

UNIVERZITA KARLOVA V PRAZE

Přírodovědecká fakulta
Katedra fyzické geografie a geoekologie

Studijní program: Geografie
Studijní obor: Fyzická geografie a geoekologie



Tereza UHLÍKOVÁ

VÝVOJ KONVEKTIVNÍCH BOUŘÍ V DATECH DISTANČNÍHO POZOROVÁNÍ

CONVECTIVE STORMS DEVELOPMENT IN REMOTE
SENSING DATA

Magisterská práce

Vedoucí závěrečné práce/Školitel: RNDr. Petr Novák, Ph. D.

Praha, 2016

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

V Praze dne

.....

Tereza UHLÍKOVÁ

Poděkování

Děkuji mnohokrát panu RNDr. Petru Novákovi, Ph. D., vedoucímu této magisterské práce, za předání cenných znalostí, velmi přívětivý přístup a připomínky, které mi poskytoval po dobu jejího vypracování. Dále velice děkuji svým konzultantům RNDr. Haně Kyznarové, Ph. D. a RNDr. Miloslavu Müllerovi, Ph. D. za všechny čas, který mi věnovali. Děkuji také Českému hydrometeorologickému ústavu za poskytnutí dat.

Obsah

Abstrakt	6
1 Úvod	9
2 Konvekce a konvektivní bouře	11
2.1 Životní cyklus konvektivních bouří	12
2.2 Koncepční modely konvektivních bouří	13
2.3 Výskyt konvektivních bouří v České republice	15
3 Detekce konvektivních bouří	18
3.1 Pozemní systémy - meteorologické radary	18
3.2 Pozemní systémy - detekce bleskové aktivity	21
3.3 Družicové systémy	22
4 Nowcasting	26
4.1 Metody nowcastingu konvektivních bouří	26
4.2 Úspěšnost krátkodobých předpovědí	28
4.3 Nowcasting konvektivních bouří v České republice	29
5 Data	31
5.1 Pozemní radarová síť České republiky (CZRAD)	31
5.2 Středoevropská síť pro detekci blesků (CELDN)	33
5.3 Nowcastingový systém CELLTRACK	33
6 Metody	35
6.1 Parametry konvektivních buněk	35
6.2 Vybrané konvektivní buňky	39
7 Výsledky práce	40
7.1 Jednoduché izolované konvektivní buňky	41
7.2 Nebezpečné konvektivní buňky	48
7.2.1 Vybrané nebezpečné konvektivní buňky	48
7.2.1.1. Den 17. 7. 2010	49

7. 2. 1. 2. Den 15. 8. 2010.....	51
7. 2. 1. 3. Den 24. 8. 2010.....	53
7. 2. 1. 4. Den 18. 6. 2013.....	55
7. 2. 1. 5. Den 4. 8. 2013.....	57
7. 2. 1. 6. Den 3. 8. 2014.....	59
7. 2. 2 Indexy výskytu krup	61
7. 2. 3 Srovnání vybraných parametrů mezi buňkami	66
8 Diskuze a závěr.....	68
Literatura	72

Abstrakt

Název práce: Vývoj konvektivních bouří v datech dálkové detekce
Autor: Tereza Uhlíková
Katedra: Katedra fyzické geografie a geoekologie
Vedoucí diplomové práce: RNDr. Petr Novák, Ph.D.
E-mail vedoucího: petr.novak@chmi.cz

Současný stav vývoje systémů distančního pozorování Země a výpočetních technologií umožňuje nejen identifikovat konvektivní bouře, ale rovněž zaznamenávat jejich vývoj a měřit jejich parametry. V této práci je pro studium vývoje konvektivních bouří na základě radarových a bleskových dat pro Českou republiku (sítě CZRAD a CELDN) využíván nowcastingový systém CELLTRACK. Tento systém identifikuje jednotlivé konvektivní buňky jako jádra vysoké odrazivosti ≥ 44 dBZ a přiřazuje jim parametry odvozené z radarových a bleskových dat. V letech 2010 - 2014 bylo vybráno šest jednoduchých izolovaných konvektivních buněk a šest konvektivních buněk, které produkovaly nebezpečné konvektivní jevy. Na těchto příkladech je nastíněn vývoj vybraných parametrů buněk pro obě skupiny a navrženy prahové hodnoty těchto parametrů, které mohou pomoci identifikovat potenciálně nebezpečné konvektivní buňky.

klíčová slova: konvektivní buňka, nebezpečná konvektivní bouře, distanční pozorování konvektivních bouří, nowcasting, CELLTRACK, CZRAD, CELDN

Abstract

Title: Convective storms development in remote sensing data
Author: Tereza Uhlíková
Department: Department of Physical Geography and Geoecology
Supervisor: RNDr. Petr Novák, Ph. D.
Supervisor's e-mail: petr.novak@chmi.cz

Systems of remote sensing and computing technologies are nowadays at such a developed level, they are providing tools for identifying and tracking convective storms as well as for measuring their parameters. In this study, the nowcasting algorithm CELLTRACK is used to identify convective cells as a high reflectivity cores (≥ 44 dBZ) in the radar data (CZRAD). CELLTRACK is also used to obtain parameters of these cells from radar data and lightning detection data (CELDN) over the territory of Czech Republic. Six single isolated cells and six cells producing severe convective phenomena were selected from the years 2010 - 2014. The development of selected parameters during the life cycle of convective cells in both groups is demonstrated and threshold values of these parameters, that can potentially help to identify severe convective cells, are proposed.

key words: convective cell, severe convective storm, remote sensing of convective storms, nowcasting, CELLTRACK, CZRAD, CELDN

Seznam zkratek

CALIPSO	Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Observation
CALIOP	Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Projection
CAPPI	Constant Altitude Plan Position Indicator
CG výboj	cloud-to-ground, výboj do země
CC výboj	cloud-to-cloud, mezioblačný výboj
CELDN	Central European Lightning Detection Network
COTREC	Continuity of TREC Vectors
CPR	Cloud Profiling Radar
ČHMÚ	Český hydrometeorologický ústav
ESWD	European Severe Weather Database
GEO	Geostationary Earth Orbit
HHO	horní hranice oblačnosti
HRV	High Resolution Visible
IC výboj	intra-cloud, výboj v rámci jednoho oblaku
IR	infra-red
LEO	Low Earth Orbit
MCS	Mesoscale Convective System
MEHS	Maximum Expected Hail Size
MSG	Meteosat Second Generation
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
NWP	Numerical Weather Prediction
POSH	Probability of Severe Hail
PPI	Plan Position Indicator
RC	Reflectivity Core
SCIT	Storm Cell Identification and Tracking
SHI	Severe Hail Index
TITAN	Thunderstorm Identification, Tracking, Analysis and Nowcasting
TREC	Tracking Radar Echoes by Correlation
VIL	Vertically Integrated Liquid
VILD	VIL density

1 Úvod

Konvektivní bouře produkují jedny z nejdynamičtějších a nejnebezpečnějších atmosférických jevů. Spojují v sobě ohrožení atmosférickou elektřinou, přívalovými srážkami (povodněmi), silným větrem anebo krupobitím, které mohou způsobit újmy na lidském zdraví a majetku. Od druhé poloviny 20. století se stále vyvíjejí možnosti distančního pozorování Země resp. atmosféry, rozvíjejí se i výpočetní a komunikační technologie, které umožňují získaná data zpracovávat v téměř reálném čase. Rozšiřují se tak lidské znalosti o procesech vedoucích ke vzniku konvektivních bouří a jejich predikci, v datech distančního pozorování je možné sledovat životní cyklus těchto bouří a jejich pohyb v prostoru. V operativním provozu meteorologických služeb jsou v současné době běžně používány systémy sledující v pozemních radarových či družicových datech vývoj konvektivních bouří a poskytující předpověď jejich pohybu na následující desítky minut až hodiny.

V Českém hydrometeorologickém ústavu je od roku 2007 pro sledování konvektivních buněk operativně využíván algoritmus CELLTRACK, který pracuje s daty české radarové sítě (CZRAD). Tento systém rovněž experimentálně z radarových dat odvozuje četné parametry identifikovaných konvektivních buněk a přiřazuje jim bleskové výboje detekované v buňce a jejím okolí do vzdálenosti 35 km. Některé tyto parametry konvektivních buněk mohou souviset s vývojem nebezpečných konvektivních jevů, proto je výhledově připravováno jejich operativní využití. V této práci je představen první pohled na hodnoty vybraných parametrů nebezpečných konvektivních buněk a na jeho základě navrhnout první odhad limitních hodnot, které by v budoucnu mohly sloužit pro identifikaci potenciálně nebezpečných konvektivních buněk v operativním provozu.

Vývoj parametrů konvektivních buněk v průběhu jejich životního cyklu byl studován na dvanácti vybraných případech v letech 2010 - 2014. Bylo zvoleno šest konvektivních buněk, detekovaných systémem CELLTRACK po dobu 75 - 195 min, které produkovaly nebezpečné konvektivní jevy (kroupy, tornádo, vysoký úhrn bleskových výbojů). Tyto buňky se během doby detekce štěpily, slučovaly a stávaly součástí multicel. Ve stejném období bylo ve dnech s výraznou konvektivní aktivitou

vybráno šest jednoduchých konvektivních buněk, detekovaných systémem CELLTRACK po dobu 20 - 60 min, které se po dobu detekce neštěpily ani neslučovaly s jinými buňkami.

Tato práce je rozdělena do osmi hlavních kapitol, z nichž Kapitoly 2 - 4 jsou rešerší české a zahraniční literatury. Kapitola 2 představuje konvektivní bouře a procesy, které vedou k jejich vzniku. Jsou představeny fáze životního cyklu konvektivních bouří, koncepční modely konvektivních bouří a jejich charakteristiky a přiblížen výskyt těchto bouří v České republice. V kapitole 3 jsou shrnuty možné metody dálkové detekce konvektivních bouří s rozdělením na pozemní a družicové detekční systémy, jsou popsány produkty radarových dat využívané v operativní i experimentální meteorologii. Čtvrtá kapitola prezentuje různé metody tvorby nowcastingu vývoje konvektivních bouří ve světě a systémy užívané v České republice resp. Českém hydrometeorologickém ústavu (ČHMÚ). V kapitolách 5 a 6 jsou uvedena využitá data a metody výběru parametrů buněk, dní a případů buněk s nebezpečnými konvektivními jevy. V kapitole 7 jsou představeny vybrané případy, vývoj jejich vybraných parametrů a porovnání hodnot těchto parametrů mezi jednotlivými vybranými typy buněk.

V kapitole 8 jsou shrnuty a diskutovány výsledky této práce. Je uvedeno, jak vývoj vybraných konvektivních buněk odpovídá literatuře, zhodnoceny informace, které může poskytnout měření vybraných parametrů a navrhnuty limitní hodnoty těchto parametrů, které mohou pomoci identifikovat potenciálně nebezpečné konvektivní buňky.

2 Konvekce a konvektivní bouře

Pojem konvekce se používá pro označení archimédovského vztlaku jako důsledku rozdílu v hustotách (těleso/vzduchová hmota vs. prostředí – kapalina/plyn). V meteorologii se jako termická konvekce označují plošně omezené výstupné a kompenzační sestupné pohyby vzduchu způsobené rozdílem teplot (hustot) mezi vzduchovou hmotou a okolní atmosférou. Jako vynucená konvekce se pak označují výstupné pohyby vzduchu přes překážku nebo na studených frontách, které tvoří pohybující se rozhraní mezi dvěma vzduchovými hmotami s výrazně odlišnými hustotami (z důvodu rozdílné teploty, relativní vlhkosti či obojího). Rychlosti výstupných proudů se obvykle pohybují v rozmezí 10 - 20 m/s, mohou však dosahovat i několika desítek m/s. Atmosférická konvekce se výrazně podílí na vertikální výměně tepla a vlhkosti v troposféře a spodní stratosféře, dopravuje vlhký a teplý vzduch z přízemních vrstev vzhůru.

K vývoji konvektivní oblačnosti (oblaky druhu Cumulus a Cumulonimbus) je spolu s (1) iniciačními mechanismy výstupných proudů vzduchu (termická a vynucená konvekce nebo přízemní konvergence vzduchu) zapotřebí (2) dostatečná vlhkost v přízemní vrstvě atmosféry, která zajistí nasycení vystupujícího vzduchu výše v atmosféře a (3) instabilní zvrstvení atmosféry, které podporuje další zrychlení vzduchové hmoty směrem vzhůru. Podle vertikálního rozsahu oblačnosti se rozlišuje mělká a hluboká konvekce, kdy první bývá mohutná jen několik stovek metrů, druhá může dosahovat až nad tropopauzu (ta je v blízkosti pólů ve výšce přibližně 9 km nad hladinou moře, v okolí rovníku přibližně 17 km) (NOAA A, 2016) (Řezáčová et al., 2007).

Výraz konvektivní bouře (angl. *convective storm* popř. *severe convective storm* – nebezpečná konvektivní bouře) se používá pro vertikálně mohutnou srážkovou oblačnost druhu Cumulonimbus, která vzniká v důsledku hluboké, vlhké konvekce a pro souhrn konvektivních procesů a jevů, které se s ní pojí – blesková aktivita, vysoké rychlosti větru, tornáda, silné přívalové srážky či kroupy (Meteorologický slovník výkladový a terminologický (eMS)).

2.1 Životní cyklus konvektivních bouří

Struktura konvektivních bouří a jejich cirkulace byla studována letadlovými průlety skrz bouře v rámci programu Thunderstorm Project v období po druhé světové válce. Data z těchto traverzů pak byla ve spojení s radarovými snímky použita k vytvoření schématu životních fází konvektivní bouře (Byers, Braham, 1948) a základních koncepčních modelů konvektivních bouří, které jsou představeny dále v této a následující kapitole 2. 2.

Životní cyklus Cumulonimbů se skládá minimálně ze tří fází, kdy první začíná vznikem výstupného proudu vzduchu a kondenzací oblačných kapiček v mělký Cumulus bez kompenzačních sestupných proudů vzduchu. Ten se dále vyvíjí ve vysoký Cumulus, kde se k výstupnému proudu začíná vyvíjet kompenzační sestupný proud vzduchu, který je ochlazený spotřebou latentního tepla na výpar některých kapiček padajících uvnitř oblaku. Na konci této fáze se začínají vytvářet podmínky pro vznik bleskových výbojů.

Ve druhém stadiu je již vyvinutý Cumulonimbus se silným výstupným (angl. *updraft*) i sestupným (angl. *downdraft*) proudem vzduchu, který se u zemského povrchu obvykle projevuje nárazovým větrem (gust fronta, angl. *gust front*). Fáze zralosti se u konvektivních bouří může pohybovat od desítek minut po několik hodin. Výstupný proud vzduchu v oblaku je natolik silný, že dochází k četným srážkám oblačných krystalků a krupek, při kterých se tyto nabíjejí kladně či záporně. Menší částice mají tendenci se nabíjet kladně, větší záporně. Jelikož větší oblačné (kladně nabitě) částice klesají vlivem gravitace k základně oblaku a malé lehké (záporně nabitě) jsou vynášeny výstupným proudem k vrcholu oblaku, vznikají tak dvě hlavní centra elektrického náboje. Zem pod základnou oblaku je nabita převážně kladně. Mezi centry opačné polarity pak vznikají elektrické výboje – uvnitř jednoho oblaku (IC – *intra-cloud*), mezi dvěma oblaky (CC – *cloud-to-cloud*), mezi oblakem a zemí (CG – *cloud-to-ground*) (Rakov, Uman, 2003) (Zajac, Weaver, 2002). Déle žijící bouře mohou v tomto stadiu životního cyklu rovněž generovat další nebezpečné jevy, ty jsou popsány dále v kapitole 2. 2 u příslušného typu bouří.

V poslední fázi vývoje konvektivního oblaku se chladný sestupující vzduch u zemského povrchu začne roztékat a postupně odřízne oblak od vtékajícího teplého a vlhkého vzduchu. Oblak již není dále vyživován, neudrží si vertikální mohutnost potřebnou pro tvorbu srážek a nakonec dojde k jeho rozpadu. V tomto posledním stadiu se z nebezpečných konvektivních jevů mohou stále ještě vyskytovat bleskové výboje.

2. 2 Konceptní modely konvektivních bouří

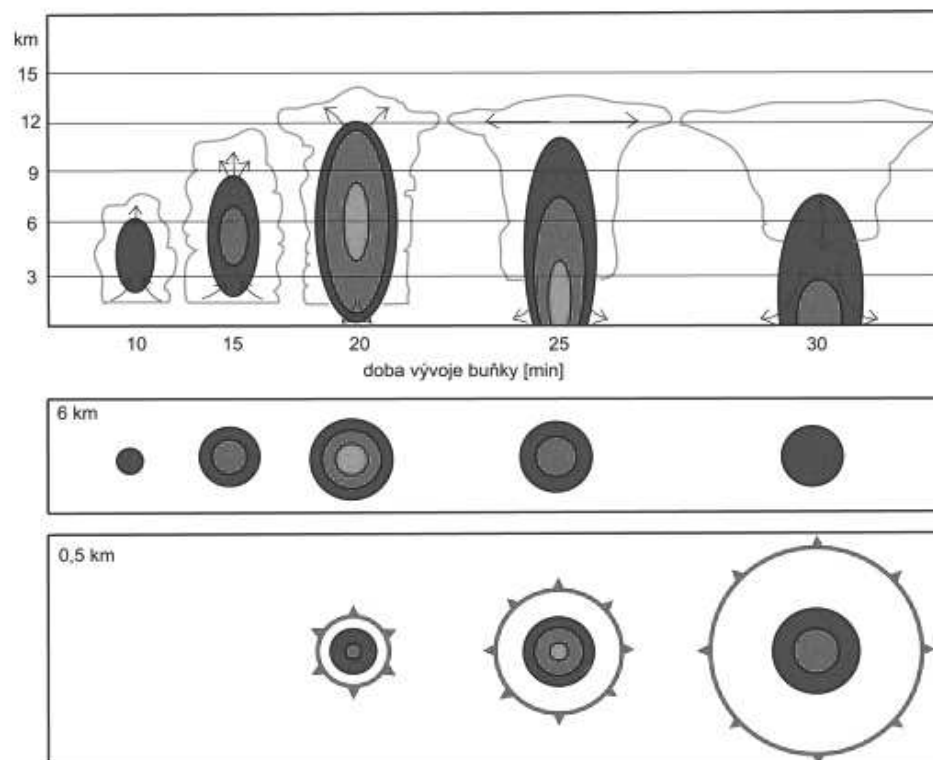
Základní jednotkou bouře je konvektivní buňka (případně konvektivní cela z angl. *convective cell*). Ta se může vyskytovat buď samostatně nebo je stavební jednotkou multicelárního konvektivního systému.

Nejjednodušší model bouře s jednou buňkou vzniká jako jeden výstupný proud, nejčastěji iniciován termickou konvekcí. Tento proud vertikálního směru se vyvíjí v prostředí se slabým stříhem větru (změna rychlosti a směru větru s výškou) a určuje vertikální mohutnost oblaku. Životní cyklus jednoduché konvektivní buňky se pohybuje se nejčastěji v řádech desítek minut (viz obr. 2. 1).

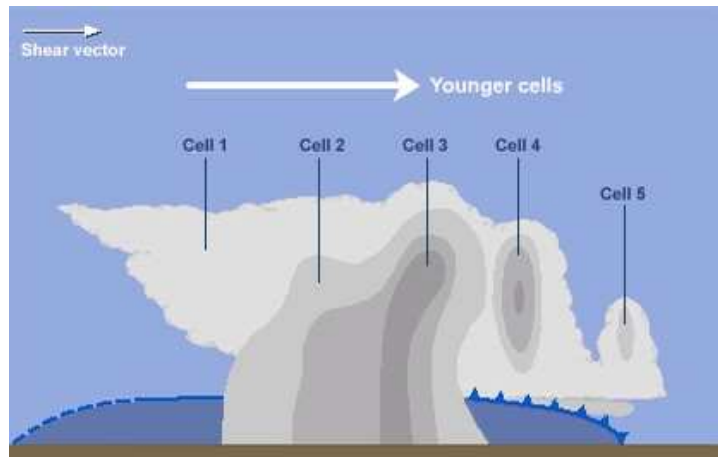
Dalším typem konvektivní bouře tvořené jednou cirkulační buňkou je supercela, jejíž životnost může být až několik hodin. Toho je dosaženo díky charakteristické dlouhotrvající obnovující se cirkulaci v buňce, která zabraňuje převážení sestupných proudů vzduchu v oblaku. Supercely vznikají v prostředí se silným stříhem větru, v jejich středních partiích se vyvíjí oblast nízkého tlaku vzduchu, která vytváří rotující proudění neustále oživující potřebný výstupný proud vzduchu. Přístrojově lze tento jev zaznamenat obtížně, detekce probíhá především z měření radiálních rychlostí dopplerovskými radary nebo sledováním dráhy bouře v radarových datech, kde se bouře z důvodu vnitřní rotace obvykle pohybuje zakřiveněji, oproti pohybu převažujícího pole proudění. S výskytem supercely bývají během jejího stadia zralosti obvykle spojeny nebezpečné konvektivní jevy jako např. výskyt tornáda nebo velkých, nebezpečných krup. Tornádo – tromba (vír rotující kolem jiné než horizontální osy, v tomto případě se jedná o osu přibližně vertikální) se vyskytuje pod základnou konvektivních bouří, alespoň jednou během své existence se dotkne zemského povrchu a je silné natolik, aby způsobilo škody. Rychlost tornadického větru je určována právě ze způsobených škod a pohybuje se mezi 29 - 105 m/s (Fujitova stupnice F1 - F5). Kroupy se vyvíjejí ve vertikálně mohutných bouřích dosahujících vysoko nad nulovou izotermu, s přítomností přechlazené vody a s dostatečně silným a plošně rozsáhlým výstupným proudem, který udržuje zárodky krup ve výšce po dlouhou dobu. Ty pak v čase rostou zachycováním přechlazených vodních kapiček, pro dosažení definice kroupy musí přesáhnout velikost 5 mm ((Meteorologický slovník výkladový a terminologický (eMS)) (Řezáčová et al., 2007).

Větší množství konvektivních buněk v různém stadiu vývoje s různým uspořádáním, které se navzájem ovlivňují, tvoří multicely. Pohyb a vývoj takových bouří je přepověditelný obtížněji než u jednoduchých konvektivních buněk. Nové cely vznikají

obvykle na boku hlavního systému, iniciovány vynuceným výstupem vzduchu, který vyvolává čelo studené gust fronty starší buňky. Nově vzniklé buňky vytvářejí další nové gust fronty, které při příznivém stříhu větru a instabilitě prostředí ve spodních hladinách atmosféry podporují vznik dalších výstupných proudů a konvektivních buněk (tento způsob vzniku multicely ilustruje obr. 2. 2). Na radarových snímcích se multicely objevují jako několik blízkých jader vysoké odrazivosti, z nichž jedno může být výraznější než ostatní (cela v nejzralejším stadiu vývoje – viz obr. 2. 2). Jsou-li cely organizovány do tvaru linie, užívá se pro tento systém název čáry instability nebo anglický název *squall line*. Multicely mohou rovněž vzniknout spojením několika původně izolovaných konvektivních buněk nebo se další samostatně vzniklé cely mohou s multicelou sloučit v průběhu jejího života. Nejrozsáhlejší multicelární systémy jakéhokoliv původu, jejichž srážková oblast přesahuje v některém směru rozměr 100 km se označují jako mezosynoptické konvekční systémy (MCS, angl. *mesoscale convective system*). S většími multicelárními systémy bývají ve fázi zralosti buněk často spojeny déletrvající přívalové srážky a rozsáhlejší blesková aktivita.



Obr. 2. 1: Vývoj konvektivní buňky. Radarová odrazivost je znázorněna stupni šedi (nejvyšší odrazivost je nejsvětlejší), gust front značkou pro studenou frontu. Zdroj: Řezáčová et al. (2007).

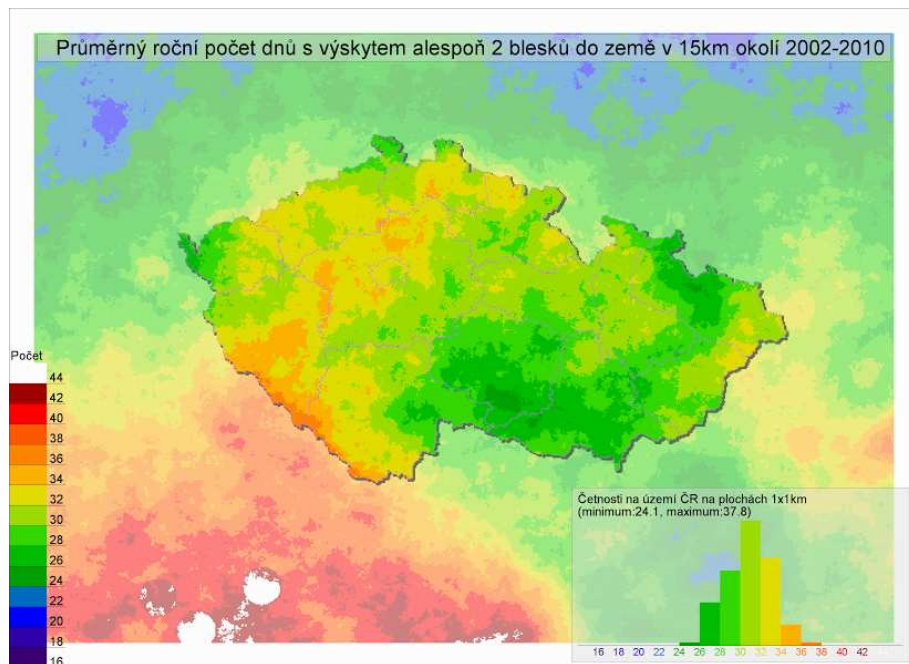


Obr. 2. 2: Multicelární systém s pěti konvektivními buňkami různého stáří. Radarová odrazivost je znázorněna stupni šedi (nejvyšší odrazivost je nejtmaší), gust fronta značkou pro studenou frontu. Zdroj: MetEd (2013).

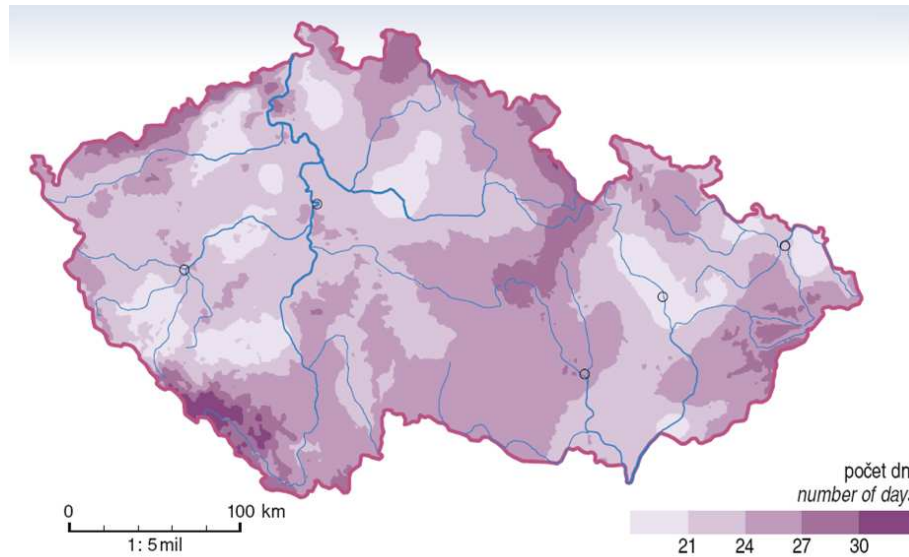
2. 3 Výskyt konvektivních bouří v České republice

V České republice je výskyt konvektivních bouří obvykle spojen s letním obdobím a odpoledními hodinami, kdy se zemský povrch a přilehlá vrstva atmosféry nejvíce prohřívají a uplatňuje se termická konvekce. V období mezi listopadem a únorem je výskyt Cumulonimbů prakticky výhradně spojen s přechody studených front, které vytváří vynucenou konvekci. Konvektivní bouře jsou u nás běžně spojeny s elektrickou aktivitou a přívalovými srážkami, méně pak s výskytem nebezpečných krup (s průměrem větším než 2 cm), vzácněji s výskytem tornáda. Běžně se u nás vyskytují jednoduché konvektivní buňky a multicely, méně častým typem konvektivní bouře je pro Českou republiku supercela – v letech 2000 - 2015 bylo těchto u nás dle databáze Amateur Stormchasing Society (2016) zaznamenáno jen 129 (jejich skutečný počet je však pravděpodobně o něco vyšší).

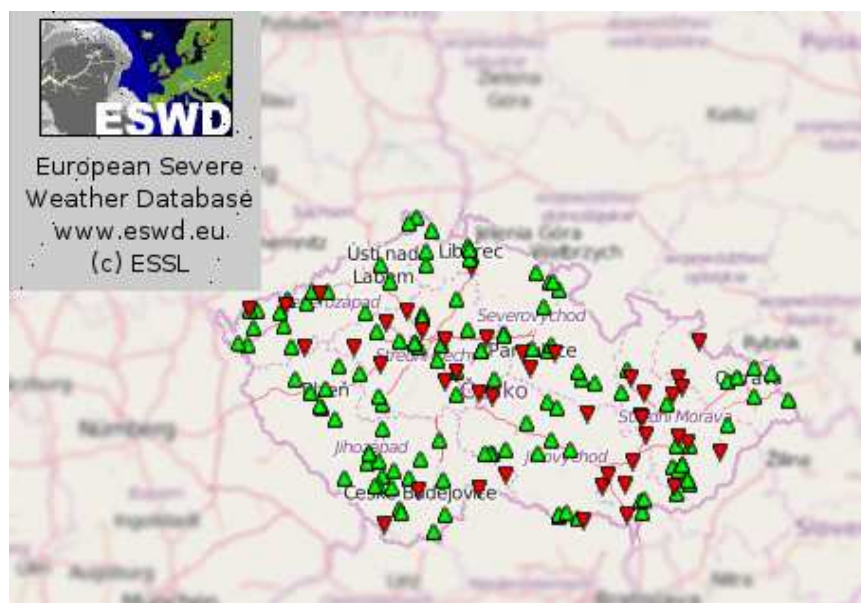
Přehled o prostorovém rozdělení bouřkové aktivity dle výskytu blesků nad Českem poskytují obr. 2. 3 a obr. 2. 4, kdy první představuje data z období 2002 - 2010, druhý pak období 1981 - 2000. Prostorové rozdělení potvrzených a ověřených případů tornád a nebezpečných krup nad Českem v letech 2000 - 2015 poskytuje obr. 2. 5 (data z *European Severe Weather Database* - Evropská databáze nebezpečného počasí), obr. 2. 6 pak představuje klimatologii výskytu krup z let 1981 - 2000.



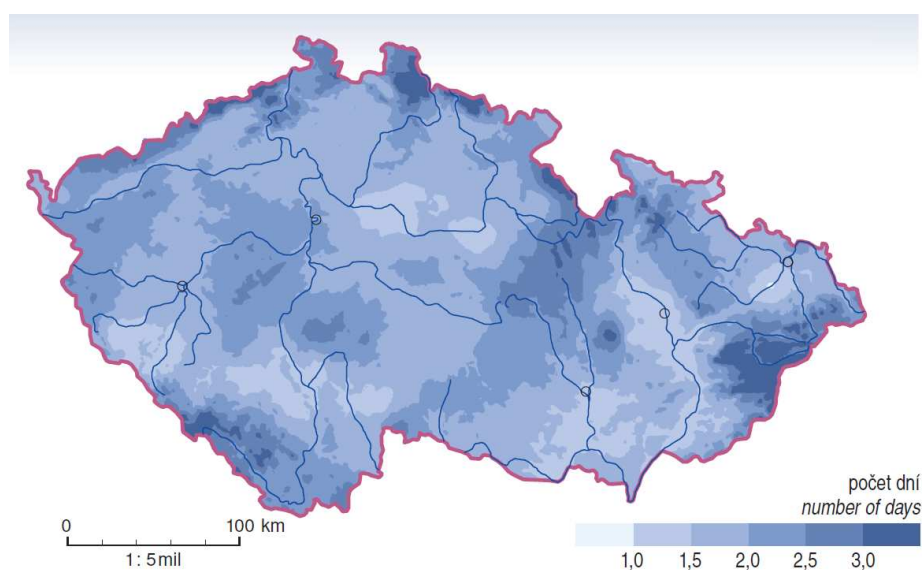
Obr. 2. 3: Průměrný počet dní s minimálně 2 CG blesky (grid 1x1 km) v období 2002 - 2010. Vytvořeno podle statistik ČHMÚ, autor Petr Novák.



Obr. 2. 4: Průměrný roční počet dní s bouřkou v období 1981 - 2000. Zdroj: Atlas podnebí Česka (2007).



Obr. 2. 5: Potvrzené (více pozorovatelů) či ověřené (autorizovanou entitou) případy tornád (červeně) a nebezpečných krup (zeleně) v období 2000 - 2015. Zdroj: ESWD (2016).



Obr 2. 6: Průměrný roční počet dní s kroupami v období 1981 - 2000. Zdroj: Atlas podnebí Česka (2007).

3 Detekce konvektivních bouří

Distanční pozorování Země je v současné době neustále se rozvíjející odvětví získávání dat o okamžitém i dlouhodobém stavu atmosféry a zemském povrchu, jehož velká výhoda je vysoké časové i prostorové rozlišení. Principem využití distančního pozorování k detekci konvektivních bouří je aktivní vysílání elektromagnetického signálu a následná analýza jeho zpětně odražené přijaté části (např. radary a lidary) nebo pasivní příjem elektromagnetického záření emitovaného atmosférou, resp. různými atmosférickými jevy (např. systémy pro detekci blesků nebo družicové radiometry).

V této kapitole jsou uvedené typy detekce rozdělené na pozemní (pro operativní detekci konvektivních bouří jsou tyto užívané primárně) a družicové.

3. 1 Pozemní systémy - meteorologické radary

Pozemní radarová síť je operativně využívána především pro detekci srážkové oblačnosti a identifikaci konvektivní oblačnosti na velkém území (dosah je obvykle 200 - 250 km od jednoho přístroje). Meteorologické radary vysílají vysokoenergetický elektromagnetický signál na dlouhých vlnových délkách ($\lambda = 3 - 10$ cm, pro operativní radary v Evropě většinou $\lambda = 5$ cm), zformovaný anténou do tvaru kužele. Anténou je poté přijata malá část tohoto záření, zpětně rozptýlená srážkovými částicemi, která je následně zesílena a detekována přijímačem. Z času přijatého záření lze určit vzdálenost meteorologických cílů podle rovnice:

$$r = (c \cdot \Delta t) / 2$$

kde r je vzdálenost cíle, c rychlost světla a Δt doba mezi vysláním a přijetím signálu.

Pro určení přesné pozice cíle je zaznamenán také elevační úhel a azimut, ve kterém anténa signál vysílala. Z intenzity přijatého signálu lze určit radarovou odrazivost podle rovnice:

$$Pr = K (Z / r^2)$$

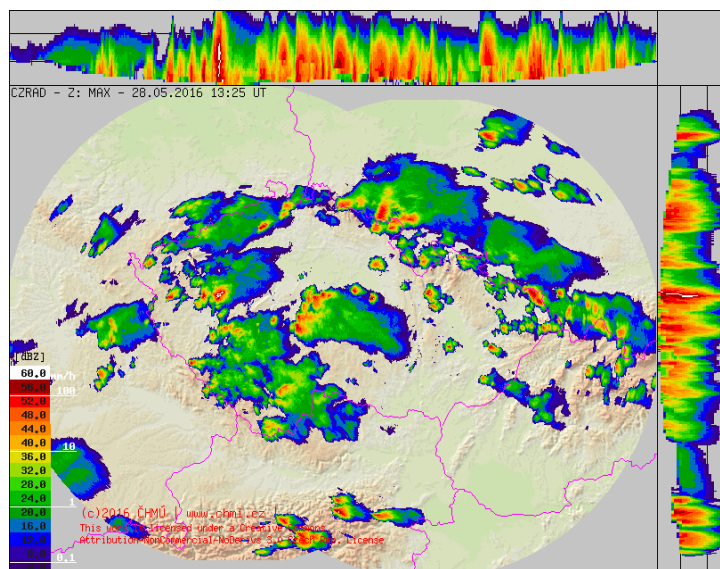
kde Pr je výkon přijatého signálu, K přístrojová konstanta (technické parametry radaru), r vzdálenost cíle a Z radarová odrazivost. Pro vyjádření jednotek radarové odrazivosti se používá $Z [dBZ] = 10 \log Z [mm^6/m^3]$. Za předpokladu Raleighova rozptylu (tj. částice jsou sférické a jejich poloměr $D_i \ll \lambda$) dále platí:

$$Z = \sum_{i \in IV} D_i^6$$

kde D_i je poloměr kapek, které by Raleighovým rozptylem rozptýlily naměřený výkon Pr (Novák, 2015) (Řezáčová et al., 2007).

Rotující anténou radaru je elektromagnetický signál vyslán v azimutu na různých elevačních úhlech a jsou tak získána trojrozměrná data o rozložení radarových cílů v atmosféře. Tato sférická trojrozměrná data jsou konvertována do kartézských dvourozměrných produktů poskytujících potřebné informace o detekované oblačnosti.

Nezákladnější dvourozměrné zobrazení radarových dat je (1) PPI (z angl. *Plan Position Indicator*) – radarová data naměřená na jedné elevaci antény, z nich vertikální interpolací vzniká (2) CAPPI (z angl. *Constant Altitude Plan Position Indicator*) – odrazivost v konstantní výškové hladině. Velmi důležitým produktem pro detekci a studium konvektivních bouří (identifikace bouřkových jader) je (3) Z MAX zobrazující maximální radarovou odrazivost ve vertikálním sloupci (viz obr. 3. 1).

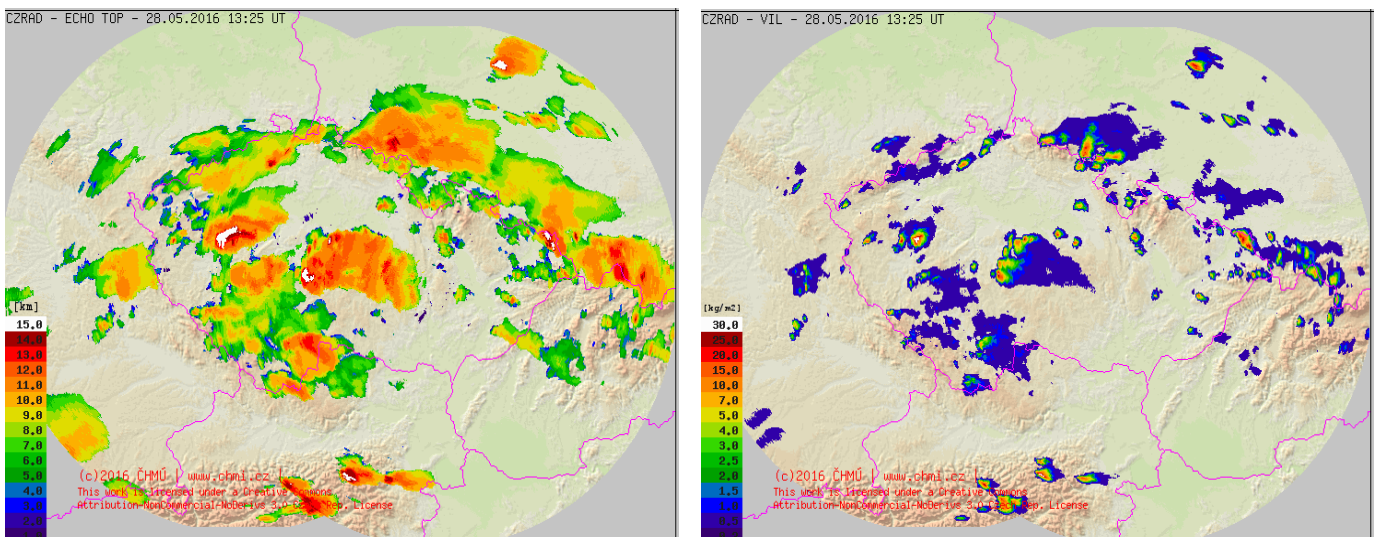


Obr. 3. 1: Data CZRAD, 28. 5. 2016. Produkt MAX Z (nejvyšší radarová odrazivost ve vertikálním sloupci radarových dat) s bočními pohledy.

Dále jsou využívány produkty radarových dat, které v případě vysokých hodnot ukazují na přítomnost hluboké konvekce. Příkladem těchto produktů jsou (4) EchoTop – maximální výška [km], ve které radarová odrazivost dosáhne určené prahové hodnoty (v ČHMÚ 4 dBZ) a (5) VIL (z angl. *Vertically Integrated Liquid*) – vertikálně integrovaná radarová odrazivost převedena na odhad obsahu kapalné vody [kg/m²], podle vzorce:

$$VIL = 3,44 \cdot 10^{-6} \int_{h_{base}}^{h_{top}} Z^4 dh$$

kde Z je radiolokační odrazivost [mm⁶/m³], h_{base} výška základny oblačnosti [m] a h_{top} výška horní hranice srážkové oblačnosti [m]. Pro praktické výpočty je pro každý plošný element integrál převáděn na sumaci přes jednotlivé hladiny PPI (Řezáčová et al., 2007).



Obr. 3. 2: Data CZRAD, 28. 5. 2016. Produkty EchoTop – horní hranice radarové odrazivosti 4 dBZ (vlevo) a VIL – obsah kapalné vody v trojrozměrném sloupci (vpravo).

Indexy výskytu krup zapojují doplňkové informace o vertikálním teplotním profilu atmosféry (z aerologických sondáží nebo z modelů), jelikož kroupy rostou při teplotě 0°C, nebezpečné kroupy při -20°C. Operativně využívaný produkt pro detekci krup v ČHMÚ – (6) HAIL_PROB (vycházející z Waldvogel et al., 1979) počítá s polohou centra vysoké odrazivosti vůči nulové izotermě a vyjadřuje

pravděpodobnost výskytu krup. Ta je 100 %, pokud jsou hodnoty radarové odrazivosti > 45 dBZ zaznamenány alespoň ve výšce 5,5 km nad H_0 , 0 %, pokud jsou méně než 1,625 km (Řezáčová et al., 2007). Další produkt – operativně využívaný v americké NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) a experimentálně testovaný v ČHMÚ – (7) SHI (z angl. *Severe Hail Index*) [J/ms] (podle Witt et al., 1998) váží vertikální integraci profilu odrazivosti (0 při < 40 dBZ, 1 při > 50 dBZ) a teplotou (0°C resp. - 20°C) podle vzorce:

$$SHI = 0.1 \int_{H_0}^{H_t} W_T(H_T) \dot{E} dH,$$

kde H_T je výška vrcholu bouřkové oblačnosti a \dot{E} kinetická energie krup přepočtená z dat odrazivosti. Z tohoto indexu vychází empirický vzorec pro (8) MEHS (z angl. *Maximum Expected Hail Size*) [mm] a (9) POSH (z angl. *Probability of Severe Hail*) [%], který zohledňuje navíc výšku H_0 :

$$MEHS = 2,54 (SHI)^{0,5}$$

$$POSH = 29 \ln (SHI / WT) + 50$$

$$WT = 57,5 H_0 - 121$$

3. 2 Pozemní systémy - detekce bleskové aktivity

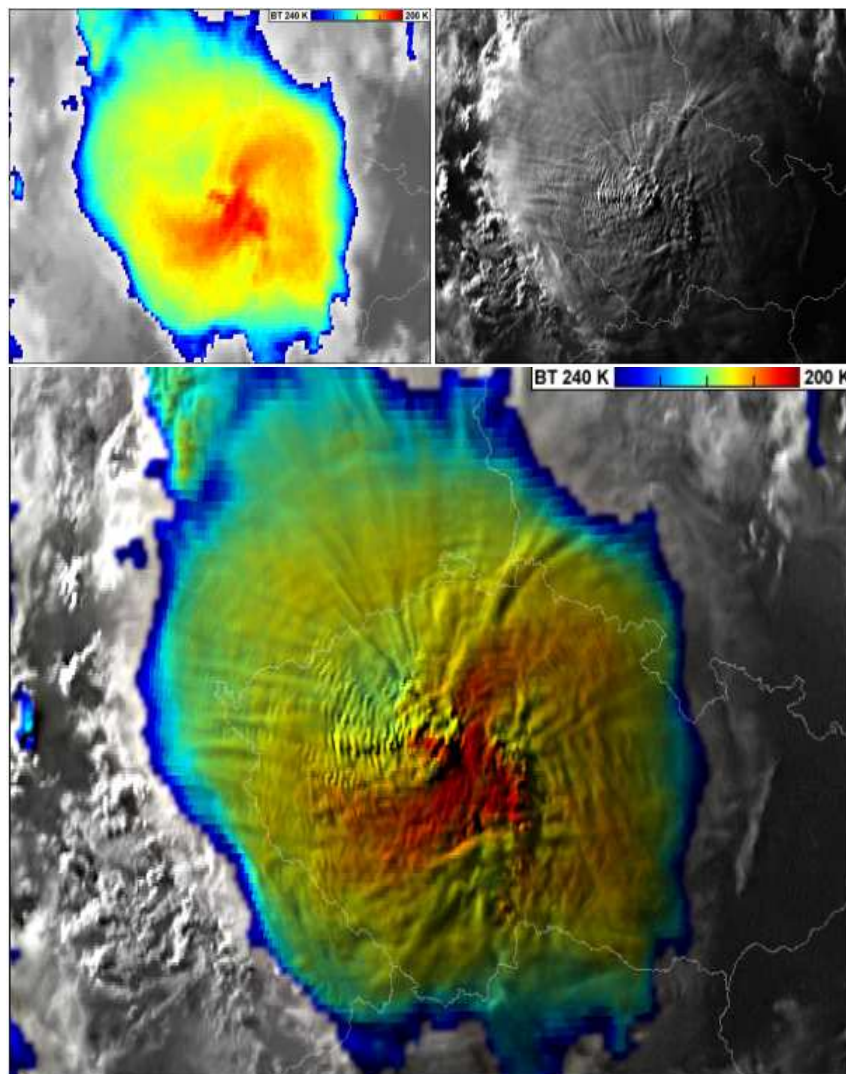
Pozemní detekce blesků je založena na síti senzorů rozmístěných po zájmovém území. Ty přijímají elektromagnetický signál generovaný bleskovým výbojem a pomocí metody lokalizace (1) *direction finding* – DF nebo (2) *time of arrival* – TOA určují jeho polohu. DF funguje na principu detekce azimutu, ze kterého přichází signál a následného určení polohy výboje průsečíkem z údajů optimálně tří senzorů. TOA zaznamenává přesný čas (synchronizovaný dle GPS) příchodu signálu, poloha je určena z průsečíku hyperbol, vytvořených na základě času příchodu signálu, rovněž ze tří až čtyř senzorů (Leonibus et al., 2007), (Rakov, Uman, 2003).

Elektrické výboje v atmosféře generují elektromagnetický signál v širokém spektru, senzory pozemních sítí jsou ale konstruovány pouze pro detekci na určitém intervalu – v oboru dlouhých, velmi krátkých či velmi dlouhých vln. Nejrozšířenější jsou ty pracující (1) v oboru dlouhých vlnových délek ($\lambda = 1 - 10$ km), ve kterém vyzařují nejvíce energie výboje do země a silné oblačné výboje. Dlouhé vlny se šíří téměř rovnoběžně se zemským povrchem, dokáží proto v relativně malém počtu detekovat výboje na národní i nadnárodní úrovni. Senzory detekující výboje (2) na velmi krátkých vlnových délkách ($\lambda = 1 - 10$ m) zaznamenávají všechny výboje, včetně těch slabých oblačných. Tyto systémy jsou citlivé na zakřivení Země a orografické překážky více než předchozí a jsou proto využívány především lokálně v místech, kde je nebezpečná jakákoliv blesková aktivita (např. letiště, kosmodromy...). Systémy využívající k detekci (3) velmi dlouhé vlny ($\lambda = 30 - 60$ km) využívají odraz těchto vln od ionosféry a dokáží zaznamenat elektrickou aktivitu v atmosféře na vzdálenosti tisíce kilometrů. Přesnost lokalizace je však ve velké vzdálenosti od senzorů nižší než u senzorů pracujících v oboru dlouhých a velmi krátkých vln (Leonibus et al., 2007) (Rakov, Uman, 2003) (Řezáčová et al., 2007). Hlavní výhodou detekce bleskových výbojů pomocí pozemních senzorů je přesnost jejich lokalizace (u senzorů pracujících v oboru dlouhých vln přibližně 1 km) a množství získaných informací o výboji (polarita, typ, velikost elektrického proudu).

3. 3 Družicové systémy

Většina meteorologických družic obíhá Zemi po jedné ze dvou základních kategorií drah – geostacionárních (GEO – *Geostationary Earth Orbit*) nebo nízkých (LEO – *Low Earth Orbit*) polárních, které se liší především vzdáleností oběžné dráhy od povrchu Země (GEO přibližně 35 000 km resp. polární LEO 700 - 1500 km) a tím pádem i oběžnou rychlostí a velikostí scény, kterou mohou pozorovat. Meteorologické družice poskytují další část operativně využitelných dat o konvektivních bouřích v oblastech pokrytých pozemní radarovou sítí a sítí senzorů pro detekci blesků (rozvinuté státy světa). Jedná se především o informace o horní hranici oblačnosti (HHO) konvektivních bouří, rovněž ale mohou detekovat vznik konvektivní oblačnosti dříve než jej zaznamenají srážkové radary. Nad územím, pro které pozemní měření nejsou

dostupná nebo mají nevyhovující kvalitu, jsou družicová pozorování jediným zdrojem informací o konvektivních bouřích. Při získávání satelitních dat o poloze oblačnosti se uplatňuje paralaxa (zdánlivý rozdíl polohy oblačnosti při pohledu z družice oproti skutečné poloze nad povrchem Země, tento rozdíl závisí na výšce oblačnosti a její geografické poloze, výšce oběžné dráhy družice a její poloze vůči této dané oblačnosti). Korekce na paralaxu je nezbytná pro správnou interpretaci satelitních dat, zejména při porovnávání těchto s radarovými (Radová, Seidl, 2008).

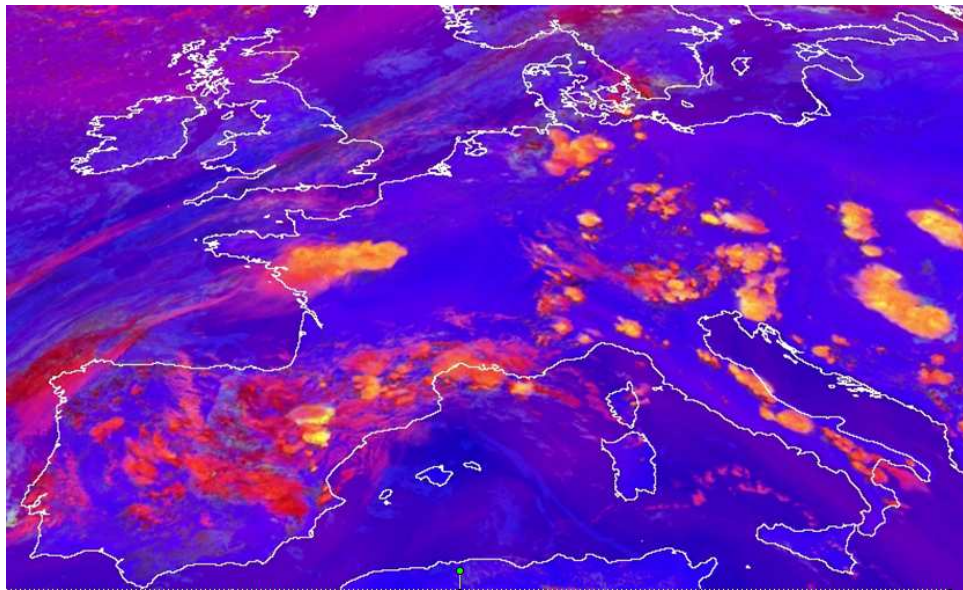


Obr. 3. 3: Snímek z geostacionární družice MSG, 13. 7. 2011 18:35 UTC, Česká republika. V horní části snímky z barevně zvýrazněného IR kanálu (vlevo) a HRV kanálu (vpravo). V dolní části tzv. sendvič těchto dvou kanálů. Zdroj: Setvák et al. (2012).

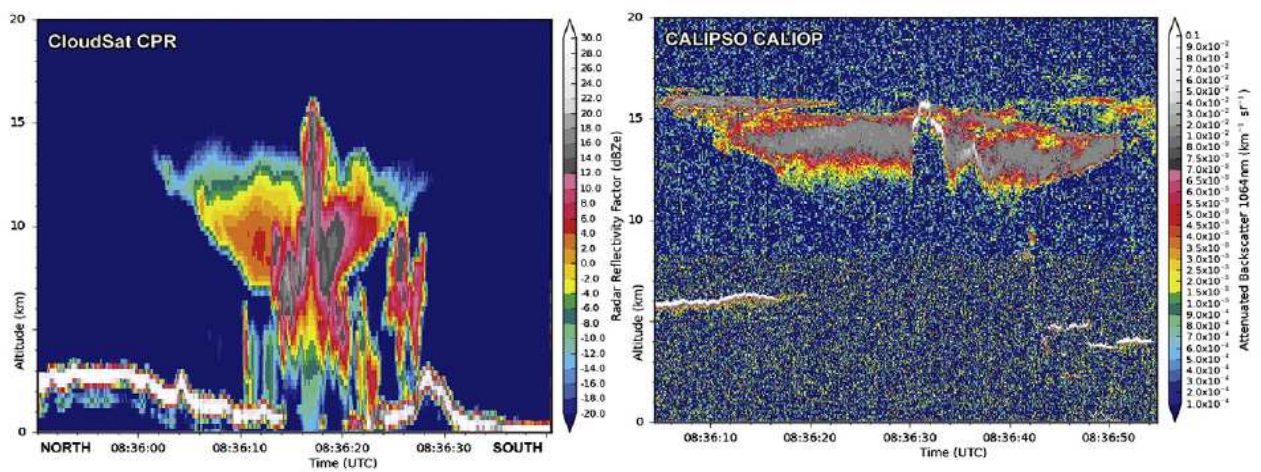
Charakteristickým rysem HHO konvektivních bouří je jejich kovadlina a jeden či více přestřelujících vrcholů, které reprezentují pozici silného updraftu bouře, jenž v některých případech proráží tropopauzu a teprve ve stratosféře jeho rychlost rychle slábne (okolní horní hranice oblačnosti je tropopauzou limitována). Radiometry umístěné na družicích přijímají v denních hodinách rozptýlené či odražené sluneční záření ve viditelném až infračerveném oboru, nepřetržitě pak v tepelném oboru, ve kterém HHO konvektivních bouří tvoří výrazně chladné oblasti. Pro zobrazení detailní struktury této HHO se používá barevné zvýraznění intervalu velmi nízkých teplot (v našich zeměpisných šířkách se střední výškou tropopauzy tradičně 240 K (modrá) - 200 K (červená)) (Setvák et al., 2013). Porovnání pohledu na HHO konvektivní bouře ve viditelném spektru a v oboru tepelného záření nabízí obr. 3. 3.

Pro operativní využití družicových snímků předpovědními službami nebo pro další studium vývoje konvektivních bouří jsou z dat získávaných družicemi vytvářeny tzv. RGB kompozity jednotlivých spektrálních kanálů či jejich matematických kombinací zvýrazňující kritické charakteristiky oblačnosti. Jedním z nich je „Convective Storms“ RGB produkt vyvinutý pro geostacionární družici MSG (*Meteosat Second Generation*). Ten žlutou barvou zvýrazňuje nejchladnější oblasti konvektivních bouří (obvykle oblast silných updraftů) a indikuje přítomnost drobných oblačných částic na HHO bouře (generovaných silnými updrafty) – viz obr. 3. 4.

Radary a lidary umístěné na družicích na nízkých oběžných drahách poskytují data o dvourozměrné vertikální struktuře oblaků. Tato data jsou však vzhledem ke sporadickým přímým přeletům nad zralými konvektivními bouřemi využívána především experimentálně, pro studijní účely. Příkladem přístrojů aktivní detekce z družic jsou CALIOP (*Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Projection*) na družici CALIPSO a CPR (*Cloud Profiling Radar*) na družici CloudSat. Na dlouhých vlnách operující CPR ($\lambda = \sim 3 \text{ mm}$) detekuje vertikální strukturu oblaku až k základně. CALIOP ($\lambda = \sim 1 \text{ }\mu\text{m}$) zachycuje vrstvy velmi drobných ledových částic a aerosolů nad opticky hustou oblačností zaznamenanou radarem, právě tou je však jeho signál směrem dolů rychle utlumen – viz obr. 3. 5 (NASA B, 2012) (Kuma, 2010).



Obr. 3. 4: Snímek geostacionární družice MSG, 25. 5. 2007 13:04 UTC, Evropa. Potenciálně nebezpečné bouře, produkt „Convective Storms“. Zdroj: Kerkmann et al. (2008).



Obr. 3. 5: Data z družic CloudSat a CALIPSO, přístroje CPR a CALIOP, 16. 7. 2007, Mexiko. Příklad rozsahu a typu informací poskytovaných těmito přístroji. Zdroj: Setvák et al. (2013).

4 Nowcasting

Metoda, využívaná v operativní meteorologii, zvaná nowcasting je kombinací detailní analýzy okamžitého stavu atmosféry v lokálním či mezosynoptickém měřítku a krátkodobé predikce, jak se tento stav bude vyvíjet v nejbližších hodinách. Časový rozsah těchto předpovědí se obvykle pohybuje od prvních desítek minut po šest hodin od výchozího stavu atmosféry (odhady vývoje na dobu 3 - 6 h dopředu jsou v některé literatuře již označovány jako VSRF (angl. *very short range forecasting*)) (Lai, 2005) (Meteorologický slovník výkladový a terminologický (eMS)) (Van Horne, 2003). Většinou se jedná o předpověď vývoje konkrétních meteorologických jevů jako jsou například srážky a vítr v obecném smyslu, minima či maxima teploty a rovněž všechny nebezpečné fenomény spojené s konvektivními bouřemi (srážky, vítr, blesková aktivita, krupobití). Časový rozsah nowcastingové předpovědi se může lišit podle jevu, pro který je vytvořena.

Tato kapitola je zaměřena na nowcasting konvektivních bouří. Předpověď se v tomto případě týká především dráhy bouře a vývoje nebezpečných konvektivních jevů (vysoké úhrny srážek, blesky, krupobití) a pohybuje se v časovém rozmezí desítek minut (Wilson et al., 1998) (Wilson et al., 2004). Hlavní motivací tvorby nowcastingových předpovědí pro konvektivní bouře je včasné varování obyvatelstva před nebezpečnými konvektivními jevy.

4.1 Metody nowcastingu konvektivních bouří

Nowcasting se začal vyvíjet spolu s rozvojem systémů distančního pozorování a telekomunikací po skončení druhé světové války od 50. let minulého století. V 60. letech se sestával především z časové extrapolace radarových snímků spojených s údaji srážkoměrných stanic. Největší rozvoj znamenal pro nowcasting přechod na digitální měření meteorologických veličin a rozvoj softwarových nástrojů, které umožňovaly vyvíjet propracovanější algoritmy pro detekci a sledování konvektivních buněk a později numerické modely pracující s asimilací velkých objemů

mezoměřítkových dat (Lai, 2005) (Mass, 2011) (Pierce et al., 2012) (Wilson et al., 1998).

V současné době jsou na národní či regionální úrovni vyvíjeny četné nowcastingové systémy pracující buď s (1) plošnou extrapolací, (2) detekcí a sledováním konvektivních buněk, (3) specializovanými numerickými modely (NWP – *Numerical Weather Prediction*) nebo jsou tyto výše zmíněné (4) kombinovány spolu či s dalšími expertními systémy (detekce zón konvergence, koncepční modely konvektivních bouří...) (Pierce et al., 2012) (Wilson et al., 1998).

Krátkodobá extrapolace radarového echa ve většině případů neuvažuje žádné jeho změny ve velikosti či intenzitě (persistence, angl. *steady-state assumption*). Vektor posunu radarových cílů je vypočten ze změny polohy radarového echa na dvou časově oddělených radarových snímcích, kdy jako kritérium podobnosti může být použita maximální vzájemná korelace (angl. *cross-correlation coefficient*) nebo nejnižší absolutní chyba. Získaný vektor je použit pro extrapolaci celého srážkového pole nebo je toto pole dále rozčleněno na několik dílčích částí, které jsou extrapolovány odděleně každá svým vektorem posunu. Dnes stále užívaným systémem je TREC (*Tracking Radar Echoes by Correlation*) resp. jeho modernější verze COTREC (*continuity of TREC vectors*) (Li et al., 1993).

Detekce a sledování konvektivních buněk (angl. *cell tracking*) je forma extrapolace vyvinutá konkrétně pro nowcasting konvektivních buněk. Počátečním stavem pro takovou předpověď je detekce buněk na základě radarových, bleskových či družicových dat. V případě radarových dat je určena prahová hodnota radarové odrazivosti a v některých případech i prahová hodnota objemu či plochy radarového cíle, od kterých budou buňky algoritmem zaznamenávány. Celé jádro vysoké radarové odrazivosti (angl. *reflectivity core* – RC) je pak z vytvořeno buď s využitím stejného (konstantního) prahu odrazivosti, aplikovaného na okolní buňky radarových dat, nebo pomocí variabilního prahu odrazivosti např. podle vztahu ($Z_{\max} - 10$ dBZ). Jádro odrazivosti pak mohou být přiřazeny další charakteristiky (VIL, hodnoty indexů výskytu krup, bleskové výboje, IR teplota měřená z družicových snímků...) a jeho pohyb a další vývoj je sledován a dále předpovídán v čase. Příklady systémů pracujících na principu detekce a sledování konvektivních buněk jsou americké TITAN (*Thunderstorms Identification Tracking Analysis and Nowcasting*) (Dixon, Wiener, 1993) (NCAR, 2015) a SCIT (*Storm Cell Identification and Tracking*) (Johnson et al., 1998) nebo německý TRACE3D (Handwerker, 2002).

Asimilace dat do numerických modelů nabízí možnost použít všechna dostupná data dálkové detekce (především data z radarů a geostacionárních družic) na jedné platformě, což představuje největší výhodu užití NWP. Hlavní nevýhodou využití numerických modelů v nowcastingu konvektivních bouří je čas potřebný ke zpracování těchto dat, v současné době se v operativním provozu využívají NWP v časovém rozlišení 1h, vývoj konvektivních buněk je však mnohem rychlejší a jejich životnost v některých případech jedné hodiny ani nedosahuje (Pierce et al., 2012) (Van Horne, 2003) (Wilson et al., 1998).

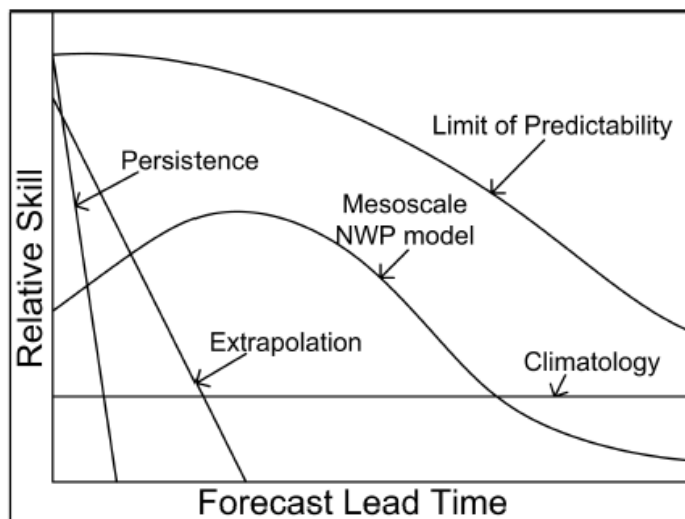
Algoritmy spojující extrapolační přístupy s expertními systémy jsou vyvíjeny k dosažení nejoptimálnějšího výsledku předpovědi vývoje konvektivních bouří a pracují s výhodami jednotlivých metod. Obvykle bývá spojena extrapolace radarových a satelitních dat s mezoměřítkovou NWP, jejichž váha se v čase mění podle úspěšnosti (viz obr. 4. 1). Anglický GANDOLF (*Generated Advanced Nowcasts for Deployment in Operational Land Surface Flood Forecast*) pracuje s radarovými, satelitními, naměřenými průtokovými a NWP daty. (Pierce et al., 2000). Dalším systémem využívajícím více nowcastingových metod je americký Auto-Nowcaster, který pomocí detekce přízemní konvergence, instability atmosféry a stříhu větru predikuje pravděpodobnost vzniku a vývoje konvektivních bouří. Pro nowcasting již vzniklých bouří je použita plošná extrapolace (Mueller et al., 2003).

4. 2 Úspěšnost krátkodobých předpovědí

Základní rozdíly mezi jednotlivými metodami nowcastingu popsané dříve v této kapitole určují jejich výhody a nevýhody a úspěšnost jimi vytvořené předpovědi v čase. Tuto úspěšnost zachycuje níže obr. 4. 1.

Efektivita konkrétních nowcastingových schémat (včetně těch pracujících s expertními systémy) je testována a srovnávána na případových studiích. S příchodem nového milénia se staly Olympijské hry událostmi, při jejichž příležitosti k porovnávání těchto systémů dochází. V publikacích se jednalo především o Olympijské hry v Sydney v roce 2000 (Forecast Demonstration Project) (Pierce et al., 2004) (Wilson et al., 2004), kde si při předpovídání dráhy konvektivních bouří nejlépe vedl cell tracking systém TITAN a v Pekingu v roce 2008 (Wilson et al., 2010). V současné době

se nowcastingové přístupy a schémata permanentně testují a srovnávají na vědeckých platformách, jedna z významných se nachází v Helsinkách (Koskinen et al., 2011).



Obr. 4. 1: Teoretická úspěšnost předpovědi v čase pro jednotlivé nowcastingové přístupy.

Zdroj: Zipser (1990) In Van Horne (2003).

4. 3 Nowcasting konvektivních bouří v České republice

Stejně jako mnoho jiných národních meteorologických služeb, využívá i Český hydrometeorologický ústav (ČHMÚ) nowcastingové metody předpovědi konvektivních bouří, a to plošnou extrapolaci a detekci a sledování konvektivních buněk. Jako jeden ze vstupů pro tyto předpovědi je využíván lokální NWP model.

Pro plošnou extrapolaci radarového echa je užíván systém COTREC (princip podrobněji uveden výše v této kapitole). Srážková pole a jejich vektory proudění jsou zde postupně rozdělována na dílčí části (nejmenší v posledním kroku mají rozměr 44 x 44 km). Jako alternativa k této metodě je využíván nowcastingový systém INCA-CZ, který porovnává čtverce o rozměrech 100 x 100 km. Použití plošné extrapolace srážkového pole je vhodné především pro nowcasting stratiformních srážek, ne tolik pro předpověď vývoje pohybu konvektivních bouří z důvodu jejich mírně odlišného pohybu od vektorů proudění (Novák, 2007) (Novák, Kyznarová, 2013). Detekce a sledování konvektivních buněk poskytuje řešení těchto limitů plošné extrapolace. V ČHMÚ je pro sledování konvektivních buněk používán zde vyvinutý

algoritmus CELLTRACK (Kyznarová, 2009). Tomu je dále věnována část následující kapitoly v rámci popisu použitých datových podkladů a systémů. Numerické předpovědi pro území České republiky zajišťuje náš lokální model ALADIN. Vektory posunu radarových cílů jsou modelem získávány z pole větrného proudění na hladině 700 hPa a těmito vektory jsou následně radarová data překryta (Novák, 2007).

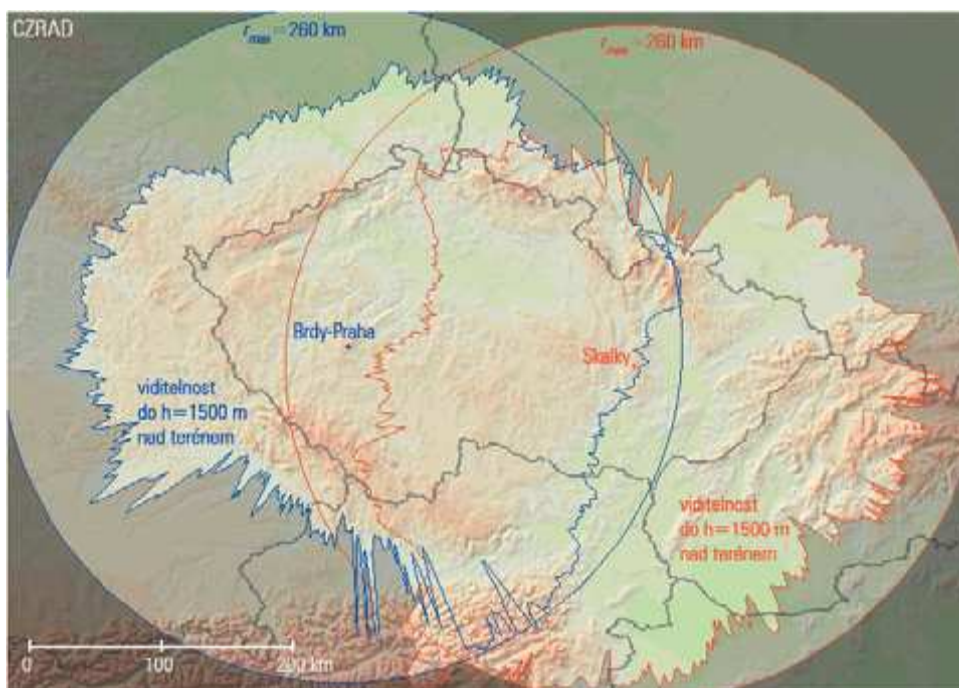
5 Data

V této práci jsou využita data z české meteorologické radarové sítě (CZRAD) a data o detekovaných elektrických výbojích nad Českou republikou ze středoevropské detekční sítě (CELDN = *Central European Lightning Detection Network*). Pro identifikaci konvektivních buněk (jader vysoké radarové odrazivosti) nad Českou republikou a sledování vývoje jejich parametrů během detekovaného životního cyklu je použit nowcastingový systém CELLTRACK (Kyznarová, 2009). Data byla poskytnuta Českým hydrometeorologickým ústavem.

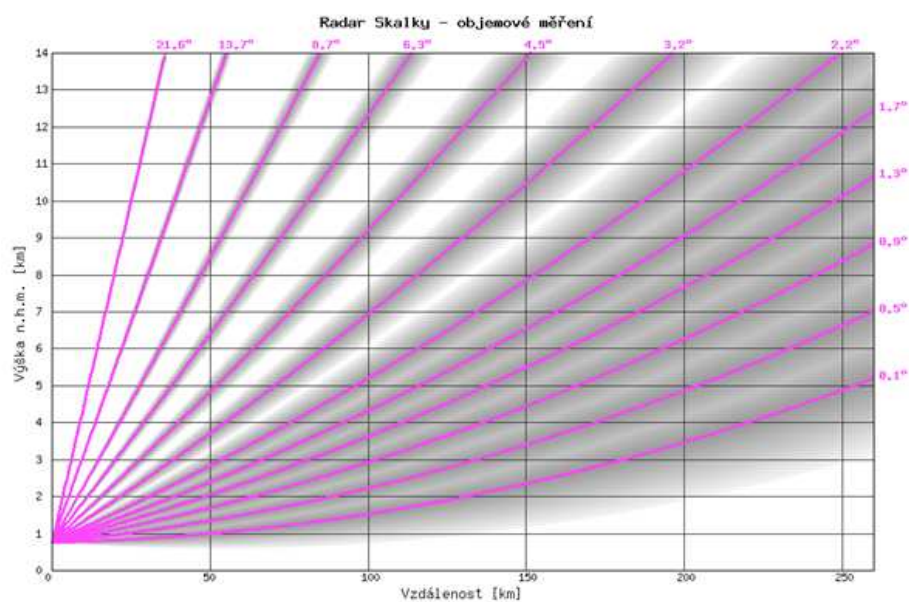
5.1 Pozemní radarová síť České republiky (CZRAD)

Česká meteorologická radarová síť je tvořena dvěma dopplerovskými radary (Skalky u Protivanova resp. vrchol Praha v Brdech – pozice na obr. 5. 1) operujícími ve frekvenčním pásmu C. Naměřená sférická objemová radarová data jsou interpolována do kartézské soustavy s rozlišením 1 x 1 km. Dosah radarových měření užívaných pro odhad srážek je až 260 km. Díky zakřivení Země je v této vzdálenosti osa paprsku (který sleduje výrazněji méně zakřivenou rovinu) 1500 m nad terénem, což je nejzazší hranice absence dat ze spodních hladin atmosféry, při které lze ještě adekvátně odhadnout objem srážek z radarových dat. Faktorem rovněž ovlivňujícím dosah radarového signálu je blokující orografie. Nejnižší je tedy dosah za oblastí vyšších pohoří (Krkonoše), nejvyšší na území nížin (Panonská pánev) (Kyznarová, Novák, 2016). Časové rozlišení dat CZRAD je 5 min s počátkem měření v nejvyšších elevacích – tak, aby byly spodní hladiny (nejdůležitější pro odhad srážek) zaznamenány v co nejaktuálnějším čase. Skenovací strategii radarů CZRAD – elevační úhly, na kterých anténa vysílá elektromagnetický signál – znázorňuje na příkladu radaru Skalky obr. 5. 2.

V této práci byly využity základní produkty radarových dat – CAPPI, Z MAX, EchoTop, VIL a indexy výskytu krup (popsané dříve v kapitole 3).



Obr. 5. 1: Radary v České republice – poloha (středů kruhů), jejich maximální dosahy (kruhy) a dosahy vhodné pro určování intenzity srážek, do výšky osy paprsku 1500 m nad terénem. Zdroj: Novák, Kyznarová (2016).



Obr. 5. 2: Skenovací strategie CZRAD. Růžová barva značí osu paprsku, šedá barva jeho šířku paprsku. Zdroj: Novák, Kyznarová (2016).

5. 2 Středoevropská síť pro detekci blesků (CELDN)

V České republice jsou pro detekci blesků instalovány a od roku 2002 operativně využívány dva senzory pracující v oboru dlouhých vlnových délek. Ty spolu s německými, rakouskými, polskými, slovenskými a maďarskými senzory vytváří detekční síť CELDN, kterou provozuje firma Siemens. Přesnost lokalizace výbojů v této síti je přibližně 1 km. Úspěšnost detekce jednotlivých výbojů v této síti je 70 - 80 %, úspěšnost detekce blesků do země (v CELDN se do jednoho blesku spojují výboje, které jsou od prvního vzdálené do okruhu 10 km a času 1 s, mezi sebou časově vzdálené do 500 ms) je 90 %, oblačných blesků pak 5 - 30 %. Všechny detekované výboje jsou operativně zaznamenávány v pětiminutových intervalech (stejně časové rozlišení jako časové rozlišení radarových dat) (Novák, 2012) (Novák, Kyznarová, 2011).

V této práci byla ze sítě využita data o typu (oblačné výboje, výboje do země), polaritě (výboje do země s pozitivní polaritou, výboje do země s negativní polaritou) a hustotě výbojů pro buňky identifikované algoritmem CELLTRACK (ke každé detekované buňce jsou přiřazeny úhrny výbojů z její plochy a okolí do vzdálenosti 35 km, hustota výbojů je počítána pouze pro samotnou buňku).

5. 3 Nowcastingový systém CELLTRACK

System použitý v této práci k identifikaci, sledování jader vysoké radarové odrazivosti (angl. *reflectivity core* – RC) a zaznamenávání jejich parametrů v průběhu životního cyklu, je algoritmus CELLTRACK (Kyznarová, 2009). Tento systém pracuje s radarovými daty CZRAD (v prostorovém rozlišení 1 x 1 x 0,5 km a časovém rozlišení 5 min), konkrétně využívá vertikální průměty produktu maximálních odrazivostí – Z MAX. Práh algoritmu pro identifikaci jádra je odrazivost 44 dBZ a plocha 2 x 2 km, k vytvoření jádra odrazivosti z okolních bodů je prahem konstantní hodnota odrazivosti 44 dBZ. V této práci je dále pro toto jádro odrazivosti ≥ 44 dBZ užíván termín *buňka*.

První pohyb buňky v čase následujícím po čase jeho identifikace ($t + 1$) je odvozen z vektorů pohybu získaných systémem COTREC a buňky z času t jsou těmito vektory přeneseny. Následně je vypočtena podobnost (angl. *similarity*) tvaru skutečných a přenesených buněk z času ($t + 1$) podle vzorce:

$$sim = YY / (YY + YN + NY)$$

kde YY je počet bodů obsazených buňkami v obou časech, YN a NY počet bodů obsazených pouze jednou buňkou. Pokud je sim vyšší než 0,85 a je dodržena prahová vzdálenost skutečné a přenesené buňky v intervalu 7 - 13 km (podle rychlosti větru), je buňka v čase $(t + 1)$ přiřazena té původní z času t . Pokud je sim nižší, je usouzeno na štěpení či slučování buněk. V současné době je v ČHMÚ systém CELLTRACK používán především pro extrapolaci polohy buněk, pro kterou jsou používány vektory pohybu odvozené z historického pohybu buňky (minimálně dvě, maximálně šest předchozích měření).

V práci byla využita (1) data o souřadnicích těžišť všech detekovaných buněk nad územím České republiky a blízkým okolím (pokrytí CZRAD) v pětiminutových intervalech, parametry odvozené z (2) radarových a (3) bleskových dat pro detekované buňky v pětiminutových intervalech (tyto parametry a jejich následná selekce jsou popsány dále v kapitole 6. 1) a (4) data o historii procesů štěpení a slučování buněk během jejich životního cyklu v pětiminutových intervalech.

6 Metody

V této kapitole jsou popsány metody výběru parametrů buněk detekovaných systémem CELLTRACK, které mohou ukazovat na jejich potenciální nebezpečnost. Dále jsou popsány metody výběru dní s nebezpečnými konvektivními jevy z let 2010 - 2014 a uveden výběr konkrétních konvektivních buněk – šest jednoduchých izolovaných a šest, se kterými byly spojeny nebezpečné jevy.

6.1 Parametry konvektivních buněk

Systém CELLTRACK zaznamenává pro každou identifikovanou buňku 29 parametrů odvozených z radarových dat a 10 parametrů odvozených z dat detekce blesků:

AREA	– plocha buňky [km ²]
VOL	– suma bodů v oblasti buňky s odrazivostí ≥ 4 dBZ (vymezeno parametrem AREA) ve všech CAPPI hladinách [km ³]
VOL44	– suma bodů v oblasti buňky s odrazivostí ≥ 44 dBZ (vymezeno parametrem AREA) ve všech CAPPI hladinách [km ³]
TOP	– nejvyšší detekovaná výška odrazivosti 4 dBZ v buňce (produkt radarových dat EchoTop) [m]
BOTTOM	– nejnižší detekovaná výška odrazivosti 4 dBZ v buňce [m]
BOTTOM0	– nejnižší detekovaná výška odrazivosti 0 dBZ v buňce [m]
HEIGHT	– rozdíl parametrů TOP a BOTTOM [m]
MAX_R	– hodnota maximální odrazivosti v buňce (získáno z objemových radarových dat) [dBZ]

MAX_R2D	– průměrná odrazivost v buňce (vymezeno parametrem AREA, počítáno z radarového produktu Z MAX) [dBZ]
MAX_R3D	– průměr odrazivostí ≥ 44 dBZ v oblasti buňky (vymezeno parametrem AREA) ve všech CAPPI hladinách (průměr odrazivostí bodů, které vytvářejí parametr VOL44) [dBZ]
MAX_R_CAPPI	– hodnota maximální odrazivosti v buňce (počítáno z interpolovaných CAPPI hladin) [dBZ]
MAX_R_CAPPI_AREA	– suma bodů MAX_R_CAPPI v buňce [km ²]
MAX_R_CAPPI_VOL	– počet CAPPI hladin v buňce, kde se vyskytuje MAX_R_CAPPI
MAX_R_CAPPI_TOP	– nejvyšší detekovaná výška MAX_R_CAPPI v buňce [m]
MAX_R_CAPPI_BOTTOM	– nejnižší detekovaná výška MAX_R_CAPPI v buňce [m]
MAX_R_CAPPI_STRED_HEIGHT	– průměr parametrů MAX_R_CAPPI_TOP a MAX_R_CAPPI_BOTTOM [m]
maxVIL	– maximální hodnota VIL v buňce [kg/m ²]
VIL_SUM	– suma hodnot VIL v buňce [kg/m ²]
meanVIL	– průměrná hodnota VIL v buňce [kg/m ²]
meanHP	– průměrná hodnota HAIL_PROB v buňce [%]
maxHP	– maximální hodnota HAIL_PROB v buňce [%]
meanSHI	– průměrná hodnota SHI v buňce [J/ms]
maxSHI	– maximální hodnota SHI v buňce [J/ms]
meanVILD	– průměrná hodnota VILD (VILDensity = VIL vážený výškou EchoTopu) v buňce [g/m ³]
maxVILD	– maximální hodnota VILD v buňce [g/m ³]
meanPOSH	– průměrná hodnota POSH v buňce [%]
maxPOSH	– maximální hodnota POSH v buňce [%]
meanMEHS	– průměrná hodnota MEHS v buňce [mm]
maxMEHS	– maximální hodnota MEHS v buňce [mm]

ALL	– počet všech výbojů v buňce a jejím okolí do vzdálenosti 35 km
CC	– počet oblačných výbojů v buňce a jejím okolí do vzdálenosti 35 km
CG	– počet výbojů do země v buňce a jejím okolí do vzdálenosti 35 km
CG_NEG	– počet výbojů do země s negativní polaritou v buňce a jejím okolí do vzdálenosti 35 km
CG_POS	– počet výbojů do země s pozitivní polaritou v buňce a jejím okolí do vzdálenosti 35 km
ALL_INT	– hustota všech výbojů v buňce (váženo parametrem AREA)
CC_INT	– hustota oblačných výbojů v buňce (váženo parametrem AREA)
CG_INT	– hustota výbojů do země v buňce (váženo parametrem AREA)
CG_NEG_INT	– hustota výbojů do země s negativní polaritou v buňce (váženo parametrem AREA)
CG_POS_INT	– hustota výbojů do země s pozitivní polaritou v buňce (váženo parametrem AREA)

Z uvedených parametrů konvektivních buněk, které v současné době algoritmus CELLTRACK k těmto buňkám přiřazuje (39) jich bylo vybráno 13 (AREA, VOL44, TOP, MAX_R_CAPPI_STRED_HEIGHT, VIL, maxVILD, maxHP, maxPOSH, ALL, CC, CG, CG_POS, CG_NEG) podle níže popsaných důvodů:

Parametr AREA byl vybrán, jelikož se jedná o jeden ze základních parametrů, který udává vývoj horizontálních rozměrů buňky po dobu jejího životního cyklu.

Z hodnot VOL a VOL44 je pro detekci potenciálně nebezpečných buněk optimálnější druhá z nich, která započítává z trojrozměrného sloupce radarových dat pouze body s odrazivostí ≥ 44 dBZ a nikoliv celý sloupec radarových dat určený parametrem AREA.

Parametry BOTTOM a BOTTOM0 byly u všech studovaných bouří již v první CAPPI hladině (všechny konvektivní buňky měly základnu níže než 1000 m). Z tohoto vyplývala i hodnota parametru HEIGHT (o 1000 m snížený parametr TOP). Ze zmíněných čtyř parametrů buňky je tedy zcela bez ztráty informací možné využít pouze parametr TOP.

Rozdíl mezi hodnotami MAX_R a MAX_R_CAPPI vyjadřuje ztrátu informace interpolací objemových radarových dat do CAPPI hladin, tento rozdíl byl u všech sledovaných bouří v rozmezí 0 - 1,5 dBZ. Další parametry pracující s maximální odrazivostí v buňce z objemových či CAPPI dat (MAX_R2D, MAX_R3D, MAX_R_CAPPI_AREA, MAX_R_CAPPI_VOL) neposkytují operativně důležité doplňkové údaje oboune, pro identifikaci potenciálně nebezpečných konvektivních buněk lze tedy z těchto využít jen parametr MAX_R.

Parametry MAX_R_CAPPI_TOP, MAX_R_CAPPI_BOTTOM a MAX_R_CAPPI_STRED_HEIGHT udávají polohu (výšku) a vertikální rozsah jádra maximální odrazivosti v rámci detekované buňky. Operativně je možné použít pouze parametr MAX_R_CAPPI_STRED_HEIGHT jako průměrnou hodnotu pro výšku jádra maximální odrazivosti. Název tohoto parametru je dále v práci zkrácen na MAX_R_HEIGHT.

Hodnoty parametru VIL pro buňku (maxVIL, VIL_SUM, meanVIL) stejně jako VILD jsou ovlivněny vlastnostmi radarových dat v různé vzdálenosti od radarů. Pro konvektivní buňky příliš blízko radarům nejsou dostupná data pro vrchní části buněk, pro ty příliš daleko chybí data ze spodních hladin (viz skenovací strategii na obr. 5. 2). Zhrazenost hodnot meanVIL resp. meanVILD není pro identifikaci potenciálně nebezpečných konvektivních buněk příliš vhodná, z ukazatelů vertikálně integrovaného vodního obsahu buňky se tedy pravděpodobně nejvíce hodí maxVIL a maxVILD.

Z indexů výskytu krup spolu hodnoty SHI, POSH a MEHS úzce souvisejí (poslední dvě jsou získány empirickým vzorcem z SHI – popsáno podrobněji dříve ve třetí kapitole), je tedy možné využít pouze jednu z nich. Byla vybrána hodnota POSH, jelikož je stejně jako HAIL_PROB (HP) udávána v procentech pravděpodobnosti výskytu krup a je možné porovnat pravděpodobnosti výskytu obecných (HP) a nebezpečných (POSH) krup.

Všechny parametry hustoty bleskových výbojů počítají tuto hodnotu pouze z informací pro detekovanou buňku (výboje detekovány na ploše buňky vážena

parametrem AREA). Podle Kyznarové (2009) je tímto způsobem k buňkám přiřazeno pouze okolo 30% skutečné bleskové aktivity generované celou konvektivní bouří, jedná se tedy o významnou ztrátu informací a tyto parametry nebyly v práci využity.

Využity byly všechny parametry, které udávají počet bleskových výbojů v buňce a jejím okolí do vzdálenosti 35 km – všechny výboje (ALL), oblačné výboje (CC), výboje do země (CG), výboje do země s negativní polaritou (CG_NEG) a výboje do země s pozitivní polaritou (CG_POS).

6. 2 Vybrané konvektivní bouře

Případy konvektivních bouří nad Českou republikou, které jsou dále v práci studovány byly vybrány ze dní v letech 2010 - 2014, ve kterých byly zaznamenány silné konvektivní jevy. Pro předvýběr těchto dní byla využita (1) data o bleskové aktivitě nad Českou republikou (dny s úhrny > 9500 blesků) (data CELDN, poskytnuto ČHMÚ), dále pak (2) data o výrazných letních povodních (obvykle vícedenní časové úseky) (ČHMÚ A, 2015), (3) tornádech o rychlostech větru vyšších než třída F1 (ESWD, 2016) a (4) výrazných krupobitích (Skripniková, 2013). Někteřou z těchto podmínek spolu s podmínkou výskytu konvektivních bouří (vyloučení povodňových dní s převládajícími stratiformními srážkami) splnilo 22 dní.

Ve vybraných dnech bylo zvoleno šest jednoduchých izolovaných konvektivních buněk, s jejichž životním cyklem nebyly spojeny výrazně nebezpečné konvektivní jevy a šest buněk, které produkovaly nebezpečné konvektivní jevy (nebezpečně velké kroupy, tornádo či vysoký počet bleskových výbojů). Nebezpečné konvektivní buňky oproti vybraným jednoduchým procházely procesy štěpení a slučování s dalšími buňkami či se stávaly součástí multicely. Vybrané případy obou typů konvektivních buněk jsou představeny v kapitole 7.

7 Výsledky práce

Tato kapitola představuje parametry vybraných konvektivních buněk po dobu detekce těchto buněk systémem CELLTRACK. Je rozdělena na dvě části, z nichž první je věnována jednoduchým izolovaným konvektivním buňkám ve dnech s výraznou konvektivní aktivitou, druhá pak celám s nebezpečnými jevy (výskyt nebezpečně velkých krup, výskyt tornáda a vysoké úhrny bleskových výbojů).

Jelikož je životní cyklus studovaných konvektivních buněk omezen radarovou odrazivostí ≥ 44 dBZ (prahová hodnota odrazivosti, od které je buňka detekována systémem CELLTRACK), jsou pro tuto práci zavedeny termíny (1) *doba života buňky* a (2) *doba detekce buňky*. První z nich odpovídá skutečné délce životního cyklu konvektivní buňky se všemi jejími fázemi (viz kapitola 2. 1). Tato doba může být přibližně aproximována časem, po který je buňka zaznamenávána radarovou sítí CZRAD (i ta však zaznamenává oblačnost až od doby tvorby srážkových částic). Termín doba detekce pak odpovídá času, po který byla buňka detekována systémem CELLTRACK – její radarová odrazivost byla ≥ 44 dBZ. Prakticky je tedy oříznuta část první vývojové fáze buňky (fáze mělkého a vysokého Cumulu), zaznamenána celá fáze zralosti Cumulonimbu a počáteční část fáze rozpadu buňky, kdy tato poslední fáze je opět oříznuta o konečná stadia oblaku, která jsou ještě rozpoznatelná v radarových datech. Rozdíl mezi dobou života a dobou detekce buňky zobrazuje tabulka 7. 1. Důležitým ukazatelem je rozdíl mezi počátkem životního cyklu buňky určeným z radarových dat a dobou, kdy buňka dosáhne odrazivosti ≥ 44 dBZ. Tento rozdíl vyjadřuje možnou ztrátu informací o počátečních fázích vývoje buňky. Ve většině vybraných případů buněk byl tento rozdíl 5 - 10 min, v případě obou vybraných případů buněk produkujících nebezpečné kroupy a v případě jedné jednoduché konvektivní buňky byl tento rozdíl 40 - 45 resp. 25 min. V počátečních fázích těchto tří buněk totiž nastala na několik desítek minut stagnace pozitivního vývoje odrazivosti kolem 40 dBZ a jejich detekce systémem CELLTRACK byla proto opožděna.

Tabulka 7. 1: Vybrané konvektivní buňky nad Českou republikou v letech 2010 - 2014.

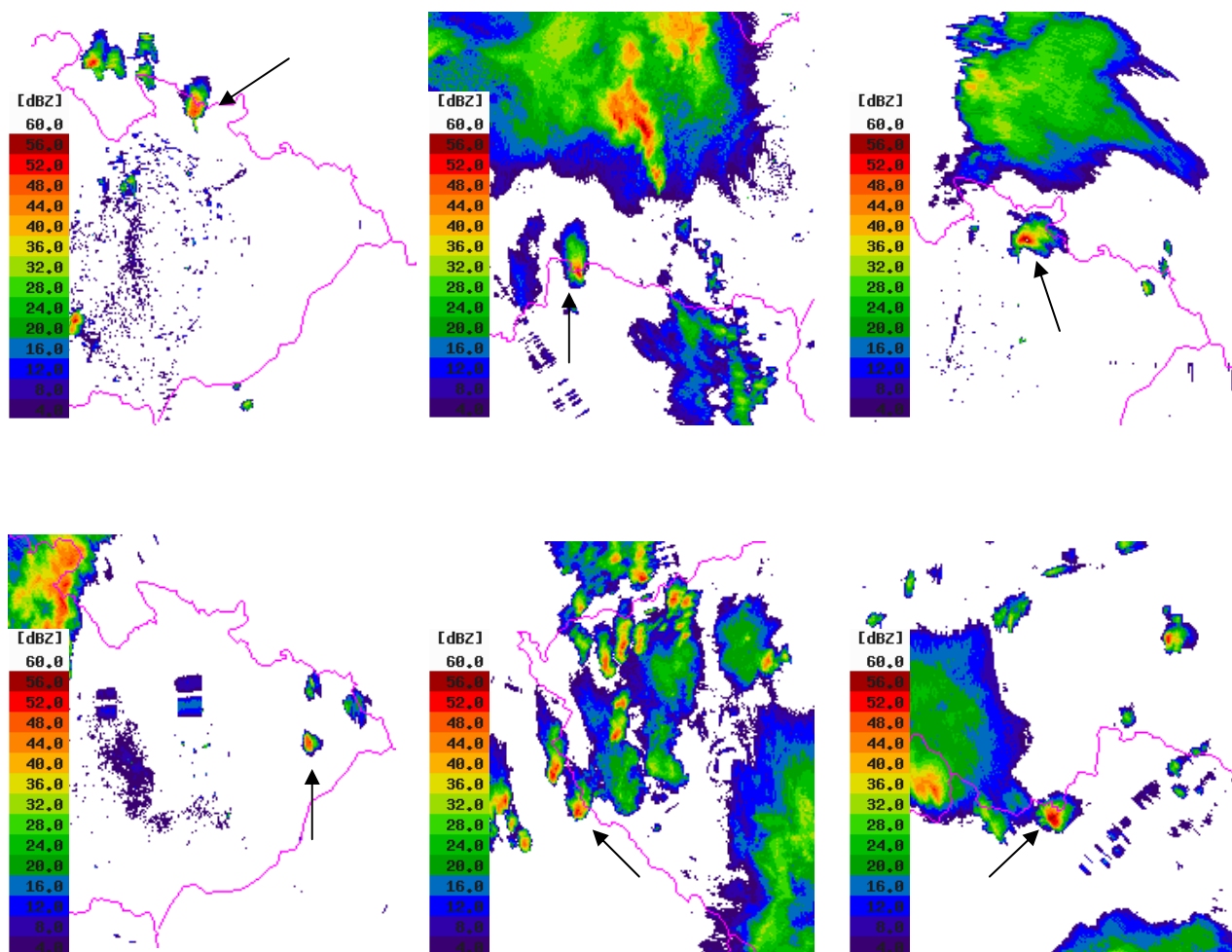
rok	měsíc	den	přibližná doba života z radarových dat (UTC)	doba detekce systémem CELLTRACK (UTC)	charakteristika buňky
2010	7	17	10:05-11:25	10:10-11:10	izolovaná jednoduchá buňka
2010	7	17	16:00-18:05	16:05-17:55	silná blesková aktivita
2010	8	15	16:20-20:25	17:00-20:15	nebezpečné kroupy
2011	7	13	19:15-20:30	19:25-20:10	izolovaná jednoduchá buňka
2011	8	24	09:55-10:50	10:10-10:30	izolovaná jednoduchá buňka
2011	8	24	14:20-18:40	15:05-18:15	nebezpečné kroupy
2012	7	3	04:35-05:15	04:40-05:00	izolovaná jednoduchá buňka
2012	7	6	15:45-16:50	16:10-16:30	izolovaná jednoduchá buňka
2013	6	18	13:50-16:25	13:55-16:05	výskyt tornáda
2013	6	18	13:50-14:45	14:00-14:30	izolovaná jednoduchá buňka
2013	8	4	00:20-02:05	00:30-01:45	silná blesková aktivita
2014	8	3	11:35-14:40	11:40-14:15	silná blesková aktivita

7. 1 Jednoduché izolované konvektivní buňky

Jednoduché buňky, které se po dobu detekce neštěpily ani neslučovaly s jinými a negenerovaly žádné výrazně nebezpečné konvektivní jevy byly systémem CELLTRACK ve vybraných dnech s výraznou konvektivní aktivitou zaznamenávány nejčastěji po dobu 10 - 20 min. Jejich životní cyklus zachycený radary CZRAD byl přibližně dvakrát delší.

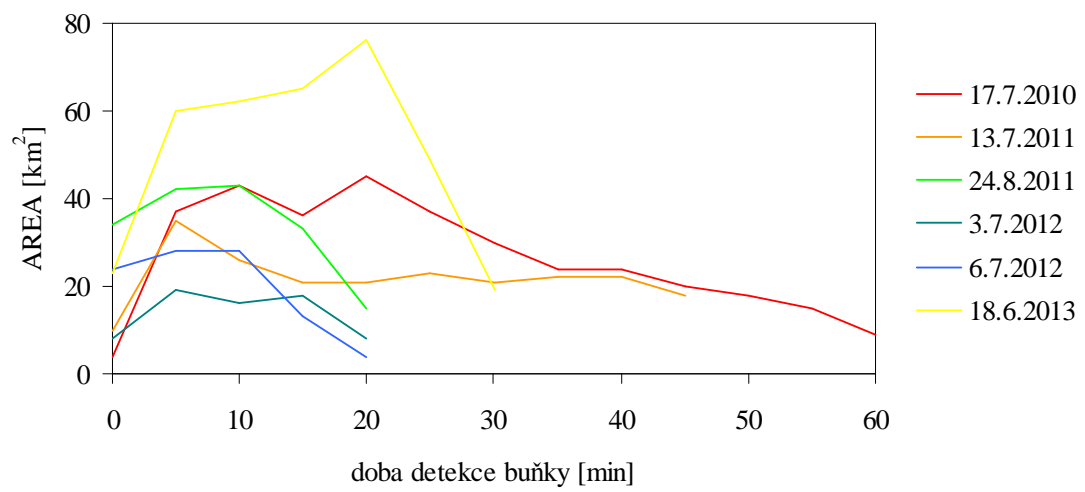
Doba detekce vybrané šestice konvektivních buněk s izolovaným vývojem byla 20 - 60 min. Pohled na vývoj vybraných parametrů těchto buněk po dobu jejich detekce by měl sloužit pro srovnání s vývojem stejných parametrů později uvedených nebezpečných konvektivních buněk. Obr. 7. 1 poskytuje pohled na šest vybraných jednoduchých buněk zobrazených v radarovém produktu Z MAX na vrcholu jejich životního cyklu během doby detekce.

Grafy 7. 1 - 7. 8 zobrazují časový vývoj vybraných parametrů jednoduchých buněk, vždy je zobrazen vývoj jednoho parametru pro všech šest buněk.

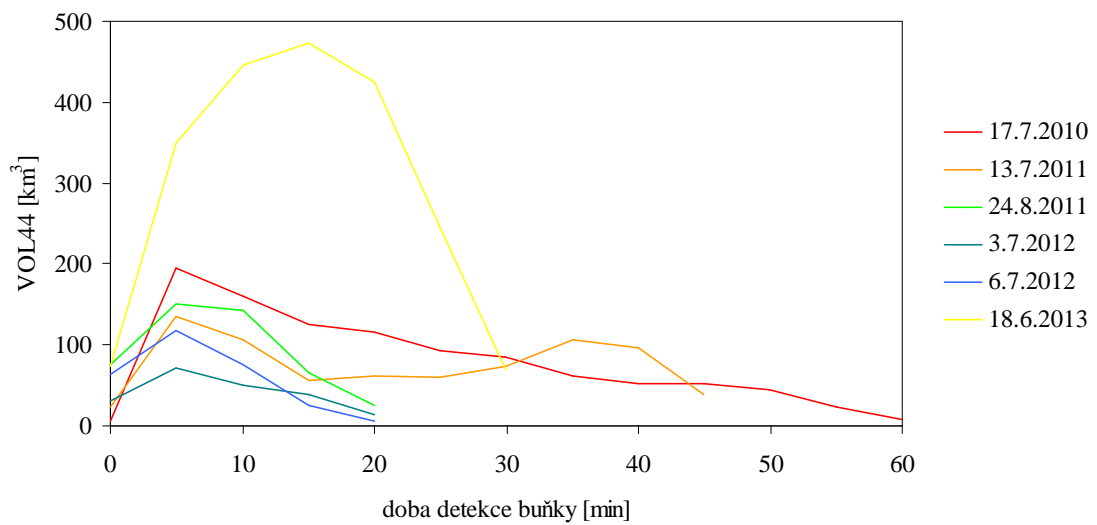


Obr. 7. 1: Data CZRAD, produkt Z MAX. Vybrané jednoduché izolované buňky nad územím České republiky přibližně v polovině životního cyklu. Horní řada zleva 17. 7. 2010, 13. 7. 2011, 24. 8. 2011, spodní řada zleva 3. 7. 2012, 6. 7. 2012, 18. 6. 2013. Šipka označuje studované buňky, růžová linie vyznačuje státní hranici.

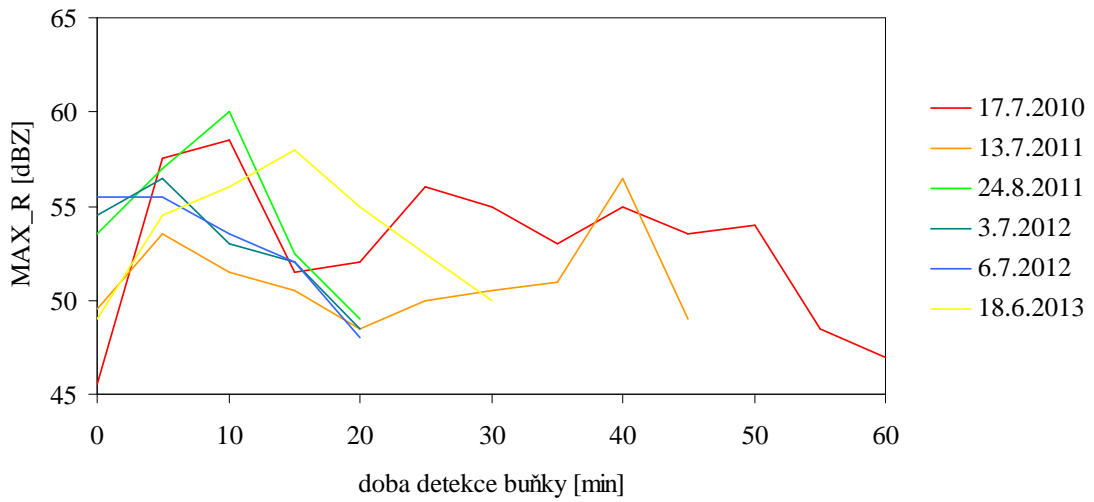
Graf 7. 1: Plocha buňky (parametr AREA).



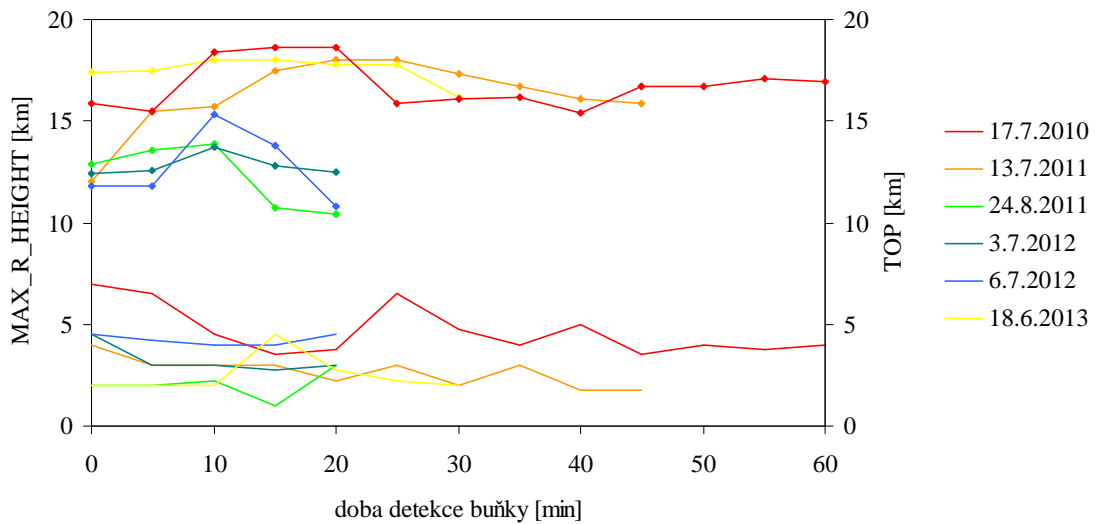
Graf 7. 2: Objem buňky (parametr VOL44).



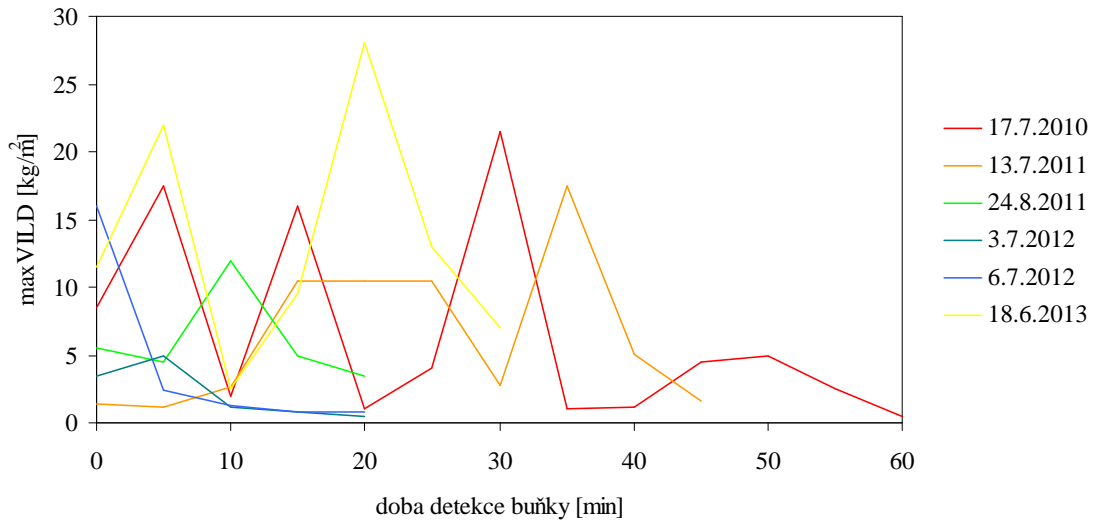
Graf 7. 3: Maximální odrazivost v buňce (parametr MAX_R).



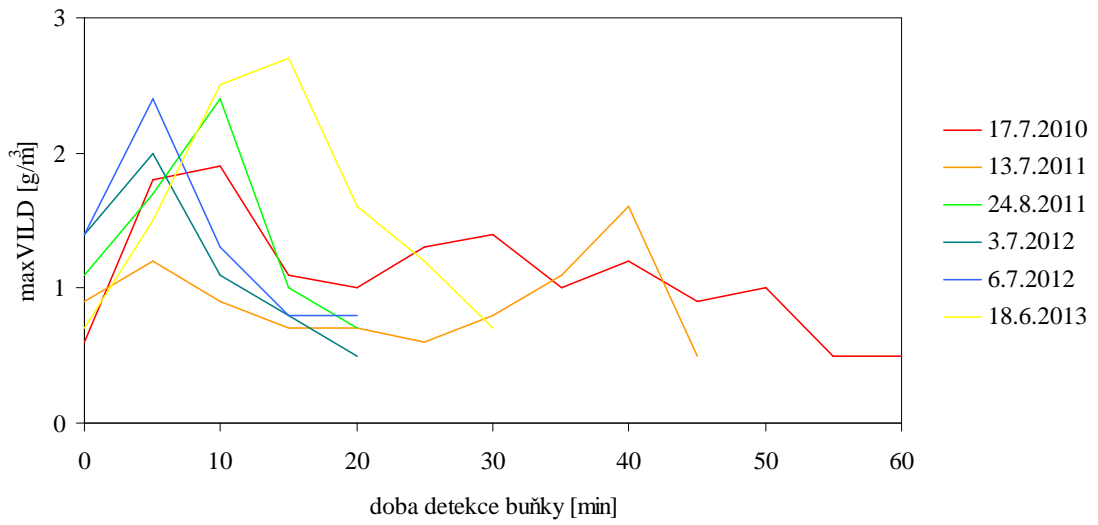
Graf 7. 4: Průměrná výška jádra nejvyšší odrazivosti (parametr MAX_R_HEIGHT), hlavní osa y (hladká linie). Výška EchoTopu – minimální odrazivost 4 dBZ (parametr TOP), vedlejší osa y (linie se značkami).



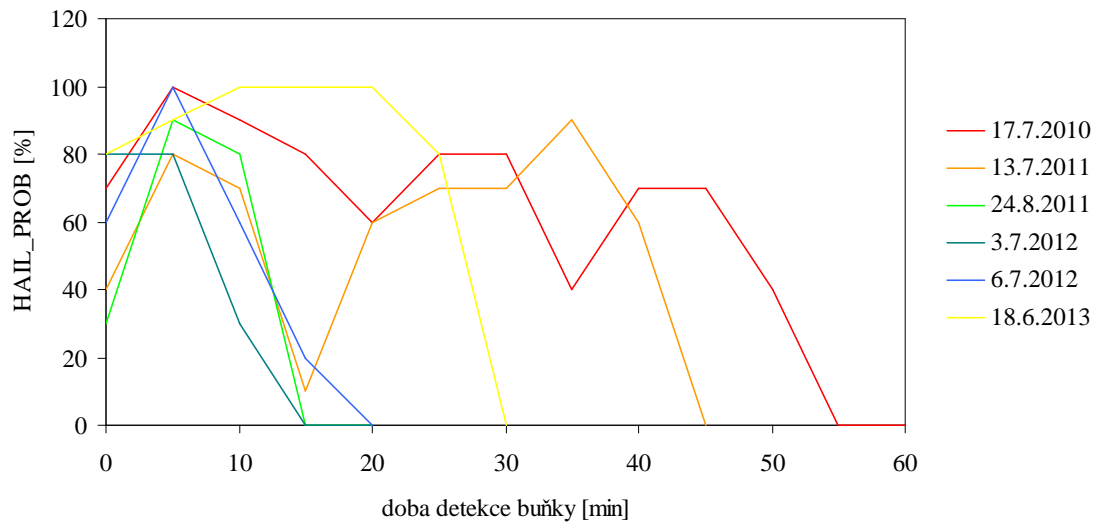
Graf 7. 5: Maximální hodnota VIL v buňce (parametr maxVIL).



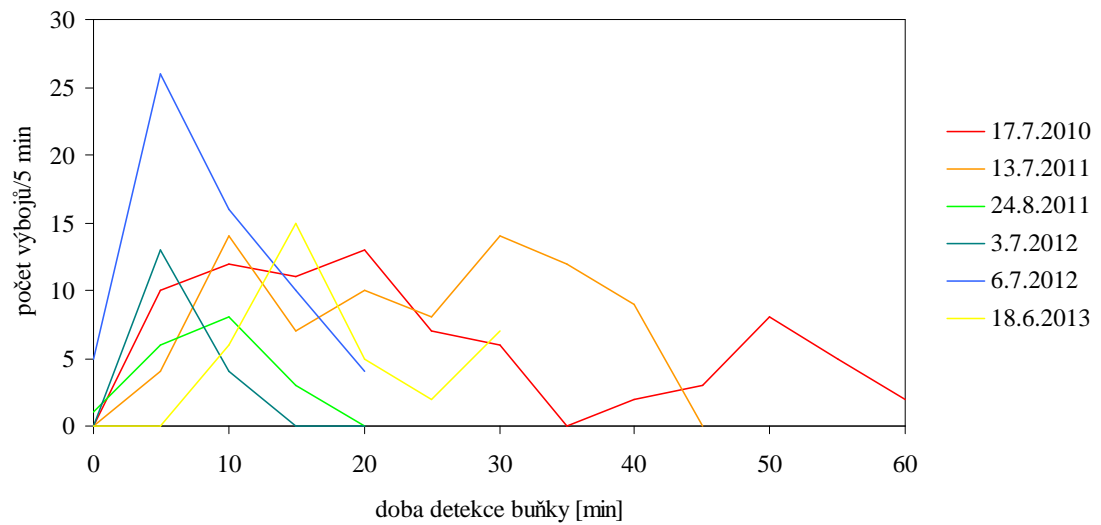
Graf 7. 6: Maximální hodnota VILDensity v buňce (parametr maxVILD).



Graf 7. 7: Pravděpodobnost výskytu krup dle parametru HAIL_PROB.



Graf 7. 8: Počet všech bleskových výbojů pro buňku a její okolí do 35 km (parametr ALL).



Ze šesti jednoduchých konvektivních buněk vybraných pro tuto práci měly tři životnost detekovanou systémem CELLTRACK 20 min, jedna pak 30 min. V těchto případech odpovídal vývoj parametrů AREA, VOL44, MAX_R, TOP, maxVILD a ALL (počet všech bleskových výbojů) teorii vývoje pro koncepční model jednoduché buňky (Byers, Braham, 1948) (Doswell, 2000) (Zajac, Weaver, 2002) – obvykle s nejvyššími hodnotami těchto parametrů přibližně uprostřed doby detekce (záznam celé růstové fáze buňky je ovlivněn prahovou hodnotou odrazivosti 44 dBZ) s následným poklesem hodnot při rozpadu buňky (v CELLTRACK datech obvykle pozvolnější než růstová fáze). Hodnoty zmíněných parametrů se u zvolených buněk žijících 45 min resp. 60 min pohybovaly v relativně nízkých číslech a jejich vývoj v době detekce buňky neměl výrazný vrchol. Blesková aktivita byla ve většině zaznamenána hned při identifikaci buňky (dosažení odrazivosti ≥ 44 dBZ) a vyskytla se v každé vybrané buňce.

V datech o průměrné výšce jader nejvyšší odrazivosti nebyl u vybraných jednoduchých konvektivních buněk zaznamenán předpokládaný pokles v pozdějších vývojových fázích buňky (Řezáčová, 2007 – viz obr. 2. 1). Tento fakt pravděpodobně souvisí s omezením času detekce buněk jejich odrazivostí ≥ 44 dBZ a předpokládaný pokles v hodnotách parametru výšky jádra nejvyšší odrazivosti by se tedy nejspíš objevil, pokud by byly údaje o buňkách zaznamenávány až do úplného rozpadu jejich buněčné struktury.

U hodnoty VIL byl u buněk s dobou detekce 20 min zaznamenán pokles v pozdějších vývojových fázích, u ostatních buněk však byl průběh tohoto parametru po dobu jejich detekce nápadně nesouvislý.

Všechny buňky se alespoň v jednom pětiminutovém intervalu vyskytovaly na 80 % nebo vyšší hranici pravděpodobnosti výskytu krup dle HAIL_PROB. Nenulové pravděpodobnosti výskytu nebezpečných krup (POSH) dosáhlo pět buněk ze šesti, obvykle však jen v jednom či dvou pětiminutových intervalech svého života a nejvyšší zaznamenaná hodnota tohoto parametru byla 40 %.

7. 2 Nebezpečné konvektivní buňky

Nebezpečné konvektivní jevy se obvykle vyskytují ve spojení se supercelami nebo multicelami. Především životní cyklus multicel má výrazněji nepředvídatelnější průběh než životní cyklus jednoduchých izolovaných buněk, jak také potvrzuje vývoj parametrů vybraných buněk, které byly po nějaký úsek doby detekce součástí multicely. Tento vývoj byl navíc v některých případech zdatelně ovlivněn štěpením a slučováním s jinými buňkami v rámci multicely.

V následujících částech této kapitoly jsou představeny (1) vybrané buňky s nebezpečnými konvektivními jevy a vývoj vybraných základních a bleskových parametrů těchto buněk po dobu jejich detekce. Dále pak je uveden (2) vývoj indexů výskytu krup resp. nebezpečných krup v buňkách a (3) srovnání některých vybraných parametrů mezi jednotlivými buňkami.

7. 2. 1 Vybrané nebezpečné konvektivní buňky

V této části jsou představeny vybrané konvektivní buňky v době výskytu nebezpečných jevů – vždy v radarovém produktu Z MAX spolu s dalším relevantním produktem radarových či bleskových dat.

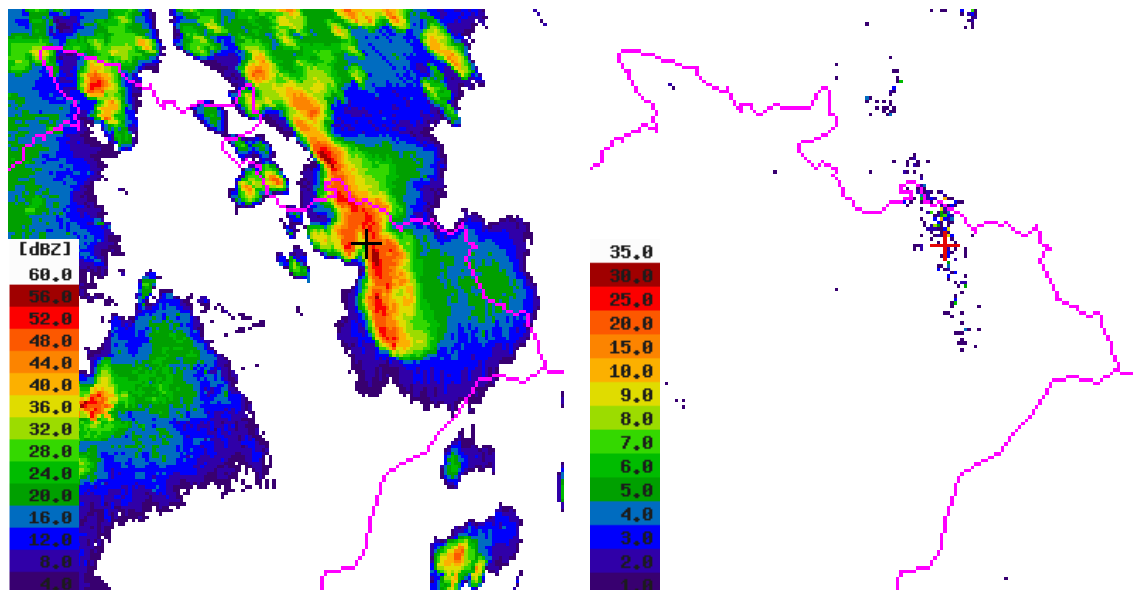
Pro každou vybranou buňku je po dobu její detekce zobrazen vývoj vybraných základních parametrů (AREA, VOL44, MAX_R a maxVIL). Hodnoty těchto parametrů se u jednoduchých buněk představených v kapitole 7. 1 pohybovaly do 80 km² (AREA), 500 km³ (VOL44), 60 dBZ (MAX_R) a 25 kg/m² (maxVIL). Parametry TOP a MAX_R_HEIGHT (odvozené z radarových dat) jsou uvedeny až v části 7. 2. 3, kde je provedeno srovnání jejich vývoje pro všechny vybrané nebezpečné buňky.

Pro každou vybranou buňku je dále představen celkový počet bleskových výbojů pro buňku a její okolí do vzdálenosti 35 km (u jednoduchých buněk nepřekročily tyto hodnoty úhrn 30 výbojů/5 min) a poměry (1) oblačných výbojů ku všem výbojům a (2) výbojů do země s pozitivní polaritou ku všem výbojům do země, vždy v pětiminutových intervalech. Jelikož u jednoduchých buněk byly detekovány pouze jednotky výbojů v měřených pětiminutových intervalech a pro část buněk nebyly zaznamenány žádné oblačné výboje ani výboje do země s pozitivní polaritou, tyto poměry pro ně nebyly zpracovány. Podíl výbojů do země s pozitivní polaritou tvoří

v konvektivních bouřích letního období tradičně jen 10 - 20 % celkového úhrnu výbojů do země (Rakov, Uman, 2003). Jejich vyšší podíl může naznačovat formování nebezpečných jevů jako jsou nebezpečně velké kroupy či tornádo – viz například Carey, Rutledge (1998). Podíl oblačných výbojů ku všem výbojům vyjadřuje rozdělení celkové bleskové aktivity mezi tyto dva základní typy výbojů u každé vybrané nebezpečné buňky a tyto údaje je možné porovnat s literaturou (viz Valachová, 2015).

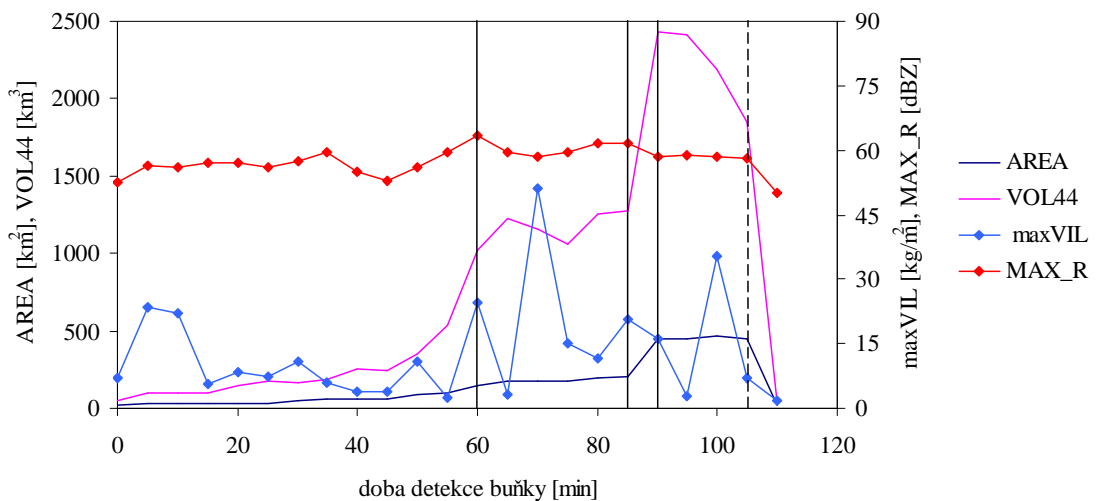
7. 2. 1. 1 Den 17. 7. 2010

V tomto dni byla v čase 16:05 - 17:55 UTC systémem CELLTRACK detekována buňka, která v pozdějších fázích životního cyklu generovala vysoký úhrn bleskových výbojů (nejvyšší úhrn byl > 300 výbojů/5min). Na obr. 7. 2 je tato buňka zobrazena v radarovém produktu Z MAX a produktu pětiminutového úhrnu všech výbojů, který je odvozený z dat detekce blesků. Buňka je zobrazena v době nejvyššího úhrnu všech výbojů během doby detekce. Graf 7. 9 zobrazuje základní parametry buňky odvozené z radarových dat po dobu detekce buňky, graf 7. 10 vybrané parametry odvozené z dat detekce blesků po dobu detekce buňky.

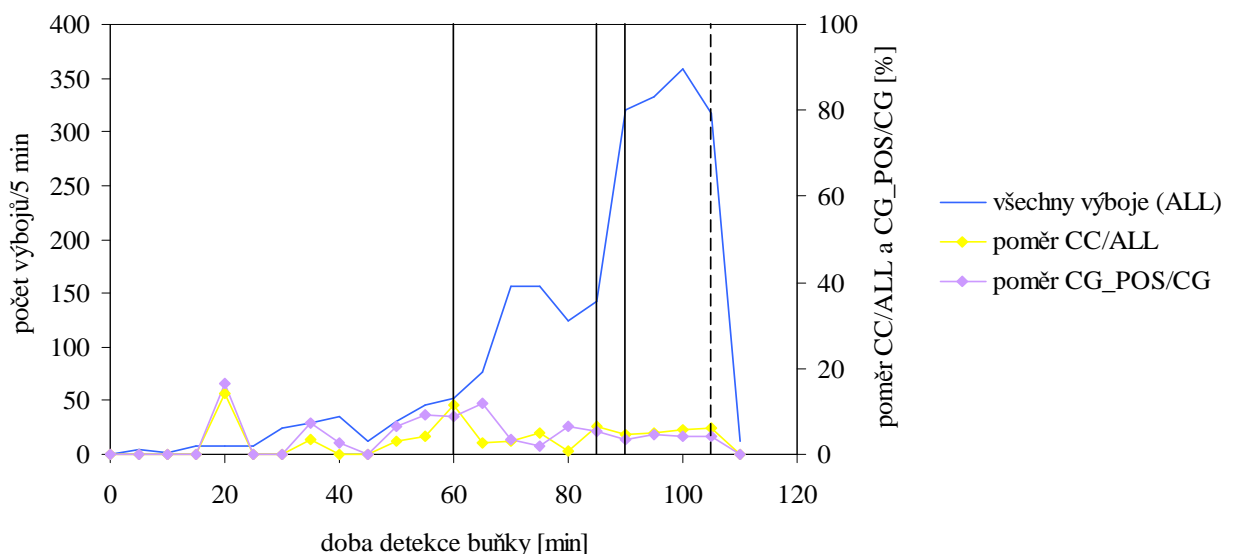


Obr. 7. 2: Data CZRAD (vlevo) a CEL5DN (vpravo), 17. 7. 2010, 17:45 UTC. Produkty Z MAX a pětiminutový úhrn všech bleskových výbojů. Nejvyšší úhrn výbojů (358) během doby detekce buňky. Těžiště buňky, která je součástí multicely, je vyznačeno černým (vlevo) a červeným (vpravo) křížem.

Graf 7. 9: Buňka ze dne 17. 7. 2010 po čas její detekce (16:05 - 17:55 UTC). Parametry plochy (AREA), objemu (VOL44), maximální odrazivosti (MAX_R) a vertikálně integrované radarové odrazivosti převedené na odhad obsahu kapalné vody (maxVIL). Jednotky parametrů maxVIL a MAX_R jsou zobrazeny na vedlejší ose y a odlišené značkami. Svislé *plné* linie označují slučování buněk, svislé *přerušované* linie označují štěpení buněk.

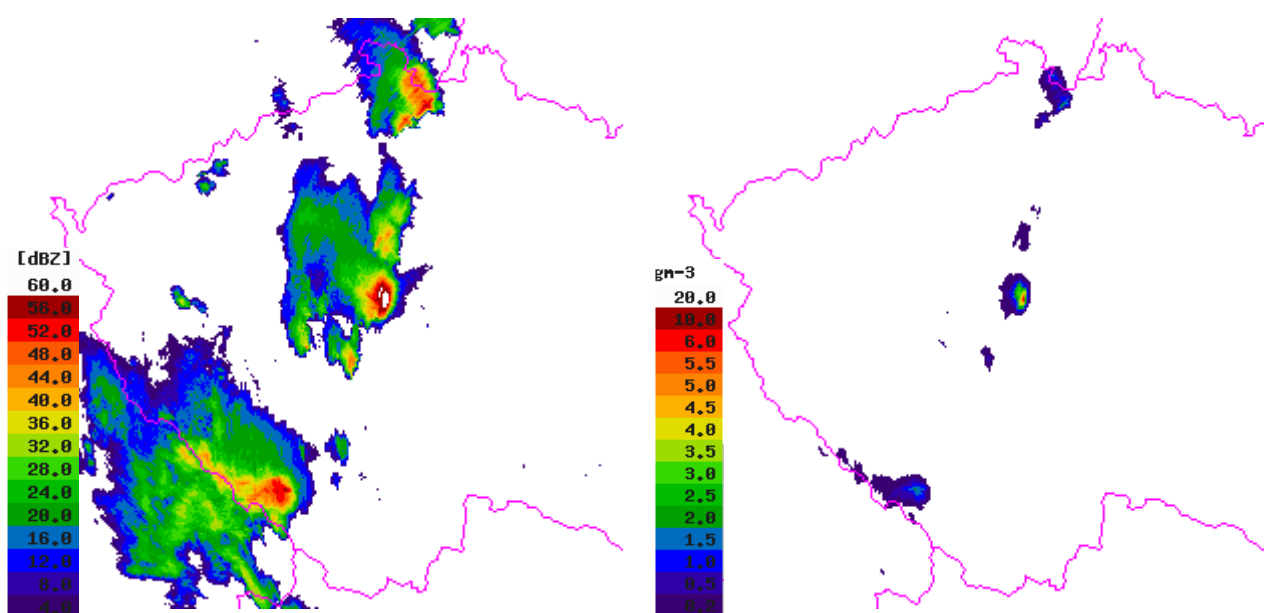


Graf 7. 10: Buňka ze dne 17. 7. 2010 po čas její detekce (16:05 - 17:55 UTC). Všechny bleskové výboje v buňce a jejím okolí do vzdálenosti 35 km. Na vedlejší ose y jsou zobrazeny a odlišeny značkami poměry oblačných výbojů (CC) ku všem výbojům (ALL) a pozitivních výbojů do země (CG_POS) ku všem výbojům do země (CG). Svislé *plné* linie označují slučování buněk, svislé *přerušované* linie označují štěpení buněk.



7. 2. 1. 2 Den 15. 8. 2010

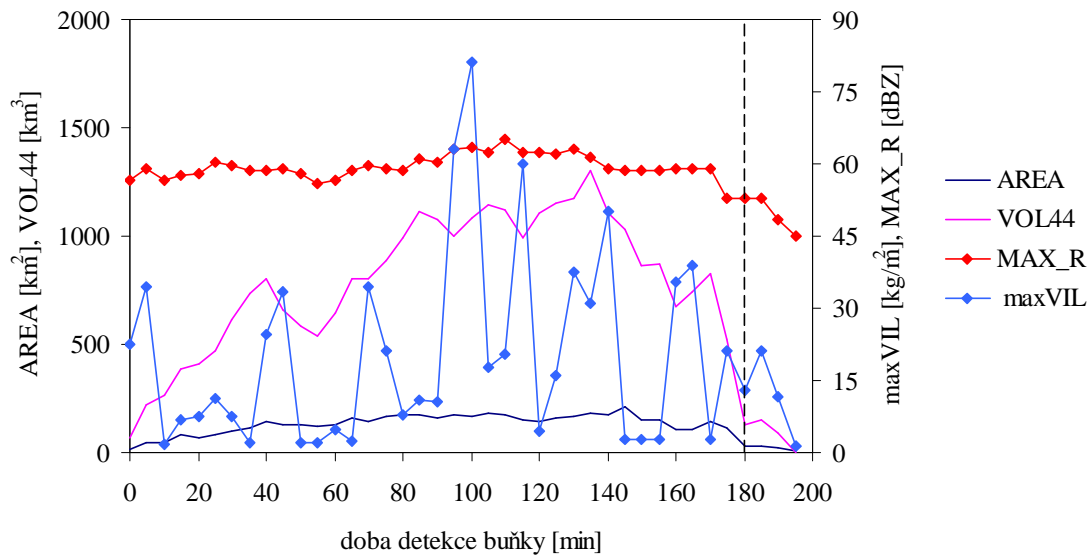
V tomto dni byla v čase 17:00 - 20:15 UTC systémem CELLTRACK detekována buňka, ze které přibližně ve druhé polovině životního cyklu vypadávaly nebezpečné kroupy o velikosti více než 30 mm (Skripniková, 2013). Na obr. 7. 3 je tato buňka zobrazena v radarových produktech Z MAX a VILD v době nejvyšší zaznamenané hodnoty parametru maxVILD. Graf 7. 11 zobrazuje základní parametry buňky odvozené z radarových dat po dobu detekce buňky, graf 7. 12 vybrané parametry odvozené z bleskových dat po dobu detekce buňky.



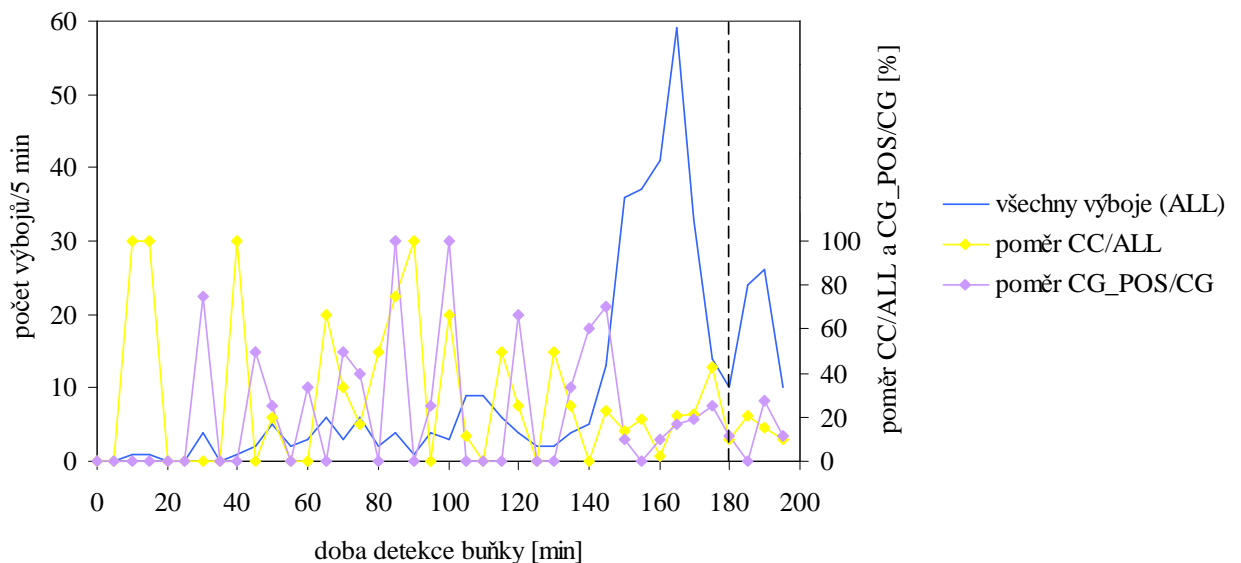
Obr. 7. 3: Data CZRAD, 15. 8. 2010, 18:50 UTC. Produkt Z MAX (vlevo) a VILD (vpravo).

Nejvyšší hodnota parametru maxVILD ($6,3 \text{ g/m}^3$) během doby detekce buňky. Buňka je zvýrazněna bílým jádrem odrazivosti 60 dBZ (vlevo) a jádrem hodnot 6 g/m^3 (vpravo).

Graf 7. 11: Buňka ze dne 15. 8. 2010 po čas její detekce (17:00 - 20:15 UTC). Parametry plochy (AREA), objemu (VOL44), maximální odrazivosti (MAX_R) a vertikálně integrované radarové odrazivosti převedené na odhad obsahu kapalné vody (maxVIL). Jednotky parametrů maxVIL a MAX_R jsou zobrazeny na vedlejší ose y a odlišené značkami. Svislá *přerušovaná* linie označuje štěpení buňky.

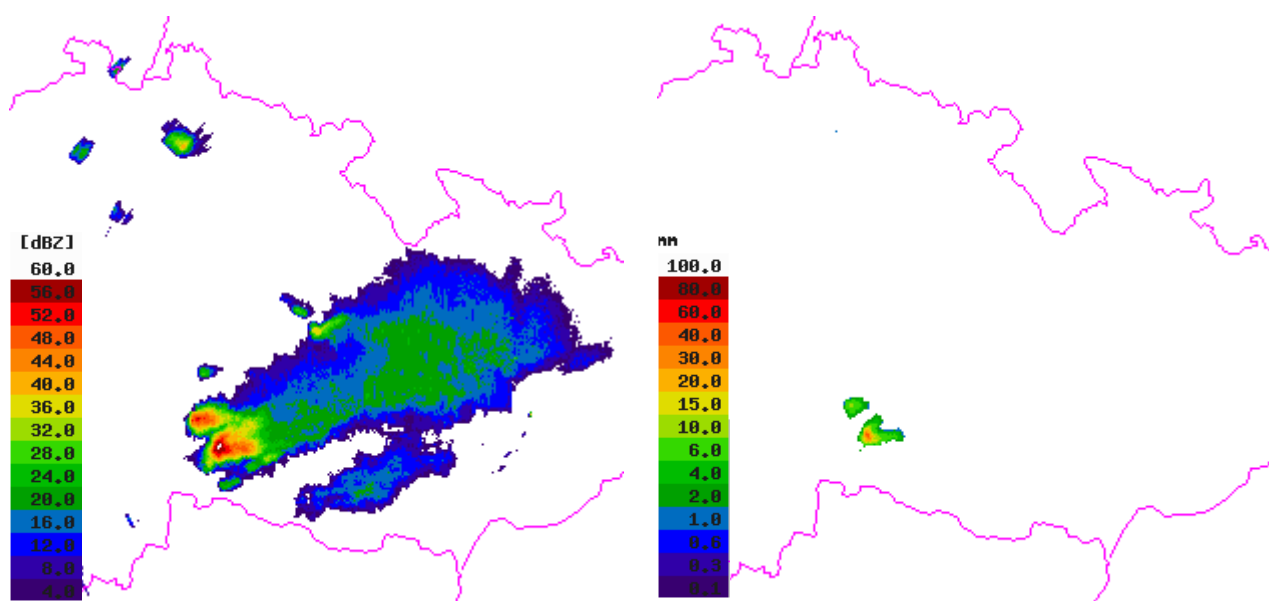


Graf 7. 12: Buňka ze dne 15. 8. 2010 po čas její detekce (17:00 - 20:15 UTC). Všechny bleskové výboje v buňce a jejím okolí do vzdálenosti 35 km. Na vedlejší ose y jsou zobrazeny a odlišeny značkami poměry oblačných výbojů (CC) ku všem výbojům (ALL) a pozitivních výbojů do země (CG_POS) ku všem výbojům do země (CG). Svislá *přerušovaná* linie označuje štěpení buňky.



7. 2. 1. 3 Den 24. 8. 2011

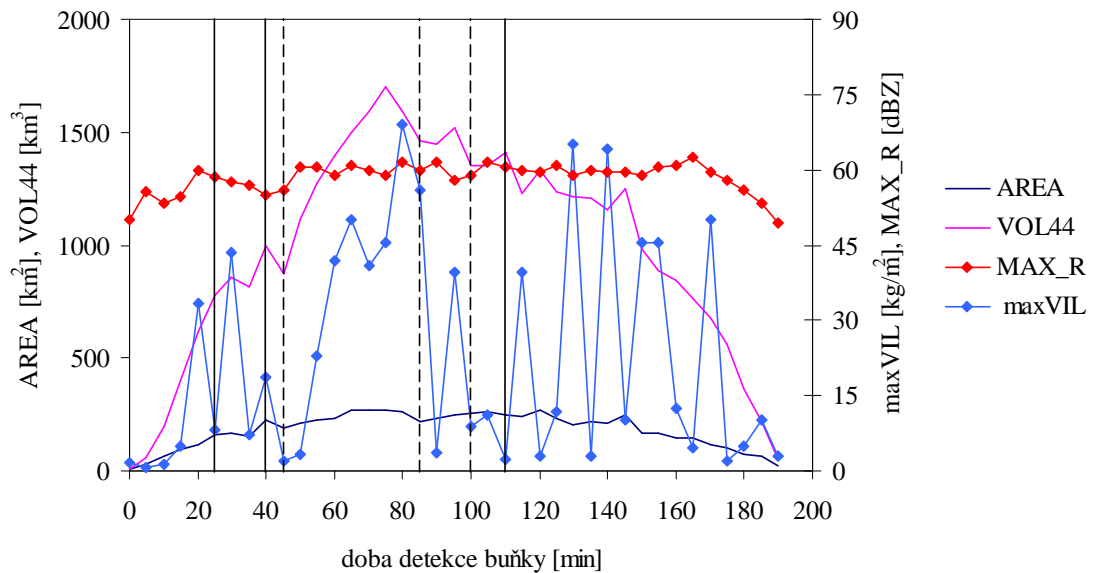
V tomto dni byla v čase 15:05 - 18:15 UTC systémem CELLTRACK detekována buňka, ze které přibližně ve druhé polovině životního cyklu vypadávaly nebezpečné kroupy o velikosti více než 40 mm (Skripniková, 2013). Na obr. 7. 4 je tato buňka zobrazena v radarových produktech Z MAX a MEHS v době nejvyšší zaznamenané hodnoty parametru maxVILD. Graf 7. 13 zobrazuje základní parametry odvozené z radarových dat po dobu detekce buňky, graf 7. 14 vybrané parametry odvozené z bleskových dat po dobu detekce buňky.



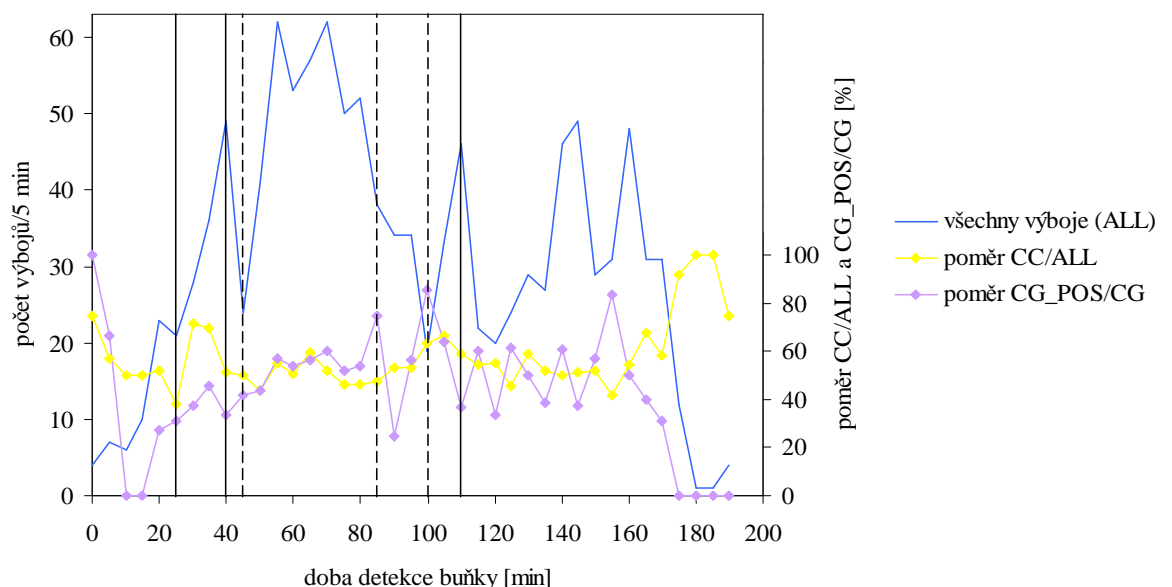
Obr. 7. 4: Data CZRAD, 24. 8. 2011, 17:50 UTC. Produkty Z MAX (vlevo) a MEHS (vpravo).

Nejvyšší hodnota parametru maxVILD ($4,5 \text{ g/m}^3$) a také nejvyšší hodnota parametru MEHS (43 mm) během doby detekce buňky. Buňka je zvýrazněna bílým jádrem odrazivosti 60 dBZ (vlevo) a jádrem hodnot 40 mm (vpravo).

Graf 7. 13: Buňka ze dne 24. 8. 2011 po čas její detekce (15:05 - 18:15 UTC). Parametry plochy (AREA), objemu (VOL44), maximální odrazivosti (MAX_R) a vertikálně integrované radarové odrazivosti převedené na odhad obsahu kapalné vody (maxVIL). Jednotky parametrů maxVIL a MAX_R jsou zobrazeny na vedlejší ose y a odlišené značkami. Svislé *plné* linie označují slučování buněk, svislé *přerušované* linie označují štěpení buněk.

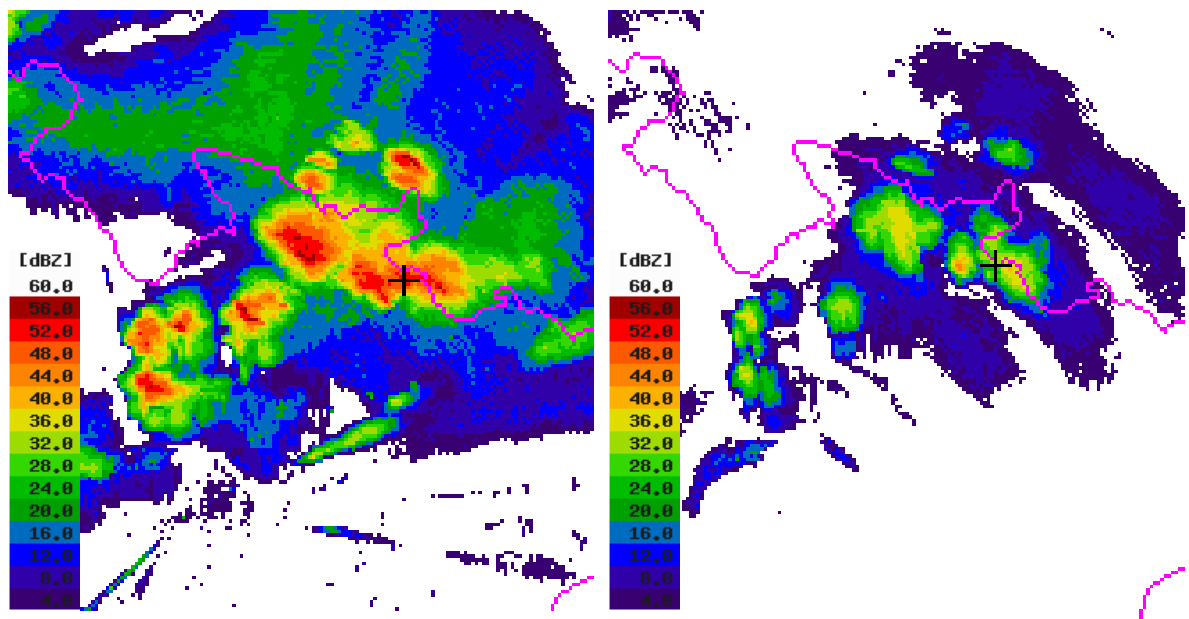


Graf 7. 14: Buňka ze dne 24. 8. 2011 po čas její detekce (15:05 - 18:15 UTC). Všechny bleskové výboje v buňce a jejím okolí do vzdálenosti 35 km. Na vedlejší ose y jsou zobrazeny a odlišeny značkami poměry oblačných výbojů (CC) ku všem výbojům (ALL) a pozitivních výbojů do země (CG_POS) ku všem výbojům do země (CG). Svislé *plné* linie označují slučování buněk, svislé *přerušované* linie označují štěpení buněk.



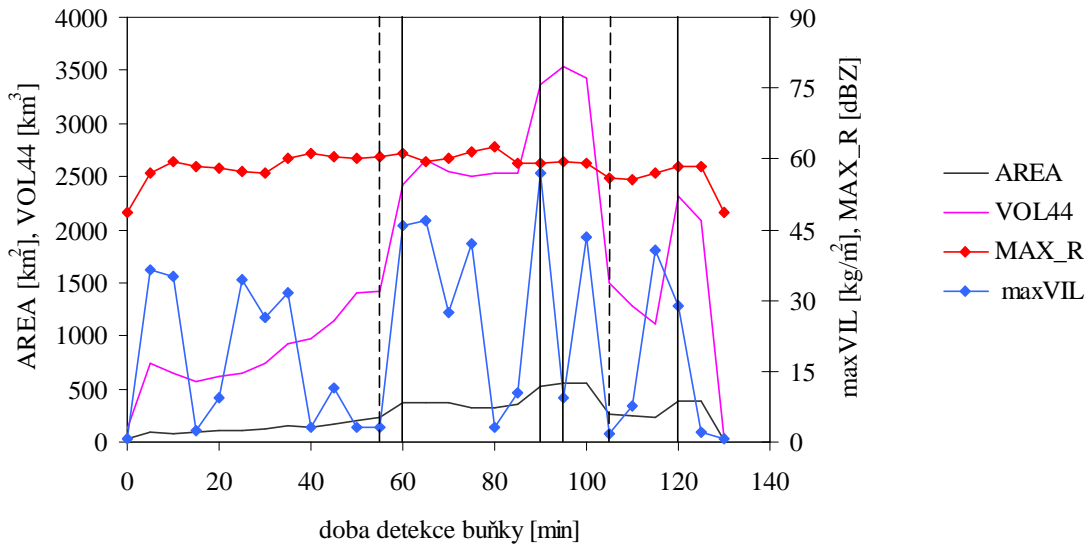
7. 2. 1. 4 Den 18. 6. 2013

V tomto dni byla v čase 13:55 - 16:05 UTC systémem CELLTRACK detekována buňka, s jejímž výskytem byl v pozdějších fázích jejího životního cyklu spojen výskyt tornáda. Na obr. 7. 5 je tato buňka zobrazena v radarovém produktu Z MAX a Z CAPPI 14 km přibližně v době výskytu tornáda (ESWD, 2016). Graf 7. 15 zobrazuje základní parametry buňky odvozené z radarových dat po dobu detekce buňky, graf 7. 16 vybrané parametry odvozené z bleskových dat po dobu detekce buňky.

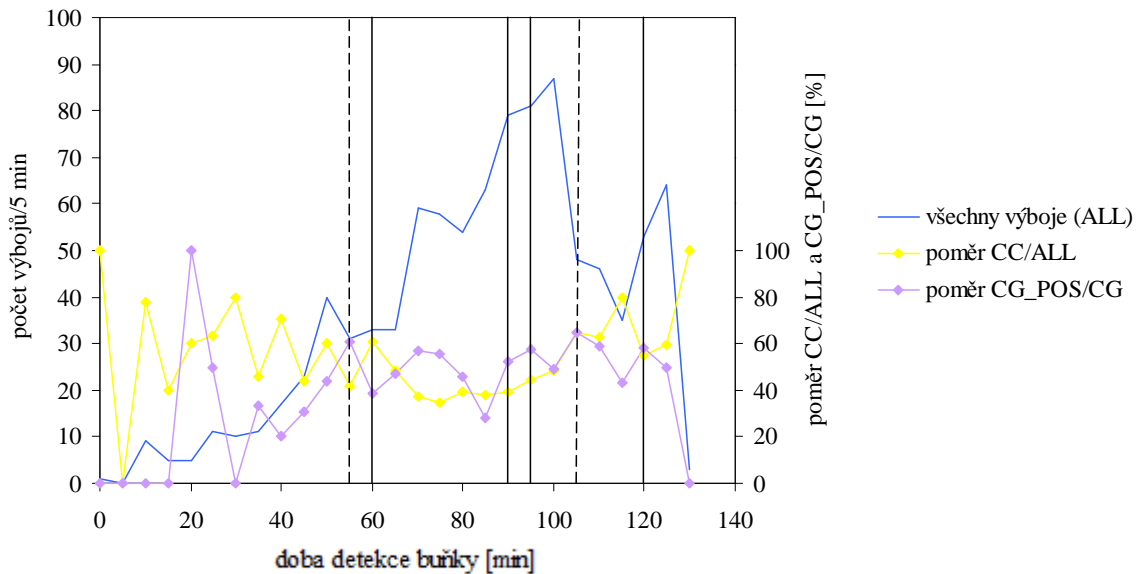


Obr. 7. 5: Data CZRAD, 18. 6. 2013, 15:40 UTC. Produkty Z MAX (vlevo) a Z CAPPI 14km (radarová odrazivost na hladině CAPPI ve 14 km) (vpravo). Přibližná doba výskytu tornáda (podle ESWD, 2016). Těžiště buňky, která je součástí multicely, je vyznačeno černým křížem.

Graf 7. 15: Buňka ze dne 18. 6. 2013 po čas její detekce (13:55 - 16:05 UTC). Parametry plochy (AREA), objemu (VOL44), maximální odrazivosti (MAX_R) a vertikálně integrované radarové odrazivosti převedené na odhad obsahu kapalné vody (maxVIL). Jednotky parametrů maxVIL a MAX_R jsou zobrazeny na vedlejší ose y a odlišené značkami. Svislé *plné* linie označují slučování buněk, svislé *přerušované* linie označují štěpení buněk.

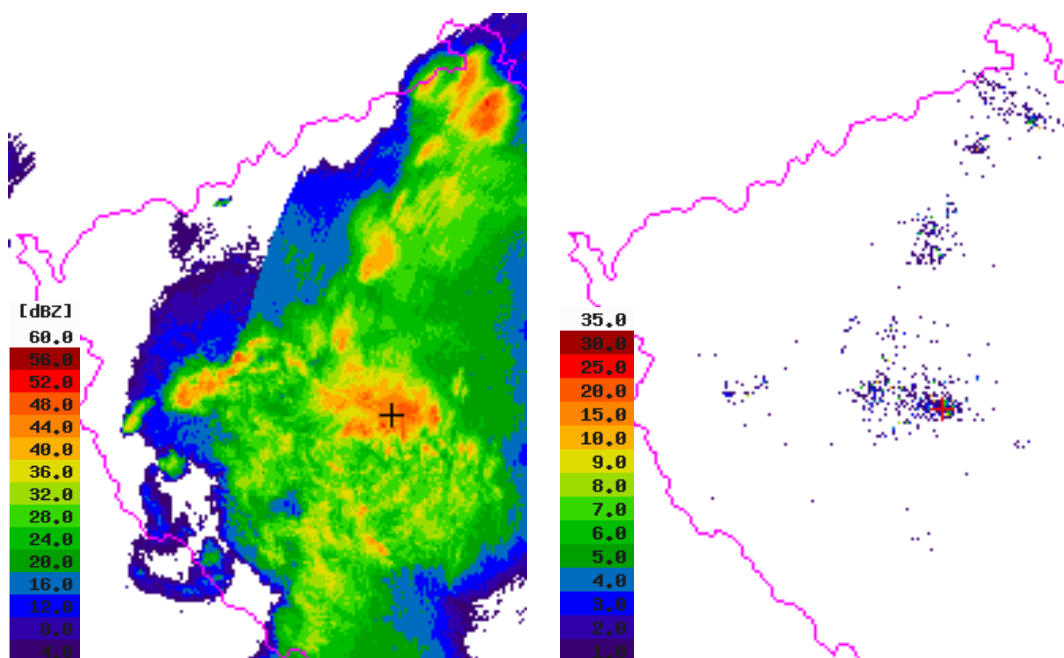


Graf 7. 16: Buňka ze dne 18. 6. 2013 po čas její detekce (13:55 - 16:05 UTC). Všechny bleskové výboje v buňce a jejím okolí do vzdálenosti 35 km. Na vedlejší ose y jsou zobrazeny a odlišeny značkami poměry oblačných výbojů (CC) ku všem výbojům (ALL) a pozitivních výbojů do země (CG_POS) ku všem výbojům do země (CG). Svislé *plné* linie označují slučování buněk, svislé *přerušované* linie označují štěpení buněk.



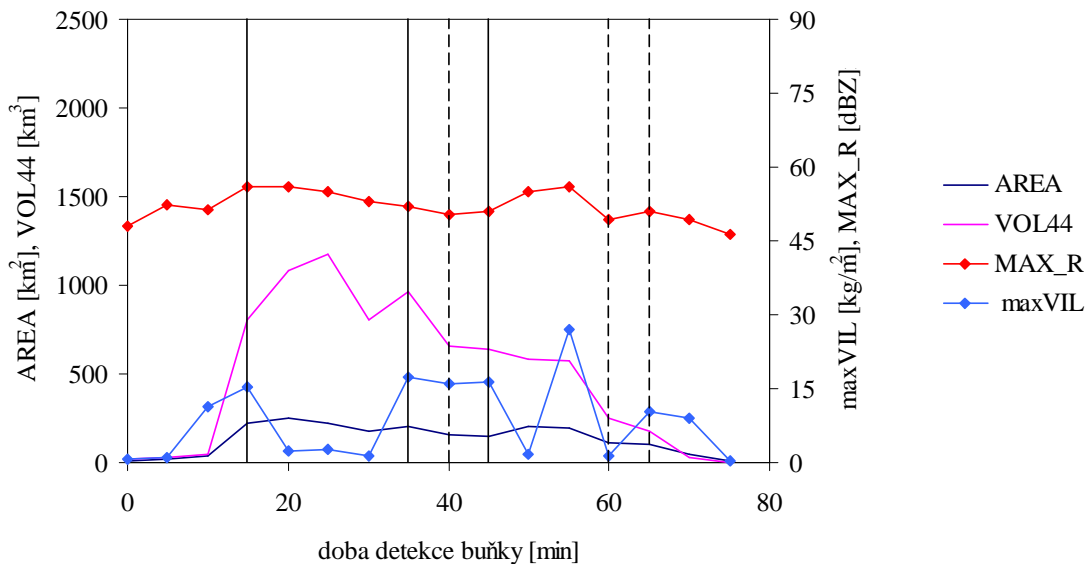
7. 2. 1. 5 Den 4. 8. 2013

V tomto dni byla v čase 00:30 - 01:45 UTC systémem CELLTRACK detekována buňka, která po velkou část svého životního cyklu generovala vysoký úhrn bleskových výbojů (nejvyšší úhrn byl > 500 výbojů/5min). Na obr. 7. 6 je tato buňka zobrazena v radarovém produktu Z MAX a produktu pětiminutového úhrnu všech výbojů, který je odvozený z dat detekce blesků. Buňka je zobrazena v době nejvyššího úhrnu výbojů do země a druhého nejvyššího úhrnu všech výbojů během doby detekce. Graf 7. 17 zobrazuje základní parametry buňky odvozené z radarových dat po dobu detekce buňky, graf 7. 18 vybrané parametry odvozené z dat detekce blesků po dobu detekce buňky.

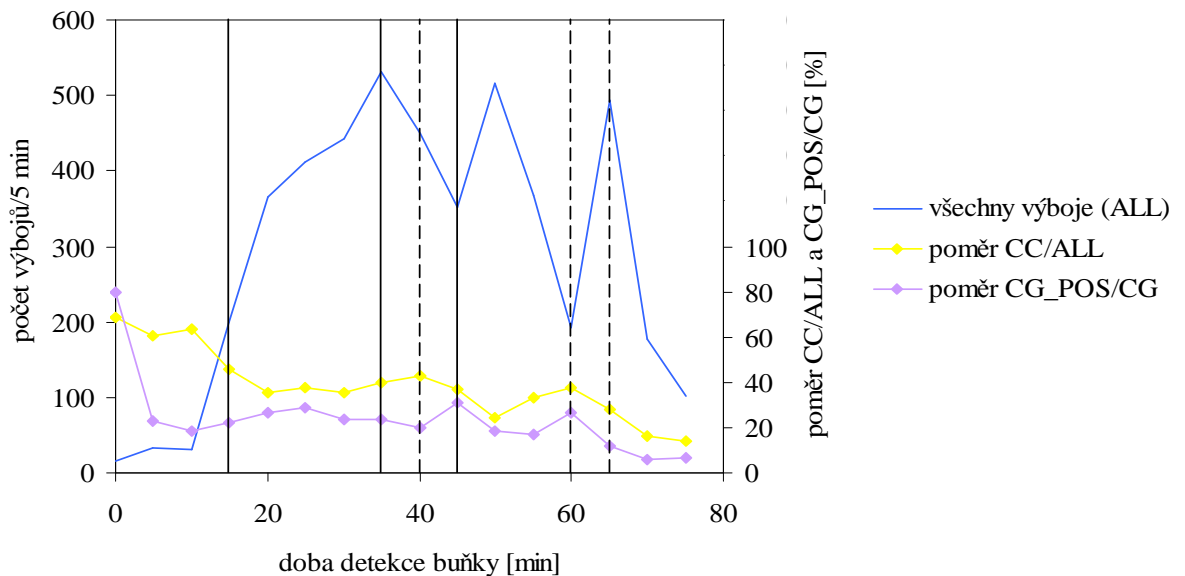


Obr. 7. 6: Data CZRAD (vlevo) a CELDN (vpravo), 4. 8. 2013, 01:20 UTC. Produkty Z MAX a pětiminutový úhrn všech výbojů. Nejvyšší úhrn výbojů do země (389) a druhý nejvyšší úhrn všech výbojů (516) během doby detekce buňky. Těžiště buňky, která je součástí multicely, je vyznačeno černým (vlevo) a červeným (vpravo) křížem.

Graf 7. 17: Buňka ze dne 4. 8. 2013 po čas její detekce (00:30 - 01:45 UTC). Parametry plochy (AREA), objemu (VOL44), maximální odrazivosti (MAX_R) a vertikálně integrované radarové odrazivosti převedené na odhad obsahu kapalné vody (maxVIL). Jednotky parametrů maxVIL a MAX_R jsou zobrazeny na vedlejší ose y a odlišené značkami. Svislé *plné* linie označují slučování buněk, svislé *přerušované* linie označují štěpení buněk.

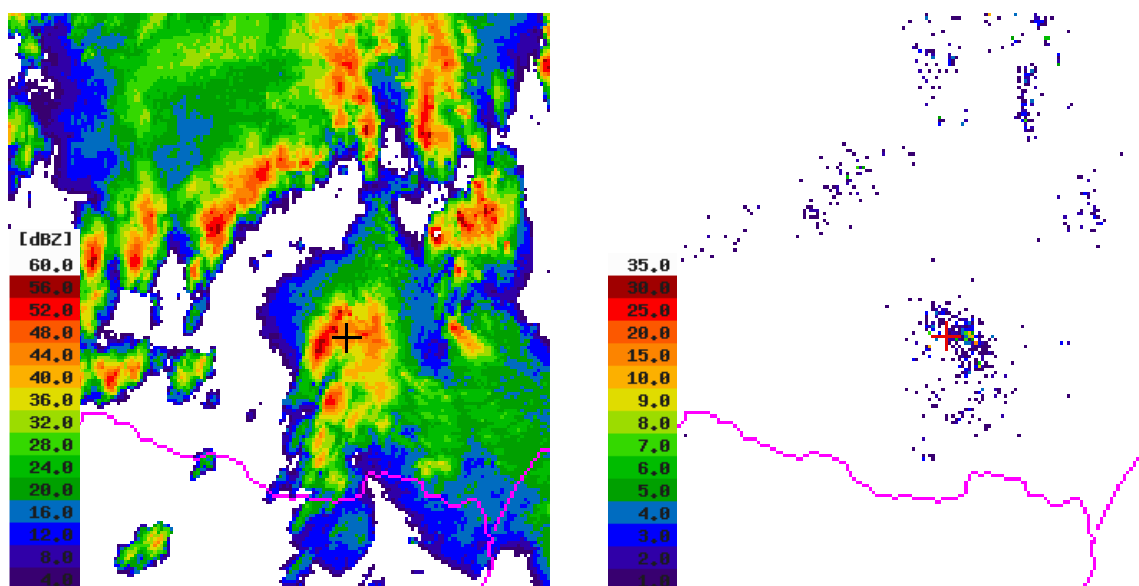


Graf 7. 18: Buňka ze dne 4. 8. 2013 po čas její detekce (00:30 - 01:45 UTC). Všechny bleskové výboje v buňce a jejím okolí do vzdálenosti 35 km. Na vedlejší ose y jsou zobrazeny a odlišeny značkami poměry obláčkových výbojů (CC) ku všem výbojům (ALL) a pozitivních výbojů do země (CG_POS) ku všem výbojům do země (CG). Svislé *plné* linie označují slučování buněk, svislé *přerušované* linie označují štěpení buněk.



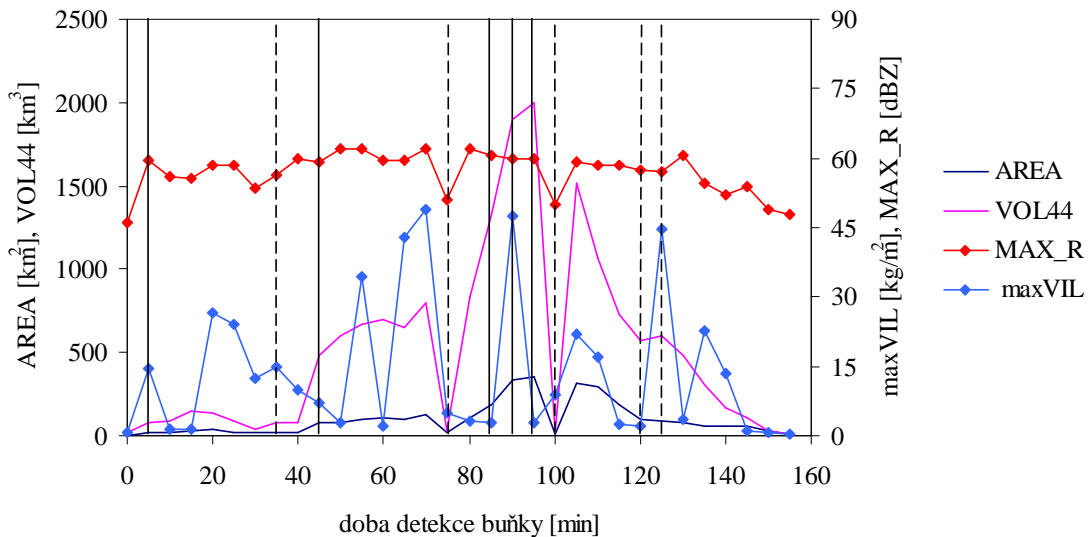
7. 2. 1. 6 Den 3. 8. 2014

V tomto dni byla v čase 11:40 - 14:15 UTC systémem CELLTRACK detekována buňka, která ve druhé polovině svého životního cyklu generovala vysoký úhrn bleskových výbojů (nejvyšší úhrn byl > 400 výbojů/5min). Na obr. 7. 7 je tato buňka zobrazena v radarovém produktu Z MAX a produktu pětiminutového úhrnu všech výbojů, který je odvozený z dat detekce blesků. Buňka je zobrazena v době nejvyššího úhrnu výbojů do země a druhého nejvyššího úhrnu všech výbojů během doby detekce. Graf 7. 19 zobrazuje základní parametry buňky odvozené z radarových dat po dobu detekce buňky, graf 7. 20 vybrané parametry odvozené z dat detekce blesků po dobu detekce buňky.

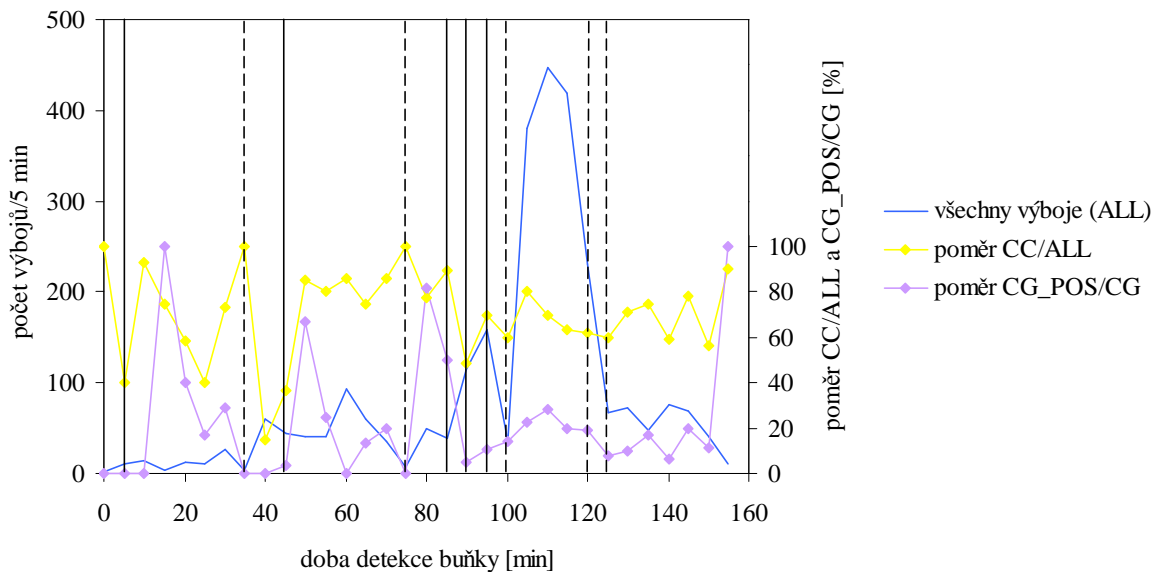


Obr. 7. 7: Data CZRAD (vlevo) a CELDN (vpravo), 3. 8. 2014, 13:35 UTC. Produkty Z MAX a pětiminutový úhrn všech výbojů. Nejvyšší úhrn výbojů do země (152) a druhý nejvyšší úhrn všech výbojů (419) během doby detekce buňky. Těžiště buňky, která je součástí multicely, je vyznačeno černým (vlevo) a červeným (vpravo) křížem.

Graf 7. 19: Buňka ze dne 3. 8. 2014 po čas její detekce (11:40 - 14:15 UTC). Parametry plochy (AREA), objemu (VOL44), maximální odrazivosti (MAX_R) a vertikálně integrované radarové odrazivosti převedené na odhad obsahu kapalné vody (maxVIL). Jednotky parametrů maxVIL a MAX_R jsou zobrazeny na vedlejší ose y a odlišené značkami. Svislé *plné* linie označují slučování buněk, svislé *přerušované* linie označují štěpení buněk.



Graf 7. 20: Buňka ze dne 3. 8. 2014 po čas její detekce (11:40 - 14:15 UTC). Všechny bleskové výboje v buňce a jejím okolí do vzdálenosti 35 km. Na vedlejší ose y jsou zobrazeny a odlišeny značkami poměry oblačných výbojů (CC) ku všem výbojům (ALL) a pozitivních výbojů do země (CG_POS) ku všem výbojům do země (CG). Svislé *plné* linie označují slučování buněk, svislé *přerušované* linie označují štěpení buněk.



7. 2. 2 Indexy výskytu krup

Jako indexy výskytu krup byly v této práci využity parametry maxVILD, maxHP (HAIL_PROB) a maxPOSH.

Produkt VILD (zde parametr maxVILD) se používá pro detekci nebezpečných krup pouze z radarových dat (váží vertikálně integrovanou odrazivost buňky převedenou na odhad kapalného obsahu výškou EchoTopu) (Amburn, Wolf, 1997). Z vybraných případů buněk s nebezpečnými kroupami se tyto hodnoty nejčastěji pohybovaly v rozmezí 2 - 6 g/m³ (pro den 15. 8. 2010) resp. 2 - 4 g/m³ (pro den 24. 8. 2011). U buněk bez nebezpečných krup tyto hodnoty ve většině nepřesahovaly hranici 4 g/m³, u jednoduchých konvektivních buněk z kapitoly 7. 1 nepřesahovaly tyto hodnoty hranici 3 g/m³.

Parametry maxPOSH a maxHP jsou udávány v procentech pravděpodobnosti výskytu obecných resp. nebezpečných krup. Z velikosti POSH lze usuzovat rovněž na předpokládanou velikost krup (MEHS – viz vzorce v kapitole 3. 1). Platí přibližně, že pokud je POSH vyšší než 30%, lze očekávat kroupy s průměrem okolo 2 cm, pokud je vyšší než 70%, pak kroupy s průměrem okolo 4 cm. Pro varování před potenciálně nebezpečnými kroupami se proto zdá vhodnější tento index. HP navíc detekuje/předpovídá výskyt všech (i velmi malých) krup, které nejsou nebezpečné, jeho hodnoty jsou tedy v podstatě pro všechny konvektivní buňky relativně vysoké (viz také graf 7. 6), pro obecně nebezpečné konvektivní bouře vybrané v této práci byla hodnota parametru maxHP po většinu života 100 %.

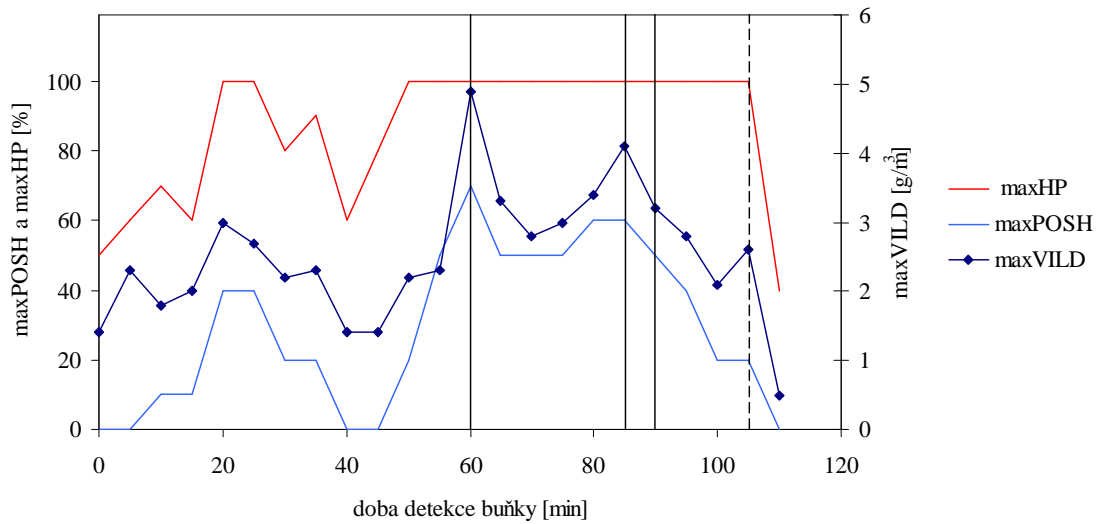
Tabulka 7. 2 poskytuje srovnání obou indexů výskytu krup mezi bouří, která prokazatelně generovala nebezpečné kroupy (ESWD, 2016) (Skripniková, 2013) dne 15. 8. 2010, bouří s hlášeným výskytem tornáda (ESWD, 2016), u které nebyl hlášen výskyt nebezpečných krup (ESWD, 2016) dne 18. 6. 2013 a bouří s vysokým úhrnem CG výbojů dne 4. 8. 2013.

Dále je pro každou vybranou nebezpečnou konvektivní buňku uveden graf, který poskytuje pohled na srovnání vývoje hodnot všech tří indexů výskytu krup po dobu její detekce.

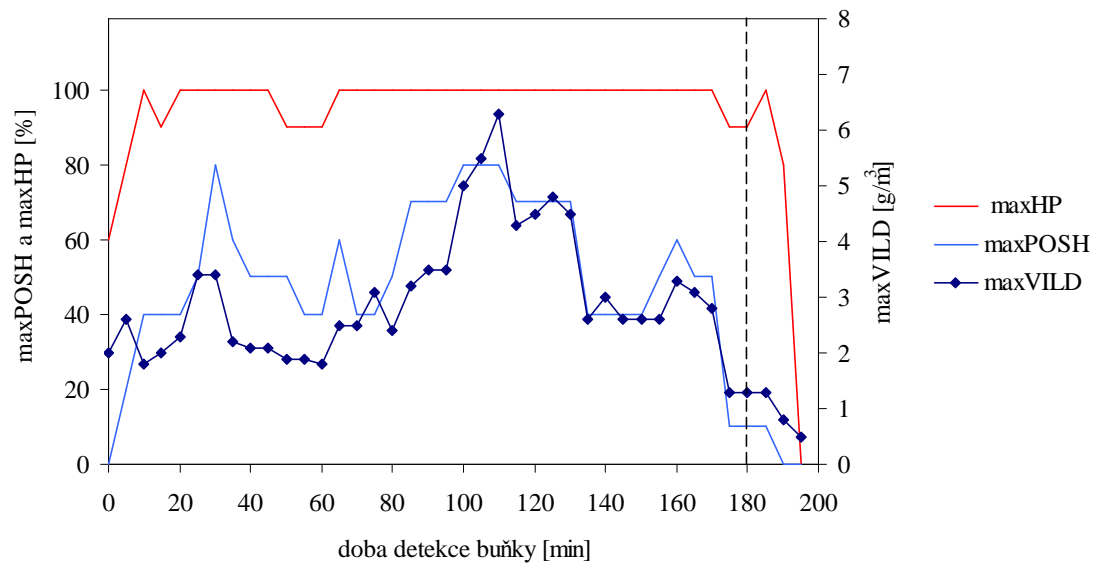
Tabulka 7. 2: Indexy výskytu krup u vybraných nebezpečných konvektivních buněk.

čas	maxHP	maxPOSH	maxHP	maxPOSH	maxHP	maxPOSH
	15.8.2010	15.8.2010	18.6.2013	18.6.2013	4.8.2013	4.8.2013
5	80	20	100	30	30	10
10	100	40	100	50	0	10
15	90	40	100	40	90	40
20	100	40	100	50	90	30
25	100	50	100	30	90	20
30	100	80	100	40	100	30
35	100	60	100	50	100	10
40	100	50	100	50	100	10
45	100	50	100	50	100	10
50	90	50	100	50	100	30
55	90	40	100	50	100	40
60	90	40	100	50	90	20
65	100	60	100	50	60	0
70	100	40	100	60	0	0
75	100	40	100	70	0	0
80	100	50	100	70		
85	100	70	100	50		
90	100	70	100	60		
95	100	70	100	50		
100	100	80	100	50		
105	100	80	100	40		
110	100	80	100	30		
115	100	70	100	50		
120	100	70	100	50		
125	100	70	100	40		
130	100	70	40	0		
135	100	40				
140	100	40				
145	100	40				
150	100	40				
155	100	50				
160	100	60				
165	100	50				
170	100	50				
175	90	10				
180	90	10				
185	100	10				
190	80	0				
195	0	0				

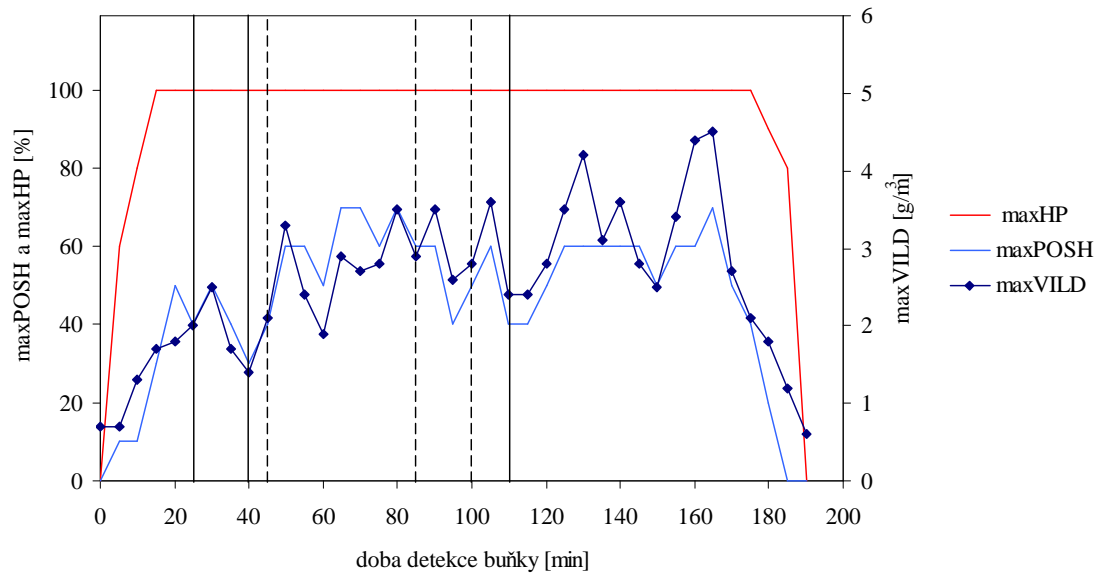
Graf 7. 21: Buňka ze dne 17. 7. 2010 po čas její detekce (16:05 - 17:55 UTC). Parametry maxVILD, maxHP a maxPOSH. Jednotky parametru maxVILD jsou zobrazeny na vedlejší ose y a odlišné značkami. Svislé *plné* linie označují slučování buněk, svislé *přerušované* linie označují štěpení buněk.



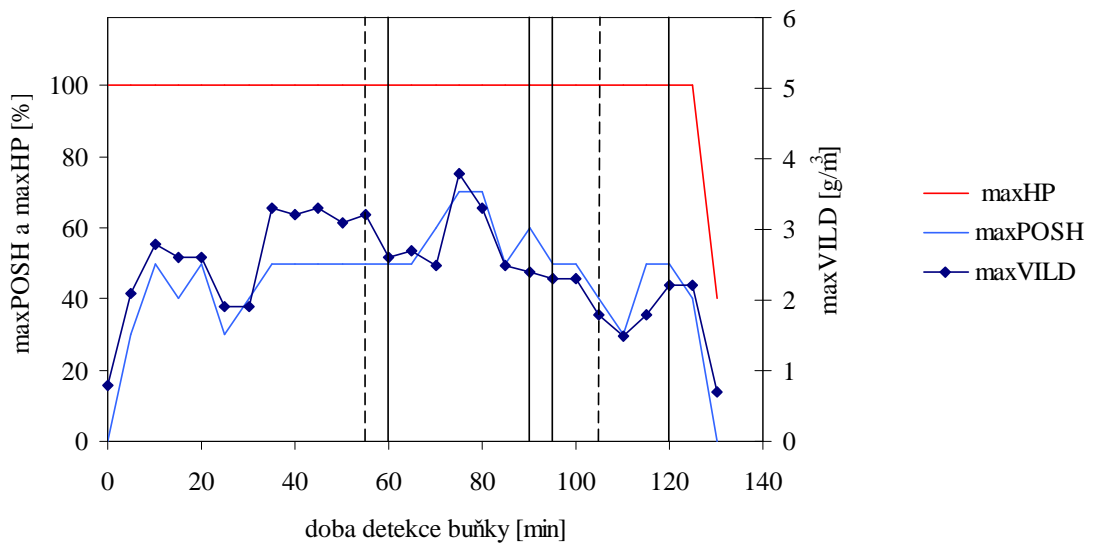
Graf 7. 22: Buňka ze dne 15. 8. 2010 po čas její detekce (17:00 - 20:15 UTC). Popis stejný jako u grafu 7. 21.



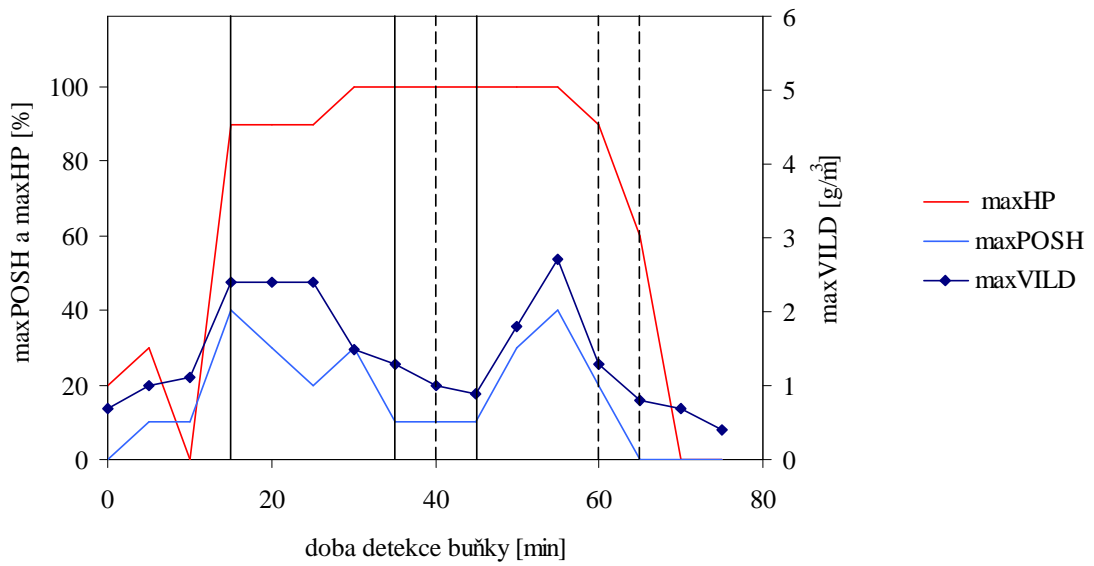
Graf 7. 23: Buňka ze dne 24. 8. 2011 po čas její detekce (15:05 - 18:15 UTC). Popis stejný jako u grafu 7. 21.



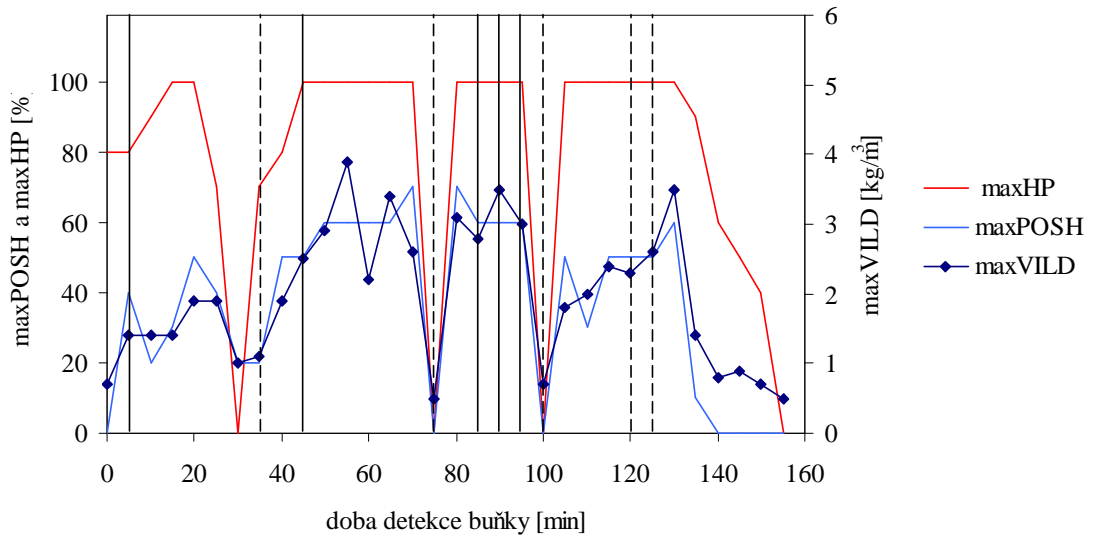
Graf 7. 24: Buňka ze dne 18. 6. 2013 po čas její detekce (13:55 - 16:05 UTC). Popis stejný jako u grafu 7. 21.



Graf 7. 25: Buňka ze dne 4. 8. 2013 po čas její detekce (00:30 - 01:45 UTC). Popis stejný jako u grafu 7. 21.



Graf 7. 26: Buňka ze dne 3. 8. 2014 po čas její detekce (11:40 - 14:15 UTC). Popis stejný jako u grafu 7. 21.



7. 2. 3 Srovnání vybraných parametrů mezi buňkami

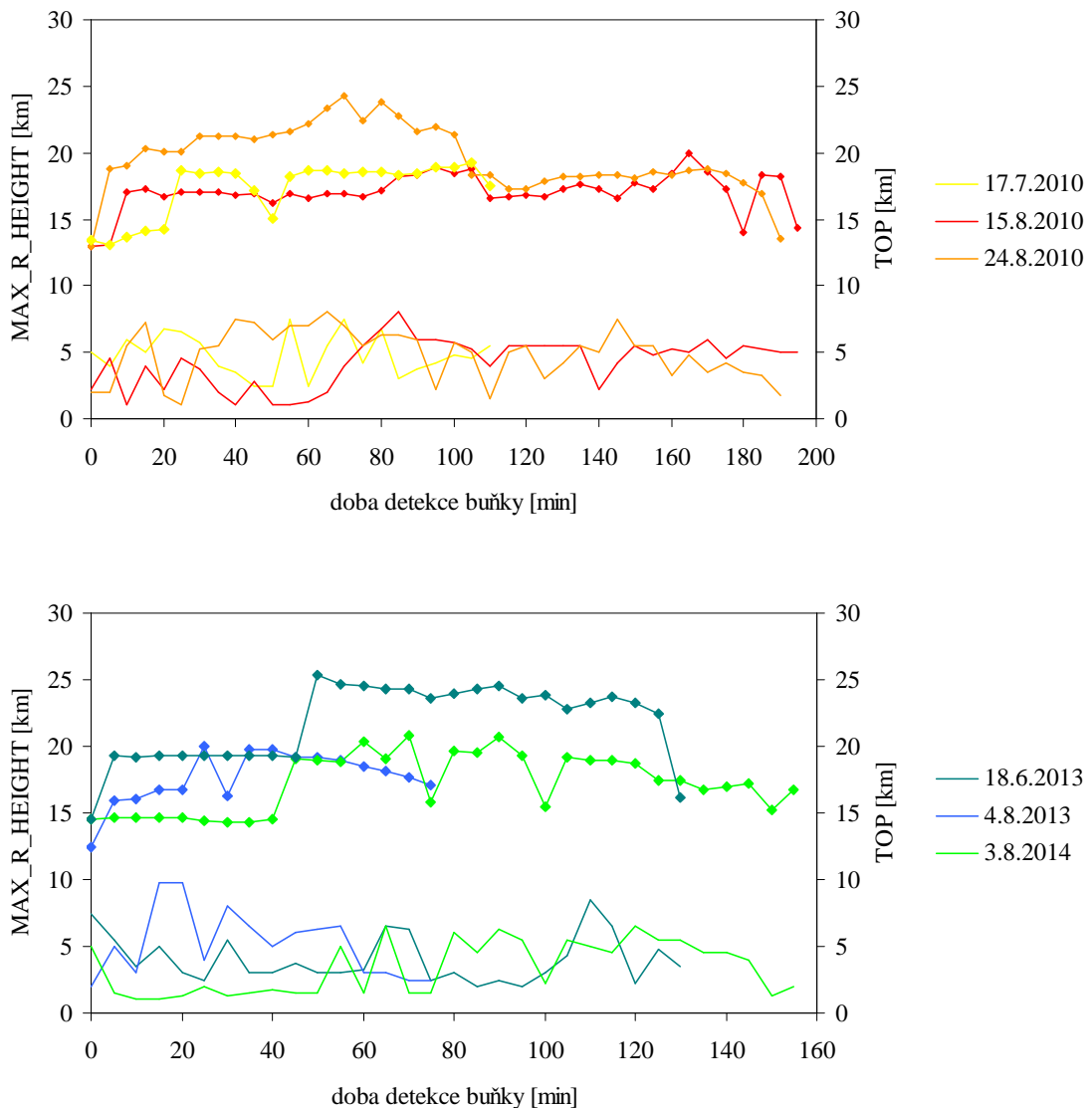
V této části je poskytnut pohled na srovnání některých vybraných parametrů mezi všemi nebezpečnými buňkami. Tyto parametry jsou výška EchoTopu v buňce (TOP), průměrná výška jádra nejvyšší odrazivosti v buňce (MAX_R_HEIGHT) a nejvyšší odrazivost v buňce (MAX_R), resp. její průměrné hodnoty během doby detekce buněk.

Hodnoty parametru TOP se ve čtyřech z šesti vybraných případů nebezpečných konvektivních buněk pohybovaly mezi 15 - 20 km, stejně jako jednoduché buňky z kapitoly 7. 1 se životním cyklem delším než 20 min. Pro dvě nebezpečné buňky přesahoval tento parametr výšku 20 km. Je nutné poznamenat, že měření výšky EchoTopu konvektivních bouří pomocí pozemních radarů může ve větší vzdálenosti od přístroje nadhodnocovat tento parametr z důvodu šířky jednotlivých radarových paprsků a vzdálenosti mezi nimi (viz obr. 5. 2). Podrobně je tato nejistota popsána Setvákem et al. (2010).

Výšky jádra nejvyšší odrazivosti (parametr MAX_R_HEIGHT) nabývaly u nebezpečných konvektivních buněk hodnot 1 - 10 km, u jednoduchých buněk přitom tato hodnota překročila hranici 5 km jen v případě té nejdéle žijící. Podobně jako u vybraných jednoduchých buněk nebyl ani u nebezpečných buněk zaznamenán nijak jasný pokles této hodnoty v pozdějších vývojových fázích buňky. Tento fakt, stejně jako u jednoduchých konvektivních buněk, pravděpodobně souvisí s omezením času detekce buněk jejich odrazivostí ≥ 44 dBZ a předpokládaný pokles v hodnotách parametru výšky jádra nejvyšší odrazivosti by se tedy nejspíš objevil, pokud by byly údaje o buňkách zaznamenávány až do úplného rozpadu buněčné struktury.

Průměrná maximální odrazivost v buňce (parametr MAX_R) pro vybrané nebezpečné buňky během doby jejich detekce je představena v tabulce 7. 3, spolu se srovnáním s těmito průměrnými hodnotami pro jednoduché konvektivní buňky bez nebezpečných jevů uvedených v kapitole 7. 1. V obou typech konvektivních bouří přesahuje průměrná hodnota tohoto parametru 50 dBZ, výrazněji vyšší je pro dlouho žijící supercely, které generovaly nebezpečné kroupy a pro buňku s výskytem tornáda.

Graf 7. 27: Průměrná výška jádra nejvyšší odrazivosti (MAX_R_HEIGHT), hlavní osa y (hladká linie). Výška EchoTopu – výška minimální odrazivosti 4 dBZ (TOP), vedlejší osa y (linie se značkami). Všechny vybrané nebezpečné buňky.



Tabulka 7. 3: Průměrná hodnota parametru MAX_R pro jednoduché i nebezpečné buňky.

jednoduché buňky		buňky s nebezpečnými jevy	
vybraná buňka	průměrná maximální odrazivost (dBZ)	vybraná buňka, nebezpečný jev	průměrná maximální odrazivost (dBZ)
17. 7. 2010	52,8	17. 7. 2010, bleskové výboje	57,5
13. 7. 2010	51,1	15. 8. 2010, kroupy	58,5
24. 8. 2011	54,4	24. 8. 2010, kroupy	58,4
3. 7. 2012	52,9	18. 6. 2013, tornádo	58,3
6. 7. 2012	52,9	4. 8. 2013, bleskové výboje	52,1
18. 6. 2013	53,6	3. 8. 2014, bleskové výboje	56,9

8 Diskuze a závěr

V této závěrečné kapitole jsou shrnuty výsledky práce a diskutovány související nejistoty a omezení.

Výběr jednoduchých konvektivních buněk ve dnech s výraznou konvektivní aktivitou byl omezen dvěma následujícími faktory. (1) Podmínku izolovanosti (bez štěpení či slučování jader) splňovalo jen velmi málo buněk, což souhlasí s Doswellem (2000), který uvádí, že instabilita atmosféry, jež dává vzniknout jedné konvektivní buňce dává téměř nezbytně vzniknout více konvektivním buňkám v jejím okolí. Rovněž (2) protože podobně jako podle Wilsona et al. (1998) trval životní cyklus jednoduchých buněk ve vybraných dnech z období 2010 - 2014 většinou okolo půl hodiny, doba detekce těchto buněk systémem CELLTRACK (doba, po kterou měla celá radarovou odrazivost ≥ 44 dBZ) byla ve větším množství případů pouze 10 - 20 min. To je kromě horní hranice tohoto intervalu (a tedy pěti pětiminutových intervalů, ve kterých byly systémem CELLTRACK zaznamenávány parametry buněk odvozené z radarových a bleskových dat) příliš krátká doba pro uspokojivé popsání vývoje parametrů konvektivní buňky. Tyto buňky však negenerovaly výrazně nebezpečné konvektivní jevy a doba detekce vybraných konvektivních buněk, které nebezpečné jevy generovaly, byla dostatečně dlouhá (75 - 195 min) aby bylo možné uspokojivě popsat vývoj parametrů během jejich životního cyklu.

Rozdělení procesů, kterými vybrané nebezpečné buňky procházely, pouze na štěpení a slučování bylo zatíženo ztrátou informace o jejich rozsahu. Ten je pravděpodobně možné odvodit ze změn objemu (VOL44) nebo plochy (AREA) buňky. Rozsah štěpení a slučování u vybraných buněk vyjadřoval rovněž znatelný rozdíl mezi supercelami (které byly u vybraných buněk s nebezpečnými jevy spojeny s výskytem nebezpečných krup) a multicelami či MCS (s nimiž byly spojeny nejvyšší úhrny bleskových výbojů ve studovaném období a rovněž výskyt tornáda). V případě supercel lze mluvit o připojování a odštěpování buněk, jelikož plocha resp. objem obou se pohyboval jen v prvních desítkách procent plochy resp. objemu supercely. V případě multicel se zcela hodí v této práci používaný výraz štěpení a slučování buněk, jelikož

plocha resp. objem buněk ovlivňujících těmito procesy buňku původní dosahoval u vybraných případů až 100 %.

Parametry AREA a VOL44 se u vybraných nebezpečných konvektivních buněk na vrcholu jejich životního cyklu pohybovaly v hodnotách od 100 km² do 600 km² resp. od 500 km³ do 3500 km³. Tyto intervaly jsou velmi široké a jak bylo řečeno, hodnoty těchto dvou parametrů jsou často výrazněji ovlivňovány procesy štěpení a slučování buněk, na základě studovaných případů tedy není jasná hranice, která by ukazovala na nebezpečné konvektivní buňky.

V hodnotách maximální odrazivosti v buňce (MAX_R) tvoří hranici pro identifikaci nebezpečných konvektivních buněk tradičně odrazivost 55 - 60 dBZ, jedná se však především o varování před nebezpečím krup či přivalovými srážkami, což bylo potvrzeno i u případů vybraných v této studii. U vybraných buněk s jinými nebezpečnými jevy (vysoký úhrn bleskových výbojů, výskyt tornáda) se maximální odrazivost v buňce pohybovala v nižších hodnotách.

Hodnoty parametru maxVIL se u bouří generujících nebezpečné kroupy pohybovaly nad 45 kg/m², jednoduché konvektivní buňky ve většině nepřesahovaly hodnotu 20 resp. 25 kg/m². Lze tedy předpokládat limitní hodnotu okolo 30 kg/m², některé studované konvektivní buňky, které generovaly vysoký úhrn bleskových výbojů však tuto hodnotu po většinu doby detekce nepřesahovaly.

Parametr maxVILD jako ukazatel výskytu nebezpečných krup se osvědčil v případě ze dne 15. 8. 2010, kdy dosahoval v delším časovém úseku hodnot > 3,5 g/m³, což je podle Amburna a Wolfa (1997) mez pro výskyt krup s průměrem > 2 cm. I druhá vybraná buňka ze dne 24. 8. 2011 vytvářela kroupy s průměrem až 4 cm, její hodnoty parametru maxVILD však tuto skutečnost neodhalily a byly srovnatelné s buňkami, které nebezpečné kroupy negenerovaly (na základě ESWD, 2016 a radarového produktu ZMAX). Ze všech indexů výskytu krup lze pro detekci nebezpečných krup označit produkt HAIL_PROB za nevyhovující, jelikož počítá s výskytem jakkoliv velkých krup a jeho hodnoty se pro všechny konvektivní buňky včetně těch jednoduchých pohybovaly ve vysokých číslech, pro všechny nebezpečné konvektivní buňky téměř po celou dobu života na 100 % pravděpodobnosti. Hodnota POSH by mohla sloužit k vytváření výstrah před nebezpečnými kroupami, na vybraných případech nebezpečných konvektivních buněk však nebyla pozorována zcela jasná hranice v hodnotách mezi buňkami, které skutečně produkovaly nebezpečné kroupy a těmi,

kteře tyto neprodukovaly (hodnoty 70 % POSH, kteřá odpovída očekávatelným přibližně 4 cm velkým kroupám se vyskytly i v životním cyklu bouře s tornádem a dvou ze tří bouří s vysokým úhrnem bleskových výbojů).

Vybrané konvektivní buňky s nebezpečnými jevy vykazovaly jakousi výlučnost, co se týče typu nebezpečí – buňky s výskytem nebezpečných krup neprodukovaly nijak významný úhrn bleskových výbojů, buňky s vysokým úhrnem bleskových výbojů neprodukovaly nebezpečné kroupy, buňka produkující tornádo nevytvářela ani vysoké úhrny blesků ani nebezpečné kroupy (na základě ESWD, 2016 a radarového produktu Z MAX). Nelze se však spoléhat na to, že tuto výlučnost budou dodržovat všechny nebezpečné konvektivní buňky, které se nad naším územím vyskytnou.

Konvektivní buňky, kterým byla systémem CELLTRACK přiřazena silná blesková aktivita (alespoň 300 výbojů zaznamenaných v některém z pětiminutových intervalů jejich života), byly ve všech vybraných i četných dalších studovaných případech součástí multicely či MCS. V těchto systémech byly tyto buňky neustále ovlivňovány procesy slučování, štěpení a opětovného slučování buněk a vývoj jejich parametrů po dobu detekce byl proto značně nesouvislý. Další nejistotu pro buňky se silnou bleskovou aktivitou představuje přiřazování úhrnu bleskových výbojů těmto buňkám a jejich okolí do vzdálenosti 35 km. V rámci multitel je toto okolí (a s ním zaznamenané bleskové výboje) geometricky rozdělováno mezi blízké buňky a vývoj hodnoty tohoto parametru může být tímto způsobem u buněk, které se během doby svého života stanou součástí multicely, ovlivněn.

Poměr pozitivních výbojů do země ku všem výbojů do země má podle literatury i vybraných nebezpečných konvektivních buněk potenciál upozornit na nebezpečné konvektivní jevy (vyjma nebezpečného úhrnu bleskových výbojů). Na základě studovaných případů by limitní hodnotu mohla tvořit hranice 40 % podílu výbojů do země s pozitivní polaritou na celkovém počtu výbojů do země.

Z parametrů buněk byly studovány jen ty získávané z radarových dat a některé z dat detekce blesků – např. co se týče nebezpečnosti bleskových výbojů, je tato práce zaměřena pouze na úhrny těchto výbojů a jejich polaritu, nikoliv velikost elektrického proudu, který jimi procházel. Ta je však jistě dobrým námětem na další výzkum, jelikož maximum elektrického proudu podle literatury patří výbojům do země s pozitivní polaritou (Rakov, Uman, 2003) (Novák, Kyznarová, 2011) a vzhledem k jejich čtenějšímu výskytu v buňkách produkujících nebezpečné kroupy a tornádo je tedy

možné, že z tohoto hlediska bleskové aktivity představují tyto buňky rovněž nebezpečí. Dalším způsobem sledování vývoje konvektivních bouří, který nebyl v této práci využit a kterému se mimo jiné věnuje ve své práci Valachová (2015) je analýza družicových dat, která poskytují informace o vývoji bouří, které radarová data neukazují (např. teplotu HHO nebo výskyt přestřelujících vrcholů).

Přestože vybrané studované případy představují jednoduché konvektivní buňky z různých období v letech 2010 - 2014 a vybrané buňky s nebezpečnými jevy v těchto letech zastupují případy s nebezpečně velkými kroupami, vysokými úhrny bleskových výbojů a u nás neobvyklým výskytem tornáda, jedná jen o velice malý počet případů a poznatky z této studie tak pouze naznačují, jaké parametry konvektivních buněk u nás mohou ukazovat na jejich nebezpečnost resp. typ nebezpečí. Pro optimální nastavení prahových hodnot parametrů pro identifikaci nebezpečných konvektivních buněk je zapotřebí vzít v úvahu další případové studie a tyto a další odhady poté ověřit v experimentálním provozu.

Literatura

AMBURN, S., A., WOLF, P., L. (1997): *VIL Density as a Hail Indicator*. Weather and Forecasting 12, s. 473 - 478.

Atlas podnebí Česka (2007). Praha, Olomouc: ČHMÚ, Univerzita Palackého v Olomouci. 206 s. ISBN 978-80-86690-26-1 a ISBN 978-80-244-1626-7.

BYERS, H. R., BRAHAM, R. R. (1948): *Thunderstorm structure and circulation*. Journal of Meteorology, Vol. 5, No. 3, s. 71 - 86.

CAREY, L. D., RUTLEDGE, S. A. (1998): *Electrical and multiparameter radar observations of a severe hailstorm*. Journal of Geophysical Research, Vol. 103, Issue D12, s. 13979 - 14000.

DIXON, M., WIENER, G. (1993): *TITAN – Thunderstorm Identification, Tracking, Analysis and Nowcasting*. Journal of Atmospheric and Oceanographic Technology, Vol. 10, No. 6, s. 785 - 797.

DOSWELL, CH. A. (2000): *Severe Convective Storms – An Overview. Chapter 1 in Severe Convective Storms, A Meteorological Monograph* [online]. URL: <<http://www.cimms.ou.edu/~doswell/Monograph/Overview.html>>

HANDWERKER, J. (2002): *Cell tracking with TRACE3D – a new algorithm*. Atmospheric Research 61. s. 15 - 34.

JOHNSON, J. T., MACKEN, P. L., WITT, A., DE WAYNE MITCHELL, E., STUMPF, G. J., EILTS, M. D., THOMAS, K. W (1998): *The Storm Cell Identification and Tracking Algorithm: An Enhanced WSR-88D Algorithm*. Weather and Forecasting, Vol. 13, s. 263 - 276.

KERKMANN, J., ROESLI, H., BRIDGE, G., KÖNIG, M. (2008): *Applications of Meteosat Second Generation (MSG). RGB Composites with channels 01-11 and Their Interpretation (.ppt)*.

KOSKINEN et al. (2011): *The Helsinki Testbed: A Mesoscale Measurement, Research and Service Platform*. Bulletin of American Meteorological Society 32, s. 325 - 342.

KUMA, Peter: *Visualising Data from CloudSat and CALIPSO Satellites*. Bratislava, 2010. Bachelor's Thesis. Comenius University, Faculty of Mathematics, Physics and Informatics, Division of Meteorology and Climatology. Mentor: Mgr. Ivan Bašták Ďurán, Ph.D., 79 s.

KYZNAROVÁ, Hana: *Životní cyklus konvektivních bouřkových buněk z pohledu distančního pozorování*. Praha, 2009. Doktorská práce. Univerzita Karlova, Matematicko-fyzikální fakulta, Katedra meteorologie a ochrany prostředí. Vedoucí disertační práce RNDr. Martin Setvák, CSc., 112 s.

KYZNAROVÁ, Hana, NOVÁK, Petr (2009): *CELLTRACK – Convective cell tracking algorithm and its use for deriving life cycle characteristics*. Atmospheric Research 93, s. 317 - 327.

LAI, E. S. T. (2005): *Advances in Nowcasting*. CBS Technical Conference on Public Weather Services, St Petersburg, Russian Federation, 21 - 22 February.

LEONIBUS et al. (2007): *Final report for: Study on the Present Status and Future Capabilities of Ground-Based Lightning Location Systems* [online].

URL: <http://www.eumetsat.int/groups/pps/documents/document/pdf_mtg_rep32.pdf>

LI, L., SCHMID, W., JOSS, J. (1993): *Nowcasting of Motion and Growth of Precipitation with Radar over a Complex Orography*. Journal of Applied Meteorology, Vol. 34, p. 1286 - 1300.

LOJOU, Jean-Yves, MURPHY, Martin J., HOLLE, Ronald L., DEMETRIADAS, Nicolas W. S. (2009): *Nowcasting of thunderstorms using VHF measurements*. In BETZ, Hans Dieter, SCHUMANN, Ulrich, LAROCHE Pierre.: *Lightning: Principles, Instruments and Application: Review of Modern Lightning Research*. Springer. 641 s. ISBN 9781402090790

MacGORMAN, Donald, RUST, David (1998): *The electrical nature of storms*. Oxford University Press. 422 s. ISBN 0-19-507337-1

MASS, Clifford (2011): *Nowcasting: The Promise of New Technologies of Communication, Modelling and Observation*. Bulletin of the American Meteorological Society [online]. URL: <<http://www.atmos.washington.edu/cliff/NewFInal010912.pdf>>

MUELLER, C., SAXEN, T., ROBERTS, R., WILSON, J., BETANCOURT, T., DETTLING, S., OIEN, N., YEE, J. (2003): *NCAR Auto-Nowcast System*. Weather and Forecasting, Vol. 18, p. 545 - 561.

NOVÁK, Petr (2007): *Czech Hydrometeorological Institute's severe storm nowcasting system*. Atmospheric Research 83, s. 450 - 457.

NOVÁK, Petr (2012): *Porovnání dat ze sítí detekce blesků CELDN a LINET na území České republiky během konvekční sezóny 2010*. Meteorologické zprávy, ročník 65, č. 6, s. 161 - 167.

NOVÁK, Petr (2015): *Základy radarových měření (.ppt)*. Přednáška předmětu NMET073 – Distanční pozorování a detekční metody v meteorologii, MFF Univerzity Karlovy.

NOVÁK, Petr, KYZNAROVÁ, Hana (2011): *Climatology of Lightning in the Czech Republic*. Atmospheric Research 100, s. 318 - 333.

NOVÁK, Petr, KYZNAROVÁ, Hana (2013): *Využití radarových měření pro kvantitativní odhady a nowcasting srážek v Českém hydrometeorologickém ústavu*. Meteorologické zprávy 66, s. 175 - 180.

NOVÁK, Petr, KYZNAROVÁ, Hana (2016): *Obnova meteorologické radarové sítě CZRAD v roce 2015*. Meteorologické zprávy 69.

PIERCE, C., HARDAKER, P. J., COLLIER, C. G., HAGGETT, C. M. (2000): *GANDOLF: a system for generating automated nowcasts of convective precipitation*. Meteorological Applications 7, s. 341 - 360.

PIERCE, C. E. et al. (2004) *The nowcasting of precipitation during Sydney 2000: an appraisal of the QPF algorithms*. Weather Forecasting 19, s. 7 - 21.

PIERCE, C., SEED, A., BALLARD, S., SIMONIN, D., LI, Z. (2012): *Doppler Radar Observations – Weather Radar, Wind Profiler, Ionospheric Radar, and Other Advanced Applications*. Dr. Joan Bech (Ed.), ISBN: 978-953-51-0496-4, InTech, also URL: <<http://www.intechopen.com/books/dopplerradar-observations-weather-radar-wind-profiler-ionospheric-radar-and-other-advancedapplications/nowcasting>>

RADOVÁ, Michaela, SEIDL, Jakub (2008): *Parallax Applications When Comparing Satellite and Radar Data*. EUMETSAT Meteorological Satellite Conference 2008, Darmstadt, Germany.

RAKOV, Vladimir A., UMAN, Martin A.. (2003): *Lightning: physics and effects*. Cambridge University Press. 687 s. ISBN 9780521583275

ŘEZÁČOVÁ, Daniela, NOVÁK, Petr, KAŠPAR, Marek, SETVÁK, Martin (2007): *Fyzika oblaků a srážek*. Praha: Academia. 574 s. ISBN 978-80-200-1505-1

SAUNDERS, C. P. R. (1993): *A review of thunderstorm electrification processes*. Journal of Applied Meteorology and Climatology, vol. 32, Issue 4, s. 642 - 655.

SETVÁK, M., LINDSEY, D. T., NOVÁK, P., WANG, Pao K., RADOVÁ, M., KERKMANN, J., GRASSO, L., SU, S.-H., RABIN, R. M., ŠŤÁSTKA, J., CHARVÁT, Z. (2010): *Satellite-observed cold-ring-shaped features atop deep convective clouds*. Atmospheric Research 97, s. 80 – 96.

SETVÁK, Martin (2012): *Konvektivní bouře – pozorování z družic (.ppt)*. Přednáška předmětu NMET073 – Distanční pozorování a detekční metody v meteorologii, MFF Univerzity Karlovy.

SETVÁK, Martin, CHARVÁT, Zdeněk, VALACHOVÁ, Michaela, BEDKA, Christopher (2012): *Blended “sandwich” image products in nowcasting*. EUMETSAT Meteorological Satellite Conference 2012, Sopot, Poland.

SETVÁK, Martin, BEDKA, Christopher, LINDSEY, Daniel T., SOKOL, Alois, CHARVÁT, Zdeněk, ŠŤÁSTKA, Jindřich, WANG, Pao K. (2013): *A-Train observations of deep convective storm tops*. Atmospheric Research 123, s. 229 - 248.

SKRIPNIKOVÁ, Kateřina: *Detekce krup pomocí meteorologických radarů*. Praha, 2013. Disertační práce. Univerzita Karlova, Přírodovědecká fakulta, Katedra fyzické geografie a geoekologie. Vedoucí disertační práce doc. RNDr. Daniela Řezáčová, CSc., 95 s.

VALACHOVÁ, Michaela (2015): *Blesková aktivita konvekčních bouří*. Meteorologické zprávy 68, s. 85 - 94.

VAN HORNE, M. P.: *Short-Term Precipitation Nowcasting for Composite Radar Rainfall Field*. Cambridge (MA), 2003, Master's Thesis. Massachusetts Institute of Technology, Department of Civil and Environmental Engineering. Supervisor: Dara Entekhabi. 115 s.

WALDVOGEL, A., FEDERER, B., GRIMM, P. (1979): *Criteria for the Detection of Hail Cells*. Journal of Applied Meteorology 18, s. 1521 - 1525.

WILLIAMS, Earl R. (1994): *Global Circuit Response to Seasonal Variations in Global Surface Air Temperature* [online]. URL: <[http://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/15200493\(1994\)122%3C1917%3AGCRTSV%3E2.0.CO%3B2](http://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/15200493(1994)122%3C1917%3AGCRTSV%3E2.0.CO%3B2)>

WILLIAMS, Earl R. (2005): *Lightning and climate: A review*. Atmospheric Research 76, s. 272 - 287.

WILLIAMS, E. R., MUSHTAK, V., ROSENFELD, D., GOODMAN, S., BOCCIPIO, D. (2005): *Thermodynamic conditions favorable to superlative thunderstorm updraft, mixed phase microphysics and lightning flash rate*. Atmospheric Research 76. s. 288 - 306.

WILSON, J. W., CROOK, N. A., MUELLER, C. K., SUN, J., DIXON, M. (1998): *Nowcasting Thunderstorms: A Status Report*. Bulletin of American Meteorological Society, Vol. 79, No. 10, s. 2079 - 2099.

WILSON, J. W., EBERT, E. E., SAXEN, T. R., ROBERTS, R. D., MUELLER, C. K., SLEIGH, M., PIERCE, C. E., SEED, A. (2004): *Sydney 2000 Forecast Demonstration Project: Convective Storm Nowcasting*. Weather Forecasting 19, s. 131 - 150.

WILSON, J. W., FENG, Y., CHEN, M., ROBERTS, R. D. (2010): *Nowcasting Challenges during the Beijing Olympics: successes, failures and implications for future nowcasting systems*. Weather Forecasting 25, s. 1691 - 1714.

WITT, A., EILTS, M. D., STUMPF, G. J., JOHNSON, J. T., MITCHELL, E., THOMAS, K. (1998): *An Enhanced Hail Detection Algorithm for the WSR-88D*. Weather and Forecasting 13. s. 286 - 303.

ZAJAC, W. A., WEAVER, J. F. (2002): *Lightning Meteorology I: An Introductory Course on Forecasting with Lightning Data* [online]. URL: <http://rammb.cira.colostate.edu/visit/zajac_weaver_2002_awips.pdf>

ZIPSER, E. (1990): *Rainfall predictability: When will extrapolation-based algorithms fail?* Eighth Conference on Hydrometeorology, American Meteorological Society, p. 138 - 142.

Internetové zdroje:

Amateur Stormchasing Society – projekt sdružení Amatérská meteorologická společnost (2016): *Databáze supercel*. URL: <<http://www.bourky.cz/databaze-supercel/#>>

ČHMÚ A (2015): *Hlásná a předpovědní povodňová služba*.

URL: <http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/poboc/CB/pruvodce/povodnove_zpravy.html>

ESWD (2016): *European Severe Weather Database*. URL: <<http://www.eswd.eu/>>

MetEd (2013): *Multicells (or Multiple-cell Systems)*. URL: <www.meted.ucar.edu>

Meteorologický slovník výkladový a terminologický (eMS), verze eMS 1.4 (3/2016).

URL: <<http://slovník.cmes.cz/>>

NASA B (2012): *The Afternoon Constellation*. URL: <atrain.nasa.gov>

NASA (2014): *The Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Observation (CALIPSO)*. URL: <<http://www-calipso.larc.nasa.gov>>

NCAR (2015): *TITAN – Thunderstorm Identification, Tracking, Analysis and Nowcasting*. URL: <<http://www.ral.ucar.edu/projects/titan/home/index.php>>

NOAA A (2016): *Ingredients for a Thunderstorm*. URL: <<http://www.srh.noaa.gov/jetstream/tstorms/ingredient.html>>