úhrny. Pás srážek v SV-JZ směru je již oproti předpovědi bez asimilace lépe vystižen, model však stále negeneruje výraznou srážkovou oblast v západních Čechách a v oblasti Frýdlantského výběžku.

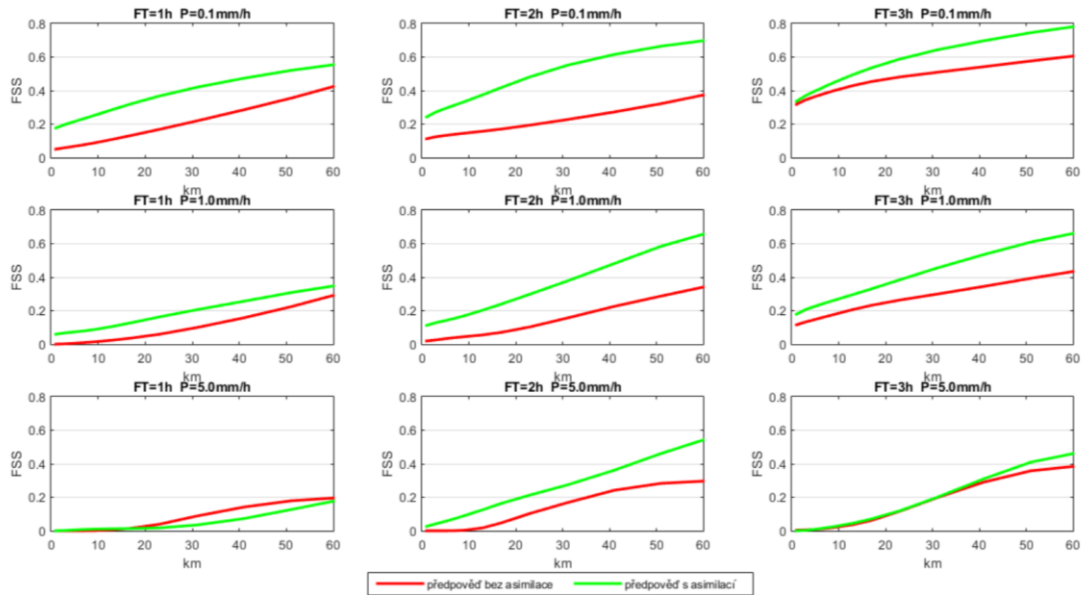


Obr. 20: Příklad předpovědi s využitím asimilace II. ze dne 16.6.2016 pro 16-19 hodinu. V levém sloupci je zobrazen odhad hodinových srážek odvozený od radarových a srážkoměrných měření, tzv. MERGE produkt ČHMU. V prostředním sloupci předpověď bez asimilace. V pravém sloupci je zobrazena předpověď s asimilací. Zdroj: autor.

Na obrázku 21 je kvantitativní zhodnocení předpovědi metodou FSS. Nejmenší zlepšení dosahuje předpověď na 1 hodinu (16-17 h), při prahové srážce 5 mm je dokonce označena jako špatná, což je ale následkem špatné lokalizace míst s vysokým srážkovým úhrnem. U předpovědi na 2 hodiny po začátku předpovědi (17-18 h) je zlepšení výrazné, zvláště pro prahové srážky 0,1 a 1 mm/h. U prahové hodnoty 5 mm/h je také pozorovatelné zlepšení není však tolik patrné. V případě předpovědi na 3 hodiny se pro prahové hodnoty 0,1 a 1 mm/h předpověď zlepšuje oproti předpovědi bez asimilace s rostoucí elementární plochou. Pro prahovou hodnotu 5 mm/h jsou hodnoty FSS téměř beze změny a hodnoty FSS jsou malé. Tento fakt je důsledkem toho, že model negeneruje výraznou srážkovou oblastí Západních Čechách.

U obou verifikačních předpovědí je výraznější zlepšení až ve druhé a třetí hodině předpovědi s asimilací. Tuto skutečnost lze vysvětlit tím, že model potřebuje určitý čas, aby se hodnoty modelových proměnných násilně měněných během asimilace „přizpůsobily“ potřebám

modelu. Jedná se o skutečnost, která vyžaduje další studium, které překračuje rámec této práce. U obou předpovědí není zřejmý znatelný pokles srážek po asimilaci v místech, kde model bez asimilace generoval falešnou srážku. Také tato skutečnost vyžaduje další studium. Lze však tvrdit, že modelová předpověď s využitím asimilace generuje lepší prostorové rozložení srážek než modelová předpověď bez asimilace.



Obr. 21 Vyhodnocení předpovědi ze dne 16.6.2016 metodou FSS. Výsledky jsou počítané pro první tři hodiny předpovědi FT=1;2;3 a tři prahové hodnoty P=0,1; 1 a 5 mm/h. Zdroj: autor.

6 DISKUZE

Vazby mezi meteorologickými veličinami byly počítány na základě dat z numerického modelu COSMO. Důvodem pro využití modelových dat namísto naměřených hodnot byla potřebná informace o prostorovém rozložení hodnot v malém měřítku. Dalším důvodem pro využití je to, že lze provádět analýzu proměnných které nemůžeme explicitně měřit, jako je obsah oblačné vody nebo obsah ledových částic. Posledním pozitivem je fakt, že model COSMO umí modelovat radarovou odrazivost. To že se používají modelová data má nevýhodu v tom, že získaná struktura odpovídá tomu, jak vztahy mezi veličinami popisuje model a nemusí zcela odpovídat pozorování.

Modelová data a analýza souvislosti jednotlivých modelových veličin byla použita k tomu, aby na základě měřených dat o srážkách, byly modelová data modifikována tak, aby model generoval srážky. To bylo motivací celé práce. Ačkoli má model popisovat skutečné procesy, díky zjednodušením a aproximacím chování modelu zcela neodpovídá skutečnosti.

Korelace byly počítány na základě vzdálenosti od určeného středu bouře. Tato vzdálenost může mít také vliv na hodnotu vypočtené korelace a to tím, že se vzdáleností vzrůstá počet korelovaných hodnot. Nárůst počtu hodnot byl díky zvětšujícímu se okolí ve vzdálenosti <5-6) uzl. b. oproti vzdálenosti <0,1) uzl. b. téměř 40ti násobný.

Obecným problémem aplikované kovariantní techniky je to, že intenzity srážek mají exponenciální rozdělení a radarová odrazivost také nemá normální rozdělení. Modelové hodnoty odrazivosti jsou formálně omezeny hodnotou -150 dBz, což vnáší chybu do výsledku korelací. Přes tyto problémy jsou kovariantní modely běžně používány s dobrými výsledky. I ve studovaném případě většina získaných výsledků odpovídá předpokladům a lze je hodnotit kladně.

Oblasti konvekce, ze kterých byla data zpracována, byly vybrány jako oblasti s maximální hodnotou vertikální rychlosti v celém sloupci, kde minimální vertikální rychlost byla nastavena na 2,5 m/s. Nastavením právě této podmínky se stalo, že ne nutně ve středových oblastech model generoval srážku. Avšak určitě se jednalo o oblasti, kde v modelu probíhala silná konvekce

Výsledky vztahů potvrdily silné vazby mezi některými modelovými veličinami uvnitř konvektivních bouří. U většiny z nich pozorujeme rychlý pokles se vzdáleností, což je plně v souladu s charakterem studovaného jevu. Výjimkou, kde dochází k nárůstu hodnot se vzdáleností jsou hodnoty v nízkém patře u korelací radarové odrazivosti a intenzity srážek se směšovací poměrem vodní páry. K stejnému trendu dochází u dvojic radarová odrazivost-obsah oblačné vody a v nízkém a středním patře u intenzity srážek-obsahu oblačné vody. Tyto dvojice však jsou v nízkém patře označeny jako statisticky nevýznamné. U dvojic proměnných radarová odrazivost, resp. intenzita srážek a vertikální rychlost dochází k nárůstu ze záporných hodnot které se asymptoticky blíží nule. Tuto skutečnost nelze jednoznačně vysvětlit. Téměř konstantní hodnotu v celém horizontálním rozsahu mají ve středním patře korelace dvojice směšovací poměr vodní páry a obsah ledových částic a v nízkém patře korelace teploty a radarové odrazivosti, intenzity srážek, vertikální rychlosti a směšovacího poměru vodní páry. Významnost hodnot korelací pro menší vzdálenosti potvrdila až na výjimky (vysoké hladiny proměnných intenzita srážek-obsah oblačné vody, nízké hladiny dvojic radarová odrazivost-obsah oblačné vody, intenzita srážek-směšovací poměr vodní páry, obsah oblačné vody-obsah ledových částic, vertikální rychlost-směšovací poměr vodní páry, vertikální rychlost-teplota a teplota-směšovací poměr vodní páry) analýza metodou bootstrap.

Byly testovány dvě metody asimilace radarových dat. Metoda I. pracovala s korelacemi mezi dvěma veličinami očištěnými od vazeb na ostatní veličiny. V tomto případě hodnoty některých očištěných korelací byly těžko vysvětlitelné. A proto takto sestavený korelační model použitý v asimilaci dával špatné výsledky. Naopak metoda II., která místo očištěných korelací použila přímo vypočtené hodnoty korelací radarové odrazivosti a ostatních modelových veličin, dávala uspokojivé výsledky.

Metoda II byla testována na dvou předpovědích a ukázalo se, jak subjektivně (subjektivním srovnání naměřených a předpovězených srážek), tak i objektivně pomocí FSS, že předpověď s využitím asimilace radarových dat obecně zlepšila předpověď konvektivních srážek. Zlepšení je kvantitativně lepší pro druhou a třetí hodinu předpovědi. Důvody, proč obdobné zlepšení není patrné první hodinu, bude předmětem dalšího výzkumu.

Aplikovaný postup asimilace založený na kovariantním modelu, který využívá modelová data popsáním způsobem, je nový a zatím nebyl jinde použit. Protože předpověď konvektivních srážek se zřetelně zlepšila pro druhou a třetí předpovědní hodinu, jsou důvody ve výzkumu navržené metody pokračovat. Další výzkum by se tedy měl zaměřit na otázky:

- Proč nenastává zřetelné zlepšení první hodinu integrace?
- Výsledky naznačují, že model je schopen po asimilaci generovat srážky. Ale pokles srážek po asimilaci v místech, kde srážky nejsou pozorovány, není zřejmý. Je to použitým kovariantním modelem?
- Je opravdu lepší pracovat s odrazivostí než se srážkovou intenzitou?
- Je nezbytné provést testování asimilace na rozsáhlejším souboru dat?
- Je vhodné použít i vzdálenější data od uzlu, kam se aktuální data asimilují. Lze použít jinou techniku asimilace, tj. úpravy hodnot? Které veličiny se mají během asimilace upravovat?

7 ZÁVĚR

V úvodní části práce je popsán proces asimilace dat, jeho stručný vývoj a nejméně využívané metody asimilace. Větší pozornost je zaměřena na metody modelování kovariantních matic předběžného pole využívaných v mnoha metodách asimilace, které určují sféru vlivu naměřených dat a definuje vztahy mezi modelovými veličinami. V druhé části se práce zaměřila na numerickou předpověď silné konvekce. Byly popsány současné metody využívané k předpovědi konvekce. Celá podkapitola byla věnována konvekci a konvektivním bouřím, jejich definici, druhům, struktuře a vývoji. Poslední část rešerše se věnuje konvektivnímu prostředí v modelech NWP, kde za poslední půlstoletí došlo k výraznému rozvoji a naráží se na mnoho problémů spojených s možností explicitního modelování konvekce, které bylo dříve kvůli výpočetní náročnosti pouze parametrizováno.

Diplomová práce si kládla za cíl vytvořit kovariantní model chyb pro velmi specifické prostředí konvektivních bouřek pro asimilaci radarové odrazivosti a jejího přepočtu na intenzitu srážek. Model byl tvořen na základě vztahů veličin radarová odrazivost nebo intenzita srážek a ostatních modelových veličin jako je vertikální rychlost, teplota, směšovací poměr vodní páry, obsah oblačné vody a obsah ledových částic. Tyto vztahy byly zjištěny korelační analýzou dat z prognostických polí získaných integrací numerického modelu COSMO v oblastech, kde model generoval konvekci.

Výsledky korelační analýzy potvrdily silné vazby mezi většinou modelových veličin. Hodnoty korelací jsou obecně vyšší pro dvojice korelací s veličinou radarová odrazivost než s veličinou intenzita srážek. Hodnoty strmě klesají se vzdáleností a mají většinou exponenciální charakter. Bylo testováno více metod asimilace, pro každou z nich byl vytvořen kovariantní model. První metoda byla založena na z části analyticky řešeném optimálním způsobu asimilace radarové odrazivosti nebo intenzitě srážek spočívající v úpravě modelových veličin W , T , QV , QC , QIA . Tento postup se však ukázal jako nevhodný bez ohledu na to, zda byly při asimilaci využity vztahy mezi radarovou odrazivostí nebo jejího přepočtu na intenzitu srážek. Metoda asimilace II. byla založena na technice podobné metodě nudging a testy ukázaly lepší výsledky při využití vztahů radarové odrazivosti než intenzity srážek. Metoda asimilace II. byla otestovaná na dvou předpovědích z letního období roku 2016, na kterých byla ukázána její funkčnost.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- BANNISTER, R. N. (2008): A review of forecast error covariance statistics in atmospheric variational data assimilation. I: Characteristics and measurements of forecast error covariances. Quarterly journal of the royal meteorological society, 134, s. 1951-1970.
- BANNISTER, R. N. (2017): Review Article A review of operational methods of variational and ensemble-variational data assimilation. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 143, s. 607-633.
- BATTAN, L. J. (1973): Radar Observation of the Atmosphere. The University of Chicago Press, 324 s.
- BJERKNES, J. (1904): Das Problem der Wettervorhersage, betrachtet vom Standpunkt der Mechanik und der Physik. Meteorologische Zeitschrift, 21, s. 1-7.
- BUEHNER, M., SHLYAEVA, A. (2015): Scale-dependent background error covariance localisation. Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography, 67, s. 1-17.
- DAVISON, A.C., HINKLEY, D.V. (2005): Bootstrap Methods and Their Applications. Cambridge University Press. 583 s.
- FISHER, M. (2003): Background Error Covariance Modelling. ECMWF, s. 1-63
- GUSTAFSSON, N. a kol. (2017): Survey of data assimilation methods for convective-scale numerical weather prediction at operational centres. Quarterly journal of the royal meteorological society.
- HELMHOLTZ, H. von (1858): Über Integrale der hydrodynamischen Gleichungen, welche der Wirbelbewegung entsprechen. Journal für die reine und angewandte Mathematik, 55, s. 25-55.
- HOHENEGGER, C., SCHÄR, C. (2007): Atmospheric predictability at synoptic versus cloud-resolving scales. Bulletin of the American Meteorological Society, 88, s. 1783-1793.
- CHARNEY, J. G. a kol. (1950): Numerical integration of the barotropic vorticity equation. Tellus, 2, s. 237-254.
- KALNAY, E. (2003): Atmospheric modelling, Data Assimilation and Predictability. Cambridge university press, Cambridge, 341 s.
- LORENC, A. C. (1986): Analysis methods for numerical weather prediction. Quarterly journal of the royal meteorological society, 112, s. 1177-1194.
- MARSHALL, J. S., PALMER, W. M. (1948): The distribution of raindrops with size. Journal of Meteorology, 5, s. 165-166.

- NOVÁK, P., KYZNAROVÁ, H. (2016): MERGE2- Modernizovaný systém kvantitativních odhadů srážek provozovaný v Českém hydrometeorologickém ústavu. *Meteorologické zprávy*, 69, s.137-144.
- RICHARDSON, L. F. (1922): *Weather prediction by numerical process*. Cambridge University Press, Cambridge. 236 s.
- ROBERTS, N. M., LEAN, H. W. (2008): Scale-selective verification of rainfall accumulations from high resolution forecast of convective events. *Monthly Weather Review*, 136, s. 78–97.
- ŘEZÁČOVÁ, D. a kol (2007): *Fyzika oblaků a srážek*. Academia, Praha, 574 s.
- SEDLÁKOVÁ, K. (2015): Využití analýzy prostorových vazeb mezi meteorologickými veličinami v asimilaci dat do numerického modelu předpovědi počasí. *Bakalářská práce, Katedra fyzické geografie a geoekologie PŘF UK, Praha*, 58 s.
- SOKOL, Z. (2011): Assimilation of extrapolated radar reflectivity into a NWP model and its impact on precipitation forecast at high resolution. *Atmospheric research*, 100, s. 201-212.
- SUN, J., ZHANG, F. (2006): Intrinsic versus practical limits of atmospheric predictability and the significance of the butterfly effect. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 73, s. 1419-1438.
- XIE, Y., KOCH, S., MC GINLEY J., ALBERS, S., BIERINGER, P., WOLFSON, M., CHAN, M. (2011): A space-time multiscale analysis system: A sequential variational analysis approach. *Monthly Weather Review*, 139, s.1224–1240.
- XU, Q., WEI, L., GAO, J., ZHAO, Q, NAI, K., LIU, S. 2016. Multistep variational data assimilation: important issues and a spectral approach. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 68, s. 1-26.
- YANO, J. a kol (2017): *Scientific challenges of convective-scale numerical weather prediction*. American Meteorological Society.

SEZNAM POUŽITÝCH ELEKTRONICKÝCH ZDROJŮ

COSMO (2011): General description: general Description of the COSMO-Model. Consortium for small scale modelling [online]. [cit. 24. 5. 2015]. Dostupné z: <http://www.cosmo-model.org/content/model/general/default.htm>.

DOMS, G., BALDHAUF, M. (2015): A Description of the Nonhydrostatic Regional COSMO-Model, Part I: Dynamics and Numerics. Consortium for Small-Scale modelling [online] [cit. 24. 5. 2015]. Dostupné z: <http://www.cosmo-model.org/content/model/documentation/core/cosmoDyncsNumcs.pdf>.

Meteorologický slovník (2017): Meteorologický slovník výkladový a terminologický. Česká meteorologická společnost [online]. [cit. 22.3.2018]. Dostupné z: <http://slovník.cmes.cz>.

Radarová síť CZRAD (2011): Český hydrometeorologický ústav [online]. [cit. 15.2.2018] Dostupné z: http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/meteo/rad/info_czrad/index.html

PŘÍLOHY

Příloha 1: Hodnota tlaku vzduchu a výšky jednotlivých vertikálních hladin. Tyto hodnoty odpovídají použité konfiguraci modelu COSMO.

vertikální hladina	nadmořská výška v m	tlak v hPa
1	22000,0	30,1282
2	21000,0	38,0731
3	20028,6	47,1396
4	19085,4	57,3756
5	18170,0	68,8210
6	17282,1	81,5063
7	16421,4	95,4524
8	15587,5	110,6704
9	14780,0	127,1608
10	13998,6	144,9138
11	13242,9	163,9089
12	12512,5	184,1152
13	11807,1	205,4913
14	11126,4	227,9854
15	10470,0	251,5370
16	9837,5	276,0756
17	9228,6	301,5225
18	8642,9	327,7910
19	8080,0	354,7879
20	7539,6	382,4134
21	7021,4	410,5612
22	6525,0	439,1231
23	6050,0	467,9855
24	5596,1	497,0334
25	5162,9	526,1485
26	4750,0	555,2149

vertikální hladina	nadmořská výška v m	tlak v hPa
27	4357,1	584,1151
28	3983,9	612,7320
29	3630,0	640,9538
30	3295,0	668,6692
31	2978,6	695,7718
32	2680,4	722,1588
33	2400,0	747,7345
34	2137,1	772,4072
35	1891,4	796,0915
36	1662,5	818,7104
37	1450,0	840,1925
38	1253,6	860,4746
39	1072,9	879,5000
40	907,5	897,2220
41	757,1	913,5995
42	621,4	928,5995
43	500,0	942,1985
44	392,5	954,3790
45	298,6	965,1316
46	217,9	974,4533
47	150,0	982,3502
48	94,6	988,8329
49	51,4	993,9182
50	20,0	997,6311
51	0,0	1000,0000

Zdroj: model COSMO

Příloha 2: Kovarianční matice chyb pro jednotlivá patra pro metodu asimilace I. s použitím vyjádření srážek pomocí radarové odrazivosti.

vyšoké patro		W	T	QV	QC	QIA	
Z-W	0,735	W	1	0,51	0,754	0,613	0,733
Z-T	0,284	T	0,51	1	0,73	0,31	0,384
Z-QV	0,676	QV	0,754	0,73	1	0,484	0,608
Z-QC	0,533	QC	0,613	0,31	0,484	1	0
Z-QIA	0,624	QIA	0,733	0,384	0,608	0	1

střední patro		W	T	QV	QC	QIA	
Z-W	0,408	W	1	0,294	0,579	0,664	0,357
Z-T	0,248	T	0,294	1	0,663	0,128	0,167
Z-QV	0,684	QV	0,579	0,663	1	0,438	0,433
Z-QC	0,31	QC	0,664	0,128	0,438	1	0
Z-QIA	0,495	QIA	0,357	0,167	0,433	0	1

nížké patro		W	T	QV	QC	QIA	
Z-W	-0,563	W	1	0,216	0,068	0,441	0
Z-T	-0,401	T	0,216	1	0,181	-0,265	0
Z-QV	0,176	QV	0,068	0,181	1	0,095	0
Z-QC	0	QC	0,441	-0,265	0,095	1	0
Z-QIA	0	QIA	0	0	0	0	1

Zdroj: autor

Příloha 3: Kovariantní matice chyb pro jednotlivá patra pro metodu asimilace I. s použitím vyjádření srážek pomocí intenzity srážek.

vysoké patro		W	T	QV	QC	QIA	
I-W	0,451	W	1	0,51	0,754	0,613	0,733
I-T	0,327	T	0,51	1	0,73	0,31	0,384
I-QV	0,407	QV	0,754	0,73	1	0,484	0,608
I-QC	0	QC	0,613	0,31	0,484	1	0
I-QIA	0,652	QIA	0,733	0,384	0,608	0	1

střední patro		W	T	QV	QC	QIA	
I-W	0,159	W	1	0,294	0,579	0,664	0,357
I-T	0,269	T	0,294	1	0,663	0,128	0,167
I-QV	0,312	QV	0,579	0,663	1	0,438	0,433
I-QC	0	QC	0,664	0,128	0,438	1	0
I-QIA	0,729	QIA	0,357	0,167	0,433	0	1

nízké patro		W	T	QV	QC	QIA	
I-W	-0,282	W	1	0,216	0,068	0,269	0
I-T	-0,2	T	0,216	1	0,181	-0,265	0
I-QV	0	QV	0,068	0,181	1	0,095	0
I-QC	0	QC	0,269	-0,265	0,095	1	0
I-QIA	0	QIA	0	0	0	0	1

Zdroj: autor

Příloha 4: Kovariantní matice chyb pro jednotlivá patra pro metodu asimilace II. s použitím vyjádření srážek pomocí radarové odrazivosti

vysoké patro		střední patro		nízké patro	
Z-W	0,735	Z-W	0,408	Z-W	-0,563
Z-T	0,284	Z-T	0,248	Z-T	-0,401
Z-QV	0,676	Z-QV	0,684	Z-QV	0,176
Z-QC	0,533	Z-QC	0,31	Z-QC	0
Z-QIA	0,624	Z-QIA	0,495	Z-QIA	0

Zdroj: autor

Příloha 5: Kovariantní matice chyb pro jednotlivá patra pro metodu asimilace II. s použitím vyjádření srážek pomocí intenzity srážek.

vysoké patro		střední patro		nízké patro	
I-W	0,451	I-W	0,159	I-W	-0,282
I-T	0,327	I-T	0,269	I-T	-0,2
I-QV	0,407	I-QV	0,312	I-QV	0
I-QC	0	I-QC	0	I-QC	0
I-QIA	0,652	I-QIA	0,729	I-QIA	0

Zdroj: autor