

UNIVERZITA KOMENSKÉHO V BRATISLAVE FAKULTA MATEMATIKY, FYZIKY A INFORMATIKY



SUPERCELY V STREDNEJ EURÓPE

Základné črty superciel namerané rádiolokátormi SHMÚ

Diplomová práca

2013

Bc. Miroslav Šinger

UNIVERZITA KOMENSKÉHO V BRATISLAVE FAKULTA MATEMATIKY, FYZIKY A INFORMATIKY

SUPERCELY V STREDNEJ EURÓPE

Základné črty superciel namerané rádiolokátormi SHMÚ

Diplomová práca

Študijný program: Meteorológia a klimatológia Študijný odbor: 1155 Školiace pracovisko: Katedra astronómie, fyziky Zeme a meteorológie Školiteľ: Mgr. Alois Sokol, PhD.

Bratislava 2013

Bc. Miroslav Šinger

ZADANIE DIPLOMOVEJ PRÁCE

Študent(ka)
vypracuje za účelom obhajoby v rámci záverečného konania vo vysokoškolskom magisterskom štú-
diu na UK FMFI diplomovú prácu s (predbežným) názvom:
SUPERCELY V STREDNED PULSPE
pod vedením pracovníka Man ALOIS POLOC PhD z pracoviska OMK KAFZN
Cieľ diplomovej práce a ďalšie poznámky:
CIECON JE IDENTIFILOVAT A ANALYZOVAT PRIPADY
VYSKYTU SUPERCIEL VSR A OLOLI. SO ZAME RAVITY
NASPOCOINE RYSY UYSKYTH ZA UČELOM ZLEPŠENJA VYSTRAH,
podpis študenta
Diplomová práca je tematicky priradená k špecializácii METEOROLO & IA
& KCIHATOGGA
V Bratislave dňa

Poznámka: Vyplňujte v 3 exemplároch: 1 pre študenta, 1 pre vedúceho práce, 1 pre študijné oddelenie (odovzdá študent pri zápise do 4. ročníka).

ČESTNÉ VYHLÁSENIE

Vyhlasujem, že som diplomovú prácu vypracoval samostatne a uviedol som všetku použitú literatúru.

.....

vlastnoručný podpis študenta

POĎAKOVANIE

Ďakujem Mgr. Aloisovi Sokolovi, PhD. za cenné rady a usmernenie pri písaní diplomovej práce a tiež za to, že som sa takto mohol podieľať na výskume superciel na Slovensku.

Taktiež ďakujem Ing. Ľuboslavovi Okonovi, pracovníkovi SHMÚ na Odbore dištančných meraní, ktorý mi sprístupnil databázu a ochotne pomohol pri tvorbe produktov pre túto prácu.

Vďaka patrí tiež ďalším pracovníkom SHMÚ, menovite Mgr. Martinovi Bellusovi, RNDr. Jánovi Kaňákovi, Ing. Oldřichovi Španielovi a Mgr. Lucii Uhrínovej, ktorí mi ochotne poradili a pomohli pri tvorbe databázy pre túto prácu.

Ďakujem tiež Vierke Verešovej za pomoc pri dopĺňaní databázy z internetu.

ABSTRAKT

Názov práce:	Supercely v strednej Európe (Diplomová práca)
Pracovisko:	KAFZM FMFI UK v Bratislave
Autor:	Bc. Miroslav Šinger
Vedúci:	Mgr. Alois Sokol, PhD.
Dátum:	13. mája, 2013
Počet strán:	149

konceptuálny model Supercelu V práci popísali supercely. sme identifikujeme dopplerovským rádiolokátorom podľa prítomnej mezocyklóny. Supercela má typické črty na poli rádiolokačnej odrazivosti a družicové črty. Poznáme tri typy superciel: LP, CL a HP. Supercelárne prostredie sa vyznačuje vertikálnym strihom vetra. V tomto prostredí je generovaná horizontálna vorticita, ktorá sa nakláňaním vortexu mení na vertikálnu. Na periférii updraftu supercely vznikajú dve opačne orientované centrá vertikálnej vorticity, čím postupne dochádza k štiepeniu supercely. Na vyhodnotenie potenciálu prostredia vyprodukovať supercely používame rôzne indexy. Supercely sa vyskytujú aj na Slovensku, v práci sme analyzovali prípady detegované rádiolokátormi SHMÚ v rokoch 2000 - 2012. Na základe vybraných prípadov sme vyhodnotili vhodné makrosynoptické podmienky pre vznik superciel a spravili sme stručný štatistický rozbor situácií. Práca obsahuje aj ukážky detegovaných rádiolokačných čŕt superciel a horizontálne a vertikálne rezy z rádiolokačných dát rádiolokátorov SHMÚ. V niektorých prípadoch sú popísané aj záznamy dokumentovaných javov súvisiacich s detegovanými supercelami.

Kľúčové slová:

.

Supercela, mezocyklóna, vertikálny strih vetra, vorticita.

ABSTRACT

Title:Supercells in the middle Europe (Diploma work)Department:DAPEM FMPI CU in BratislavaAuthor:Bc. Miroslav ŠingerSupervisor:Mgr. Alois Sokol, PhD.Date:May 13, 2013Number of pages.:149

In this paper we describe the conceptual model of supercell. We identify the supercell by using the Doppler's radar, due to the presence of a mesocyclone. Supercell has characteristic radar and satellite features. We are able to divide the supercell spectrum into three types: LP, CL and HP supercells. Supercell's environment is typical for strong vertical wind shear. There is generated horizontal vorticity, which is tilted to vertical vorticity by deformation of vortex in this environment. Two counter rotating vortices are generated on the periphery of initial updraft and consequent storm splitting follows. Various parameters are used to evaluate the possibility of producing supercells in the specific environment. Supercells occur also in Slovakia. We have analyzed cases which were detected by radiolocators of SHMU (The Slovak Hydrometeorological Institute) from the year 2000 till the year 2012. Following the chosen cases, we have evaluated the appropriate macrosynoptic conditions for formation of supercells. We have also done the statistical analysis of those situations. The paper includes also demonstrations of radiolocatory detected features of supercells. It also includes demonstrations of horizontal and vertical cross section from data of radiolocators of SHMU. In some cases there are also described the data related to detected supercells.

Keywords:

Supercell, vertical shear, vorticity, updraft.

Obsah

Ζ	OZNAM S	KRATIEK	9
Ú	VOD		11
1	Metodi	ka práce	13
	1.1 Te	oretická časť	13
	1.2 Vý	ber prípadov	13
	1.2.1	Detekcia superciel na Slovensku	13
	1.3 Ar	alyzované dáta	14
	1.3.1	Rádiolokátory SHMÚ Malý Javorník a Kojšovská hoľa	14
	1.3.2	Model ALADIN SHMÚ	17
	1.3.3	Aerologické stanice	17
	1.3.4	Družicové dáta	17
	1.3.5	Dokumentácia javov	18
	1.3.6	Makrosynoptická analýza	18
	1.3.7	Štatistické spracovanie	19
2	Teoreti	cký úvod	20
	2.1 De	finícia supercely	20
	2.2 Me	ezocyklóna	20
	2.2.1	Wall cloud	22
	2.3 Ту	pická supercela	23
	2.4 Čr	ty na poli rádiolokačnej odrazivosti	25
	2.4.1	Weak Echo Region (WER) – oblasť slabej rádiolokačnej odrazivosti.	26
	2.4.2	Hákovité echo	30
	2.4.3	V-tvar	32
	2.5 Dr	užicové črty	33
	2.5.1	Studený U/V tvar	34
	2.5.2	Studený prstenec	35
	2.5.3	Vlečka	36
	2.6 Ty	py superciel	37
	2.6.1	LP supercela	37
	2.6.2	HP supercela	39
	2.6.3	CL supercela	41
3	Dynam	ika supercely	42
	3.1 Ve	rtikálny strih vetra	42
	3.2 Gr	afické zobrazovanie vertikálneho strihu vetra - hodograf	43
	3.3 Ro	tácia v supercele	45

	3.3.	1 Pôvod rotácie v supercele	47		
3.	3.4 Štiepenie supercely				
	3.4.	1 Vznik nových updraftov	50		
	3.4.	2 Podpora right (left) movera	52		
4	Pred	lpovedanie superciel	56		
4.	.1	CAPE	56		
4.	.2	Strihové parametre	58		
	4.2.	1 Strih vetra	58		
	4.2.2	2 Stredný strih vetra	60		
4.	.3	Storm to relative environmental helicity (SRH)	61		
4.	.4	Bulk Richardson number (BRN)	62		
4.	.5	Storm relative wind (SRW)	64		
4.	.6	Energy-helicity index (EHI)	67		
5	Ana	lýza superciel na Slovensku	70		
5.	.1	Vhodné makrosynoptické podmienky pre vznik superciel na Slovensku	70		
	5.1.	1 Analýza situácií pri výskyte superciel na Slovensku	73		
	5.1.2	2 Výškové prúdenie pri supercelárnych situáciách na Slovensku	83		
	5.1.	3 Ďalšie štatistické vyhodnotenia	86		
5.	.2	Rozdelenie superciel podľa tvaru poľa rádiolokačnej odrazivosti	95		
5.	.3	Typické supercelárne črty detegované rádiolokátormi SHMÚ	104		
	5.3.	1 Mezocyklóna	104		
	5.3.2	2 Hákovité echo	108		
	5.3.	3 WER	114		
	5.3.4	4 Vertikálne a horizontálne rezy	115		
	5.3.	5 Štiepenie	129		
6	Foto	odokumentácia vybraných prípadov	134		
ZÁ	ZÁVER				
POU	POUŽITÁ LITERATÚRA				

ZOZNAM SKRATIEK

- BRN Bulk Richardson Number
- BWER Bounded Weak Echo Region
- CAPE Convective Available Potential Energy
- CFS Climate Forecast System
- CL-Classic Supercell
- CWA Close-in Warm Area
- CWS Central Warm Spot
- DWA Distant Warm Area
- EHI Energy Helicity Index
- ESRL Earth System Research Laboratory
- ESWD European Severe Weather Database
- FFD Forward Flank Downdraft
- FFGF Forward Flank Gust Front
- HHO horná hranica oblačnosti
- HP Heavy Precipitation Supercell
- HRV High Resolution Visible
- IR-Infra-Red
- KH rádiolokátor na Kojšovskej holi
- LM-Left-mover
- LP Low Precipitation Supercell
- MJ rádiolokátor na Malom Javorníku
- MSG Meteosat Second Generation
- MUCAPE Most Unstable Convective Available Potential Energy
- ORD obyčajná konvektívna bunka

RFD – Rear Flank Downdraft

- RFGF Rear Flank Gust Front
- RGB Red Green Blue
- RM-Right-mover
- SHMÚ Slovenský hydrometeorologický ústav
- SRH Storm to Relative Helicity
- SRW Storm to Relative Wind
- SUP supercela bez mezocyklonálneho tornáda
- TOR supercela spojená s mezocyklonálnym tornádom
- UKMO United Kingdom Met Office

V-Notch – V-tvar

- WER Weak Echo Region
- WV-Water Vapor

ÚVOD

Supercely boli prvýkrát diagnostikované v 60-tych rokoch v USA. Svojimi extrémnymi prejavmi sa dostávali do povedomia verejnosti, čím sa zvyšoval nárok na predpovedanie týchto konvektívnych javov. Meteorológovia sa ich snažia exaktne predpovedať už od 70-tych rokov minulého storočia, kedy to umožnil technologický pokrok. V 80-tych rokoch vzniklo viacero prác (Wilhelmson a Klemp 1981; Weisman a Klemp, 1982; Rotunno a Klemp, 1985), ktoré prezentovali výsledky trojrozmerných simulácií superciel a reprodukovali množstvo dôležitých javov identifikovaných pri pozorovaných supercelách.

Termín supercela nepokrýva výskyt extrémnych búrkových prejavov počasia vo všeobecnosti, pretože napr. z hľadiska množstva zrážok, nárazov vetra a aj dĺžkou života sa môžu multicelárne systémy prejavovať rovnako intenzívne. Označenie supercela je historicky spojené s vývojom jednej výraznej konvektívnej bunky s prítomným výstupným prúdom zreteľne separovaným od zostupného a so špecifickou rotáciou. Termín supercela zaviedol v roku 1964 Browning pri predkladaní konceptuálneho modelu nebezpečných búrok pohybujúcich sa doprava od prevládajúceho smeru prúdenia.

Pre vznik superciel je kľúčový vertikálny strih vetra. V Európe väčšinou pre vznik dostatočného strihu vetra nie sú počas konvektívnej sezóny vhodné cirkulačné podmienky. No napriek tomu môžu takéto podmienky vzniknúť (napr. v blízkosti teplotných rozhraní).

Hlavným cieľom práce je zozbierať informácie o supercelách z prevažne zahraničnej literatúry a spraviť stručný rozbor kľúčových fyzikálnych faktorov, ktoré vedú k špecifickým črtám superciel. Na základe zistených teoretických a empirických poznatkov o supercelách potom identifikovať supercelárne črty a ich vývoj na poli rádiolokačnej odrazivosti z dát rádiolokátorov SHMÚ. Cieľom práce je tiež na základe vybraných situácií zo Slovenska zanalyzovať podmienky, ktoré viedli k vzniku superciel a štatisticky ich vyhodnotiť, čím prispieť k zlepšeniu predpovedí výstrah. Práca má tiež zdvihnúť povedomie o supercelách u odborníkov i laickej verejnosti.

Problematika superciel je veľmi rozsiahla a priamo sa týka aj iných nebezpečných javov, ako napr. tornádo, downburst a pod., čo sú taktiež rozsiahle témy, a preto sme ich v práci nemohli hlbšie analyzovať.

V prvej kapitole je zadefinovaná metodika práce, t.j. podrobne opísaná metóda práce a analyzované dáta.

V úvode druhej kapitoly je zadefinovaná supercela a spôsob detekcie mezocyklóny. Táto kapitola tiež pojednáva o konceptuálnom modeli supercely a sú v nej analyzované typické rádiolokačné črty supercely. Podkapitole o družicových črtách supercely je venovaná menšia pozornosť, nakoľko priama detekcia supercely pomocou družicových meraní nie je možná. V závere druhej kapitoly sa diskutuje o supercelárnom spektre, teda o rozdelení superciel na tri typy: LP, CL a HP.

Tretia kapitola je zameraná na dynamiku supercely. V úvode je zadefinovaný vertikálny strih vetra a tiež spôsob grafického zobrazenia strihu vetra. Ďalšia časť druhej kapitoly analyzuje vznik rotácie výstupného prúdu v supercele a problematiku štiepenia supercely.

Štvrtá kapitola kladie dôraz na možnosti predpovedania superciel na základe rôznych indexov a ich kombinácií.

Piata kapitola analyzuje supercely na Slovensku. Sú tu popísané vhodné makrosynoptické podmienky, črty na poli rádiolokačnej odrazivosti a záver tejto kapitoly je venovaný podrobnej analýze niekoľkých prípadov.

1 Metodika práce

1.1 Teoretická časť

V prvej časti práce (kapitola 2 až 4) sme sa venovali teoretickému popisu a empirickej analýze superciel, t.j. možnosti detekcie prostredníctvom odpozorovaných rádiolokačných a družicových čŕt superciel. Vychádzali sme prevažne zo zahraničnej odbornej literatúry a z publikácií, ktoré sú venované supercelám a konvektívnym javom. Využili sme aj literatúru špecializovanú na dynamiku atmosféry. Pri vysvetľovaní neznámych javov a pojmov sme využili meteorologický výkladový slovník a *Glossary of meteorology* (http://glossary.ametsoc.org). Pri popise jednotlivých javov sme vychádzali aj z dát SHMÚ.

1.2 Výber prípadov

V druhej časti práce (kapitola 5) sme analyzovali supercely na Slovensku v rokoch 2000 až 2012.

Výber prípadov sme robili na základe dát rádiolokačnej odrazivosti rádiolokátorov SHMÚ. K vybraným prípadom sme následne analyzovali ďalšie materiály (detailne popísané v kapitole 1.3). Celkovo sme zozbierali 113 GB dát a približne 623 000 súborov.

1.2.1 Detekcia superciel na Slovensku

Supercely sme detegovali na základe rádiolokačných čŕt diskutovaných v kapitole 2.4. Ak teda hovoríme o supercele, myslíme tým bunku, ktorá vykazovala supercelárne črty predovšetkým na základe rádiolokačnej odrazivosti, nakoľko vzhľadom na definíciu supercely (kapitola 2.1) priama detekcia mezocyklóny v mnohých prípadoch nebola možná. V prípadoch, keď bola supercela detegovaná v rozsahu merania radiálnej dopplerovskej rýchlosti, sa vzhľadom na kvalitu dát dala mezocyklóna identifikovať len v ojedinelých prípadoch. Hovoríme preto o príznaku mezocyklóny.

Pri výbere prípadov sme na poli rádiolokačnej odrazivosti kládli dôraz na perzistentnosť javov, čiže daný jav musel byť detegovaný na viacerých snímkach rádiolokačnej odrazivosti v rámci tej istej bunky. Taktiež sme zohľadňovali životnosť danej bunky. Bunky bez signifikantných čŕt existujúce do 60 minút sme do výberu nezahrnuli.

Bunku sme už nepovažovali za supercelu, ak nevykazovala žiadne supercelárne črty a na snímkach rádiolokačnej odrazivosti sa nejavila ako samostatne existujúce jadro.

Do výberu sme zahrnuli len supercely, ktoré sa vyskytli na území Slovenska, prípadne sa vyskytli mimo nášho územia, no za supercelárnej situácie nad Slovenskom. Ak sa teda supercela vyskytla na území Slovenska a súčasne aj v okolí slovenských hraníc, do výberu sme ju zahrnuli.

1.3 Analyzované dáta

1.3.1 Rádiolokátory SHMÚ Malý Javorník a Kojšovská hoľa

Na analýzu superciel na Slovensku sme využili archív rádiolokačných dát dostupný na CD a DVD nosičoch z oboch rádiolokátorov SHMÚ na Malom Javorníku (ďalej MJ) aj Kojšovskej holi (ďalej KH), t.j. od 8.6.2000 do 30.8.2012. Archív dát z KH bol dostupný až od 28.6.2006, nakoľko predtým sa namerané dáta z KH nearchivovali. Dáta sme analyzovali len v období od apríla do konca augusta vrátane, keďže sme vychádzali z predpokladu, že v chladnom polroku sú pre hlbokú konvekciu nevhodné podmienky.

Dáta sme sťahovali z archívu na CD a DVD nosičoch na SHMÚ a na Malom Javorníku s pomocou pracovníkov Odboru Dištančných meraní SHMÚ. Celkovo sme z oboch rádiolokátorov analyzovali cca 500 000 snímok. Niektoré snímky neboli vygenerované a bolo nutné ich nanovo vyrobiť z objemových dát.

Maximálny dosah MJ je 240 km. Od roku 2000 do roku 2009 sme mali k dispozícii dáta namerané s časovým krokom 15 minút, od 3.8.2009 z krokom 10 minút a od 27.4.2010 až do konca sledovaného obdobia s krokom 5 minút. Dáta merané na 240 km dosahu mali radiálne rozlíšenie 1 km. Z MJ boli dostupné aj dáta merané na 60 km dosahu s radiálnym rozlíšením 250 m v rokoch 2000 a 2001, 125 m v rokoch 2002 – 2005 a tiež od 28.7.2006 do roku 2008. Merania na 60 km dosahu prebiehali medzi hlavnými meraniami na 240 km dosahu.

Archív dát z KH bol dostupný od 28.6.2006. Maximálny dosah KH je 200 km. Dáta boli namerané s časovým krokom 7,5 minúty, od 3.8.2009 s krokom 10 minút a od 27.4.2010 až do konca sledovaného obdobia s krokom 5 minút. Dáta z KH mali do roku 2009 vrátane radiálne rozlíšenie 250 m, potom až do konca sledovaného obdobia 625 m. Zlúčená mapa

rádiolokačnej odrazivosti oboch rádiolokátorov bola generovaná s rovnakým časovým krokom ako merania z MJ.

Výber prípadov sme robili podľa dostupných možností na základe viacerých produktov, pričom sme sa zameriavali na spodné hladiny oblakov (cca do 3 km nad povrchom), pretože tam sú supercelárne črty zvyčajne najvýraznejšie.

Do 12.8. 2002 sme výber robili na 60 km dosahu na základe produktu *PPI* s eleváciou 1,4 až 1,5 stupňa, čo pri vzdialenosti objektu 60 km zodpovedá nadmorskej výške približne 2,2 km, pri vzdialenosti 20 km nadmorskej výške 1,2 km. Pre 240 km dosah sme mali k dispozícii len nie príliš vhodný produkt *CMAX*. Od 12.8. 2002 sme mohli výber prípadov robiť aj na 240 km dosahu podľa produktu *PPI* s eleváciou 0,2 až 0,4 stupňa. Vzdialenosti objektu 80 km od rádiolokátora tejto elevácii zodpovedá nadmorská výška objektu približne 1,2 km, vzdialenosti objektu 160 km je to približne 2,6 km, vo vzdialenosti 240 km vyššie ako 4 km. Napriek tomu bol produkt *PPI* na 240 km dosahu použiteľný až od roku 2004, nakoľko dáta boli dovtedy natoľko nekvalitné, že sa z nich nedali odpozorovať žiadne štruktúry.

Od 28.6.2006 sme na výber prípadov používali produkt *MOS CAPPI 2km* - zlúčená mapa rádiolokačnej odrazivosti v hladine 2 km. Produkty vygenerované z KH použité v produkte *MOS CAPPI 2km* boli so zníženým časovým aj priestorovým rozlíšením. Vygenerovaním z objemových dát sme získali dáta s maximálnym časovým a priestorovým rozlíšením. Taktiež sa tým odstránil problém vznikajúci v oblastiach, kde sa vzájomne prekrývajú dosahy rádiolokátorov.

Pole rádiolokačnej odrazivosti sme potom porovnávali s poľom radiálnej dopplerovskej rýchlosti. Analyzovať pole radiálnej dopplerovskej rýchlosti sme mohli len v bunkách vyskytujúcich sa v obdobiach, keď MJ meral na 60 km dosahu, keď že v tomto období dochádzalo k aliasingu rýchlosti pri hodnote $32 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Pri 240 km dosahu dochádzalo k aliasingu rýchlosti už pri hodnote $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, ktorá je príliš nízka na identifikáciu mezocyklóny. Pole radiálnej dopplerovskej rýchlosti sme mohli analyzovať aj na základe dát z KH. Od roku 2006 do 3.8.2009 dochádzalo k aliasingu rýchlosti pri hodnote 29,5 m · s⁻¹, neskôr už pri rýchlostiach 9,8 m · s⁻¹, čo už bola opäť príliš nízka hodnota na identifikáciu mezocyklóny. Taktiež vo vzdialenosti 80 km a viac už bolo pole radiálnej dopplerovskej rýchlosti nepoužiteľné, nakoľko dáta boli veľmi ťažko interpretovateľné, prípadne príliš zaťažené aliasingom.

V niektorých prípadoch sme nemali k dispozícii žiadne rádiolokačné dáta, prípadne niektoré produkty. Najväčší výpadok sme zaznamenali v roku 2006, kedy sme nemali k dispozícii dáta z apríla, mája a takmer celého júna (do 28.6.) alebo v roku 2000 od 11.7. do 3.8.

Po výbere prípadov sme k príslušným termínom mohli analyzovať aj dáta s lepším radiálnym rozlíšením (250 alebo 625 m), no len pre dáta namerané KH. Analyzovali sme *PPI* na eleváciách 0,0; 0,3; 0,6; 1,0; 1,5; 2,5 stupňa. Elevácie 0,3 a 0,6 stupňa boli do roku 2008 nahradené eleváciou 0,7 stupňa, v roku 2010 eleváciou 0,5 stupňa.

Vo vybraných prípadoch sme analyzovali aj vertikálne a horizontálne rezy oblakmi s najlepšie vyvinutými príznakmi supercely. Vertikálne rezy generované z objemových dát KH sme robili na základe nekorigovanej rádiolokačnej odrazivosti s prítomnými odrazmi pozemných cieľov, nakoľko užitočné dáta korigovanej rádiolokačnej odrazivosti boli často z dôvodu nízkej koherencie signálu odfiltrované. Následným porovnaním polí generovaných z korigovanej a nekorigovanej rádiolokačnej odrazivosti sme mohli pozemné ciele jednoznačne určiť. Ako podkladovú mapu pre naznačenie orientácie vertikálneho rezu sme použili produkt *CAPPI 2km* z nekorigovaných dát. Vo vyšších hladinách už v niektorých oblastiach chýbajú namerané dáta, pretože v daných oblastiach nemeria žiadna z elevácií. KH mal aj jednu zápornú eleváciu, čiže bol schopný detegovať ciele v hladine 2 km bol schopný detegovať ciele len do vzdialenosti 120 km.

Horizontálne rezy sme robili pomocou produktov *CAPPI* s vertikálnym krokom 2 km, od hladiny 2 km do 12 km. V oblasti, v ktorých žiadna s elevácií nemala dosah, sme polia nedopĺňali z iných elevácií, čo sa na horizontálnych rezoch prejavuje ako kruhy okolo rádiolokátora.

Na základe polí rádiolokačnej odrazivosti sme tiež štatisticky vyhodnocovali, či sa supercely vyskytli izolovane alebo v súvislosti konvektívnych štruktúr. Rozdelili sme ich do štyroch kategórií – izolovaná bunka, "vejár", línia buniek so supercelou a línia superciel.

Podľa poľa rádiolokačnej odrazivosti sme robili aj trasovanie jednotlivých buniek, kde sme sledovali oblasť WER (kapitola 2.4.1), pretože je najlepšie identifikovateľná v rámci jednej bunky. Ak sa v danej bunke WER nevyskytovala, sledovali sme oblasť najvýraznejšej rádiolokačnej odrazivosti v jadre bunky. Ak sa bunka rozštiepila, sledovali sme *right-mover* (kapitola 3.4).

1.3.2 Model ALADIN SHMÚ

V ďalšej fáze analýzy sme sa zamerali na výstupy z numerického modelu ALADIN SHMÚ. S pomocou pracovníkov numerických predpovedí SHMÚ sme mali možnosť analyzovať výstupy z modelu ALADIN pre vybrané prípady, pre beh z 00:00 UTC daného dňa s analýzou 00:00 UTC a predpoveďou na 12 hodín a beh z 12:00 UTC daného dňa s analýzou 12:00 UTC s predpoveďou na ďalších 12 hodín. Jednotlivé behy modelu ALADIN sme mali k dispozícii pre situácie od roku 2004. Pre vybrané dni sme robili analýzu polí vetra vo výške 10 m nad povrchom, v hladine 925, 850, 800, 700 a 500 hPa. Na základe polí vetra sme potom vypočítali vertikálny strih vetra medzi hladinou 500 hPa a hladinou 10 m nad povrchom v zobrazovacom softvéri používanom na SHMÚ - *Visual Weather*. V závislosti od analyzovaného parametra sme si zvolili vhodnú doménu, stupnicu a farebnú škálu. Ďalej sme analyzovali tlak prepočítaný na hladinu mora a index MUCAPE.

1.3.3 Aerologické stanice

Na zobrazenie vertikálnych profilov vetra sme využívali aerologické merania. K záznamom sme sa dostali cez portál University of Wyoming (http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html), kde sú dostupné aerologické merania z celého sveta. Pre vybranú situáciu sme použili dáta aj z dňa pred a po výskyte supercelárnej bunky.

1.3.4 Družicové dáta

Pri analýze vybraných prípadov sme používali aj dáta z družice MSG získané z portálu EUMETSAT (http://www.eumetsat.int/Home/index.htm). Boli k dispozícii od roku 2004. Tieto dáta však neboli upravené v grafickej forme, preto na ich spracovanie bolo nutné použiť program, ktorý ich vygeneruje vo forme obrázkov. Za pomoci pracovníkov dištančných meraní SHMÚ, konkrétne družicových meraní, sme využili program *MSGproc*. Na vizualizáciu výstupov z *MSGProc* sme potom využili softvér *ViewMSGProc*, ktorý je takisto vyvinutý na SHMÚ.

Z portálu EUMETSAT sme objednávali kanály High Resolution Visible (HRV), Water Vapor (WV) 6,2 µm a Infra Red (IR) 10,8 µm pre oblasť strednej Európy. Tie sme potom spracúvali v programe MSGProc, kde sme súčasne vygenerovali aj RGB produkt HRV Clouds a upravený IR 10,8 µm, v ktorom je farebne zvýraznené pole jasovej teploty. Pre kanál vodnej pary 6,2 µm sme zvýrazňovali kontrast.

Pri porovnávaní družicových a rádiolokačných snímok je dôležité si uvedomiť, že družicové snímky sú oproti rádiolokačným posunuté na sever kvôli paralaxe.

1.3.5 Dokumentácia javov

Ďalším neoceniteľným zdrojom našej analýzy boli záznamy o pozorovaných javoch a škodách súvisiacich s konvektívnymi situáciami, ktoré boli zaznamenané náhodnými pozorovateľmi z celého Slovenska, vrátane blízkych pohraničných oblastí. Tieto udalosti boli zaznamenávané, niekedy aj vedecky spracované, aj odborníkmi zo Slovenska či z okolitých krajín (Simon a kol., 2007).

Čerpali sme prevažne zo záznamov z ESWD (European Severe Weather Database, http://www.essl.org/cgi-bin/eswd/eswd.cgi) a zo záznamov z územia Slovenska, napr. informácie z médií, regionálnych správ, či správ samotných starostov obcí a miest a pod. Nevynechali sme ani české a rakúske databázy meteorologických služieb či amatérskych pozorovateľov.

Po preskúmaní databáz sme našli niekoľko prípadov výskytu superciel, ktoré sme v našom výbere nemali. Ani dodatočne sme ich však do výberu nemohli zahrnúť. Pri výbere sme totiž vychádzali z dát rádiolokátorov SHMÚ a tie boli v niekoľkých prípadoch práve v daný deň neúplné, chybné, prípadne namerané s veľmi veľkým časovým krokom (niekedy aj 60 min).

1.3.6 Makrosynoptická analýza

Po finálnom výbere prípadov sme v jednotlivých dňoch analyzovali makrosynoptické podmienky v strednej Európe. Vychádzali sme z prízemných a výškových máp, kde sme analyzovali rozloženie tlakových útvarov v Európe a prechody frontov cez územie Slovenska. Na výškových mapách (http://www.wetterzentrale.de/topkarten/fscfsreaeur.html) sme z CFS (Climate Forecast System) reanalýz v hladine 500 hPa analyzovali geopotenciálnu výšku, v hladine 850 hPa geopotenciálnu výšku a teplotu vzduchu, a na prízemnej mape tlak vzduchu prepočítaný na hladinu mora. Z modelu ALADIN sme analyzovali pole vetra v hladine 500 hPa a vo výške 10 m a vypočítaným vertikálnym strihom vetra medzi týmito hladinami.

Použili sme aj makrosynoptické analýzy situácií meteorológov SHMÚ a UKMO (http://www.wetterzentrale.de/topkarten/fsfaxsem.html).

1.3.7 Štatistické spracovanie

Na základe analýzy dát z rádiolokačnej odrazivosti sme určili 240 konvektívnych situácií (dní). Z nich sme potom vytypovali 40, v ktorých sa vyskytlo 101 superciel. Tieto sme analyzovali a štatisticky vyhodnocovali.

Štatistické vyhodnotenia sme robili v štatistickom programovacom jazyku R a v programe Microsoft Excel, na základe ktorých sme robili aj niektoré grafické vyhodnotenia v programe Adobe Photoshop. Priemerné polia AT500 hPa sme počítali na portáli ESRL (http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/composites/hour/).

2 Teoretický úvod

2.1 Definícia supercely

Supercela je definovaná ako konvektívna bunka tvorená silným rotujúcim výstupným prúdom (ďalej *updraft*), ktorý je počas existencie bunky pomerne stacionárny. Silno rotujúci *updraft* sa javí na snímkach z dopplerovského rádiolokátora ako tzv. mezocyklóna (viď kapitola 1.2), ktorej prítomnosť je hlavným kritériom definície supercely (Klemp, 1987; Doswell a Burgess, 1993; Moller a kol., 1994; Brooks a Wilhelmson, 1994b).

Supercela vzniká v oblasti s instabilitou vzduchovej hmoty a výrazným strihom vetra (viď kapitola 2.2) (Brooks, 2009).

Supercela má špecifické družicové črty (Setvák, 2008) a črty na poli rádiolokačnej odrazivosti (Lemon, 1980).

Supercela patrí medzi najnebezpečnejší jav v troposfére. V súvislosti s výskytom superciel dochádza k vzniku cirkulačne najstabilnejších a najsilnejších tornád. Navyše je sprevádzaná silným vetrom, prudkým dažďom a krupobitím a mimoriadnou elektrickou aktivitou, za minútu dokáže vyprodukovať stovky bleskov (Řezáčová a kol, 2007).

Typickou vlastnosťou supercely je štiepenie materskej bunky na dve sekundárne, ktoré sa postupne od seba vzďaľujú a ich *updrafty* opačne rotujú. Jedna z nich vo väčšine prípadov zaniká (Řezáčová a kol, 2007).

Na rozdiel od obyčajných konvektívnych buniek, dosahuje životnosť supercely niekoľko hodín (ojedinele aj viac ako 10) (Řezáčová a kol, 2007).

2.2 Mezocyklóna

Mezocyklóna je oblasť rotujúceho *updraftu* s horizontálnym rozmerom 2-10 km (Moller a kol., 1994), ktorý rotuje okolo zvislej osi zvyčajne v rovnakom smere ako cyklóny na danej pologuli, zriedka sa stretávame aj s anticyklonálnou rotáciou (pri štiepení, viď kapitola 2.4).

Oblak je charakterizovaný ako supercela, ak sú v jeho mezocyklóne namerané hodnoty vertikálnej vorticity (viď kapitola 2.3) rádovo aspoň 10⁻² s⁻¹ (Moller a kol., 1994).

20

Rotácia spojená s mezocyklónou je zvyčajne v stredných hladinách troposféry, t. j. 3-8 km nad zemským povrchom, vo výnimočných prípadoch aj vyššie (Brooks a kol, 1994b).



Obr. 2.1 - Pole dopplerovskej rýchlosti, MJ (dosah 60 km), PPI 1.4 st., 9.6.2004, 15:07 UTC, Záhorie (prevzaté a upravené, SHMÚ).

Túto rotáciu môžeme detegovať pomocou dopplerovského rádiolokátora (Brown a Wood, 1991; Burgess a Lemon, 1990). Na obr. 2.1 je zobrazené pole radiálnej dopplerovskej rýchlosti. V pravej časti obrázku je znázornená stupnica radiálnej rýchlosti častíc. Záporné hodnoty predstavujú rýchlosť pohybu častíc smerom k radaru a kladné rýchlosti predstavujú rýchlosť pohybu častíc smerom od radaru. Sledujme objekt vyznačený čiernou kružnicou. Všimnime si výrazný gradient rýchlosti detailne zobrazený v ľavej časti obrázku. Na prednej strane sledovaného objektu sa častice pohybovali smerom od radaru (čierna šípka) a na zadnej strane smerom k radaru (biela šípka), čo indikuje cyklonálnu rotáciu a objekt už definujeme ako supercela (Donaldson, 1970).

Obr. 2.2 zobrazuje pole rádiolokačnej odrazivosti rovnakej situácie ako na obr. 2.1. Pri danej elevácii rádiolokátora vidíme štruktúry ako hákovité echo a WER (viď kapitola 2.4) a tiež oblasť FFD výtoku (viď kapitola 2.3). Porovnaním obr. 2.1 a 2.2 si môžeme všimnúť, že hákovité echo sa formuje v oblasti silnej rotácie na zadnej strane mezocyklóny a WER vzniká v oblasti intenzívneho vtoku teplého a vlhkého vzduchu od juhozápadu.



Obr. 2.2 – Pole rádiolokačnej odrazivosti, MJ (dosah 60 km), PPI 1.4 st., 9.6.2004, 15:07 UTC, Záhorie (prevzaté a upravené, SHMÚ).

2.2.1 Wall cloud

Wall cloud (Fujita, 1960) vzniká pri formovaní mezocyklóny smerom k zemskému povrchu. Je to lokálne, ale dlhotrvajúce zníženie časti základne oblaku, s veľkosťou od jedného do niekoľkých km. Často sa nachádza na južnej alebo juhozápadnej strane supercely. Rotujúci *wall cloud* môže predchádzať tornádam. *Wall cloud* vidíme na obr. 2.3, kde sa nachádza pod čiernou krivkou.



Obr. 2.3 - Wall cloud (pod čiernou krivkou), 19.7.2011, 14:30 UTC, Banská Bystrica (foto: M. Šinger).

2.3 Typická supercela

Konceptuálny model typickej supercely znázorňujú obr. 2.4 a 2.5. Horizontálnu štruktúru typickej supercely vidíme na obr. 2.4. Oblasť zrážok je znázornená farebne (najsilnejšie zrážky a krúpy sú červené). Zrážky v blízkosti *updraftu* sú slabé, čo naznačuje, že *updraft* supercely je dostatočne silný na to, aby zabránil zrážkovej vode v tejto oblasti dopadať na zemský povrch. Na zadnej strane mezocyklóny je bledomodrou až zelenou farbou znázornená zahnutá oblasť relatívne slabých zrážok, tzv. hákovité echo (viď kapitola 2.4.2).

Supercela má zvyčajne dva zostupné prúdy (ďalej *downdraft*). Hlavný *downdraft* v supercele sa nazýva *forward flank downdraft* (FFD), ktorý je orientovaný v smere výškového prúdenia smerom od *updraftu*. Čelo tohto zostupného prúdu je na obr. 2.4 označené symbolom studeného frontu a nazýva sa *forward flank gust front* (FFGF) (Meteorologický slovník, 1993). FFGF vizuálne často sprevádza oblak arcus, prípadne *shelf* alebo *roll cloud*. V zadnej časti supercely sa nachádza druhý *downdraft* supercely, tzv. *rear*

flank downdraft (RFD), na čele ktorého pozorujeme tzv. *rear flank gust front* (RFGF). RFD je oblasť zostupujúceho vzduchu často obtáčajúca sa okolo okludujúcej mezocyklóny¹. Zväčša býva viditeľný ako jasný úsek alebo zárez okolo *wall cloudu*. Pozdĺž RFGF sa formujú nové *updrafty*, tzv. *flanking line*². Medzi dvoma divergentnými prúdeniami do búrky vteká teplý vzduch (angl. *inflow*) na obr. 2.4 znázornený žltými šípkami. Ak supercela vytvorí tornádo, vír sa s najväčšou pravdepodobnosťou vytvorí v oblasti blízko oklúzneho bodu mezocyklóny (na obrázku 2.4 označené ako "T"). Bledomodrou farbou je vo veľkej časti obrázku 2.4 zobrazená nákova.



Obr. 2.4 - Horizontálna štruktúra typickej supercely (http://weather-warehouse.com/grenci/HailSpikes.html).

Vertikálna štruktúra typickej supercely je na 2.5. Oblak na obrázku smeruje zľava doprava. Región FFD so silnými zrážkami v pravej časti supercely je ohraničený FFGF, v ľavej časti je oblasť RFD ohraničená RFGF, pozdĺž ktorého sa formujú nové jadrá. Zrážková činnosť je tu nevýrazná. Pod základňou supercely sa mezocyklóna formuje smerom k zemskému povrchu a vzniká tu *wall cloud*, ktorý môže vyústiť do vzniku tornáda³.

Na materskom oblaku sa v oblasti *wall cloudu* niekedy objavujú kanáliky alebo vrúbkované vzory (na obr. 2.5 ozn. ako *"striations"*), ktoré sú usporiadané paralelne vzhľadom k prevládajúcemu prúdeniu a sú príznakom rotácie v oblaku.

¹ Mezocyklóna, v ktorej studený vzduch pochádzajúci z RFD úplne pohltil cirkuláciu v spodných častiach búrky a to tak, že sa už do búrky nemôže dostávať teplý vzduch.

² Čiara kumulov rozširujúca sa od najaktívnejšej časti supercely, väčšinou smerom na juhozápad. Pozdĺž nej je zvyčajne pozorované konvergentné prúdenie vzduchu v spodných 2-3 km nad zemským povrchom.

³ Vznik *wall cloud* neznamená, že supercela vyprodukuje tornádo.



Obr. 2.5 – Vertikálna štruktúra typickej supercely (Houze a Hobbs: Supercell Thunderstorms, ppt prezentacia).

Supercelu na obr. 2.5 zásobuje teplý vzduch znázornený širokou červenou šípkou. Vrchnú vrstvu oblaku tvorí nákova, ktorá sa rozširuje v smere výškového prúdenia, no čiastočne sa môže rozširovať aj v protismere (angl. *back sheared anvil*). Cez nákovu môže prechádzať kopulovitý výbežok oblaku - prestreľujúci vrchol (angl. *overshooting top*), ktorý sa dostal nad hladinu nulového vztlaku kvôli intenzívnemu *updraftu*. Pre supercelu sú typické pretrvávajúce a výrazné prestreľujúce vrcholky, mnohokrát siahajúce až do spodnej stratosféry (Rasmussen a Straka, 1998).

Oblasť RFD a FFD môžeme taktiež identifikovať na obr. 2.3. Pohľad na oblak približne zodpovedná schematickej štruktúre supercely na obr. 2.5, teda RFD môžeme vidieť vľavo, FFD vpravo od *wall cloudu*.

2.4 Črty na poli rádiolokačnej odrazivosti

Pri identifikácii supercely nestačí vizuálne pozorovanie rotácie, prípadne črty na poli rádiolokačnej odrazivosti či družicové črty, pretože nie každá supercela musí nutne vykazovať všetky typické znaky (Moller a kol, 1994). Tieto črty nám však pomáhajú pri detegovaní supercely, avšak supercela musí byť jednoznačne detegovaná na poli dopplerovskej rýchlosti, pričom príznak mezocyklóny musí splniť isté kritériá, ako je vorticita, vertikálne rozmery a trvanie, aby bol oblak označený ako supercela (Burgess a Lemon, 1990). Taktiež je dôležité rozpoznať tornádický potenciál supercely, no ide o veľmi rozsiahlu tému, a preto sa jej v tejto práci nebudeme venovať.

2.4.1 Weak Echo Region (WER) – oblasť slabej rádiolokačnej odrazivosti

Na poli rádiolokačnej odrazivosti sa WER javí ako "priehlbina" alebo oblasť s nízkymi hodnotami rádiolokačnej odrazivosti v spodných hladinách oblaku (cca do výšky 5 km nad povrchom). Nad touto oblasťou sa vo vyšších hladinách často nachádza oblasť vysokej rádiolokačnej odrazivosti, ktorá je tvorená veľkými hydrometeormi. Vyskytuje sa na tej strane oblaku, z ktorej do neho vteká teplý vzduch (http://www.meted.ucar.edu/radar/severe_signatures/ index.htm).

Na identifikáciu WER využívame horizontálne aj vertikálne rezy oblakmi. Na horizontálnych rezoch pre spodné hladiny (napr. *CAPPI 2km*) vidíme typickú priehlbinu v poli rádiolokačnej odrazivosti, ktorá je lokalizovaná obvykle na pravej (ľavej) strane vzhľadom na pohyb supercely s cyklonálne (anticyklonálne) rotujúcim *updraftom*. Na horizontálnych rezoch pre vyššie hladiny (4-5 km a viac) už túto priehlbinu obvykle nepozorujeme. Horizontálny rez supercelou zobrazuje obr. 2.6. Ide o prípad z roku 2009, východne od Kojšovskej hole. Biele šípky ukazujú oblasti, v ktorých v dôsledku silného vtoku vzduchu (od juhu) a následného unášania častíc s vyššou rádiolokačnou odrazivosťou dochádza k tvorbe WER.



Obr. 2.6 – Pole rádiolokačnej odrazivosti, WER (označené bielymi šípkami), čierna šípka označuje postup superciel, KH, *CAPPI 2km*, 11.5.2009, 21:07 UTC, východne od Kojšovskej hole (prevzaté a upravené, SHMÚ).

Na vertikálnych rezoch sa WER prejavuje ako výrazný gradient fádiolokačnej odrazivosti v prízemnej vrstve, ktorý je lokalizovaný priamo pod jadrom vysokej rádiolokačnej odrazivosti vo väčšej výške (cca nad 5 km). Prípad z Podunajskej nížiny znázorňuje obr. 2.7. Orientácia rezu je v pravej hornej časti obrázku. Čierna šípka ukazuje WER.



Obr. 2.7 - Vertikálny rez vedený oblasťou vysokých hodnôt rádiolokačnej odrazivosti konvektívneho systému, MJ (dosah 240 km), 9.5.2003, 19:07 UTC, Podunajská nížina (prevzaté a upravené, SHMÚ).

WER je jednou z viacerých čŕt vypovedajúcich o intenzite konvektívnej bunky⁴. Jeho prítomnosť naznačuje, že oblak má intenzívny vtok vzduchu a následkom toho aj silný *updraft*.

2.4.1.1 Bounded Weak Echo Region (BWER)

Intenzívny vtok a *updraft* môžu oblasť WER predĺžiť až do stredných hladín troposféry, kde už WER obklopujú výraznejšie odrazivosti. Túto oblasť v konvektívnej meteorológii označujeme *bounded weak echo region* (BWER), čiže ohraničený WER.

Obr. 2.8 predstavuje vertikálny rez tým istým konvektínym systémom ako obr. 2.7 nameraný o 15 minút neskôr. Tu už vidíme BWER (na obr. 2.8 vyznačený čiernym oválom), ktorý je zľava aj sprava ohraničený vyššími hodnotami rádiolokačnej odrazivosti.

⁴ WER môžeme pozorovať aj pri nesupercelárnych bunkách.



Obr. 2.8 - Vertikálny rez vedený oblasťou vysokých hodnôt rádiolokačnej odrazivosti konvektívneho systému, MJ (dosah 240 km), 9.5.2003, 19:22 UTC, Podunajská nížina (prevzaté a upravené, SHMÚ).

BWER je schematicky znázornený na obr. 2.9. Červená šípka predstavuje *updraft*, modrá ukazuje na previs nahromadených hydrometeorov (angl. *overhang*) (obr. 2.9 je nutné konfrontovať s obr. 2.10, pretože rez je orientovaný v smere úsečky CD na obr. 2.10)



Obr. 2.9 - Schéma BWER (Chisholm a Renick, 1972).

Horizontálne rezy supercelárnou bunkou zobrazuje obrázok 2.10. Oblasti s najvyššou rádiolokačnou odrazivosťou sú čierne, oblasti s nižšou rádiolokačnou odrazivosťou sú vyšrafované redšie. Sledujeme priesečník úsečiek AB, CD v rôznych výškových hladinách.



Obr. 2.10 - Horizontálne rezy mohutnou konvektívnou bunkou (Chisholm a Renick, 1972).

V priesečníku na obr. 2.10 v najnižšej hladine, t.j. 1 km nad povrchom, nepozorujeme takmer žiadne odrazivosti. V oblasti silného *updraftu* pozorujeme nevýrazné odrazivosti (WER). Táto oblasť siaha približne do výšky 4 km. Vo výške 4 km nad povrchom už pozorujeme BWER, pretože priesečník obklopujú odrazivosti zo všetkých strán, no v jeho blízkosti stále výrazné odrazivosti nie sú. Táto oblasť siaha maximálne do výšky 10 km nad povrchom. Vo výškach 10-13 km nad povrchom sa už priesečník nachádza v oblasti najvyššej rádiolokačnej odrazivosti. Priesečník sa v najvyšších hladinách oblaku nachádza v oblasti prestreľujúcich vrcholkov (Chisholm a Renick, 1972).

2.4.2 Hákovité echo

Hákovité echo (angl. *hook echo*) vzniká, keď hydrometeory z vyšších hladín oblaku zostupujú do nižších a obiehajú mezocyklónu (Chisolm a Renick, 1972). Hákovité echo teda naznačuje rotáciu v spodných hladinách oblaku. Črta na poli rádiolokačnej odrazivosti sa vtedy javí ako hák vyčnievajúci z oblasti FFD zvyčajne orientovaný kolmo na vektor pohybu supercely (Markowski, 2002a).

Hákovité echo najčastejšie detegujeme na poli rádiolokačnej odrazivosti klasickej supercely (viď kapitola 2.6.3) (Forbes, 1981). Hodnoty rádiolokačnej odrazivosti v ňom sú obvykle slabšie než v zrážkovom jadre FFD (Doswell a Burgess, 1993). Nemusí to však platiť vždy, ako napr. v prípade supercely, ktorá súvisí s extrémne silným tornádom. V tom prípade sa v oblasti hákovitého echa môžu nachádzať veľké trosky a vytvárajú tak vysoké hodnoty na poli rádiolokačnej odrazivosti.

Hákovité echo supercely ukazuje biela šípka na obr. 2.11. Ide o prípad z juhovýchodného Slovenska z 11.4.2009.



Obr. 2.11 – Pole rádiolokačnej odrazivosti, hákovité echo (označené bielou šípkou), KH, *CAPPI 2km*, 11.4.2009, 15:30 UTC, severne od Košíc (prevzaté a upravené, SHMÚ).

Hákovité echo zvyčajne spájame so supercelou (Burgess a Lemon, 1990), no môžeme ho objaviť aj na poli rádiolokačnej odrazivosti nesupercelárnych buniek, čiže na detekciu supercely jeho existencia nestačí. Avšak dlhšie pretrvávajúce hákovité echo (20 - 30 min a viac) výrazne zvyšuje pravdepodobnosť, že ide o supercelu. Obr. 2.12 zobrazuje niekoľko prípadov tornádických a netornádických superciel⁵. Vidíme, že prítomnosť hákovitého echa sa nedá použiť ako indikátor tornáda (Markowski a kol., 2002).



Obr. 2.12 - Hákovité echá tornádických a netornádických superciel, pole rádiolokačnej odrazivosti, (Markowski a kol., 2002).

⁵ Pod pojmom tornádická supercela sa myslí supercela so signifikantným tornádom, ktoré súvisí s mezocyklónou.

2.4.3 V-tvar

O "V-tvare" na poli rádiolokačnej odrazivosti hovoríme, ak sa hydrometeory usporiadajú do tvaru písmena V (angl. "*V-notch*"). Nazýva sa tiež forward flank notch, pretože je to štruktúra v oblasti FFD výtoku. V-tvar supercely identifikovaný na poli rádiolokačnej odrazivosti znázorňuje obr. 2.13. V-tvar sa spravidla vyskytuje v stredných hladinách oblaku, no býva detegovaný aj v spodných hladinách.



Obr. 2.13 – V-tvar supercely, pole rádiolokačnej odrazivosti, KH, *CAPPI 2km*, 11.5.2009, 21:22 UTC, severne od Košíc (prevzaté a upravené, SHMÚ).

Pretrvávajúci V-tvar je typický pre supercelu, no môže sa vyskytovať aj v obyčajnej konvektívnej bunke, a preto sa podľa neho nedá spoľahlivo určiť, či je daný oblak supercela. V-tvar sa typicky vytvára v smere vektora strihu vetra (Lemon, 1970).

Typické črty supercely na poli rádiolokačnej odrazivosti vidíme na obr. 2.14. Ide o ukážkový príklad CL supercely, pretože má všetky typické supercelárne črty detegovateľné na poli rádiolokačnej odrazivosti. Na juhozápadnom okraji supercely zostupujúce hydrometeory formujú na zadnej stane mezocyklóny hákovité echo. Z južnej strany do oblaku

vteká teplý vzduch. Na pravej strane mezocyklóny je vyznačená približná poloha BWER. Hydrometeory v oblasti FFD výtoku pripomínajú tvar písmena V.

Črty búrok na poli rádiolokačnej odrazivosti vo všeobecnosti vypovedajú o intenzite búrok. Dlho pretrvávajúce črty tiež zvyšujú pravdepodobnosť výskytu nebezpečných javov, ako je downburst⁶, intenzívne krupobitie, tornádo a pod. Niekedy sú vyššie menované črty v supercele prítomné len veľmi krátku dobu, prípadne sa niektoré nevyskytujú vôbec.



Obr. 2.14 - Typické črty supercely na poli rádiolokačnej odrazivosti, USA (prevzaté a upravené, http://www.personal.psu.edu/gmm5106/blogs/meteo_361).

2.5 Družicové črty

Klasické meteorologické družice vidia len hornú hranicu oblačnosti (HHO) búrok, a teda nie sú schopné priamo pozorovať ich vnútornú štruktúru. No vzhľadom k tomu, že HHO je výsledkom procesov prebiehajúcich vnútri oblaku, vzhľad HHO môže do istej miery nepriamo vypovedať o týchto procesoch (Setvák a kol., 2008).

HHO sledujeme na poli tzv. jasovej teploty, ktorú v meteorológii určujeme pomocou Planckovho zákona najmä z radiancie tepelného kanálu IR 10,8 μm. Jasovú teplotu nemôžeme priradiť priamo k termodynamickej, nakoľko sme pri použití Planckovho zákona pokladali oblak za absolútne čierne teleso. Tieto rozdiely však pri rozoznávaní význačných štruktúr HHO nehrajú podstatnú úlohu.

Doposial' existujú štúdie zamerané na súvis význačných čŕt družicových snímok s nebezpečnými javmi na zemskom povrchu len pre územie Severnej Ameriky

⁶ Veľmi silný zostupný konvektívny prúd, ktorý je príčinou vzniku ničivého divergentného vetra pri zemskom povrchu.

(McCann, 1983), z ktorých vyplýva, že z cca 900 prípadov (v USA) bolo 50 % spojených s tornádom F2⁷ (Meteorologický slovník, 1993) a 70 % s výskytom nebezpečných prejavov počasia (krúpy, silný vietor).

2.5.1 Studený U/V tvar

Studený U/V (angl. cold U/V) tvar identifikujeme na poli jasovej teploty. Či tento jav pripomína tvar písmena U alebo V môže byť dôsledkom polohy družice voči oblaku, no tiež sa môže jednať o dôsledok rôzneho relatívneho prúdenia voči pohybu oblaku na úrovni jeho nákovy (Setvák a kol., 2008).

Oblasti vnútri sudeného U/V sú označované ako CWA (Close-in Warm Area) a DWA (Distant Warm Area) (Heymsfield, 1983a; Heymsfield, 1983b). Teplotný rozdiel medzi CWA a minimom v rámci studeného U je často používaný ako jedna z charakteristík studených U (Setvák a kol., 2008).



Obr. 2.15 – Snímka z družice NOAA, kanál *IR 11.0*, 24.4.2007, 22:11 UTC, Mexiko (http://cimss.ssec.wisc.edu/goes/blog/archives/date/2007/04/25).

Výrazné studené U/V môžeme vidieť na obr. 2.15, ktorý znázorňuje pole jasovej teploty HHO supercely na hraniciach Mexika a Texasu v USA. Na obr. 2.15 vidíme studené U s minimálnou jasovou teplotou -67 °C a vo vnútri studeného U vidíme prestreľujúce vrcholky s minimálnou teplotou -78 °C, okolo ktorých pozorujeme teplejšie oblasti CWA, a v smere výškového prúdenia DWA. Nad oblasťou studeného U je viditeľná vlečka (kapitola 2.5.3), ktorá vykazuje vyššiu jasovú teplotu ako oblasť pod ňou.

⁷ Klasifikácia intenzity tornád podľa Fujitovej stupnice, ktorá hodnotí rýchlosť vetra podľa spôsobených škôd. Tornádo F2: 50 – 70 m/s.

2.5.2 Studený prstenec

Na poli jasovej teploty konvektívnych oblakov niekedy pozorujeme jav analogický studenému U/V, kedy štruktúra HHO pripomína studený prstenec (v angl. *cold-ring*). Tento jav vidíme na snímke na obr. 2.16 znázorňujúcej pole jasovej teploty HHO, pričom v pravej časti je snímka farebne upravená. Pri týchto konvektívnych bunkách sa minimum teploty HHO vyskytuje na okrajoch nákovy v podobe uzatvoreného chladného prstenca s teplejšou oblasťou vo vnútri – CWS (z angl. *central warm spot*) (Setvák a kol., 2008).



Obr. 2.16 - Snímka z družice NOAA, kanál *IR 10.8* μm, vľavo neupravená, vpravo farebne zvýraznená snímka, 9.5.2003, 20:30 UTC, Podunajská nížina (Simon a kol., 2007).

Najvýraznejšie prstence môžu mať priemer oblasti CWS až do 30 km. Teplotný rozdiel medzi maximom CWS a minimom studeného prstenca sa pohybuje od niekoľkých do 15 K (Setvák a kol., 2008). Tento ukazovateľ taktiež nie je smerodajný pre intenzitu konvektívnej bunky (viď problém popísaný v úvode kapitoly 2.5).

Existuje niekoľko možných vysvetlení pre vznik CWS, identických s mechanizmom vzniku CWA. Jedno z nich tvrdí, že CWS (CWA) by mohlo byť prejavom obtekania oblasti prestreľujúcich vrcholkov (Řezáčová a kol., 2007). Toto vysvetlenie sa nazýva záveterné efekty (angl. *wake effects*). Ďalšie možné vysvetlenie je, že CWS (CWA) je spôsobené prítomnosťou "vyskakujúcich cirrov" generovaných kolapsom prestreľujúcich vrcholkov (Wang, 2007), jav v meteorológii označený ako *gravity wave breaking mechanism* (Fujita, 1982).

V súčasnosti prevláda názor, že tvar studeného U/V či prstenca môže závisieť na charaktere prúdenia v horných hladinách búrok, čomu napovedajú aj prvé predbežné
simulácie, kde potlačenie strihu prúdenia viedlo k zmene charakteru modelovanej búrky zo studeného U/V na studený prstenec. Tomu napovedá aj fakt, že búrky so studeným U/V sú ďaleko častejšie v USA ako v Európe, práve kvôli výraznejšiemu strihu vetra (Setvák a kol., 2008).

Výskyt studeného prstenca spojený so supercelou bol zaznamenaný aj na Slovensku (obr. 2.16). Podrobnú analýzu tohto prípadu možno nájsť v Simon a kol. (2007).

2.5.3 Vlečka

Vlečka sa na družicových snímkach javí ako prúd ľadového materiálu, ktorý je unášaný v smere výškového prúdenia (viď obr. 2.17). Zvyčajne "pramení" niekoľko km posunutá od primárneho prestreľujúceho vrcholku (Setvák a Doswell, 1991).

Vlečka je vertikálne oddelená od nákovy, ktorá je cez ňu niekedy viditeľná, čo nasvedčuje tomu, že je pravdepodobne riedka a tenká. Môžeme ju vidieť aj na poli jasovej teploty HHO ako teplotný rozdiel jasovej teploty medzi vlečkou a okolím (viď obr. 2.15).



Obr. 2.17 – Snímka z družice NOAA, kanál *HRV*, 24.4.2007, 22:11 UTC, Mexiko (http://cimss.ssec.wisc.edu/goes/blog/archives/date/2007/04/25).

Z numerických simulácií vyplýva, že zdroj vlhkosti pre vlečku je kupola, teda nie vrchol, ktorý je oveľa suchší a studenší. Po odtrhnutí cirrov od kupoly nastáva adiabatický proces, teda ľadové častice tvoriace vlečku už nemenia výšku a pohybujú sa pozdĺž príslušnej izentropickej plochy.

Kolísanie intenzity *updraftu* vyvoláva gravitačné vlny, ktoré spôsobujú transport hydrometeorov do stratosféry. Tento mechanizmus podnecuje zmiešavanie vzduchu v oblaku

so stratosférickým vzduchom a vlečka sa tak niekedy javí teplejšia ako nákova pod ňou (Setvák a kol., 2008).

2.6 Typy superciel

V súčasnosti poznáme tri základné typy superciel:

- LP Low Precipitation (Burgess and Davies-Jones 1979; Bluestein and Parks 1983),
- HP Heavy Precipitation (Doswell a kol. 1990; Moller a kol. 1994).
- CL Classic Supercell (Browning 1964; Lemon and Doswell 1979),

Sú identifikované podľa množstva zrážok v tylovej časti supercely (región RFD). Spektrum supercely je spojité, čo znamená, že napr. pôvodne LP supercela sa môže vyvinúť do CL a nakoniec aj do HP formy (Bluestein a Woodall, 1990).

2.6.1 LP supercela

Prvá známka o LP supercele bola zaznamenaná koncom 60-tych rokov minulého storočia (Rasmussen a Straka, 1998). Vzniká hlavne v USA v okolí tzv. dryline⁸ (Moller a kol., 1994) východne od Rocky Mountains a západne od Great Plains. Je pre ňu typická hodnota CAPE (viď. kapitola 3.1) okolo 2900 J.kg⁻¹ a relatívne vysoká hladina voľnej konvekcie⁹ (Meteorologický slovník, 1993) (angl. *level of free convection*) zvyčajne nad 2200 m (Rasmussen a Straka, 1998). LP supercely tiež málokedy produkujú tornáda (Rasmussen a Straka, 1998).

V typickej LP supercele prevládajú výstupné prúdy, zostupné sú menej vyvinuté alebo nevyvinuté. Je charakterizovaná malým množstvom zrážok v oblasti RFD, ako môžeme vidieť na obr. 2.18. V blízkosti *updraftu*, konkrétne na náveternej strane, kde sa obvykle oblasť RFD nachádza, nie sú výraznejšie zrážky, z čoho pochádza aj názov LP supercely – *low precipitation*. Na poli rádiolokačnej odrazivosti majú často nízke odrazivosti, no napriek tomu môžu produkovať veľké krúpy.

⁸ V USA hranica oddeľujúca suchý vzduch vo vnútrozemí na západe a vlhký vzduch na juhovýchode krajiny pochádzajúci z Mexického zálivu. Cez deň postupuje na východ, v noci ustupuje na západ. Existencia takého systému v Európe nebola dokázaná.

⁹ Hladina voľnej konvekcie – výška, v ktorej začína výstup vzduchových častíc len na úkor energie instability atmosféry, teda bez pôsobenia vonkajších síl.



Obr. 2.18 - Horizontálna štruktúra LP supercely (Doswell a Burgess, 1993).

LP supercela je veľmi dobre pozorovateľná a je na nej vizuálne jednoduchšie rozoznateľná rotácia práve kvôli minimálnym zrážkam v okolí updraftu (Burgess a Davies-Jones, 1979) a nedostatku strednej oblačnosti (obr. 2.20) (Doswell a Burgess 1993).

Vertikálnu štruktúru LP supercely vidíme na obr. 2.19. Silný updraft je v oblasti bez zrážok a práve kvôli nedostatku zrážkových častíc v mezocyklóne býva rotácia na poli dopplerovskej rýchlosti obvykle ťažko detegovateľná (Doswell a Burgess, 1993). V LP supercele taktiež nezaznamenávame hákovité echo (Rasmussen a Straka, 1998).



Obr. 2.19 - Vertikálna štruktúra LP supercely (Doswell Obr. 2.20 - Fotografia LP supercely (W. Faidley, a Bugess, 1993).

1996).

2.6.2 HP supercela

HP supercela sa môže vyvíjať vo všetkých oblastiach USA (Moller a kol., 1990; Johns a kol., 1993) a vyskytuje sa aj v Európe. Vizuálne je zložité ju pozorovať, pretože sa zvyčajne tvorí vo vlhkom oblačnom prostredí (Doswell a Burgess, 1993). Je mohutnejšia ako LP supercela, čo môžeme vidieť aj porovnaním obrázkov 2.18 a 2.21, rozdiel vidieť aj porovnaním obrázkov 2.19 a 2.22.



Obr. 2.21 - Horizontálna štruktúra HP supercely (Doswell a Burgess, 1993).

HP supercela obsahuje veľké množstvo zrážok v tylovej časti, a tak v prízemnej vrstve napokon dominuje cirkulácia spojená s RFD výtokom. Na poli rádiolokačnej odrazivosti niekedy pozorujeme hákovité echo s vyššími odrazivosťami ako v jadre HP supercely. Typické hákovité echo HP supercely vidíme na obr. 2.21, kedy sa veľké množstvo hydrometeorov obtáča okolo mezocyklóny a črta na poli rádiolokačnej odrazivosti má skôr "fazuľovitý" tvar (Rasmussen a Straka, 1998).

Hydrometeory obtáčajúce sa okolo mezocyklóny obvykle znemožňujú pozorovanie *wall cloud* alebo tornáda, čo je jedna z najnebezpečnejších vlastností HP supercely. HP supercela častejšie produkuje tornáda ako LP supercela, no ich intenzita je obvykle redukovaná dominanciou zostupných pohybov v tylovej časti, t.j. RFD výtokom (Rasmussen a Straka, 1998).

Fotografiu HP supercely môžeme vidieť na obr. 2.23. Ak ju porovnáme s obr. 2.21, vidíme, že supercela je odfotografovaná z južnej až juhovýchodnej strany a na fotografii je zachytený *shelf cloud* na čele RFD výtoku.



Obr. 2.22 - Vertikálna štruktúra HP supercely Obr. 2.23 - Fotografia HP supercely (R. Edwards, 2001).

HP supercela vzniká v prostredí, v ktorom sú v stredných hladinách (3-7 km) nízke relatívne rýchlosti vetra (SRW, viď kapitola 4.5). Predpokladá sa, že kvôli silnej rotácii v spodných a stredných hladinách a slabom strihu vetra v stredných hladinách sa zrážky môžu nachádzať aj v mezocyklóne (Brooks a kol., 1994a). HP supercela môže byť súčasťou väčších konvektívnych komplexov, prípadne viac HP superciel môže vytvoriť tzv. *squall line*¹⁰.

Vývoj HP supercely môže niekedy skončiť aj ako *bow echo* (oblúkové echo) (Moller a kol., 1994). Situáciu dobre znázorňuje obr. 2.24.



Obr. 2.24 - Vývoj HP supercely, plné čiary schematicky znázorňujú pole rádiolokačnej odrazivosti v spodných hladinách, gust fronty sú označené symbolmi atmosférických frontov (Moller a kol., 1994).

¹⁰ Čiara búrok s dĺžkou od niekoľkých desiatok do stoviek km. Často vzniká na rýchlo postupujúcich studených frontoch.

Na obr. 2.24 vidíme, že vo fáze 4 má črta HP supercely na poli rádiolokačnej odrazivosti fazuľovitý tvar, potom môže dôjsť k dvom možnostiam. Buď dôjde k prerodu HP supercely na *bow echo*, alebo fazuľovitý tvar ešte mohutnie a na poli rádiolokačnej odrazivosti nakoniec detegujeme mohutné jadro vysokej rádiolokačnej odrazivosti (Moller a kol., 1994).

2.6.3 CL supercela

Klasická supercela je najplodnejším producentom tornád spomedzi všetkých typov superciel. Má veľmi dobre vyvážené výstupné a zostupné pohyby. FFD obvykle vzniká na severovýchod od mezocyklóny a je sprevádzaný silnými zrážkami. RFD býva obvykle bez zrážok (Lemon a Doswell 1979).

CL supercela sa zväčša vyvíja ako mohutná izolovaná konvektívna bunka oddelená od ostatných búrok. Väčšinou má jednoznačné črty na poli rádiolokačnej odrazivosti ako hákovité echo a BWER (Chisolm a Renick, 1972; Lemon, 1980).



Obr. 2.25 - Horizontálna štruktúra CL supercely (Doswell a Burgess, 1993).

Obr. 2.26 – Družicová snímka, RGB kompozit kanálov *IR 10.8* µm a *HRV*, SEVIRI, MSG, *flanking line*, 16.8.2010 (prevzaté a upravené, http://www.eumetsat.int/Home/index.htm).

Pri CL supercele sa zvyčajne zo strany proti smeru vektora strihu vetra vytvárajú nové jadrá pozdĺž línie - *flanking line* (Fujita, 1960), viditeľné na obr. 2.25 ako "chvost" búrky (na obr. 2.26 označené červenými šípkami).

CL supercela sa často vytvára v prostredí s výrazným strihom vetra (kapitola 3.1) v spodných a stredných hladinách, v čom sa líši od HP supercely. CL supercele sa nebudeme d'alej venovať, pretože jej štruktúra je veľmi podobná štruktúre typickej supercely (kapitola 2.3).

3 Dynamika supercely

Typickou vlastnosťou supercely je jej špecifický pohyb, ktorého smer sa výrazne odchyľuje od priemerného smeru vetra v oblačnej vrstve. Taktiež sa zvyčajne stáčajú doprava (v smere hodinových ručičiek) od prevládajúceho prúdenia, no existuje malé percento superciel stáčajúcich sa doľava (v protismere hodinových ručičiek).

Supercela sa môže štiepiť na dve opačne rotujúce bunky, ktoré sa pri svojom pohybe od seba vzďaľujú a jedna z nich vo väčšine prípadov zaniká.

3.1 Vertikálny strih vetra

Vertikálny strih vetra je vektor definovaný ako rozdiel medzi vetrom v dvoch hladinách

$$\Delta \vec{V} = \vec{V}_{TOP} - \vec{V}_{BOT}, \qquad (3.1)$$

kde *V*_{TOP} je vektor prúdenia vo vyššej hladine a *V*_{BOT} je v nižšej hladine.

Vektor strihu vetra smeruje od nižšej k vyššej hladine a medzi dvomi danými hladinami tvorí segment hodografu (viď kapitola 3.2), čo znázorňuje obr. 3.1. V kartézskych súradniciach predstavuje os "u" v kladnom zmysle západný smer, os "v" predstavuje v kladnom zmysle južný smer. Aby sme videli zmenu strihu vetra, potrebujeme údaje



Obr. 3.1 – Vertikálny strih vetra (Doswell, 1991).



Obr. 3.2 – Zmena vertikálneho strihu vetra (Doswell, 1991).

minimálne z troch hladín. Tri hladiny profilu vetra zobrazujú dva vektory vertikálneho strihu, ktoré sú znázornené na obr. 3.2. Zmena vertikálneho strihu vetra $\Delta(\Delta \vec{V})$ je potom

$$\Delta(\Delta \vec{V}) = \Delta \vec{V}_2 - \Delta \vec{V}_1, \qquad (3.2)$$

na obrázku znázornená prerušovanou šípkou (Doswell, 1991).

Vektor vertikálneho strihu vetra môže byť nenulový aj pri konštantnom smere vetra, tzn. že sa mení len jeho rýchlosť (Doswell, 1991), čo má dôsledky na ďalší vývoj supercely (podrobnejšie analyzované v kapitole 3.4).

Vertikálny strih vetra má významný vplyv na vývoj oblaku (Doswell, 1991). Vertikálny profil vetra pozostáva z rôznych rýchlostí a smerov vetra vo viacerých hladinách. Vietor sa obvykle s rastúcou výškou stáča v smere hodinových ručičiek. Nové bunky majú tendenciu vznikať v proti smere vektora strihu vetra na pravom boku systému alebo v jeho pravej zadnej časti (Řezáčová a kol., 2007).

Vertikálnemu strihu vetra v jednotlivých konvektívnych systémoch, ako aj v rôznych typoch superciel, sa podrobnejšie venujeme v kapitole 4.2.

3.2 Grafické zobrazovanie vertikálneho strihu vetra - hodograf

Na grafické zobrazovanie vertikálneho strihu vetra využívame hodograf. Na vytvorenie hodografu musíme poznať smer a veľkosť vektora vetra vo viacerých výškových hladinách.

Obrázok 3.3 znázorňuje vertikálny priebeh teploty vzduchu, no v tomto prípade je dôležitý profil vetra, ktorý je znázornený v pravej časti. V rôznych hladinách vidíme rôzne rýchlosti a smery vetra. Je tu pozorovateľný *veering*¹¹ a *backing*¹² vetra, no je zložité si pomocou tohto grafu predstaviť zmenu rýchlosti vetra s rastúcou výškou, na čo je vhodný hodograf (Doswell, 1991).

¹¹ Vietor sa nad danou oblasťou stáča v smere hodinových ručičiek.

¹² Vietor sa stáča proti smeru hodinových ručičiek.





Obr. 3.3 - Skew-T diagram (weather.uwyo.edu/ upperair/sounding.html).

Obr. 3.4 – Hodograf (pre iný prípad ako na obr. 3.4) (http://www.meted.ucar.edu/ mesoprim/hodograf/print.htm).

Zmeny rýchlosti a smeru vetra však dobre popisuje hodograf (obr. 3.4, obrázky nepopisujú tú istú situáciu). Kružnice znázorňujú rýchlosť vetra po 10 m.s⁻¹. Čísla na krivke označujú výšku hladiny, v ktorých boli hodnoty namerané s vertikálnym krokom 1 km. Dĺžky šípiek závisia od rýchlosti vetra. Smer šípiek v hodografe predstavuje vektor vetra v danej výškovej hladine. Do hodografu ho vynášame podobne ako smer vetra v synoptickej meteorológii. Pospájaním jednotlivých koncových bodov vektorov vetra v susedných hladinách v smere od nižšej k vyššej hladine dostávame hodograf (Doswell, 1991).



Obr. 3.5 – (a) Hodograf popisujúci strih vetra, v ktorom sa formujú obyčajne konvektívne bunky, (b) zakrivený a dlhý hodograf supercelárneho prostredia (http://www.crh.noaa.gov/lmk/soo/docu/supercell.php).

Obrázok 3.5a znázorňuje profil vetra obyčajnej konvektívnej bunky. Je zjavné, že ani rýchlosť, ani smer vetra sa s výškou podstatne nemenia. Smer vetra je vo všetkých hladinách veľmi podobný s pohybom oblaku. Toto neplatí pre supercelu. Z obr. 3.5b možno jednoznačne odčítať stáčanie vetra predovšetkým v spodných hladinách. Častým prípadom je zmena smeru vetra v spodných hladinách, ustálenie v stredných hladinách a zvyšovanie rýchlosti vetra v stredných a vyšších hladinách, čo spôsobuje naklonenie *updraftu* (Doswell, 1991).

3.3 Rotácia v supercele

V ranom štádiu vývoja izolovaného kopovitého oblaku strih vetra zvyčajne prekáža konvekcii, pretože má tendenciu oddeľovať vystupujúce bubliny, čím bráni vzniku perzistentného *updraftu*. Ak sa za vhodných podmienok *updraft* vyvinie v strihovom prostredí, strih vetra môže vyvolať rotáciu *updraftu* okolo vertikálnej osi (Řezáčová a kol., 2007).

Skôr než sa začneme podrobne venovať vzniku rotácie v supercele, sformulujme pohybové rovnice s využitím Boussinesqovej aproximácie (zanedbávame trenie a Coriolisovu silu)

$$\frac{du}{dt} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p'}{\partial x},\tag{3.3}$$

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p'}{\partial y},\tag{3.4}$$

$$\frac{dw}{dt} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p'}{\partial z} + B.$$
(3.5)

B je vztlaková sila a u, v, w sú zložky vektora rýchlosti prúdenia V, p' označuje perturbačný tlak (Bluestein, 1993).

Dôležitou vektorovou veličinou na sledovanie dynamických procesov v oblaku je vorticita, ktorá charakterizuje vírivú štruktúru prúdenia (Bluestein, 1993; Řezáčová a kol., 2007). Vorticitu ω dostávame, ak aplikujeme operáciu rotácie na vektor rýchlosti prúdenia V (u, v, w) (Meteorologický slovník, 1993)

$$\vec{\omega} = \nabla \times \vec{V} = \vec{i}\eta + \vec{j}\xi + \vec{k}\zeta, \qquad (3.6)$$

i, j, k sú jednotkové vektory v smere osí x, y, z a η, ξ, ζ sú zložky vektora vorticity ω , ktoré sa dajú vyjadriť ako

$$\eta = \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z}, \xi = \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x}, \zeta = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}.$$
(3.7)

Potom môžeme sformulovať pohybovú rovnicu vo vektorovom tvare

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} = -\nabla \left(\frac{\vec{V}.\vec{V}}{2} + \frac{p'}{\rho_0} \right) + \vec{V} \times \vec{\omega} + B\vec{k}.$$
(3.8)

Aplikujme operáciu $\nabla \times (3.5)$ Dostávame výraz

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = \nabla \times (\vec{V} \times \vec{\omega}) + \nabla \times (B\vec{k}).$$
(3.9)

Na analýzu rotácie v supercelách nám stačí vertikálna zložka v (3.6), $\zeta = k.\omega$.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = \vec{k} \cdot \nabla \times (\vec{V} \times \vec{\omega}) + \vec{k} \cdot \nabla \times (B\vec{k}) = \vec{k} \cdot \nabla \times (\vec{V} \times \vec{\omega}), \qquad (3.10)$$

teda $\vec{k}.\nabla \times (\vec{Bk}) = 0$, pretože vztlak negeneruje priamo vertikálnu rotáciu v oblaku. Generuje len horizontálnu vorticitu, čo môžeme ukázať tak, že zoberieme napr. zložku y horizontálnej vorticity ξ a za *u* a *w* dosadíme z rovníc (3.3) a (3.5). Potom dostávame



Obr. 3.6 - Vznik horizontálnej vorticity v spodných hladinách oblaku, prevzaté a upravené (Řezáčová a kol., 2007).

Horizontálna vorticita sa teda vytvára vplyvom horizontálneho gradientu vztlaku. Situáciu znázorňuje obr. 3.6a. Maximum záporného vztlaku je v strede *downdraftu*. Symetricky po oboch stranách *downdraftu* vznikajú horizontálne gradienty vztlaku opačného znamienka. Vytvárajú sa tak opačne orientované centrá rotácie. Šírenie tohto studeného výtoku zobrazuje obr. 3.6b. Pretože sa gradient vztlaku zachováva, zachováva sa aj centrum horizontálnej vorticity. Vzniká horizontálne orientovaný vortex v tvare prstenca, ktorý obopína celý oblak (Řezáčová a kol., 2007).

3.3.1 Pôvod rotácie v supercele

Uvažujme vzťah (3.10). Matematickými úpravami sa dá ukázať, že

$$\vec{k} \cdot \nabla \times (\vec{V} \times \vec{\omega}) = \frac{\partial}{dx} (w\eta - u\zeta) - \frac{\partial}{\partial y} (v\zeta - w\xi), \qquad (3.12)$$

a keď dosadíme do (3.10) dostávame

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = -u \frac{\partial \zeta}{\partial x} - v \frac{\partial \zeta}{\partial y} - w \frac{\partial \zeta}{\partial z} - \zeta \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}\right) + \eta \frac{\partial w}{\partial x} + \xi \frac{\partial w}{\partial y}.$$
 (3.13)

Vzťah (3.13) môžeme prepísať do jednoduchšej formy

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = -\vec{V} \cdot \nabla \zeta - \zeta \,\nabla_H \cdot \vec{V} + \vec{\omega_H} \cdot \nabla_H w. \tag{3.14}$$

Ak vezmeme do úvahy Boussinesqovu rovnicu kontinuity

$$\nabla \cdot \vec{V} = \nabla_H \cdot \vec{V} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \qquad (3.15)$$

dostávame rovnicu lokálnej zmeny vertikálnej vorticity

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = \left[-\vec{V} \cdot \nabla \zeta \right] + \left[\zeta \frac{\partial w}{\partial z} \right] + \left[\vec{\omega}_{H} \cdot \nabla_{H} w \right].$$
(3.16)
lokálna zmena
vertikálnej vorticity =
$$\begin{bmatrix} advekčný \\ člen \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} naťahovací \\ člen \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} nakláňací \\ člen \end{bmatrix}$$

Z rovnice (3.16) vidíme, že jediný člen, ktorý nie je závislý na preexistencii vertikálnej vorticity, je člen nakláňací. Tento člen popisuje tvorbu vertikálnej vorticity

procesom nakláňania horizontálnej vorticity *updraftom* v prostredí s vertikálnym strihom horizontálneho prúdenia (preto je tento člen "nakláňací"). Tomuto členu sa priraďuje aj najväčší význam ohľadne tvorby vorticity v supercelách (Doswell, 1991; Řezáčová a kol., 2007).

Prvý člen na pravej strane predstavuje advekciu vertikálnej vorticity. Druhý člen vyjadruje zmenu rýchlosti prúdenia vo vertikálnom smere. Ak *w* rastie s výškou a $\zeta > 0$, dochádza k naťahovaniu vortexu, zvyšovaniu konvergencie a zosilňovaniu rotácie prúdenia (Bluestein, 1993).

Vráťme sa ešte k nakláňaciemu členu rovnice (3.16). Ak strih vetra s výškou nemení smer, tzn. s výškou narastá len rýchlosť vetra, je $\frac{\partial u}{\partial z} > 0$ a na južnej strane oblaku je $\frac{\partial w}{\partial y} > 0$. Nakláňací člen (3.16) prechádza na jednoduchý tvar

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = \frac{\partial u}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial y} > 0.$$
(3.17)

Na južnej strane oblaku vzniká kladná vertikálna vorticita (Bluestein, 1993). Situáciu ilustruje obr. 3.7. Do oblaku vteká vzduch v spodných hladinách od východu a v horných hladinách vyteká na východ (na obr. 3.7 vyznačené bielymi valcovitými šípkami). Zatočené šípky zobrazujú horizontálnu vorticitu v severojužnom smere. Malé šípky vo vnútri oblaku ukazujú smer vynúteného výstupu vzduchu po stranách a zostupu vzduchu v strede. Vtekajúci vzduch sa v oblaku dostáva do výstupného prúdu, vortex sa deformuje a na južnej strane oblaku vzniká kladná (cyklonálna) vertikálna vorticita. Súčasne na severnej strane spôsobuje nakláňanie vortexu zápornú (anticyklonálnu) vertikálnu vorticitu. Cyklonalita (anticyklonalita) má teda zmysel len pre označenie smeru rotácie, no stále hovoríme o výstupnom prúde s kladnou vertikálnou rýchlosťou (Řezáčová a kol., 2007).

Numerické simulácie aj dáta z dopplerovských rádiolokátorov potvrdzujú, že naklonenie horizontálnej vorticity je dôležité pre vznik vertikálnej vorticity v strihovom prostredí. Obr. 3.7a je typický príklad ranného štádia konvekcie, kvôli opačne orientovaným centrám vertikálnej vorticity. Opačne rotujúce víry zvyšujú vťahovanie okolitého vzduchu do oblaku z východnej strany, zvyčajne v stredných hladinách (Řezáčová a kol., 2007). Obr. 3.7b už znázorňuje štiepenie supercely (viď kapitola 3.4) (Klemp, 1987).



Obr. 3.7 – (a) Vznik vertikálnej rotácie v supercele, (b) štiepenie supercely (Klemp, 1987).

3.4 Štiepenie supercely

Štiepením supercely vznikajú dve samostatné bunky, ktoré sa pri svojom pohybe od seba vzďaľujú. Cyklonálne rotujúca bunka sa označuje *right-mover* (ďalej RM) a anticyklonálne rotujúca bunka *left-mover* (ďalej LM) (Klemp, 1987; Wilhelmson a Klemp, 1987; Bluestein, 1993; Řezáčová a kol., 2007).

Štiepenie supercely nespôsobuje silný *downdraft*, len ho podporuje. Numerické simulácie ukázali, že supercela sa môže štiepiť, aj keď v simulácii vypneme vypadávanie zrážok. Bez klesajúcej zrážkovej vody sa záporný vztlak potrebný na vývoj zostupného prúdu do veľkej miery redukuje. V simuláciách však napriek tomu pokračovala spojitá regenerácia na okrajoch oblaku a pokračovalo aj štiepenie (Rotunno a Klemp, 1982).

Analyzujme situáciu matematicky. Aplikujme operátor $\nabla \cdot$ na pohybové rovnice (3.3) - (3.5). Po súčte dostávame

$$\frac{1}{\rho_0} \nabla^2 p' = -\left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] - 2 \left[\frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial y} \right] + \frac{\partial B}{\partial z}. \quad (3.18)$$

Konvektívne bunky vplývajú na okolité prúdenie, preto musíme k zložkám vektora rýchlosti prúdenia prirátať aj perturbačnú zložku

$$u(x, y, z, t) = \overline{u(z)} + u'(x, y, z, t),$$

$$v(x, y, z, t) = \overline{v(z)} + v'(x, y, z, t),$$

$$w(x, y, z, t) = 0 + w'(x, y, z, t).$$

(3.19)

Dosadením (3.19) do (3.18) dostávame

$$\nabla^{2} p' = -\rho_{0} \left[\left(\left(\frac{\partial u'}{\partial x} \right)^{2} + \left(\frac{\partial v'}{\partial y} \right)^{2} + \left(\frac{\partial w'}{\partial z} \right)^{2} \right) + \left(2 \frac{\partial u'}{\partial y} \frac{\partial v'}{\partial x} + 2 \frac{\partial u'}{\partial z} \frac{\partial w'}{\partial x} + 2 \frac{\partial v'}{\partial z} \frac{\partial w'}{\partial y} \right) \right] - \rho_{0} \left[2 \frac{\partial \overline{u}}{\partial z} \frac{\partial w'}{\partial x} + 2 \frac{\partial \overline{v}}{\partial z} \frac{\partial w'}{\partial y} \right] + \rho_{0} \frac{\partial B}{\partial z}.$$

$$(3.20)$$

Na základe (3.20) môžeme perturbačný tlak rozdeliť na dynamickú a vztlakovú zložku (Wilhelmson, 1974; Rotunno a Klemp, 1982, 1985), pričom pri dynamickej zložke je potrebné zvlášť analyzovať nelineárne (kapitola 3.4.1) a lineárne vplyvy (kapitola 3.4.2).

$$p' = p'_{dyn} + p'_B = p'_{NL} + p'_L + p'_B.$$
(3.21)

Vztlaková zložka tlakových perturbácií závisí len od samotného vztlaku.

$$\nabla^2 p'_B = \rho_0 \frac{\partial B}{\partial z}.$$
(3.22)

3.4.1 Vznik nových updraftov

Zamerajme sa na nelineárne dynamické perturbácie, t.j. prvá hranatá zátvorka v (3.20). Druhý "strihový" člen môžeme rozpísať ako

$$2\frac{\partial u'}{\partial y}\frac{\partial v'}{\partial x} + 2\frac{\partial u'}{\partial z}\frac{\partial w'}{\partial x} + 2\frac{\partial v'}{\partial z}\frac{\partial w'}{\partial y} = \frac{1}{2}\left[\left(\frac{\partial v'}{\partial x} + \frac{\partial u'}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial v'}{\partial z} + \frac{\partial w'}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial u'}{\partial z} + \frac{\partial w'}{\partial x}\right)^2\right] - \frac{1}{2}\left[\left(\frac{\partial v'}{\partial x} - \frac{\partial u'}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial v'}{\partial z} - \frac{\partial w'}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial u'}{\partial z} - \frac{\partial w'}{\partial x}\right)^2\right].$$

Zaujíma nás len efekt vertikálnej rotácie a zanedbávame deformačné členy. Môžeme tak nelineárne tlakové perturbačné vplyvy zapísať ako

$$\nabla^2 p'_{NL} = \frac{\rho_0}{2} \left(\frac{\partial v'}{\partial x} - \frac{\partial u'}{\partial y} \right)^2 = \frac{\rho_0}{2} \zeta'^2.$$
(3.23)

Ak vezmeme do úvahy, že $\nabla^2 p' \approx -p'$, môžeme rovnicu (3.23) prepísať do tvaru

$$p'_{NL} \approx -\zeta'^2. \tag{3.24}$$

Z (3.24) teda vidíme, že cyklonálna aj anticyklonálna vorticita produkuje záporný perturbačný tlak. Záporné perturbácie tlaku sú väčšie, keď je rotácia silnejšia. V supercele je rotácia obvykle najsilnejšia v stredných hladinách, kde detegujeme mezocyklónu. Záporné perturbácie tlaku v stredných hladinách indukujú vertikálnu zložku sily tlakového gradientu, ktorá podporuje vznik nových *updraftov* po bokoch oblaku, kde, ako sme ukázali v kapitole 3.3, je vorticita najsilnejšia (obr. 3.7a). Pozrime sa na obr. 3.7b. Pôvodný *updraft* postupne zaniká a nastáva štiepenie supercely. Taktiež sa presúva vtok teplého a vlhkého vzduchu do polohy kolmo na vektor strihu vetra (na obr. 3.7b označené prerušovanými valcovitými šípkami) (Bluestein, 1993).

Ak vezmeme do úvahy aj deformačné členy, t.j. prvý člen nelineárnych dynamických perturbácií tlaku v (3.20) a využijeme rovnakú aproximáciu ako v (3.24), dostávame

$$p' \approx \rho_0 \left[\left(\frac{\partial u'}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v'}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w'}{\partial z} \right)^2 + \dots \right] > 0.$$
(3.25)

Z (3.25) vidíme, že kladné tlakové perturbácie sú najväčšie tam, kde je výraznejšie naťahovanie vortexu. To sa vzhľadom na pole divergencie prúdenia deje najmä v dolných a horných hladinách oblaku¹³ (Bluestein, 1993; Houze, 1993).

Nelineárne tlakové perturbácie sú následkom vertikálneho strihu vetra a naťahovania vortexu. V oblasti začne pôsobiť sila tlakového gradientu, čím dochádza k naťahovaniu *updraftu* aj bez vplyvu vztlaku¹⁴. Preto je supercela silnejšia ako obyčajná konvektívna bunka, hoci sa môže vyskytnúť v prostrediach s rovnakým CAPE (viď kapitola 4.1) (Bluestein, 1993).

3.4.2 Podpora right (left) movera

Uvažujme teraz lineárne vplyvy perturbačného tlaku. Využijeme druhý člen (3.20).

$$\nabla^2 p'_L = -\rho_0 \left[2 \frac{\partial \overline{u}}{\partial z} \frac{\partial w'}{\partial x} + 2 \frac{\partial \overline{v}}{\partial z} \frac{\partial w'}{\partial y} \right] = -2\rho_0 \frac{\partial \overline{V}}{\partial z} \nabla w',$$

čo môžeme po aproximácii opäť prepísať do tvaru

$$p'_{L} \approx 2\rho_{0} \frac{\partial \vec{V}}{\partial z} \nabla w'.$$
(3.26)

Ak vektor vertikálneho strihu vetra nemení smer, má len jednu horizontálnu zložku (napr. *x*). Vzťah (3.26) má tvar

$$p'_{L} \approx 2\rho_{0} \frac{\partial \overline{u}}{\partial z} \frac{\partial w'}{\partial x}.$$
 (3.27)

Záporné perturbácie tlaku v stredných hladinách vznikajú na strane po smere vektora strihu vetra a sila tlakového gradientu tu podporuje kladné vertikálne zrýchlenie, čoho dôsledkom je rast nových buniek. Situácia je schematicky načrtnutá na obr. 3.8. Ide o ranné štádium supercely. Sever je naznačený bielou šípkou na podstave. Horizontálny tlakový gradient, rovnobežný s vektorom strihu vetra, je zobrazený bielymi šípkami, ktoré spájajú oblasti vyššieho (H - high) a nižšieho (L - low) perturbačného tlaku. Kruhové šípky znázorňujú oblasti vývoja cyklonálnej (+) a anticyklonálnej (-) vorticity. Dlhé žlté šípky

¹³ Je to spôsobené prevahou záporných divergentných horizontálnych pohybov v dolných hladinách troposféry, ktoré ústia do výstupných pohybov. V hladine nulového vztlaku potom dochádza k divergentným horizontálnym pohybom. V stredných vrstvách je teda vortex najužší a vorticita najsilnejšia.

¹⁴ Sila tlakového gradientu 1 mb.km⁻¹ sa dá porovnať so vztlakovou silou pri teplotnom rozdiele 3 K.

predstavujú v dolných hladinách vtok teplého a vlhkého vzduchu od východu a v horných hladinách vytekanie vzduchu na východ. Krátke zelené šípky predstavujú *updrafty*. V ľavej časti je znázornený vertikálny strih vetra (Klemp, 1987).



Obr. 3.8 - Rozloženie perturbačného tlaku a prúdenia v supercele, rovný hodograf (Klemp, 1987).



Obr. 3.9 - Štiepenie supercely, rovný hodograf (Weisman a Klemp, 1986).

V ďalšom štádiu vývoja supercely môže dôjsť k štiepeniu (spôsobom už preberaným v tejto kapitole). Štiepenie supercely vo vyššie spomínanom strihovom prostredí zobrazuje obr. 3.9. V ľavom hornom rohu je zobrazený rovný hodograf s vertikálnym krokom 2 km, na ktorom oranžová šípka predstavuje vektor strihu vetra, zelená zobrazuje pohyb supercely a červená zobrazuje stredný vektor prúdenia, v pravom dolnom rohu je identifikovaný *updraft* a mezocyklóna. Prerušované šípky znázorňujú pohyb jednotlivých buniek (Klemp, 1987).

V tomto prostredí budú aj po rozštiepení obe bunky supercely, pretože takéto strihové prostredie neuprednostňuje ani kladnú, ani zápornú vorticitu.

Záporné gradienty perturbačného tlaku vyvolávajú vertikálne zrýchlenie a spojitú regeneráciu *updraftov* na oboch bokoch oblaku. Týmto môžeme vysvetliť kvázistacionárnu a dlhodobú existenciu supercely. Taktiež vertikálny tlakový gradient vzniká len po stranách oblaku, a nie na prednej či zadnej strane, takže supercela sa štiepi (Řezáčová a kol., 2007).





Obr. 3.10 – (a) Tlakový gradient v dolných, (b) v stredných, (c) v horných hladinách oblaku (Rotunno a Klemp, 1982).

Obr. 3.11 – Rozloženie perturbačného tlaku a prúdenia v supercele, konkávne zakrivený hodograf (Klemp, 1987).

Strihové prostredie konštantného smeru je veľmi zriedkavé. V praxi sa v supercelárnych prostrediach najčastejšie stretávame so strihom vetra, ktorý s rastúcou výškou mení smer. V tomto prípade už musíme zohľadniť všetky členy v (3.26). Sledujme obr. 3.11 (rovnaký popis ako obr. 3.8). V ľavej časti je zobrazený vertikálny strih vetra (konkávne zakrivený hodograf). Os "y" predstavuje v kladnom zmysle južný smer. Rozoberme vzťah (3.26). V dolných hladinách $\frac{\partial v}{\partial z} \frac{\partial w'}{\partial y}$ spôsobuje orientáciu horizontálneho perturbačného tlakového gradientu na sever (obr. 3.10a). V stredných hladinách, člen $\frac{\partial u}{\partial w'}$

 $\frac{\partial u}{\partial z} \frac{\partial w'}{\partial x}$, smeruje vektor tlakového gradientu na východ (obr. 3.10b) a vo vyšších hladinách

 $\frac{\partial v}{\partial z} \frac{\partial w'}{\partial y}$ orientuje vektor horizontálneho perturbačného tlakového gradientu na juh (obr. 3.10c) (Bluestein, 1993; Houze, 1993).

Dôsledkom strihu vetra teda vznikajú horizontálne tlakové gradienty, ktoré generujú vertikálne tlakové gradienty. Tie pri *veeringu* vetra podporujú výstupné pohyby na južnej strane *updraftu* a po štiepení je preto uprednostňovaný *right-mover*. Na severnej strane pôvodného *updraftu* vertikálny tlakový gradient výstupné prúdy nepodporuje, a preto sa *left-mover* nejaví ako supercela, prípadne rýchlo zaniká (viď obr. 3.12, rovnaký popis ako 3.9) (Bluestein, 1993; Houze, 1993).



Weisman and Klemp, Ray, Ed., 1986 / The COMET Program

Obr. 3.12 – Štiepenie supercely, konkávne zakrivený hodograf (Weisman a Klemp, 1986).

Väčšina superciel rotuje cyklonálne a pri pohybe sa odkláňa doprava od smeru riadiaceho prúdenia. Anticyklonálne rotujúce supercely sa pri svojom pohybe odkláňajú doľava, no sú veľmi zriedkavé, v USA je pomer cca 1:50 (Davies-Jones, 1986). Dôvod, prečo sa väčšina superciel pri svojom pohybe odkláňa doprava od prevládajúceho prúdenia a má cyklonálne rotujúci *updraft*, spočíva v klimatologickej prevahe vertikálneho strihu vetra, ktorého *veering* je spôsobený Coriolisovou silou. Takže aj Coriolisova sila, hoci nepriamo, ovplyvňuje vývoj superciel (Klemp a Wilhelmson, 1978).

4 Predpovedanie superciel

Na vyhodnotenie potenciálu prostredia produkovať supercely sa využíva množstvo indexov. V tejto práci sa budeme venovať len niekoľkým základným z nich.

4.1 CAPE

CAPE (*Convective Available Potential Energy*) je energia v atmosfére dostupná pre konvekciu (Doswell a Rasmussen, 1994; Moncrieff a Miller, 1976). Existuje v podmienene instabilnej atmosfére¹⁵ (Meteorologický slovník, 1993). Počíta sa ako integrál od hladiny voľnej konvekcie¹⁶ (angl. L*evel of Free Convection*) po hornú hranicu konvekcie¹⁷ (angl. Equilibrium Level)

$$CAPE = g \int_{HVK}^{HHK} \frac{T(z) - \overline{T}(z)}{\overline{T}(z)} dz, \qquad (4.1)$$

ktorá je vymedzená krivkami popisujúcimi priebeh virtuálnej teploty vzduchovej bubliny a teploty okolia, ktorá vystupuje od hladiny voľnej konvekcie po hornú hladinu konvekcie (Bednář a kol., 1993).



Obr. 4.1 - Skew-T diagram, oblast' CAPE (zdroj: internet).

¹⁵ Stav, kedy hodnota skutočného vertikálneho teplotného gradientu v atmosfére leži medzi hodnotami suchoadiabatického a nasýteno-adiabatického teplotného gradientu.

¹⁶ Častica má v hladine voľnej konvekcie rovnakú teplotu ako okolie, získava kladné zrýchlenie a jej kinetická energia rastie, až kým sa jej teplota opäť nerovná teplote okolia.

¹⁷ Tiež zvaná hladina nulového vztlaku. Častica má pri svojom výstupe v tejto hladine rovnakú teplotu ako okolie.



Obr. 4.2 - Porovnanie CAPE, 6793 prípadov, (a) CAPE v celom profile, (b) CAPE v spodných 3 km (Rasmussen a Blanchard, 1998).

Obr. 4.2 porovnáva CAPE obyčajných konvektívnych buniek (ORD), netornádických superciel (SUP) a tornádických superciel (TOR). Obdĺžnikové plochy predstavujú priemerné hodnoty, t.j. hodnoty medzi 25 % a 75 % zo všetkých prípadov, s vyznačenou prostrednou hodnotou (mediánom) a vertikálne čierne čiary zobrazujú 80 % všetkých prípadov jednotlivých konvektívnych buniek (orezaných spodných a horných 10 %). Na obr. 4.2a je CAPE v celom profile troposféry, kde môžeme vidieť, že len 50 % ORD sa vyskytlo v prostredí s CAPE > 530 J.kg⁻¹ s maximom 1820 J.kg⁻¹. Medián CAPE v supercelách je okolo 1200 J.kg⁻¹ (maximá do 3030 J.kg⁻¹), no ich hodnoty sa značne prekrývajú s hodnotami CAPE ORD. Obr. 4.2b je vypočítaný len pre spodné 3 km. Medián CAPE do 3 km v supercelách je takmer 400 J.kg⁻¹, u ORD takmer 300 J.kg⁻¹, no ich hodnoty sa aj tu značne prekrývajú z čoho vyplýva, že CAPE ako samostatný index nie je vhodný na vyhodnocovanie potenciálu prostredia vyprodukovať supercely (Rasmussen a Blanchard, 1994).



Obr. 4.3 - Porovnanie CAPE LP, CL a HP superciel, 43 prípadov (Rasmussen a Straka, 1998).

Obr. 4.3 zobrazuje hodnoty CAPE v prostrediach jednotlivých typov superciel, biele obdĺžniky predstavujú LP supercely, sivé sú CL supercely a čierne sú HP supercely. Prostredné hodnoty sú naznačené čiernou zvislou čiarou. Prostredná hodnota CAPE v prostredí LP superciel je približne 2900 J.kg⁻¹, čo je nižšia hodnota oproti CL (HP) supercelám s prostrednou hodnotou 3700 J.kg⁻¹ (3500 J.kg⁻¹) (Rasmussen a Straka, 1998; Johns a kol., 1993).

4.2 Strihové parametre

4.2.1 Strih vetra

Význam strihu vetra bol analyzovaný v kapitole 2.1. Táto kapitola porovnáva strih vetra pri výskyte obyčajných konvektívnych buniek a superciel, prípadne LP, HP a CL superciel.



Obr. 4.4a – Vertikálny strih vetra medzi prízemnou vrstvou a hladinou 6 km, 6793 prípadov (Rasmussen a Blanchard, 1998).

Rozoberme strih vetra medzi prízemnou vrstvou (0 - 500 m) a 6 km hladinou (zodpovedá letnej hodnote výšky tlakovej hladiny 500 hPa). Porovnanie vidíme na obr. 4.4 (popis rovnaký ako pri obr. 4.2). V prípade ORD sa polovica vyskytla v prostredí so strihom vetra od 5 do 15 ms⁻¹, no ekvivalentné hodnoty superciel sú vyššie a spadajú do intervalu 12 – 22 ms⁻¹. Z grafu tiež možno odčítať, že strih vetra TOR je takmer identický v porovnaní so SUP (Rasmussen a Blanchard, 1998).

0 6-km VECTOR SHEAR MAGNITUDE



Obr. 4.4b – Vertikálny strih vetra medzi prízemnou vrstvou a hladinou 6 km, 413 prípadov (Thompson a kol., 2003).

Vertikálny strih vetra medzi prízemnou vrstvou (0 – 500 m) a hladinou 6 km zobrazuje aj obr. 4.4b (popis boxplotu rovnaký ako pri obr. 4.4a) (Thompson a kol., 2003). Boxploty predstavujú zľava: silné tornádické supercely (F2-F5), slabé tornádické supercely (F0-F1), netornádické supercely, supercely s krátkou existenciou mezocyklóny (pod 30 minút) a nesupercelárne bunky, pod boxplotom sú v zátvorke uvedené počty jednotlivých prípadov. Vidíme, že väčšina superciel s perzistentnou mezocyklónou (nad 30 minút) sa vyskytla v prostrediach s vertikálnym strihom vetra nad 18,8 m/s, čo je podstatne vyššia hodnota ako v Rasmussen a Blanchard (1998) na obr. 4.4b. Taktiež sú výraznejšie separované obyčajné konvektívne bunky od supercelárnych.

Z uvedeného vyplýva, že indexy zamerané na strih vetra môžu dobre slúžiť na odlíšenie prípadov výskytu ORD a superciel, na jednotlivé kategórie superciel (LP, CL, HP) však treba použiť iné metódy, napr. v Rasmussen a Straka (1998).

4.2.2 Stredný strih vetra

Stredný strih vetra [s⁻¹] (angl. *mean shear*) (Rasmussen a Wilhelmson, 1983), je definovaný ako

$$\overline{S} = \frac{\int_0^h \frac{\partial V}{\partial z} dz}{\int_0^h dz},$$
(4.2)

čo je dĺžka hodografu predelená hrúbkou troposféry, pre ktorú sme strih vetra zisťovali (Rasmussen a Blanchard, 1998).

Rovnaké porovnanie ako v obr. 4.2 predstavuje obr. 4.5, kde môžeme vidieť, že polovica ORD má stredný strih vetra nižší ako 0.053 s⁻¹, no len 15 % superciel (SUP a TOR) má tak nízke hodnoty stredného strihu vetra. Tiež vidíme, že hodnoty TOR sú priemerne vyššie ako SUP, no na ich odlíšenie to nestačí (Rasmussen a Blanchard, 1998).



Obr. 4.5 - Stredný strih vetra, 6793 prípadov (Rasmussen a Blanchard, 1998).

4.3 Storm to relative environmental helicity (SRH)

Helicita všeobecne predstavuje schopnosť tekutiny (plynu) sa stáčať a zároveň tiecť (podobne ako vývrtka).

V meteorológii je helicita definovaná ako

$$H = -\int \vec{k} \vec{V} \times \frac{\partial \vec{V}}{\partial z} dz, \qquad (4.3)$$

kde V je horizontálna rýchlosť vetra a k je vertikálny jednotkový vektor.

SRH $[m^2s^{-2}]$ (v literatúre sa stretávame aj so skratkou SREH), je stanovená relatívne k pohybu oblaku (Davies-Jones a kol., 1990; Brooks a kol., 1994), tzn. že od vektora rýchlosti prúdenia *V* odpočítame vektor pohybu oblaku *c* a dostávame

$$SRH = -\int_0^h \vec{k} \left(\vec{V} - \vec{c} \right) \times \frac{\partial \vec{V}}{\partial z} dz, \qquad (4.4)$$

kde *h* je predpokladaný vertikálny rozsah vtoku do oblaku (väčšinou do 3 km) (Rasmussen a Blanchard, 1998). SRH ilustruje obr. 4.6. Hodograf je znázornený červenou farbou, smer rýchlosti vetra je béžový, pohyb oblaku fialovou a vektor relatívneho prúdenia je zelenou farbou. Vidíme dôležitosť zohľadnenia vektora pohybu oblaku. Výsledný vektor relatívneho prúdenia (V - c) tak zmení oblasť integrácie v (4.4).



Obr. 4.6 - Grafické zobrazenie SRH (prevzaté a upravené, A. Sokol: Fyzika konvektívnych javov v atmosfére, elektronická verzia prednášok, FMFI UK, 2010).

Porovnanie jednotlivých konvektívnych systémov ilustruje obr. 4.7 (rovnaký popis ako obr. 4.2). Väčšina ORD (75 %) sa vyskytla v prostredí so SRH < 100 m²s⁻². Polovica SUP má hodnoty SRH v rozmedzí od 64 do 208 m²s⁻². Prostredia TOR majú hodnoty väčšinou SRH > 100 m²s⁻², pričom ich prostredná hodnota je okolo 200 m²s⁻², čo je značný rozdiel v porovnaní s ORD, z ktorých len 23 % má prostredie so SRH > 100 m²s⁻² (Rasmussen a Blanchard, 1998).

Index SRH je teda použiteľný na vyhodnotenie potenciálu prostredia produkovať supercely, čo môžeme podložiť obr. 4.7, kde len 10 % ORD má SRH > 168 m²s⁻² (Rasmussen a Blanchard, 1998).



Obr. 4.7 – SRH, 6793 prípadov (Rasmussen a Blanchard, 1998).

4.4 Bulk Richardson number (BRN)

Index BRN kombinuje vertikálny strih vetra a vztlak (Moncrieff a Green, 1972; Weisman a Klemp, 1982). Môžeme ho vyjadriť vzťahom

$$BRN = \frac{1}{2} \frac{CAPE}{u^2 + v^2},$$
(4.5)

kde menovateľ predstavuje kinetickú energiu vertikálneho strihu vetra medzi spodnými a hornými hladinami, obvykle sú to hraničná vrstva a hladina 6 km (Rasmussen a Blanchard, 1998). Index v podstate vyjadruje pomer medzi výtokom a vtokom do oblaku, preto nízke hodnoty zvyčajne favorizujú dlhšie žijúce konvektívne štruktúry.

V logaritmickej stupnici vidíme na obr. 4.8 porovnanie BRN u ORD a superciel (popis je identický s obr. 4.2). Weisman a Klemp (1982) vo svojej práci uvádzajú, že prostredie s BRN < 50 favorizuje supercely a pri hodnotách BRN > 50 vznikajú skôr multicelárne systémy.



Obr. 4.8 – BRN, 6793 prípadov (Rasmussen a Blanchard, 1998).



Obr. 4.9 - CAPE a vertikálny strih vetra 0-6 km, 6793 prípadov (Rasmussen a Blanchard, 1998).

Vertikálny strih vetra medzi hladinami 0-6 km a CAPE kombinuje obr. 4.9. Bodky reprezentujú ORD, SUP sú zobrazené prázdnymi krúžkami a TOR plnými krúžkami. Hodnoty v grafe označujú krivky konštantného BRN. Z grafu môžeme usúdiť, že supercely na vznik potrebujú prostredie s vyššími hodnotami CAPE aj strihu vetra ako ORD. Hrubšie čierne krivky ohraničujú oblasť najpravdepodobnejšieho vzniku superciel a sú umiestnené vo vyšších hodnotách CAPE a strihu ako ekvivalentné krivky ORD znázornené sivou farbou (Rasmussen a Blanchard, 1998).

4.5 Storm relative wind (SRW)

Relatívne prúdenie v okolí superciel je najvýraznejšie v horných vrstvách. Porovnanie jednotlivých konvektívnych systémov zobrazuje obr. 4.10. V tomto prípade sú hodnoty počítané pre vrstvu hrúbky 2 km so stredom vo výške izotermy -40 °C. Priemerné hodnoty v okolí ORD sa pohybujú okolo 12 m.s⁻¹, čo je približne o 6 m.s⁻¹ nižšie ako v prípadoch superciel. Daná charakteristika však nedostatočne rozlišuje tornádické a netornádické supercely (Rasmussen a Blanchard, 1998).



Obr. 4.10 - SRW, 6793 prípadov (Rasmussen a Blanchard, 1998).

SRW síce slabo rozlišuje ORD od superciel, no dobre rozlišuje jednotlivé typy superciel (LP, CL, HP). Využijeme obr. 4.11 znázorňujúci strih vetra medzi hladinami 5 a 9 km. Stáčanie vektora vetra v hornej troposfére v okolí superciel veľmi dobre rozlišuje najmä LP supercely od HP superciel. Vidíme, že v prípade LP superciel sa vektor vetra stáča doľava od pohybu supercely. Pri HP supercelách prevláda v horných vrstvách atmosféry *veering* vektora vetra (tu 9 z 13 prípadov), no nie je tak výrazný ako *backing* v prostredí LP superciel. Ak je teda v horných hladinách v okolí superciel výrazný *backing* vetra, nákova sa rozširuje výrazne doľava od smeru pohybu *updraftu*, čím nemôže dochádzať k narušeniu vtokového regiónu (zatienením nákovou, drobným dažďom). *Backing* je podporovaný aj tendenciou superciel stáčať sa doprava od prevládajúceho prúdenia, čo je spôsobené strihom vetra v spodných hladinách (diskutované v kapitole 4.2) (Rasmussen a Straka, 1998).



Obr. 4.11 - SRW medzi hladinami 5 a 9 km, 43 prípadov (Rasmussen a Straka, 1998).

SRW všetkých prípadov analyzovaných vyššie v tejto kapitole zobrazuje obr. 4.12. Obrázok pojednáva o relatívnej rýchlosti prúdenia jednotlivo v prostredí LP, CL a HP superciel do výšky 10 km. Strednú hodnotu predstavuje hrubá čierna krivka. V prostrediach LP superciel vidíme výrazný nárast rýchlosti predovšetkým vo vrstve 4-10 km, na rozdiel od prostredí HP superciel, v ktorých je SRW približne konštantný v celej vrstve. Krivka strednej hodnoty veľkosti SRW CL superciel je približne medzi hodnotami LP a HP superciel. Taktiež vidíme, že vo výške 10 km nad zemským povrchom sú hodnoty SRW CL a LP superciel veľmi podobné, len pri CL supercelách je nárast veľkosti SRW plynulejší a zvyčajne začína už vo výške 2 km (Rasmussen a Straka, 1998).

Zatiaľ čo vo vrstve 2-7 km nad zemským povrchom je rozdiel strednej veľkosti SRW jednotlivých typov superciel len do 3 m. s⁻¹, vo vrstve 8-10 km vidíme signifikantný rozdiel, najmä v prostrediach LP superciel (Rasmussen a Straka, 1998).

Zamerajme sa na vrstvu 4-6 km nad zemským povrchom (obr. 4.12). Vidíme, že väčšina superciel sa vyskytuje v prostredí s veľkosťou SRW cca 10 m.s⁻¹. Rasmussen a Straka (1998) tvrdia, že rozloženie hydrometeorov v supercelách je silno závislé na veľkosti SRW v horných hladinách troposféry, čo je v rozpore s výskumom Brooks a kol. (1994b), ktorí našli rozdiel SRW vplývajúci na rozloženie hydrometeorov v supercelách v stredných hladinách.



Obr. 4.12 - Veľkosti SRW, 43 prípadov (Rasmussen a Straka, 1998).

Dáta z Dopplerovho rardaru ukazujú, že vo vrstve 9-10 km zvyčajne začína "roztekanie" nákovy (Rasmussen a Straka, 1998).

SRW v hladine 9 km nad zemským povrchom a SRH kombinuje obr. 4.13. Vidíme, že ak je SRW pod 12 m.s⁻¹, ide výhradne o prostredie HP superciel bez ohľadu na SRH, podobne ako v prostrediach so SRW > 30 m.s⁻¹, kedy sa už vyskytujú prevažne LP supercely. Prostredia so SRW medzi 18-28 m.s⁻¹ a nízkou helicitou, SRH $\leq 250 \text{ m}^2.\text{s}^{-2}$, preferujú LP supercely a pri rovnakom SRW a s rastúcou helicitou SRH sa formujú skôr HP supercely (Rasmussen a Straka, 1998).



Obr. 4.13 - SRW a SREH, 43 prípadov (Rasmussen a Straka, 1998).

4.6 Energy-helicity index (EHI)

Energy-helicity index (Hart a Korotky, 1991; Davies, 1993) je definovaný ako

$$EHI = \frac{(CAPE)(SRH)}{1.6 \times 10^5}.$$
(4.6)

EHI veľmi dobre separuje prostredie ORD od prostredia superciel, čo primárne spôsobuje SRH. Obr. 4.14 kombinuje SRH a CAPE (rovnaký popis ako obr. 4.10, hodnoty v grafe označujú krivky konštantného EHI). Hodnoty EHI >1,0 naznačujú potenciál prostredia produkovať supercely a hodnoty EHI > 2,0 indikujú vysokú pravdepodobnosť vzniku superciel (Rasmussen a Blanchard, 1998).



Obr. 4.14 - SRH a CAPE, 6793 prípadov (Rasmussen a Blanchard, 1998).

Porovnanie EHI u ORD, SUP a TOR znázorňuje obr. 4.15 (rovnaký popis ako obr. 4.2). Vidíme, že až 90 % ORD má EHI < 0,77, 60 % SUP má hodnoty EHI < 0,77 a len tretina TOR má hodnoty EHI < 0,77. Vidíme teda signifikantný rozdiel medzi SUP a TOR, pretože až 50 % TOR má EHI > 1,5, pričom len približne 10 % SUP má EHI > 1,5 (Rasmussen a Blanchard, 1998).



Obr. 4.15 - EHI, 6793 prípadov (Rasmussen a Blanchard, 1998).

Ako aj niektoré vyššie spomínané indexy, EHI dobre separuje obyčajné konvektívne bunky od superciel, no ako jediný dobre separuje aj netornádické supercely od tornádických. EHI je preto najlepším indexom na posúdenie supercelárneho prostredia (Rasmussen a Blanchard, 1998).

Supercely sa u nás vyskytujú pomerne málo, na rozdiel od USA. Hlavným dôvodom je, že dostatočný strih vetra a helicita sú u nás v zimnom polroku, zatiaľ čo instabilita (CAPE) v letnom. V lete je tak väčšina búrok bez výrazného strihu vetra (Řezáčová a kol., 2007). Aj napriek tomu sa u nás supercely vyskytujú (podrobnejšie v kapitole 5).

5 Analýza superciel na Slovensku

Výber prípadov sme robili na základe typických rádiolokačných čŕt superciel, ktoré boli diskutované v kapitole 2. Pri výbere sme zohľadňovali aj dynamiku superciel, ktorá bola diskutovaná v kapitole 3, kde sme ukázali, že výraznou supercelárnou črtou je štiepenie materskej bunky na dve sekundárne a odklon od prevládajúceho prúdenia. Celkovo sme vybrali 40 dní, v ktorých sa spolu vyskytlo 101 supercelárnych buniek (výber prípadov je podrobne popísaný v kapitole 1.2).

5.1 Vhodné makrosynoptické podmienky pre vznik superciel na Slovensku

Na základe vybraných prípadov sme pre jednotlivé dni analyzovali makrosynoptické podmienky v euroatlantickej oblasti pre vybraných 40 dní s výskytom pravdepodobných superciel na Slovensku.

Analyzovali sme polia na výškových mapách (obr. 5.1a - geopotenciál hladiny 500 hPa, obr. 5.1b - geopotenciál a teplota vzduchu v hladine 850 hPa) a na prízemných mapách (obr. 5.1a - tlak vzduchu prepočítaný na hladinu mora).



Obr. 5.1a – Geopotenciál hladiny 500 hPa a tlak vzduchu prepočítaný na hladinu mora, analýza CFS, 21.6.2011, 12:00 UTC (http://www.wetterzentrale.de/topkarten/fscfsreaeur.html).

<figure><figure>

Obr. 5.1b – Geopotenciál hladiny 850 hPa a teplota vzduchu v hladine 850 hPa, analýza CFS, 21.6.2011, 12:00 UTC (http://www.wetterzentrale.de/topkarten/fscfsreaeur.html).

Pri rozbore sme zohľadňovali aj analýzy prízemných tlakových polí SHMÚ, UKMO a ČHMÚ (obr. 5.2). Taktiež sme sme využívali aj výstupy z numerického modelu ALADIN SHMÚ. Sledovali sme pole prúdenia v hladine 500 hPa (obr. 5.3a) a vo výške 10 m nad povrchom (obr. 5.3b).



Obr. 5.2 – Analýza ČHMÚ, (a) 21.6.2011, 00:00 UTC, (b) 22.6.2011, 00:00 UTC (ČHMÚ).


Obr. 5.3 – Pole vetra (a) v hladine 500 hPa, (b) vo výške 10 m nad povrchom, analýza, numerický model ALADIN, 21.6.2011, 12:00 UTC (SHMÚ).

V kapitole 3 sme ukázali, že vertikálny strih vetra je nutnou podmienkou pre vznik superciel. Pole vertikálneho strihu vetra (obr. 5.4) sme vypočítali ako vektorový rozdiel polí prúdenia vzduchu v hladinách 500 hPa a 10 m, t.j. rozdiel polí prúdenia na obr. 5.3b a 5.3a.



Obr. 5.4 – Pole vertikálneho strihu vetra medzi hladinami 500 hPa a 10 m, farebnou škálou je označená veľkosť, symbolom smeru vetra je označený smer vektora vertikálneho strihu vetra, numerický model ALADIN, 21.6.2011, 12:00 UTC (SHMÚ).

5.1.1 Analýza situácií pri výskyte superciel na Slovensku

Ďalej sme vyhodnocovali typ situácie z hľadiska dynamiky procesov v atmosfére, najmä strihu vetra a jeho nositeľa, pričom takmer všetky supercelárne bunky sa vyskytli za nasledujúcich okolností:

- Bunky súvisiace s cirkuláciou studeného frontu (SF). Typicky to boli situácie s prechodom studeného frontu cez strednú Európu. Vo väčšine týchto prípadov sme zaregistrovali v hladine AT850 hPa nad Slovenskom do najbližšej polnoci ochladenie.
- Bunky vyskytujúce sa v blízkosti teplého frontu (TF). Typicky to boli situácie s výrazným teplotným gradientom a otepl'ovaním v hladine AT850 hPa aj v AT500 hPa nad strednou Európou počas celého dňa, t.j. aj po výskyte superciel.
- 3. Bunky súvisiace s výškovou cyklónou (Cv).
- 4. Bunky spojené s výškovou frontálnou zónou (VFZ), v ktorých sa nedal jednoznačne spojiť prechod atmosférického frontu s výskytom danej bunky, pričom cez naše územie fronty evidentne prechádzali. Väčšina týchto situácií trvala niekoľko dní.

Vzhľadom na pomerne častý výskyt nevýrazných prízemných tlakových polí, množstvo dostupných materiálov a časové rozlíšenie dát, nebolo možné spätne vo všetkých prípadoch spoľahlivo priradiť každú bunku k identifikovanému frontálnemu rozhraniu. Ide predovšetkým o kategóriu studených frontov, kde sa nejedná len o bunky priamo sa vyskytujúce na čiare frontu, ale aj o bunky, ktoré súviseli s procesmi studeného frontu (teplá advekcia a podpora výstupných pohybov, nárast vertikálneho strihu vetra atď.). Výsledky sú zobrazené v histograme na obr. 5.5.



Obr. 5.5 – Situácia pri výskyte superciel na Slovensku, SF – studený front, TF – teplý front, VFZ – výšková frontálna zóna, Cv – výšková cyklóna.

Z obr. 5.5 vidíme, že väčšina superciel sa na Slovensku vyskytla v súvislosti so studeným frontom (26 prípadov). Príklad z 20.6.2004 je zobrazený na obr. 5.6. Na obr. 5.6a si môžeme v AT500 hPa všimnúť, že Slovensko sa nachádzalo na prednej strane brázdy nízkeho tlaku vzduchu nad Severným morom. S touto brázdou bol spojený zvlnený studený front, ktorý ovplyvňoval počasie v strednej Európe. Môžeme ho identifikovať aj na analýze UKMO na obr. 5.7. Na obr. 5.6b si tiež môžeme všimnúť v hladine 850 hPa teplú advekciu pred studeným frontom.

Na obr. 5.8a je znázornené pole vetra v hladine 500 hPa, na obr. 5.8b vo výške 10 m nad povrchom. V hladine 500 hPa vidíme na obr. 5.8a silné juhozápadné prúdenie. V prízemnom poli vetra môžeme na obr. 5.8b približne identifikovať studený front v oblasti severozápadného Slovenska a Moravy. Vertikálny strih vetra medzi hladinami 500 hPa a výškou 10 m nad povrchom zobrazuje obr. 5.9, na ktorom si môžeme všimnúť, že najmä západná polovica nášho územia mala vhodné strihové podmienky (vhodné strihové podmienky sú analyzované v kapitole 5.1.3). Supercelárne bunky sa na Slovensku vyskytli 20.6.2004 okolo 12:00 UTC. Tento prípad sme tak zaradili do kategórie supercelárnych buniek vyskytujúcich sa pred studeným frontom. Najvýraznejšou supercelárnou črtou detegovanou v tento deň bolo štiepenie, ktoré je prezentované v kapitole 5.3.5.



Obr. 5.6a – Geopotenciál hladiny 500 hPa a tlak vzduchu prepočítaný na hladinu mora, analýza CFS, 20.6.2004, 12:00 UTC (http://www.wetterzentrale.de/topkarten/fscfsreaeur.html).



Daten: CFS Reanalysis (C) Wetterzentrale www.wetterzentrale.de

Obr. 5.6b – Geopotenciál a teplota vzduchu v hladine 850 hPa, analýza CFS, 20.6.2004, 12:00 UTC (http://www.wetterzentrale.de/topkarten/fscfsreaeur.html).



Obr. 5.7 – Analýza UKMO, (a) 20.6.2004, 00:00 UTC, (b) 21.6.2004, 00:00 UTC (http://www.wetterzentrale.de/topkarten/fsfaxsem.html).



Obr. 5.8a – Pole vetra (a) v hladine 500 hPa, (b) vo výške 10 m nad povrchom, numerický model ALADIN, 20.6.2004, 12:00 UTC (SHMÚ).



Obr. 5.9 – Pole vertikálneho strihu vetra medzi hladinami 500 hPa a 10 m, 20.6.2004 12:00 UTC, numerický model ALADIN (SHMÚ).

Vhodné strihové podmienky pre vznik superciel môže poskytnúť aj teplý front. Zo všetkých 40 situácií sme identifikovali tri takéto prípady. Obr. 5.1, 5.2, 5.3 a 5.4 znázorňujú situáciu, pri ktorej sa v popoludňajších hodinách na Slovensku a v Českej republike vyskytli supercelárne bunky na teplom fronte, v Českej republike spojené aj s tornádom. Na obr. 5.2 je zobrazená analýza ČHMÚ z 21. a 22.6.2011, kde si môžeme všimnúť prechod teplého frontu od juhozápadu až západu cez Českú a Slovenskú republiku. Na obr. 5.1a vidieť výškovú frontálnu zónu nad strednou Európou a tiež v prízemnom tlakovom poli nevýraznú brázdu

nízkeho tlaku vzduchu spojenú s tlakovou nížou nad Írskom. Na obr. 5.1b sme v hladine 850 hPa identifikovali teplú advekciu nad strednou Európou. Silné prúdenie v hladine 500 hPa potvrdzuje aj analýza modelu ALADIN na obr. 5.3a. Analýzu prúdenia vo výške 10 m nad povrchom zobrazuje obr. 5.3b. Na obr. 5.4 je vypočítaný vertikálny strih vetra medzi hladinou 500 hPa a výškou 10 m. Obr. 5.4 graficky znázorňuje veľmi dobré strihové podmienky pre vznik supercelárnych buniek na Slovensku a v Českej republike (strihovým podmienkam sa podrobne venujeme v závere tejto podkapitoly).

Dve obdobia výskytu supercelárnych buniek boli na Slovensku spojené s cirkuláciou výškovej tlakovej níže, pričom v jednom z týchto období sa supercelárne bunky vyskytovali v dvoch dňoch za sebou. Situácie a strihové podmienky sú zobrazené na obr. 5.10 a 5.11.



Obr. 5.10a – Geopotenciál hladiny 500 hPa a tlak vzduchu prepočítaný na hladinu mora, analýza CFS, 11.4.2009, 12:00 UTC (http://www.wetterzentrale.de/ topkarten/fscfsreaeur.html).



Obr. 5.10b – Pole vertikálneho strihu vetra medzi hladinami 500 hPa a 10 m, numerický model ALADIN, 11.4.2009, 12:00 UTC (SHMÚ).



Obr. 5.11a – Geopotenciál hladiny 500 hPa a tlak vzduchu prepočítaný na hladinu mora, analýza CFS, 3.7.2010, 12:00 UTC (http://www.wetterzentrale.de/topkarten/fscfsreaeur.html).



Obr. 5.11b – Pole vertikálneho strihu vetra medzi hladinami 500 hPa a 10 m, numerický model ALADIN, 3.7.2010, 12:00 UTC (SHMÚ).

Na obr. 5.10a a 5.11a vidíme v hladine 500 hPa výškovú tlakovú níž, ktorá okrem labilizácie teplotného zvrstvenia poskytuje aj vhodné strihové podmienky. Môžeme si tiež všimnúť, že naše územie sa nachádzalo na juhozápadnom okraji výškovej tlakovej níže. Supercelárne bunky sa v oboch situáciách vyskytli len na východnej polovici Slovenska, čo zodpovedá strihovým podmienkam (obr. 5.10b a 5.11b).

Príklad situácie z 12.5.2007, v ktorej sme supercelárne bunky priradili k situácii výšková frontálna zóna, je na obr. 5.12. Na obr. 5.12a vidíme výškovú frontálnu zónu, ktorá prebieha cez Francúzsko, Nemecko a Slovensko ďalej na východ. Na obr. 5.12b je zobrazené pole geopotenciánej výšky a teploty vzduchu v hladine 850 hPa. Na obr. 5.13 je zobrazená analýza UKMO, kde môžeme vidieť, že do strednej Európy postupovali jednotlivé frontálne systémy. Na obr. 5.14 je zobrazené pole vetra z analýzy numerického modelu ALADIN z 12.5.2007 o 12:00 UTC. Vidíme, že z obr. 5.14b nie je možné ani približne určiť polohu frontálneho rozhrania na našom území.



Obr. 5.12a – Geopotenciál hladiny 500 hPa a tlak vzduchu prepočítaný na hladinu mora, analýza CFS, 12.5.2007, 12:00 UTC (http://www.wetterzentrale.de/ topkarten/fscfsreaeur.html).



Daten: CFS Reanalysis (C) Wetterzentrale www.wetterzentrale.de

Obr. 5.12b – Geopotenciál a teplota vzduchu v hladine 850 hPa, analýza CFS, 12.5.2007, 12:00 UTC (http://www.wetterzentrale.de/topkarten/fscfsreaeur.html).



Obr. 5.13 - Analýza UKMO, 12.5.2007, 00:00 UTC (http://www.wetterzentrale.de/topkarten/fsfaxsem.html).



Obr. 5.14 – Pole vetra (a) v hladine 500 hPa, (b) vo výške 10 m nad povrchom, numerický model ALADIN, 12.5.2007, 12:00 UTC (SHMÚ).

Na obr. 5.15 je vypočítaný vertikálny strih vetra medzi hladinou 500 hPa a výškou 10 m, ktorý graficky znázorňuje dobré strihové podmienky pre vznik supercelárnych buniek na Slovensku aj v Českej republike (strihovým podmienkam sa venujeme v kapitole 5.1.3). Silné výškové prúdenie potvrdzuje aj aerologické meranie z Viedne (obr. 5.16).



Obr. 5.15 – Pole vertikálneho strihu vetra medzi hladinami 500 hPa a 10 m, numerický model ALADIN, 12.5.2007, 12:00 UTC (SHMÚ).



Obr. 5.16 - Skew-T diagram, 12.5.2007, 12:00 UTC, Viedeň (http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html).

5.1.2 Výškové prúdenie pri supercelárnych situáciách na Slovensku

Z našej analýzy vyplýva, že strihové podmienky vhodné pre tvorbu superciel na Slovensku sú predovšetkým v blízkosti výškovej frontálne zóny. Obr. 5.17 zobrazuje priemerné výškové prúdenie v AT500 hPa v dňoch výskytu superciel na Slovensku.



Obr. 5.17 – Prevládajúce prúdenie pri výskyte supercelulárnych situácií na Slovensku, 40 situácií.

Na obr. 5.17 si môžeme všimnúť, že ani jeden prípad sa nevyskytol pri východnom prúdení. Vo väčšine prípadov výrazne prevažovala západná zložka prúdenia (len v jednom prípade šlo o južné výškové prúdenie). Orientácia vektora prevládajúceho výškového prúdenia vyšla v priemere 270°, čo je západné prúdenie. Na obr. 5.17 tiež vidíme dva extrémy – interval 240° – 260° a 300° – 320°. Prvý interval zodpovedná najčastejšiemu výškovému prúdeniu pri prechode studených frontov v lete cez strednú Európu. Druhý interval je netriviálny, nakoľko ide o severozápadné výškové prúdenie, netypické pre výskyt búrok na Slovensku v letnom období.

Pre jednotlivé situácie sme sa pokúsili nájsť aj typické tvary výškovej frontálnej zóny počas výskytu superciel nad Slovenskom. Použili sme na to polia AT500 hPa. Situácie sme roztriedili do skupín podľa riadiaceho tlakového útvaru, t.j. či naše územie bolo pod vplyvom brázdy nízkeho tlaku alebo hrebeňa vysokého tlaku vzduchu, prípadne sa útvary v AT500 hPa nad strednou Európou nevyskytovali. V 7 prípadoch bolo termobarické pole príliš nevýrazné a narúšalo určitú homogenitu každej zo skupín. Tieto prípady boli z tohto výberu vylúčené. Pre skupiny s väčším počtom ako 5 dní sme potom vytvorili priemerné pole geopotenciálu v hladine 500 hPa (obr. 5.18 a 5.19). Rozdelenie jednotlivých situácií je zobrazené v tab. 5.1.

Typ situácie				
A	С	Z	Cv	Nezaradené
2.7.20	31.5.2	5.7.20	11.4.2	11.5.2009
27.5.2	9.5.20	11.5.2	12.4.2	27.4.2010
29.5.2	13.5.2	12.5.2	3.7.20	16.8.2010
15.6.2	20.6.2	23.8.2		24.5.2010
16.6.2	18.8.2			25.5.2010
9.6.20	20.8.2			26.5.2010
10.6.2	25.6.2			5.4.2012
21.6.2	11.6.2			
22.8.2	23.7.2			
23.8.2	14.6.2			
15.6.2	22.6.2			
	19.7.2			
	30.8.2			
	3.6.20			
	10.6.2			

Tab. 5.1 – Rozdelenie situácií podľa riadiacich tlakových útvarov a prevládajúceho výškového prúdenia.



500mb Geopotential Heights (m) Composite Mean 7/01 18z 5/29/01 12z 6/16/02 0z 6/16/02 18z 6/9/04 12z 6/10/04 18z 6/21/11 18z 8/22/11 18z 8/104 12z 8/18/06 18z 8/20/06 18z 6/25/07 12z 6/12/12/27/23/09 18z 6/14/10 12z 6/22/11 12z 7 NCEP/NCAR Reanalysis

Obr. 5.18 – priemerné pole AT500 hPa, (a) **typ A** - 11 situácií, hrebeň vysokého tlaku vzduchu zasahujúci zo západnej Afriky až do strednej Európy, brázda západne od Britských ostrovov, (b) **typ C** - 15 situácií, brázda nízkeho tlaku vzduchu nad západnou Európou, hrebeň vysokého tlaku zasahuje z Afriky nad Balkán (Ukrajinu) (http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/composites/hour/).



Obr. 5.19 – ukážky situácií AT500 hPa, (a) **typ Z** – výšková frontálna zóna nad strednou Európou, 11.5.2007, 12:00 UTC, (b) **typ Cv** – výšková cyklóna nad pohraničím Poľska a Ukrajiny, 3.7.2010, 12:00 UTC (http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/composites/hour/).

V situácii A (obr. 5.18a) je dominantným tlakovým útvarom hrebeň vysokého tlaku vzduchu zasahujúci do Európy zo západnej Afriky. Slovensko sa zvyčajne nachádza na jeho severnom okraji. Brázda nízkeho tlaku vzduchu sa nachádza väčšinou nad Atlantickým oceánom západne od Britských ostrovov. Prúdenie nad Slovenskom je väčšinou západné až severozápadné.

V situácii C (obr. 5.18b) je riadiacim tlakovým útvarom brázda nízkeho tlaku vzduchu nad západnou Európou. Hrebeň vysokého tlaku vzduchu zvyčajne zasahuje z oblasti Alžírska a Líbye nad Balkán. Výškové prúdenie nad Slovenskom je tak zvyčajne juhozápadné. Pre situácie na obr. 5.18 sme vypočítali aj priemerné pole vetra v hladine 500 hPa (obr. 5.20), podľa ktorého je možné identifikovať približnú polohu dýzového prúdenia nad strednou Európou. Na obr. 5.20 si môžeme všimnúť, že pre anticyklonálne situácie je prúdenie silnejšie, čo môže súvisieť s gradientovým vetrom, pretože pri rovnakom tlakovom gradiente je gradientový vietor pri anticyklonálne zakrivených izohypsách silnejší ako pri cyklonálnom zakrivení (Bluestein, 1993).



500mb Winds (m/s) Composite Mean V 7/01 18z 5/29/01 12z 6/16/02 0z 6/16/02 18z 6/9/04 12z 6/10/04 18z 6/21/11 18z 8/22/11 18z 8/16/06 18z 8/20/06 18z 6/25/07 12z 6/11/09 18z 6/24/11/0 12z 6/22/11 12z 7/ NCEP/NCAR Reanalysis

Obr. 5.20 – Priemerné pole vektora vetra v hladine 500 hPa, (a) **typ A**, (b) **typ C** (http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/composites/hour/).

Na obr. 5.19a je zobrazená ukážka situácie typu Z, pre ktorú je typická výšková frontálna zóna prebiehajúca cez Biskajský záliv, strednú Európu a Ukrajinu medzi rozsiahlou oblasťou nízkeho tlaku vzduchu nad severnou Európou a Britskými ostrovmi a oblasťou vysokého tlaku vzduchu nad južnou a juhovýchodnou Európou. Nad Slovenskom je tak zvyčajne západné prúdenie bez väčších deformácií výškovej frontálnej zóny. Pre túto situáciu sme priemerné pole AT 500 hPa nerátali, nakoľko sme našli len 4 podobné situácie.

Na obr. 5.19b je zobrazený príklad situácie Cv, pri ktorej počasie nad Slovenskom ovplyvňuje výšková tlaková níž, ktorej stred sa nachádza na pohraničí Poľska a Ukrajiny. Hrebeň vysokého tlaku vzduchu zasahoval zo Stredomoria až nad Škandináviu. Výškové prúdenie tak bolo prevažne severozápadné. Pri tejto situácii sme taktiež nepočítali priemerné pole AT500 hPa, pretože sme našli len 3 takéto dni.

Z obr. 5.18 a 5.19 teda vyplýva, že vhodné podmienky pre tvorbu superciel v strednej Európe sú najčastejšie na prednej strane brázdy nízkeho tlaku vzduchu alebo na severnom okraji hrebeňa vysokého tlaku vzduchu.

5.1.3 Ďalšie štatistické vyhodnotenia

Pri analyzovaní štatistických výsledkov je dôležité si uvedomiť, že sme analyzovali krátky rad dát a zvolili sme subjektívnu metódu detekcie.



Počet supercelárnych situácií v rámci jednotlivých rokov zobrazuje obr. 5.21.

Obr. 5.21 – Výskyt supercelárnych situácii v jednotlivých rokoch za obdobie 2000 až 2012, 40 situácií.

Keďže do roku 2006 nemáme merania z KH, v rokoch 2000 až 2006 sme identifikovali menej superciel. V roku 2008 sme napriek tomu nenašli počas sledovaného obdobia žiadnu supercelu. Tiež si môžeme všimnúť, že od roku 2009 do roku 2012 sa v každom roku vyskytlo aspoň 5 supercelárnych situácií, s maximom 7 v roku 2010.

Podľa dátumov sme ďalej vyhodnotili výskyt supercelárnych situácií v rámci jednotlivých mesiacov (obr. 5.22). Za sledované obdobie sa najviac supercelárnych situácií vyskytlo v mesiaci máj a jún, s maximom 13 v júni. Najskorší termín výskytu supercely sme zaregistrovali 5.4.2012, najneskorší 30.8.2011.



Obr. 5.22 – Výskyt supercelulárnych situácií na Slovensku v jednotlivých mesiacoch, 40 situácií.

V rámci jednej situácie sa častokrát vyskytlo viac supercelárnych buniek. Na obr. 5.23 je na osi x počet superciel v rámci jednej situácie a na osi y je počet týchto situácií za celé sledované obdobie.



Obr. 5.23 – Počet superciel pripadajúcich na jednu supercelulárnu situáciu v rokoch 2000 až 2012, 40 situácií, 101 superciel.

V grafe na obr. 5.23 si môžeme všimnúť, že až v 28 supercelárnych situáciách sa vyskytli jedna alebo dve supercely. V dvoch situáciách sa však na Slovensku vyskytlo až 10 superciel (29.5.2001 a 19.7.2011, prevažne na strednom Slovensku).

Ďalšie štatistické vyhodnotenia sme už robili pre konkrétne prípady v rámci jednotlivých situácií. V rámci dňa sme vyhodnocovali, v ktorej dennej dobe supercely vznikali najčastejšie. Výsledky sú zobrazené na obr. 5.24, stĺpce znamenajú hodinový interval. Môžeme si všimnúť, že supercely, rovnako ako obyčajné konvektívne bunky, vznikali najčastejšie popoludní medzi 12:00 a 15:00 UTC. Životnosť jednotlivých superciel je zobrazená v histograme na obr. 5.25. Vidíme, že väčšina superciel mala životnosť okolo 2 hodín, pričom až 25 z nich malo životnosť 2 až 2,5 hodiny, t.j. viac ako dvojnásobnú oproti tzv. "obyčajným" konvektívnym bunkám (Řezáčová a kol, 2007). Extrémnym prípadom je supercela z 15.6.2012, kedy oblak vznikol na východnom Slovensku o 10:20 UTC pri Nálepkove a doputoval až do severozápadného Rumunska (cca o 17:20 UTC).



Obr. 5.24 – Výskyt superciel v rámci dňa, 101 prípadov.



Obr. 5.25 - Životnosť superciel, 101 prípadov.

Na základe numerického modelu ALADIN sme vyhodnocovali vertikálny strih vetra medzi hladinou 500 hPa a prízemnou vrstvou - 10 m nad povrchom (obr. 5.4, resp. 5.9). Keďže strihové podmienky boli v rámci Slovenska častokrát diametrálne odlišné, vertikálny strih vetra sme vyhodnocovali pre konkrétne bunky. Výsledky sú zobrazené v boxplote na obr. 5.26.

Žltý boxplot (T_0000) na obr. 5.26 predstavuje strih vetra v mieste vzniku supercely, no v čase 00:00 UTC. Môžeme si všimnúť veľký rozptyl hodnôt pre 00:00 UTC. Ak však uvážime najčastejší výskyt superciel (obr. 5.24 a 5.25), je zrejmé, že vertikálny stri vetra o 00:00 UTC nemá žiadny vplyv na ich vývoj. Oranžový boxplot (T_1200) počítaný podobne ako žltý, len v čase 12:00 UTC, má o niečo menší rozptyl, keďže v tomto čase sa už supercely vyskytujú častejšie, pričom až 75 % prípadov má hodnotu viac ako 15 m.s⁻¹, s mediánom 18 m.s⁻¹.

Červený (Vznik) a zelený (Priemer) boxplot na obr. 5.26 sa priamo týkajú času výskytu supercely. Červený predstavuje hodnoty vertikálneho strihu vetra v čase vzniku supercely a zelený predstavuje priemerné hodnoty vertikálneho strihu vetra počas celej existencie supercely. Môžeme si všimnúť, že boxploty majú rovnaké hodnoty, no sú počítané z rôznych hodnôt, ide tak len o náhodnú podobnosť. Medián hodnôt vertikálneho strihu vetra je 19 m.s⁻¹, čo sa zhoduje s výsledkami v publikácii Rasmussen a Blanchard (1998), kde medián rovnakého parametra pre supercelárne prípady vyšiel okolo 19 m.s⁻¹. Ďalšie

porovnanie vertikálneho strihu vetra možno nájsť v publikácii Thompson a kol. (2003), kde sú už o niečo vyššie hodnoty vertikálneho strihu vetra (viď obr. 4.4b). Na obr. 5.26 si tiež môžeme všimnúť, že až 75 % prípadov sa vyskytlo vo vertikálnom strihu vetra väčšom ako 16 m.s⁻¹ s maximálnou hodnotou 26 m.s⁻¹ dňa 25.5.2010 (zelený boxplot). Minimálne hodnoty vertikálneho strihu vetra sa vyskytli 11.5. 2009 a to medzi 10 a 12 m.s⁻¹. V tento deň sa však vyskytlo niekoľko buniek vykazujúcich výrazné supercelárne črty (viď napr. obr. 2.6, 2.13, 5.45).



Obr. 5.26 – Vertikálny strih vetra superciel vyskytujúcich sa v rokoch 2004 až 2012 medzi hladinou 500 hPa a hladinou vo výške 10 m nad povrchom, 80 prípadov, vyhodnotené podľa numerického modelu ALADIN SHMÚ, žltý, oranžový a červený boxplot predstavujú hodnoty vertikálneho strihu vetra v mieste vzniku supercely o 00:00 UTC (žltý), 12:00 UTC (oranžový) a v čase vzniku (červený), zelený boxplot predstavuje priemerný vertikálny strih vetra počas celej existencie supercely, hodnoty boxplotu – minimálna hodnota, prvý kvartil, medián, tretí kvartil, maximálna hodnota.

Oblasti vzniku jednotlivých superciel za rok 2000 až 2012 sú zobrazené na obr. 5.27a. Čím je červená farba výraznejšia, tým viac superciel v danej lokalite počas sledovaného obdobia vzniklo. Na obr. 5.27b sú zobrazené trajektórie superciel za rovnaké obdobie. Čím je čierna farba výraznejšia, tým viac superciel prešlo danou oblasťou.



Obr. 5.27a – Oblasti vzniku superciel v rokoch 2000 až 2012, 101 prípadov.



Obr. 5.27b - Trajektórie superciel v rokoch 2000 až 2012, 101 prípadov.

Na obr. 5.27 si môžeme všimnúť, že na severe stredného Slovenska (Orava, Kysuce, Turiec) sme identifikovali málo superciel. Je to spôsobené predovšetkým možnosťami detekcie superciel v danej oblasti, nakoľko MJ dokáže detegovať ciele vo výške 2 km len do vzdialenosti cca 120 km (približne vzdialenosť Ilavy od Malého Javorníka) a pre KH je táto oblasť v tieni horských masívov. Na snímkach rádiolokačnej odrazivosti z KH boli dáta vo väčšej vzdialenosti od rádiolokátora ťažko interpretovateľné, najmä v členitom teréne (Zamagurie, severná časť Šariša a severovýchodná časť Horného Zemplína), čím nebolo vždy možné v týchto oblastiach identifikovať supercelárne črty buniek.

Na obr. 5.27a si môžeme všimnúť, že najčastejší vznik superciel, ktoré ovplyvňujú počasie na Slovensku, sme detegovali v oblasti Spiša, nevýraznejšou oblasťou je potom Morava. Väčšina superciel, ktorých vznik sme detegovali na juhu stredného Slovenska sú spojené s jedným dňom – 19.7.2011 (foto *wall cloudu* je na obr. 2.3). Tiež si môžeme všimnúť, že v oblasti Podunajskej a Východoslovenskej nížiny a v oblasti Rimavskej Soboty, kde rádiolokátory detegujú odrazivosť pomerne spoľahlivo, sme zaznamenali len veľmi málo prípadov vzniku superciel. Môžeme si tiež všimnúť, že v oblasti Podtatranskej kotliny sme detegovali len veľmi málo prípadov vzniku superciel na rozdiel od blízkej oblasti Spiša, ktorá vykazovala zvýšený výskyt.

Na obr. 5.27b môžeme identifikovať oblasti, v ktorých sme výskyt superciel detegovali pomerne často (vzhľadom na možnosti detekcie). Na obr. 5.27a sme ukázali, že najčastejší vznik superciel sme detegovali v oblasti Spiša, čiastočne aj na Morave. Pri prevládajúcom západnom prúdení sa teda najviac superciel vyskytlo v okrese Prešov, Spišská Nová Ves a na Záhorí. Tiež si môžeme všimnúť, že hoci v Podunajskej nížine sme vznik superciel detegovali len málokedy, ich výskyt tu nebol výnimočný, no v oblasti Rimavskej Soboty sme supercely takmer vôbec nedetegovali.

Keďže archív KH do roku 2006 nebol dostupný, na obr. 5.28 sme vyhodnotili jednotlivé prípady za obdobie rokov 2006 – 2012 na porovnanie výskytu superciel na východe a na západe Slovenska.



Obr. 5.28a – Oblasti vzniku superciel v rokoch 2006 až 2012, 68 prípadov.



Obr. 5.28b - Trajektórie superciel v rokoch 2006 až 2012, 68 prípadov.

Z obr. 5.28 vidíme, že po roku 2006 sme na západnom Slovensku identifikovali menej superciel ako na východnom, čím sa oblasť Spiša javí z pohľadu vzniku superciel ešte výraznejšia, no keď že ide o analýzu veľmi krátkeho radu, môže to byť len náhodná variabilita. Na poli rádiolokačnej odrazivosti sme prostredníctvom MJ identifikovali 28

prípadov¹⁸, zvyšných 40 prípadov sme detegovali len pomocou KH. Obr. 5.29 zobrazuje trajektórie superciel, ktoré sme identifikovali v rokoch 2000 – 2005 (5.29a) a v rokoch 2006 - 2012 (obr. 5.29b) pomocou MJ.



Obr. 5.29a – Trajektórie superciel v rokoch 2000 až 2005 identifikované pomocou MJ, 33 prípadov.



Obr. 5.29b – Trajektórie superciel v rokoch 2006 až 2012 identifikované pomocou MJ, 28 prípadov.

¹⁸ Niektoré z prípadov, ktoré sme detegovali pomocou MJ sme detegovali aj prostredníctvom KH (prípady na strednom Slovensku).

5.2 Rozdelenie superciel podľa tvaru poľa rádiolokačnej odrazivosti

Bunky, na ktorých sme detegovali supercelárne črty sa na snímkach rádiolokačnej odrazivosti nejavili vždy ako samostatne existujúce bunky. Zaznamenali sme štyri typické štruktúry superciel – samostatne existujúca bunka, "vejár" na poli rádiolokačnej odrazivosti, línia buniek so supercelou a línia superciel. Detekciu sme vykonávali na produktoch *CAPPI 2km* a *PPI* v spodných hladinách oblakov. Do roku 2003 sme *PPI* na dosahu 240 km MJ nemohli používať (viď kapitola 1.3.1), tak sme využívali produkt *CMAX*, ktorý sme konfrontovali s *PPI* na dosahu 60 km, ak to bolo možné.

 Samostatne existujúca bunka - detegovali sme len jedno samostatné jadro vysokej rádiolokačnej odrazivosti, príklady sú na obr. 5.30. Biele šípky označujú analyzované bunky, čierne šípky označujú smer postupu buniek. Ďalší príklad a tiež vývoj samostatnej bunky zobrazuje obr. 5.31 označenej písmenom A.



Obr. 5.30 – Pole rádiolokačnej odrazivosti, príklady samostatne existujúcich buniek (označené bielymi šípkami), čierne šípky označujú smer postupu bunky, modré čiary označujú línie buniek, (a) 9.6.2004, 14:45 UTC, *PPI* 0.8 st., MJ, Záhorie, (b) 20.6.2004, 12:30 UTC, *PPI* 0.8 st., MJ, severne od Budapešti, (c) 16.8.2010, 15:05 UTC, *CAPPI 2km*, KH, severovýchodné Maďarsko, (d) 25.5.2010, 15:20 UTC, *MOS CAPPI 2km*, Podunajská nížina, (e) 21.6.2011, 15:25, *MOS CAPPI 2km*, Česká republika (prevzaté a upravené, SHMÚ).



Obr. 5.31 – Pole rádiolokačnej odrazivosti, vývoj izolovaných superciel, *PPI* 0.8 st., MJ, 5.7.2004, 13:30 – 19:00 UTC, čierna šípka v prvej snímke označuje smer postupu bunky, A - vývoj izolovanej supercely (čiara v poslednej snímke označuje jej trajektóriu), bunka B – premena izolovanej supercely na *bow echo* (prevzaté a upravené, SHMÚ).

2. "Vejár" rádiolokačnej odrazivosti. V tomto prípade sme na poli rádiolokačnej odrazivosti detegovali jednu bunku, no vyskytujúcu sa v oblasti vyššej rádiolokačnej odrazivosti. V spodných hladinách sme tak identifikovali črtu v tvare vejára, s najvýraznejším jadrom na jeho vrchole. Príklady sú zobrazené na obr. 5.32 (tento typ môžeme vidieť aj na obr. 5.30e, bunka nad Slovenskom).







Obr. 5.32 – Pole rádiolokačnej odrazivosti, štruktúra v tvare "vejára", čierne šípky označujú pohyb bunky, približná poloha predpokladaných mezocyklón je v strede bielych kružníc, (a) 30.8.2011, 14:45 UTC, *CAPPI 2km*, KH, Prešov, (b) 15.6.2012, 12:05 UTC, *CAPPI 2km*, KH, juhozápadne od Košíc, (c) 3.6.2012, 16:00 UTC, *MOS CAPPI 2km*, Senica (prevzaté a upravené, SHMÚ).

Vejárovitá štruktúra na poli rádiolokačnej odrazivosti vzniká pravdepodobne kvôli orientácii vektora relatívneho vertikálneho strihu vetra, ktorá je približne paralelná s vejárom, t.j. hydrometeory sú odnášané z *updraftu* supercely v smere relatívneho vektora strihu vetra. Ich vypadávanie až na zemský povrch, resp. aspoň do nižších hladín, potom pole rádiolokačnej odrazivosti vytvaruje do tvaru vejára aj na horizontálnych produktoch pre nízke hladiny, napr. *CAPPI 2km*.

Príklad vývoja bunky s vejárovitou štruktúrou vidíme na obr. 5.33. Bunka vznikla cca o 14:00 UTC, na obr. 5.33 je zobrazený vývoj od 14:15 do 17:15 UTC. Vidíme, že na náveternom (v tomto prípade západnom) okraji "vejára" sa počas celého vývoja udržiava najaktívnejšie jadro, pričom vo východnej časti sa objavujú oblasti vyššej rádiolokačnej odrazivosti len sporadicky.



Reflectivity -10 0 10 20 30 40 50 60 70 GAPPI2/CardB21 Rain Intensity ____02 _04 0.1 0.2 0.3 0.6 1.3 2.7 5.6 12 24 50 100 200 400 800 (mar/h)

Obr. 5.33 – Pole rádiolokačnej odrazivosti, vývoj vejárovitej štruktúry, *MOS CAPPI 2km*, MJ, 3.6.2012, 14:15 – 17:15 UTC, západné Slovensko (prevzaté a upravené, SHMÚ).

Vejárovitú štruktúru má aj bunka na obr. 5.31 označená písmenom "B". Vidíme, že vznikla v zhluku vyššej rádiolokačnej odrazivosti, no vhodné vtokové podmienky mala pravdepodobne len najjužnejšia bunka, u ktorej sa v strihovom prostredí mohla vyvinúť mezocyklóna. Taktiež si môžeme všimnúť, že medzi 15:30 a 16:00 UTC vznikajú na *flanking line* nové jadrá a celý systém tak končí ako *bow echo*, čo je typické pre HP supercely (viď kapitole 2.6.2, vývoj "a" na obr. 2.24).

Zaznamenali sme aj prípady, v ktorých k vejárovitej štruktúre na poli rádiolokačnej odrazivosti došlo v dôsledku vzniku novej bunky na okraji už existujúceho systému. Príklad vývoja z 9.5.2003 na Podunajskej nížine je zobrazený na obr. 5.34. Túto bunku by sme klasifikovali ako HP supercelu (viď kapitola 2.6.2, vývoj "b" na obr. 2.24).



Obr. 5.34 – Pole rádiolokačnej odrazivosti, vývoj vejárovitej štruktúry, čierna šípka v prvej snímke označuje smer postupu supercely, *CMAX*, MJ, 9.5.2003, 17:45 – 20:30 UTC, Podunajská nížina (prevzaté a upravené, SHMÚ).

3. Línia - supercela existujúca v rámci línie buniek (obr. 5.35). Od predchádzajúcej "vejárovitej" štruktúry sa táto kategória líši tým, že supercelárna bunka sa vyskytuje v rámci pomerne kompaktnej línie vysokej rádiolokačnej odrazivosti a nie výlučne na okraji, resp. na vrchole.



Obr. 5.35 – Pole rádiolokačnej odrazivosti, príklady superciel existujúcich v rámci línie buniek, čierne šípky označujú smer postupu bunky, približná poloha predpokladaných mezocyklón je v strede bielych kružníc, (a) 13.5.2003, 14:41 UTC, *PPI* 1.5 st, MJ (dosah 60 km), východne od Viedne, (b) 11.6.2009, 15:22 UTC, *CAPPI 2km*, KH, severovýchodne od Prešova, (c) 23.7.2009, 21:00 UTC, *MOS CAPPI 2km*, Malacky, (d) 11.5.2007, 14:15 UTC, *MOS CAPPI 2km*, severozápadne od Bytče (prevzaté a upravené, SHMÚ).

Na obr. 5.35 vidíme na poli rádiolokačnej odrazivosti niekoľko príkladov supercelárnych buniek v rámci línie. Na obr. 5.35a sa línia buniek vytvorila až po vzniku supercely, na obr. 5.35b sme detegovali supercelárnu štruktúru na juhozápadnom okraji línie.

Obr. 5.35c zobrazuje supercelárnu bunku, ktorá vznikla priamo v línii a obr. 5.35d zobrazuje výskyt supercelárnej bunky v nekompaktnej línii buniek.

Vývoj supercely na západnom okraji línie zobrazuje obr. 5.36. Čierna šípka označuje smer postupu línie a v druhej snímke je bielou kružnicou označená supercelárna bunka. Môžeme si všimnúť, že línia je spočiatku kompaktná, no supercelárna bunka za líniou zaostáva a postupne sa od nej oddeľuje.



Obr. 5.36 – Pole rádiolokačnej odrazivosti, vývoj supercely na západnom okraji línie, čiernou šípkou je označený smer postupu línie, bielou kružnicou je na druhej snímke označená supercelárna bunka, *cmax*, MJ, 15.6.2002 21:15 UTC – 16.6.2002 01:45 UTC, západné Slovensko (prevzaté a upravené, SHMÚ).

 Línia superciel. Do tejto kategórie sme zaradili supercelárne bunky, ktoré sa vyskytovali v rámci jednej línie, pričom na poli rádiolokačnej odrazivosti boli od seba separované. Zaregistrovali sme dva takéto prípady (obr. 5.37).



Obr. 5.37 – Pole rádiolokačnej odrazivosti, línia superciel (približne označená bielou krivkou), čierne šípky označujú prevládajúce prúdenie, (a) 12.4.2009, 13:45 UTC, *CAPPI 2km*, KH, východné Slovensko, (b) 19.7.2011, 14:40 UTC, *MOS CAPPI 2km*, stredné Slovensko (prevzaté a upravené, SHMÚ).

Pri analýze jednotlivých kategórií sme zaznamenali aj prípady, predovšetkým pri kategórii izolovaných buniek, pri ktorých sa supercely vyskytli pred líniou buniek. Keďže línia postupovala rýchlejšie, supercela sa zvyčajne stala súčasťou línie. Pri tomto procese môže dôjsť aj k deformácii línie (French a Parker, 2012), ktorú sme však vzhľadom na relatívne malé množstvo prípadov a časopriestorové rozlíšenie rádiolokačných dát nezaregistrovali ani v jednom prípade. Na obr. 5.30a, 5.30c a 5.30d sú prípady, pri ktorých supercela postupne splynula s líniou buniek (označená modrou čiarou) a celý proces splynutia môžeme vidieť na obr. 5.38 (prípad je analyzovaný aj v kapitole 5.3.4.1).



Obr. 5.38 – Polia rádiolokačnej odrazivosti, splynutie supercely s líniou, supercela označená bielou šípkou, KH, *CAPPI 2 km*, 16.8.2010, 15:00 – 17:30 UTC, východné Slovensko (prevzaté a upravené, SHMÚ).

5.3 Typické supercelárne črty detegované rádiolokátormi SHMÚ

V tejto kapitole uvádzame prehľad nameraných supercelárnych čŕt nameraných na poli rádiolokačnej odrazivosti a na poli radiálnej dopplerovskej rýchlosti prostredníctvom rádiolokátorov SHMÚ a s využitím poznatkov z odbornej literatúry, najmä z Brown a Wood (1991), Burgess a Lemon (1990) a Donaldson (1970).

5.3.1 Mezocyklóna

Mezocyklóny superciel sme mohli detegovať pomocou MJ len na 60 km dosahu (do roku 2008) a pomocou KH len v rokoch 2006 až 2009 (viď problémy popísané v kapitole 1.3.1).

Na poli radiálnej dopplerovskej rýchlosti sme mezocyklónu zaregistrovali len v niekoľkých prípadoch. Vo väčšine prípadov sa však mezocyklonálna rotácia nedala spoľahlivo identifikovať. Vtedy hovoríme o tzv. "príznaku" mezocyklóny.

Na obr. 5.39, 5.40 a 5.41 je zobrazených niekoľko vybraných prípadov detekcie mezocyklóny. Poloha predpokladaných mezocyklón je približne v strede bielych kružníc a čiernou šípkou je označený smer postupu buniek, čiernou kružnicou sú označené polohy rádiolokátorov. K poľu radiálnej dopplerovskej rýchlosti je priložené aj pole rádiolokačnej odrazivosti z príslušnej elevácie.

Obr. 5.39 a 5.40 zobrazuje detegované mezocyklóny pomocou MJ na 60 km dosahu. Obr. 5.39 zobrazuje prípady, v ktorých sme mezocyklónu spoľahlivo identifikovali (supercely z 9.6.2004 sú analyzované aj v kapitole 5.3.4.2) a na obr. 5.40 sú zobrazené príklady "príznaku" mezocyklóny, tzv. *mesocyclonic vortex signature* (MVS).

Na obr. 5.41 sú uvedené najlepšie namerané prípady detekcie mezocyklóny pomocou KH. Vzhľadom na pomerne silný šum na poli radiálnej dopplerovskej rýchlosti sme signál preverili na viacerých nízkych eleváciách a identifikovali sme ho na niekoľkých snímkach po sebe. Od poľa radiálnej dopplerovskej rýchlosti sme odpočítali rýchlosť postupu danej bunky, čím sme získali pole relatívnej radiálnej rýchlosti pohybu častíc v rámci oblaku (*storm to relative radial velocity*).



Obr. 5.39 - 1A, 1B - Pole rádiolokačnej odrazivosti, <math>2A, 2B - pole radiálnej dopplerovskej rýchlosti, MJ (60 km dosah), poloha rádiolokátora je označená čiernou kružnicou, supercela A – 13.5.2003, 13:56 UTC, supercela B – 9.6.2004, 15:07 UTC, v strede bielych kružníc je oblasť mezocyklóny, čiernymi šípkami je označený smer postupu supercely (prevzaté a upravené, SHMÚ).



Obr. 5.40 – 1A, 1B – Pole rádiolokačnej odrazivosti, 2A, 2B – pole radiálnej dopplerovskej rýchlosti, MJ (60 km dosah), poloha rádiolokátora je označená čiernou kružnicou, bunka A – 15.6.2002, 18:56 UTC, supercela B – 12.5.2007, 14:37 UTC, v strede bielych kružníc je predpokladaná oblasť mezocyklóny, čiernymi šípkami je označený smer postupu supercely (prevzaté a upravené, SHMÚ).



Obr. 5.41 – Pole rádiolokačnej odrazivosti (vľavo), pole relatívnej radiálnej dopplerovskej rýchlosti (vpravo), centrálna časť východného Slovenska, pre všetky snímky je použitá rovnaká doména, čiernou kružnicou je vyznačená poloha KH, v strede bielych kružníc je predpokladaná oblasť mezocyklóny, čiernymi šípkami je označený smer postupu supercely, (a) 18.8.2006, 16:00 UTC, *PPI* 0.69 st., západne od Prešova, (b) 11.4.2009, 12:15 UTC, *PPI* 2.49 st., (c) 12.4.2009, 13:00 UTC, *PPI* 1.49 st., severozápadne od Prešova (d) 12.4.2009, 13:30 UTC, *PPI* 2.49 st., západne od Prešova, (e) 11.5.2009, 20:15 UTC, *PPI* 2.49 st., západne od Kojšovskej hole (prevzaté a upravené, SHMÚ).
5.3.2 Hákovité echo

V kapitole 2.4.2 sme ukázali, že hákovité echo je nízkohladinová črta supercely na poli rádiolokačnej odrazivosti (Burgess a Lemon, 1990). Hákovité echo sme zaregistrovali približne pri tretine analyzovaných buniek. Príklady detekcie hákovitého echa rádiolokátormi SHMÚ sú zobrazené na obr. 5.42, 5.43 a 5.44. Biele šípky ukazujú na hákovité echo, čierne šípky znázorňujú postup bunky.

Na obr. 5.42 sú príklady detegovaného hákovitého echa namerané pomocou MJ merajúcom na 240 km dosahu. Kvôli horšiemu rozlíšeniu sme na 240 km dosahu identifikovali hákovité echo len zriedkavo, pričom väčšinou už bolo veľmi dobre vyjadrené.



Obr. 5.42 – Pole rádiolokačnej odrazivosti, MJ, biele šípky ukazujú hákovité echo, čiernymi šípkami je označený smer postupu bunky, (a) 9.6.2004, 16:00 UTC, *PPI* 0.8 st., Skalica, (b) 11.5.2007, 12:15 UTC, *MOS CAPPI 2km*, severozápadne od Bytče, (c) 25.5.2010, 14:55 UTC, *MOS CAPPI 2km*, východne od Bratislavy, (d) 3.6.2012, 15:50 UTC, *MOS CAPPI 2km*, západne od Senice (prevzaté a upravené, SHMÚ).

Na obr. 5.43 sú zobrazené príklady tvaru a fáz vývoja hákovitého echa pomocou MJ merajúcom na 60 km dosahu. Keďže radiálne rozlíšenie na tomto dosahu je 125 m, hákovité echo bolo možné identifikovať. Pre jednotlivé ukážky je použitá rovnaká doména 35x24 km. Môžeme si všimnúť, že hákovité echá majú široké spektrum veľkosti, od najmenších na obr.

5.43a, po najväčšie ako na obr. 5.43f. Hákovité echo na obr. 5.43f bolo spojené s tornádom vo Viedni¹⁹.

Príklady detegovaného hákovitého echa na poli rádiolokačnej odrazivosti pomocou KH sú zobrazené na obr. 5.44. Doména jednotlivých snímok je upravená tak, aby bola opticky porovnateľná s doménou snímok na obr. 5.43. Ukážkové hákovité echo je na obr. 5.44a, pretože nie je deformované a sú v ňom relatívne nízke odrazivosti. Podobne vyzerá aj hákovité echo bunky vľavo na obr. 5.44c. V niektorých prípadoch si však môžeme všimnúť, že hákovité echo sa deformuje a ohýba v smere postupu pravdepodobne kvôli veľmi aktívnemu RFD. Toto je dobre vidieť na obr. 5.44d a 5.44g.

Hákovité echá môžeme tiež vidieť v predchádzajúcej podkapitole o detekcii mezocyklóny na obr. 5.39, 5.40 a 5.41.

¹⁹ Termíny výskytu tornáda a detegovaného hákovitého echa rádiolokátorom na Malom Javorníku sa nemusia zhodovať.



Obr. 5.43 – Pole rádiolokačnej odrazivosti, MJ (dosah 60 km), biele šípky ukazujú hákovité echo, čiernymi šípkami je označený smer postupu bunky, rovnaká doména pre všetky snímky, (a) 2.7.2000, 17:43 UTC, *PPI* 1.3 st., západne od Myjavy, (b) 16.6.2002, 00:26 UTC, *PPI* 1.5 st., juhozápadne od Senice, (c) 16.6.2002, 19:11 UTC, *PPI* 1.5 st., južne od Malaciek, (d) 16.6.2002, 20:26 UTC, *PPI* 1.4 st., Malacky, (e) 9.5.2003, 18:12 UTC, *PPI* 1.4 st., juhozápadne od Dunajskej Stredy, (f) 13.5.2003, 13:11 UTC, *PPI* 1.4 st., Viedeň, (g) 9.6.2004, 14:52 UTC, *PPI* 1.4 st., Skalica, (h) 12.5.2007, 14:07 UTC, *PPI* 1.4 st., Senec (prevzaté a upravené, SHMÚ).



Obr. 5.44 – Pole rádiolokačnej odrazivosti, biele šípky ukazujú hákovité echo, čiernymi šípkami je označený smer postupu bunky, KH, rovnaká doména pre všetky snímky, (a) 11.4.2009, 15:22 UTC, *CAPPI 2km*, severne od Košíc, (b) 11.5.2009, 19:52 UTC, *PPI* 1.49 st. (hladina vo výške cca 1,8 km), Krompachy, (c) 11.5.2009, 21:22 UTC, *PPI* 0.99 st. (hladina vo výške cca 1,6 km), severne od Košíc, (d) 14.6.2010, 17:20 UTC, *CAPPI 2km*, Spišské Podhradie, (e) 16.8.2010, 15:15 UTC, *CAPPI 2km*, južne od Turne nad Bodvou, (f) 19.7.2011, 16:50 UTC, *CAPPI 2km*, Tisovec, (g) 30.8.2011, 14:55 UTC, *CAPPI 2km*, Prešov, (h) 23.8.2012, 15:10 UTC, *CAPPI 2km*, severne od Košíc (prevzaté a upravené, SHMÚ).

Využitie hákovitého echa ako štruktúry signalizujúcej silnú rotáciu v spodných hladinách je však komplikované. Jednak, hydrometeory nie sú vhodné na sledovanie prúdenia vnútri oblakov vzhľadom na ich veľkú pádovú rýchlosť (Markowski, 2002a) a, ako vyplýva zo schémy supercely na obr. 2.4, hákovité echo leží v oblasti vzniku nových buniek, tzv. *flanking line*. Ak je táto oblasť aktívna, pozorujeme v oblasti RFD a hákovitého echa rôzne deformácie.

Komplikovanosť týchto procesov ilustruje obr. 5.45, na ktorom je zobrazený vývoj hákovitého echa z 11.5.2009 na východnom Slovensku. Sledovali sme nízku eleváciu (0.0 st.), pretože nás zaujímal predovšetkým vývoj v spodných hladinách štruktúry a táto elevácia bola najkvalitnejšie nameraná. Na vývoji si môžeme všimnúť, že bunka má veľmi aktívnu oblasť RFD, ktorá postupne ohýba RFGF v smere postupu bunky až vytvára štruktúru známu skôr ako *bow echo*, čím dochádza k postupnému zatváraniu vtokového regiónu, WER sa zmenšuje (na obr. 5.45 WER označená žltými šípkami) a mezocyklóna okluduje. V takto vzniknutom regióne RFD sa namiesto rotácie prúdenia dá očakávať skôr silná húľava. V čase 20:45 UTC sa bunka nachádzala v blízkosti rádiolokátora, čím mohli niektoré detaily zaniknúť. Na obr. 5.46 je zobrazené meranie smeru a rýchlosti vetra z automatickej stanice na Kojšovskej holi. Môžeme si všimnúť, že približne v čase prechodu RFGF cez Kojšovskú hoľu automatická stanica zaznamenala náraz vetra 11.8 m·s⁻¹ (obr. 5.46a) a zmenu smeru vetra (5.46b) zo 160° na 280°, čiže z južného až juhovýchodného sa vietor zmenil na západný.

Skutočnosť, že hákovité echo je nízkohladinová štruktúra, potvrdzuje aj vertikálny rez z 20:07 UTC na obr. 5.47 v smere úsečky AB, na ktorom si môžeme všimnúť, že vysoké hodnoty rádiolokačnej odrazivosti sa nachádzajú v oblasti hákovitého echa približne do hladiny 3 km (hákovité echo označené bielou šípkou). Za spoľahlivé považujeme hodnoty rádiolokačnej odrazivosti detegované v hladinách približne nad 1,5 km, nakoľko v hladinách do cca 1,5 km sú detegované aj pozemné ciele. Na obrázku je tiež označený žltou šípkou nový výstupný prúd tvoriaci sa pozdĺž *flanking line*.



Obr. 5.45 – Pole rádiolokačnej odrazivosti, vývoj hákovitého echa, smer postupu bunky znázorňuje čierna šípka, žlté šípky ukazujú WER, KH, *PPI* 0.0 st., 11.5.2009, 20:07 – 20:45 UTC, okolie Kojšovskej hole (prevzaté a upravené, SHMÚ).



Obr. 5.46a – Nárazy vetra, automatická stanica Kojšovská hoľa, 11.5.2009 03:00 UTC – 12.5.2009 03:00 UTC (prevzaté a upravené, SHMÚ).



Obr. 5.46b – Smer vetra, automatická stanica Kojšovská hoľa, 11.5.2009 03:00 UTC – 12.5.2009 03:00 UTC (prevzaté a upravené, SHMÚ).



Obr. 5.47 – Vertikálny rez, pole rádiolokačnej odrazivosti, v pravej časti obrázku je naznačený rez na podkladovej mape *CAPPI 2km*, biela šípka ukazuje hákovité echo, žltá šípka ukazuje nový výstupný prúd, KH, 11.5.2009, 20:07 UTC (prevzaté a upravené, SHMÚ).

5.3.3 WER

V kapitole 2.4.1 sme ukázali, že WER je štruktúra na poli rádiolokačnej odrazivosti vypovedajúca o intenzite *updraftu* a teda aj o vtoku vzduchu do bunky. Keďže do výberu sme zahrnuli len bunky so životnosťou vyššou ako 60 minút, je pravdepodobné, že vtok do buniek

musel byť veľmi výrazný. Toto potvrdzuje aj fakt, že WER sme identifikovali na viac ako polovici prípadov²⁰.

V prípade, že sme na poli rádiolokačnej odrazivosti neidentifikovali hákovité echo, WER sme identifikovali medzi RFGF a FFGF. WER môžeme vidieť na obrázkoch 5.39 až 5.45, kde sme analyzovali detekciu mezocyklóny a hákovitého echa. V tejto podkapitole teda uvádzame len niekoľko ďalších príkladov (obr. 5.48). WER a BWER budeme podrobnejšie analyzovať v nasledujúcej podkapitole o vertikálnych a horizontálnych rezoch oblakov.



Obr. 5.48 – Pole rádiolokačnej odrazivosti, ukážky WER (označené žltými šípkami), čierne šípky označujú postup bunky, KH, (a) 11.4.2009, 11:22 UTC, *PPI* 0.99 st., okolie Spiša, (b) 11.6.2009, 14:52 UTC, *PPI* 0.99 st., severovýchodne od Prešova, (c) 19.7.2011, 16:50 UTC, *CAPPI 2km*, východne od Hriňovej (prevzaté a upravené, SHMÚ).

5.3.4 Vertikálne a horizontálne rezy

Vo vybraných prípadoch sme analyzovali aj vertikálne a horizontálne rezy oblakmi s najlepšie vyvinutými príznakmi supercely. Na jednotlivých rezoch sme sa zameriavali na vertikálnu štruktúru a vývoj rádiolokačných čŕt superciel, predovšetkým na WER a BWER.

Rezy oblakmi sme robili z nekorigovanej rádiolokačnej odrazivosti pomocou produktu *CAPPI* v hladinách od 2 do 12 km s vertikálnym krokom 2 km.

²⁰ Prípadov s detekciou WER by bolo pravdepodobne viac, no nie vždy bolo možné sledovať spodné hladiny buniek.

5.3.4.1 Horizontálne a vertikálne rezy z objemových dát rádiolokátora Kojšovská hoľa

Na obr. 5.49a je zobrazená sekvencia horizontálnych rezov a z 18.8.2006 16:00 UTC. V hladine 2 km sme identifikovali oblasť WER, no v hladine 4 km sme už WER nezaregistrovali. Vo vyšších hladinách sme vyššie hodnoty rádiolokačnej odrazivosti registrovali práve v oblasti, v ktorej sme detegovali WER v hladine 2 km. Tiež si môžeme všimnúť, že hodnoty okolo 15 dBZ sme detegovali ešte v hladine 12 km.

Na obr. 5.49b je zobrazený vertikálny rez vedený bunkou na obr. 5.49a. Opäť platí, že za spoľahlivé považujeme hodnoty rádiolokačnej odrazivosti detegované v hladinách približne nad 1,5 km, nakoľko v hladinách do cca 1,5 km sú detegované aj pozemné ciele (na obr. 5.49b sú označené bielou šípkou). Ako sme si všimli na obr. 5.49a, WER je dobre vyjadrená približne do hladiny 3 km, v hladine 4 km už môžeme vidieť oblasť vysokej rádiolokačnej odrazivosti.



Obr. 5.49a – Pole rádiolokačnej odrazivosti, horizontálne rezy konvektívnej bunky, *CAPPI* s vertikálnym krokom 2 km, čierna šípka označuje smer postupu bunky, sledovaná oblasť je vyznačená bielymi kružnicami, KH, 18.8.2006, 16:00 UTC, západne od Prešova (prevzaté a upravené, SHMÚ).



Obr. 5.49b – Pole rádiolokačnej odrazivosti, vertikálny rez konvektívnej bunky, v pravej časti obrázku je naznačený rez, biela šípka ukazuje detegované pozemné ciele, 16.8.2006, 16:00 UTC, západne od Prešova (prevzaté a upravené, SHMÚ).

Ďalšia ukážka vertikálnej štruktúry bunky prostredníctvom horizontálnych rezov je na obr. 5.50a. Na obr. 5.50b je zobrazený vertikálny rez danou bunkou a na obr. 5.50c je zobrazený vývoj supercely. Ide o prípad z 25.6.2007.

Na obr. 5.50a sú v hladine 2 km veľmi dobre rozpoznateľné štruktúry ako hákovité echo a WER, čo už v hladine 4 km nepozorujeme. Nad oblasťou WER už pozorujeme oblasť vysokej rádiolokačnej odrazivosti. Na obr. 5.50a si tiež môžeme všimnúť, že oblasť najvýraznejšej rádiolokačnej odrazivosti v oblasti RFD (označená bielou šípkou), bunku tak klasifikujeme ako HP supercelu (Moller a kol., 1994).

Na obr. 5.50b taktiež identifikujeme oblasť WER, približne do hladiny 3 km. Nad oblasť ou WER sa nachádza oblasť vysokých hodnôt rádiolokačnej odrazivosti - *overhang*. Na obr. 5.50b je tiež vyznačená oblasť RFD.

Na obr. 5.50c môžeme vidieť odklon supercely od prevládajúceho prúdenia. Vidíme, že spočiatku sa pohybovala na severovýchod a pravdepodobne po vývoji mezocyklóny sa začala pohybovať na juhovýchod. Podrobnejšie sa týmto prípadom zaoberá práca Horváth a kol. (2007).



Obr. 5.50a – Pole rádiolokačnej odrazivosti, horizontálne rezy konvektívnej bunky, *CAPPI* s vertikálnym krokom 2 km, čierna šípka označuje smer postupu bunky, biela šípka v prvej snímke označuje RFD, sledovaná oblasť je vyznačená bielymi kružnicami, KH, 25.6.2007, 14:07 UTC, Trebišov (prevzaté a upravené, SHMÚ).



Obr. 5.50b – Pole rádiolokačnej odrazivosti, vertikálny rez konvektívnej bunky, v pravej časti obrázku je naznačený rez, 25.6.2007, 14:07 UTC, Trebišov (prevzaté a upravené, SHMÚ).



Obr. 5.50c – Postup supercely (označený čiernou krivkou) 25.6.2007 cez východné Slovensko, farebne zvýraznené pole rádiolokačnej odrazivosti (Horváth a kol., 2007).

V kapitole 2.4.1 sme ukázali, že na horizontálnych rezoch oblakmi môžeme okrem WER identifikovať aj BWER. Ukážka z 11.4.2009 je na obr. 5.51. Na prvej snímke sme v hladine 2 km identifikovali WER a hákovité echo. V hladine 4 km si môžeme všimnúť, že oblasť slabej (v tomto prípade dokonca takmer žiadnej) rádiolokačnej odrazivosti môžeme stále detegovať, no už je zo všetkých strán obklopená vyššími hodnotami, čo už považujeme za BWER, ktorú detegujeme aj v hladine 6 km. Pri porovnaní hladín 4 a 8 km si môžeme všimnúť, že nad oblasť ou BWER sa v hladine 8 km nachádza oblasť najvyššej rádiolokačnej odrazivosti.

Na obr. 5.51 tiež vidíme v hladine 12 km relatívne vysoké hodnoty rádiolokačnej odrazivosti v porovnaní s prípadmi na obr. 5.49 a 5.50. Pri porovnaní spomínaných prípadov si tiež môžeme všimnúť v hladine 4 km, že prípad na obr. 5.51 mal pravdepodobne najsilnejší výstupný prúd, pretože v prípadoch na obr. 5.49 a 5.50 sme už v hladine 4 km registrovali vysoké hodnoty rádiolokačnej odrazivosti.



Obr. 5.51 – Pole rádiolokačnej odrazivosti, horizontálne rezy konvektívnej bunky, *CAPPI* s vertikálnym krokom 2 km, čierna šípka označuje smer postupu bunky, sledovaná oblasť je vyznačená bielymi kružnicami, modrá šípka v druhej snímke ukazuje na BWER, biela ukazuje na výrazný gradient hodnôt rádiolokačnej odrazivosti, KH, 11.4.2009, 15:30 UTC, severovýchodne od Košíc (prevzaté a upravené, SHMÚ).

Na obr. 5.52 sú zobrazené vertikálne rezy bunky analyzovanej na obr. 5.51. V hladinách do 1,5 km si opäť môžeme všimnúť detegované pozemné ciele (podobne ako na obr. 5.49b). V pravej časti obrázku je naznačený smer vertikálneho rezu na podkladovej mape produktu *CAPPI 2 km*. Na obr. 5.52a si môžeme všimnúť, že detegovaná WER má v smere rezu horizontálne cca 7 km a vo vertikálnom smere 4 až 5 km. Nad touto oblasťou sa nachádza oblasť vysokej rádiolokačnej odrazivosti (*echo overhang*), ktorá je separovaná od FFD. Oblasť slabšej rádiolokačnej odrazivosti tak klasifikujeme ako BWER (označené modrou kružnicou). Jednotlivé štruktúry sú popísané priamo v obrázku 5.52a. Situáciu lepšie znázorňuje obr. 5.52b, kde je rez vedený popri hákovitom echu, *updraft* a FFD. Môžeme si všimnúť, že BWER siaha až do hladiny cca 6 km. Ostatné štruktúry na obr. 5.52 identifikujeme rovnako ako v obr. 5.52a.



Obr. 5.52a – Pole rádiolokačnej odrazivosti, vertikálny rez konvektívnej bunky, v pravej časti obrázku je naznačený rez, 11.4.2009, 15:30 UTC, severovýchodne od Košíc (prevzaté a upravené, SHMÚ).



Obr. 5.52b – Pole rádiolokačnej odrazivosti, vertikálny rez konvektívnej bunky, v pravej časti obrázku je naznačený rez, KH, 11.4.2009, 15:30 UTC, severovýchodne od Košíc (prevzaté a upravené, SHMÚ).

Vráťme sa ešte k obr. 5.51. Všimnime si výrazný gradient hodnôt rádiolokačnej odrazivosti predovšetkým v hladine 4 km (označené bielou šípkou). Vertikálny rez vedený danou oblasťou je na obr. 5.52c. Okrem štruktúr detegovaných na obr. 5.52a si môžeme všimnúť výrazný gradient hodnôt rádiolokačnej odrazivosti v oblasti RFD. Tento gradient môže súvisieť s vťahovaním suchého vzduchu do oblaku, prípadne omývaním okolitým

suchším prúdením. Na prítomnosť suchého vzduchu v strednej a hornej troposfére dobre poukazuje aj snímka z družice MSG, pre WV 6.2 μ m (obr. 5.53). SRW v hladine 600 hPa sme vypočítali na 10 m·s⁻¹. V prípadoch silného vťahovania suchého vzduchu môže dôjsť k podpore zostupných pohybov, najmä v RFD, čím môže dôjsť k odrezaniu prítoku teplého a vlhkého vzduchu do bunky vo WER regióne (Gilmore a Wicker, 1998). Zosilnenie aktivity downburstov však nemusí znamenať rozpad konvektívnej bunky (Simon a kol., 2007).



Obr. 5.52c – Pole rádiolokačnej odrazivosti, vertikálny rez konvektívnej bunky, v pravej časti obrázku je označený rez, KH, 11.4.2009, 15:30 UTC, severovýchodne od Košíc (prevzaté a upravené, SHMÚ).



Obr. 5.53 – Družicová snímka, kanál vodnej pary WV 6.2 μm (zvýraznený kontrast), SEVIRI, družica MSG, žltá šípka označuje prúdenie suchšieho vzduchu (tmavšia oblasť), čierna šípka označuje bunku analyzovanú na obr. 5.51 a 5.52, 11.4.2009, 15:30 UTC (prevzaté a upravené, http://www.eumetsat.int/Home/index.htm).

Ďalší príklad detekcie BWER na horizontálnych rezoch je na obr. 5.54. V hladine 2 km sme detegovali hákovité echo aj WER. BWER sme detegovali v hladine 4 aj 6 km (označená modrou šípkou). Časový vývoj BWER v hladine 4 km môžeme vidieť na obr. 5.54b.



Obr. 5.54a – Pole rádiolokačnej odrazivosti, horizontálne rezy konvektívnej bunky, *CAPPI* s vertikálnym krokom 2 km, čierna šípka označuje smer postupu bunky, sledovaná oblasť je označená bielymi kružnicami, biela šípka ukazuje na BWER, KH, 16.8.2010, 15:50 UTC, Moldava nad Bodvou (prevzaté a upravené, SHMÚ).



Obr. 5.54b – Pole rádiolokačnej odrazivosti, vývoj BWER (označená bielou šípkou), smer postupu bunky znázorňuje čierna šípka, KH, *CAPPI 4km*, 16.8.2010, 15:25 – 15:50 UTC, okolie Moldavy nad Bodvou (prevzaté a upravené, SHMÚ).

Vývoj bunky analyzovanej na obr. 5.54 môžeme vidieť aj na obr. 5.38, kde sme sa zaoberali splynutím supercely s líniou buniek. Bunku sme prvýkrát detegovali o 14:45 UTC

a na obr. 5.38 si môžeme všimnúť, že na snímke z 15:00 UTC už mala vyvinuté hákovité echo a FFD. Bunka teda mala veľmi rýchly vývoj, čo dokumentujú aj vertikálne rezy na obr. 5.55. Na obr. 5.55a je zobrazený vertikálny rez o 15:05 UTC (teda 20 minút po vzniku) vedený cez oblasť mezocyklóny, na ktorom si môžeme všimnúť WER a tiež veľmi vysoké hodnoty rádiolokačnej odrazivosti (55 dBZ) vo výške 10 km.



Obr. 5.55 – Pole rádiolokačnej odrazivosti, vertikálny rez konvektívnej bunky, v pravej časti snímky je označený rez, KH, 16.8.2010, 15:05 UTC (prevzaté a upravené, SHMÚ).

Ako si môžeme všimnúť na obr. 5.54b, prvýkrát sa BWER pravdepodobne vyskytla medzi 15:25 – 1530 UTC. BWER bola najvýraznejšia medzi 15:40 a 15:50 UTC, príslušné vertikálne rezy sú zobrazené na obr. 5.56. Rezy sú vedené približne rovnakou oblasťou v rámci bunky. Na obr. 5.56b si môžeme všimnúť, že predovšetkým *overhang* vykazuje vyššie hodnoty rádiolokačnej odrazivosti ako na obr. 5.56a, čo je spôsobené hromadením hydrometeorov v danej oblasti (kapitola 2.4.1.1). Pre termíny analyzované na obr. 5.56a a 5.56b sme robili niekoľko vertikálnych rezov (v práci nezobrazené), pričom sa taktiež ukázalo, že *overhang* vykazoval vyššie hodnoty rádiolokačnej odrazivosti o 15:50 ako o 15:40 UTC.

Porovnajme teraz vertikálne rezy na obr. 5.56b a 5.56c. Vertikálne rezy vyzerajú podobne. Porovnaním orientácie jednotlivých rezov si môžeme všimnúť, že teplý a vlhký vzduchu vteká do oblaku v prízemnej vrstve z celej oblasti medzi FFD a hákovitých echom a ústí v *updrafte*, ktorý sa prejavuje ako BWER. Na obr. 5.56c si tiež môžeme všimnúť, že BWER siahala až do hladiny 8 km.



Obr. 5.56 – Pole rádiolokačnej odrazivosti, vertikálne rezy konvektívnej bunky, v pravej časti snímky je označený rez, KH, 16.8.2010, (a) 15:40 UTC, (b) 15:50 UTC, (c) 15:50 UTC (prevzaté a upravené, SHMÚ).

5.3.4.2 Horizontálne a vertikálne rezy z objemových dát rádiolokátora Malý Javorník

Horizontálne a vertikálne rezy z dát MJ sme analyzovali na dosahu 240 km pri radiálnom rozlíšení 1 km. Rezy s radiálnym rozlíšením 125 m na 60 km dosahu sme neanalyzovali, pretože s daným rozlíšením boli k dispozícii len 3 elevácie. Produkty vertikálnych a horizontálnych rezov sa v prípade MJ nezhodujú, pretože nie sú generované z rovnakým softvérom. Aj pri MJ sme používali dáta z nekorigovanej rádiolokačnej odrazivosti, no vzhľadom na nižšiu nadmorskú výšku Malého Javorníka ako Kojšovskej hole sme za spoľahlivé považovali hladiny už nad 1 km.

Na obr. 5.57 môžeme vidieť horizontálne rezy z 9.6.2004. V blízkosti Brna sa vytvorili dve supercely a pri postupe na juhovýchod prešli západným Slovenskom. Na obr. 5.57 sú označené číslami "1" a "2". Na obr. 5.57 si môžeme všimnúť, že supercely nie sú v rovnakom štádiu vývoja. V hladine 2 km má supercela "1" vyvinuté hákovité echo a výraznú WER, zatiaľ čo pri supercele "2" identifikujeme len WER. V hladine 4 km identifikujeme BWER u oboch buniek. V hladine 6 km si môžeme všimnúť, že v bunke "1" už BWER nepozorujeme, zatiaľ čo v prípade "2" áno, pričom slabú BWER v bunke "2" pozorujeme aj v hladine 8 km.



Obr. 5.57 – Pole rádiolokačnej odrazivosti, horizontálne rezy konvektívnych buniek, *CAPPI* s vertikálnym krokom 2 km, čierna šípka označuje smer postupu buniek, biela šípka ukazuje BWER, MJ, 9.6.2004, 14:30 UTC (prevzaté a upravené, SHMÚ).

Bunky na obr. 5.57 mali približne rovnakú polohu pri prechode cez slovenské hranice. V prípade oboch buniek sme robili vertikálny rez v čase prechodu cez Skalicu. Bunka "1" prechádzala oblasťou 14:30 UTC, bunka "2" 15:15 UTC. Vertikálne rezy sú zobrazené na obr. 5.58, vedené približne rovnakou oblasťou v rámci buniek. V oboch prípadoch si môžeme všimnúť dobre vyjadrenú BWER a taktiež vysoké hodnoty rádiolokačnej odrazivosti v oblasti *overhang*. Vysoké hodnoty rádiolokačnej odrazivosti si môžeme všimnúť aj v najvyšších hladinách, v prípade bunky "1" sme zaregistrovali hodnotu 45 dBZ vo výške 12 km.



Obr. 5.58 – Pole rádiolokačnej odrazivosti, vertikálne rezy konvektívnych buniek, v pravej časti snímky je označený rez, MJ, 9.6.2004, (a) bunka "1", 14:30 UTC, (b) bunka "2", 15:15 UTC (prevzaté a upravené, SHMÚ).

Na obr. 5.59 je zobrazená ešte jedna sekvencia horizontálnych rezov z 9.6.2004 o 15:30 UTC. Bunka "2" z vyššie analyzovaných mala totiž výrazné všetky črty popísané v kapitole 2.4. V hladine 2 km si môžeme všimnúť hákovité echo (označené bielou šípkou) a WER. V hladine 4 km sme zaregistrovali BWER a takmer vo všetkých hladinách sme v oblasti FFD zaregistrovali V – tvar (označený v hladine 8 km).



Obr. 5.59 – Pole rádiolokačnej odrazivosti, horizontálne rezy konvektívnej buniek, *CAPPI* s vertikálnym krokom 2 km, čierna šípka označuje smer postupu buniek, biela hákovité echo a modrá BWER, v hladine 8 km je označený V-tvar, MJ, 9.6.2004, 15:30 UTC (prevzaté a upravené, SHMÚ).

Z dňa 9.6.2004 bolo hlásené tornádo v Českej republike v Litovli a v okolí Vsetína, no nebolo spojené s bunkami analyzovanými v tejto kapitole. Z jednou z dvoch analyzovaných buniek bolo pravdepodobne spojené krupobitie nahlásené z obce Ždánice, juhovýchodne od Brna. Podľa poľa rádiolokačnej odrazivosti oblasťou prešli obidve bunky, pričom druhá z nich vykazovala hodnoty nad 60 dBZ. Z oblasti boli hlásené krúpy s maximálnou veľkosťou 9 cm a priemernou veľkosťou 5,5 cm. Vzhľadom na vysoké hodnoty rádiolokačnej odrazivosti v oblasti *overhang* (obr. 5.58) mohlo ísť len o padanie týchto krúp bez akejkoľvek inej formy zrážok. Na západnom Slovensku boli v súvislosti s týmito bunkami zaznamenané silné nárazy vetra.

5.3.5 Štiepenie

Pri štiepení supercely dochádza k rozdelení materskej bunky na dve sekundárne. Štiepenie sme fyzikálne popísali v kapitole 3.4. V tejto podkapitole sú prezentované niektoré prípady štiepenia superciel detegované na poli rádiolokačnej odrazivosti a sú k nim priložené aj zábery z družice MSG.

Štiepenie supercely zobrazujú obr. 5.60 a 5.61. Na obr. 5.60 môžeme vidieť vývoj štiepenia na poli rádiolokačnej odrazivosti v severnom Maďarsku a na juhu stredného Slovenska 20.6.2004.



Obr. 5.60 – Pole rádiolokačnej odrazivosti, štiepenie supercely, v poslednej snímke je čierna trajektória RM a červená LM, MJ, *PPI* 0.8 st., 20.6.2004, 11:30 – 13:30 UTC, severné Maďarsko a juh stredného Slovenska (prevzaté a upravené, SHMÚ).



Obr. 5.61 – Družicové snímky, RGB kompozit kanálov *IR 10.8* μm a *HRV*, SEVIRI, MSG, štiepenie supercely, červená šípka približne ozn. LM a čierna RM, žlé šípky označujú *flanking line* RM aj LM, 20.6.2004, 11:30 – 12:45 UTC (prevzaté a upravené, http://www.eumetsat.int/Home/index.htm).

Bunku analyzovanú na obr. 5.60 sme prvý raz detegovali o 11:30 UTC. Vidíme, že už na snímke z 11:45 UTC je možné identifikovať dve jadrá buniek, ktoré sa už na snímke z 12:00 UTC dajú jednoznačne detegovať. Na ďalších snímkach vidieť, že bunky sa od seba vzďaľujú a pokračujú vo svojom pohybe (LM sa odkláňa na sever, RM na východ). Trajektórie oboch buniek sú znázornená v poslednej snímke obr. 5.60 (červená - LM, čierna – RM). Štiepenie teda prebehlo v rannom štádiu existencie bunky (cca po 15 minútach od termínu, v ktorom sme bunku prvýkrát zaregistrovali).

Štiepenie detegované na poli rádiolokačnej odrazivosti zobrazené na obr. 5.60 môžeme vidieť aj na snímkach z družice MSG (RGB kompozit kanálov IR 10.8 μm a HRV senzora SEVIRI družice MSG) na obr. 5.61. Štiepenie bolo detegovateľné približne od 12:00 UTC, kedy sme identifikovali *flanking line* oboch buniek (označená žltými šípkami). Na ďalších snímkach je RM označený čiernou šípkou, LM červenou.

Na obr. 5.62a je zobrazený Skew-T diagram z 20.6.2004, 12:00 UTC z Budapešti. Zamerajme sa na vertikálny profil vetra, ktorý dobre popisuje obr. 5.62b, kde si môžeme všimnúť, že hodograf je približne rovný (hodograf je popísaný v kapitole 3.2). V kapitole 3.4.2 sme ukázali, že takéto prostredie neuprednostňuje žiadny z produktov štiepenia.



Obr. 5.62 – (a) Skew-T diagram, 20.6.2004, 12:00 UTC, Budapešť, (b) hodograf pre daný termín, na osiach je rýchlosť vetra v m/s, pri krivke je hladina merania v hPa (http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html).

Ďalší príklad jednoduchého štiepenia je na obr. 5.63. Ide o prípad z 20.8.2011 zo severovýchodného Slovenska. Na vývoji štiepenia môžeme vidieť, že bunky sa od seba neoddelia hneď na začiatku procesu štiepenia (pravdepodobne 15:45), ale k definitívnemu rozdeleniu buniek dochádza až 16:45 UTC. Na družicových snímkach na obr. 5.64 môžeme *flanking line* oboch buniek detegovať už od 16:00 UTC (bielou šípkou označený LM, svetložltou RM).

Na obr. 5.64 na snímke o 17:30 UTC je zobrazená trajektória oboch buniek, z ktorej môžeme vidieť mierny odklon RM doprava od prevládajúceho prúdenia a výrazný odklon LM doľava.



Obr. 5.63 – Pole rádiolokačnej odrazivosti, štiepenie supercely, v poslednej snímke je čierna trajektória RM a červená LM, KH, *CAPPI 2km*, 20.8.2006, 15:30 – 17:30 UTC, severovýchodné Slovensko (prevzaté a upravené, SHMÚ).



Obr. 5.64 – Družicové snímky, RGB kompozit kanálov *IR 10.8* a *HRV*, SEVIRI, MSG, štiepenie supercely, na snímke zo 16:00 UTC biela šípka označuje LM a svetložltá RM, 20.8.2006, 15:30 – 17:30 UTC (prevzaté a upravené, http://www.eumetsat.int/Home/index.htm).

Na obr. 5.63 a 5.64 si tiež môžeme všimnúť, že ide o symetrické štiepenie, teda prostredie neuprednostňuje ani LM, ani RM. Na obr. 5.65a je zobrazený Skew-T diagram, na obr. 5.65b príslušný hodograf z aerologického merania v Gánovciach z 20.8.2006 o 12:00 UTC.

Na obr. 5.65a si môžeme všimnúť, že smer vetra bol do hladiny 500 hPa väčšinou juhozápado-západný a zosilňujúci s rastúcou výškou s výnimkou prízemnej vrstvy, kde fúkal slabý severozápadný vietor. Vzhľadom na to, že bunka sa vyskytla pomerne ďaleko od Gánoviec a tiež niekoľko hodín po meraní, v oblasti bunky mohli byť iné strihové podmienky (pretože napr. spodné hladiny v Gánovciach už začal zalievať chladnejší vzduch od západu). Tvar hodografu predovšetkým v spodných hladinách tak nemôžeme spoľahlivo posúdiť.



Obr. 5.65 – (a) Skew-T diagram, 20.8.2006, 12:00 UTC, Gánovce, (http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html).



Obr. 5.65 – (b) Hodograf, 20.8.2006, 12:00 UTC, Gánovce, na osiach je rýchlosť vetra v m/s, pri krivke je hladina merania v hPa (http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html).

6 Fotodokumentácia vybraných prípadov

V tejto kapitole uvádzame fotografie javov, škôd a oblakov, ktoré sme zaznamenali v súvislosti s analyzovanými situáciami v kapitole 5.



Obr. 6.1 – 29.5.2001, tornádo v Slovenskej Vsi, (a) trajektória tornáda, (b) zničená strecha miestnej budovy http://www.ta3.sk/gfu/extr_javy/tornado.html).



Obr. 6.2 – 9.5.2003, okres Levice (Simon a kol., 2007).



Obr. 6.3 – 12.5.2007, fotografie pravdepodobnej supercelárnej bunky, (a) Svätý Jur, (b) Šúrovce (http://www.shmu.sk).



Obr. 6.4 – 11.4.2009, krúpy v Košických Olšanoch (http://forum.bourky.com/viewtopic.php?f=32&t=397).



Obr. 6.5 – 25.5.2010, okolie obce Blahová, (a) fotografia supercely, (b) škody na porastoch (foto: T. Csörgei).





Obr. 6.6 – 26.5.2010, Klosterneuburg, severne od Viedne, (a), (b) *funnel cloud*, (c) polom v lese (http://www.unwetterstatistik.at/analysen/2010/20100 526klosterneuburg.pdf).







Obr. 6.7 – 21.6.2011, (a) *funnel cloud*, Prievidza (aktuality.sk), (b) tornádo, Vlčnov u Chrudimi (http://www.in-pocasi.cz/clanky/bourky/pardubice-vzdusny-vir/), (c) *wall cloud*, Topoľčany (http://www.shmu.sk).





Obr. 6.8 – 19.7.2011, (a) krúpy, Šuľa (http://tvoje.noviny.sk/tvojenoviny-clanky/20-07-2011/tvojenoviny-v-obcisula-padali-krupy-velke-ako-vajce.html), (b) *wall cloud*, Banská Bystrica (foto: M. Šinger).

ZÁVER

V práci sme analyzovali supercely, pričom dôraz bol kladený na význačné črty a dynamický vývoj. Supercela je typický producent veľkých krúp, tornád, húľav a má dlhú životnosť, čím spôsobuje veľké škody na majetkoch a straty na životoch, a preto stále stúpajú nároky sektoru civilnej ochrany na kvalitnú predpoveď konvektívnych javov.

Práca je rozdelená na dve časti. Prvá, teoretická časť, obsahuje stručný prehľad základných poznatkov o supercelách, ktoré boli za uplynulých 50 rokov získavané meraním, pozorovaním a neskôr aj numerickým modelovaním. V druhej, praktickej časti práce, sme potom teoretické poznatky získané o supercelách v zahraničí, najmä v USA, konfrontovali so stredoeurópskymi meteorologickými a technickými podmienkami.

Zo štúdia teórie superciel vyplynulo, že supercela je definovaná na základe prítomnej mezocyklóny, ktorú môžeme za istých okolností detegovať dopplerovským rádiolokátorom. Primárnym zdrojom vertikálnej vorticity pre mezocyklónu je nakláňanie horizontálnej vorticity generovanej vertikálnym strihom vetra v okolitom prostredí. Prítomnosť rotujúceho *updraftu* v strihovom prostredí vyvoláva ďalšie efekty - podporu výstupných pohybov, odklon v pohybe voči ostatným nesupercelárnym oblakom a štiepenie materskej bunky.

Supercelu môžeme rozpoznať aj na poli rádiolokačnej odrazivosti, kde má niekoľko typických čŕt, najmä v spodných hladinách oblaku. Typické je hákovité echo vznikajúce na zadnej strane mezocyklóny a najmä oblasť slabých odrazivostí (WER) v blízkosti silného *updraftu*. Aj v stredných hladinách majú supercely špecifické črty na poli rádiolokačnej odrazivosti, typické sú V-tvar v oblasti FFD výtoku a BWER. Pri analyzovaní význačných čŕt na poli rádiolokačnej odrazivosti treba byť však pozorný, pretože nie každá supercela vykazuje všetky typické črty a tieto črty nemusia nutne súvisieť len so supercelou.

Celkovo sme identifikovali 40 dní, v ktorých sa na Slovensku vyskytli bunky vykazujúce supercelárne črty na poli rádiolokačnej odrazivosti, pričom v spomínaných 40 dňoch sa dovedna vyskytlo 101 takýchto buniek. Keďže sme však analyzovali len dáta za 13 rokov a použili sme subjektívnu metódu detekcie, na vyhotovenie kvalitnej klimatografie superciel na Slovensku to nestačilo. Hlavným výstupom práce je teda fakt, že supercely sa na Slovensku vyskytujú a môžeme ich niekedy detegovať aj rádiolokátormi SHMÚ pracujúcimi v klasickom operatívnom režime.

140

Čo sa týka makrosynoptických podmienok, ktoré vyhovujú výskytu superciel na Slovensku, tak ide o pomerne zriedkavú kombináciu instability a zvýšeného vertikálneho strihu vetra, čo znamená skalárny rozdiel prúdenia medzi povrchom a hladinou 500 hPa aspoň 15 m/s. Takéto podmienky sú u nás v lete len v oblasti výškovej frontálne zóny, najčastejšie pred blížiacim sa studeným frontom, avšak niekoľko prípadov výskytu superciel súviselo aj s teplým frontom. Zaujímavým zistením je aj výskyt niekoľkých superciel na periférii výškovej cyklóny, ktorá takisto môže byť zdrojom potrebnej instability a vertikálneho strihu vetra.

Z analýzy jednotlivých prípadov (101 buniek) sme zistili, že v rámci dňa analyzované bunky vznikali prevažne medzi 12:00 a 15:00 UTC, pričom v nočných a dopoludňajších hodinách, teda medzi 23:00 a 10:00 UTC sme zaznamenali len jeden prípad. Bunky vykazovali priemernú životnosť 2 až 2,5 hodiny, teda viac ako dvojnásobnú oproti obyčajným konvektívnym bunkám (Řezáčová a kol, 2007), pričom 14 buniek vykazovalo životnosť väčšiu ako 4 hodiny, s maximom 7 hodín.

Ohľadne strihových podmienok sme zistili, že 75 % analyzovaných buniek sa vyskytlo v prostredí s vertikálnym strihom vetra nad 16 m·s⁻¹. Medián hodnôt tohto parametra bol 19 m·s⁻¹, teda rovnako ako v práci Rasmussen a Blanchard (1998), kde bolo analyzovaných 6793 prípadov z USA. Najsilnejší vertikálny strih vetra, 26 m·s⁻¹, sme zaznamenali 25.5.2010. Veľmi slabý vertikálny strih vetra, 10-12 m·s⁻¹, sme zaregistrovali 11.5.2009, no napriek tomu sa v tento deň vyskytlo niekoľko superciel na východe Slovenska s ukážkovými črtami na poli rádiolokačnej odrazivosti. Tento prípad poukazuje na fakt, že strih vetra vo voľnej troposfére a v okolí oblaku sa môžu výrazne líšiť, prípadne si samotná bunka vygeneruje dostatok vorticity (Csirmaz a kol., 2011).

Na supercelách na Slovensku sme detegovali rovnaké rádiolokačné črty ako sú obvykle detegované aj v USA. Najväčší rozdiel v supercelách na Slovensku a v USA je tak predovšetkým v množstve prípadov za rok a v intenzite sprievodných javov, najmä čo sa týka výskytu tornád. V USA sa v súvislosti so supercelami vyskytuje tornádo v 15-20 % prípadov (Brooks a kol., 2003). Podobnú štatistiku sme však na Slovensku nemohli zatiaľ vytvoriť, nakoľko spätná dokumentácia škôd a najmä javov je prakticky nemožná. Čo sa týka prípadov, z ktorých sa nám podarilo získať hlásenia o nebezpečných sprievodných javoch a škodách evidovaných na portáli ESWD, tak najčastejšie šlo o veľké krúpy a húľavy, tornáda boli hlásené len výnimočne.

Na poli dopplerovskej rýchlosti sme identifikovali aj niekoľko mezocyklón. V drvivej väčšine prípadov je však ich detekcia v sieti radarov SHMÚ nemožná. Situáciu komplikuje predovšetkým aliasing rýchlosti, ku ktorému na 240 km dosahu merania dochádza už pri hodnote 8 m \cdot s⁻¹, kým pri meraniach na 60 km dosahu je to až 32 m \cdot s⁻¹.

Na detekciu superciel u nás je preto vhodnejšie použiť produkt radiolokačná odrazivosť. Detegovali sme pomocou neho typické nízkohladinové štruktúry ako WER a hákovité echo. Štruktúra WER bola veľmi obvyklá a vyskytla sa prakticky u každého oblaku, avšak sama osebe nedokazuje výskyt mezocyklóny, len silného vtoku vzduchu do oblaku. Väčšiu výpovednú hodnotu ma hákovité echo, avšak to sa vyvíja len v prípade silnej nízkohladinovej rotácie, ktorú každá supercela nevytvorí. Naviac, ide o málorozmernú štruktúru, takže detegovať ju spoľahlivo v sieti rádiolokátorov SHMÚ sa nám podarilo len v niekoľkých prípadoch. Situáciu v tomto prípade komplikuje aj skutočnosť, že RFD región je oblasť tvorby nových buniek (*flanking line*), takže niektoré hákovité štruktúry mali výrazný a netriviálny vývoj, ktorý vyžaduje ďalší výskum.

Na základe poznatkov o vertikálnych štruktúrach detegovateľných na poli rádiolokačnej odrazivosti v supercelách popísaných v kapitole 2.4 sme robili vertikálne a horizontálne rezy u vybraných buniek. Na horizontálnych a vertikálnych rezoch sme demonštrovali hrúbku vtokového regiónu WER, ktorá zvyčajne siahala do hladiny 3-5 km, horizontálne mala 3-10 km. Ďalej sme zistili, že v analyzovaných bunkách bolo možné vo viacerých prípadoch detegovať aj BWER, najčastejšie v hladine 4 km, v niektorých prípadoch aj v 6 km, v ojedinelých prípadoch BWER siahala až k hladine 8 km. S oblasťou BWER bol spojený aj *overhang*, z ktorého typicky padajú iba veľké krúpy, ktoré sa v regióne *updraftu* už neudržia vzhľadom na ich vysokú pádovú rýchlosť (napr. Košické Olšany 11.4.2009, Svit 23.8.2011).

V takmer polovici prípadov sme zaznamenali aj štiepenie supercely. Dva príklady sme prezentovali v kapitole 5.3.5. V oboch prípadoch šlo o symetrické štiepenie, teda prostredie neuprednostňovalo ani LM, ani RM. Podobne ako aj iné vlastnosti superciel, štiepenie sa nemusí vyskytnúť.

Ako výsledok práce teda odporúčame operatívne využívanie niektorých indexov, napr. EHI a SREH. Dané indexy by však mali byť počítané vzhľadom na pohyb konkrétnej bunky, teda v rámci zlepšenia nowcastingu by bolo potrebné dané indexy prepočítavať podľa vývoja bunky. Ďalej odporúčame operatívne využívanie hodografov, nakoľko podľa ich tvaru môžeme približne určiť charakter konvektívnych štruktúr (Doswell, 1991). Taktiež, ak budú priaznivé technické a finančné možnosti, znovu zaviesť rádiolokačné merania s krátkym dosahom, nakoľko tieto dáta majú dostatočné priestorové rozlíšenie a k aliasingu radiálnej dopplerovskej rýchlosti dochádza pri oveľa vyššej hodnote než v operatívnom režime.

Práca predstavuje prvý krok vo výskume týchto nebezpečných javov. Ukázalo sa, že supercely sa u nás vyskytujú a vykazujú v podstate podobné črty spojené s nebezpečnými prejavmi počasia ako v iných krajinách (Schmid a kol., 1997; Setvák a kol., 2008; Höller a kol., 1994; Outinen a Teittinen, 2007; Moller a kol, 1994). Preto je potrebné im aj naďalej venovať pozornosť a vo výskume ich vlastností na Slovensku hodláme pokračovať.
POUŽITÁ LITERATÚRA

Bednář, J. a kol. 1993. Meteorologický slovník, výkladový, a terminologický, Academia, Praha, 1993.

Bluestein, H. B., 1993: Synoptic-Dynamic Meteorology in Midlatitudes. Vol. II: Observations and Theory of Weather Systems. Oxford University Press, 594 pp.

Bluestein, H. B., C. R. Parks, 1983: A synoptic and photographic climatology of low-precipitation severe thunderstorms in the Southern Plains. *Mon. Wea. Rev.*, 111, 2034–2046.

Bluestein, H. B., G. R. Woodall, 1990: Doppler-radar analysis of a lowprecipitation severe storm. *Mon. Wea. Rev.*, 118, 1640–1664.

Brooks, H. E., 2009: Proximity soundings for Europe and the United States from reanalysis data. *Atmos. Res.*, 93, 546-553.

Brooks, H. E., C. A. Doswell III, J. Cooper, 1994a: On the environments of tornadic and nontornadic mesocyclones. *Wea. Forecasting*, 9, 606–618.

Brooks, H.E., C. A. Doswell III, and M. P. Kay, 2003: Climatological estimates of local daily tornado probability for the United States. *Wea. Forecasting*, 18, 626-640.

Brooks, H. E., C. A. Doswell III, R. B. Wilhelmson, 1994b: The role of midtropospheric winds in the evolution and maintenance of low-level mesocyclones. *Mon. Wea. Rev.*, 122, 126–136.

Browning, K. A., 1964: Airflow and precipitation trajectories within severe local storms which travel to the right of the winds. *J. Atmos. Sci.*, 21, 634–639.

Burgess, D. B., R. P. Davies-Jones, 1979: Unusual tornadic storms in eastern Oklahoma on 5 December 1975. *Mon. Wea. Rev.*, 107, 451–457.

Csirmaz, K., A. Simon, G. Pistotnik, Z. Polyanszky, M. Nestiak, Z Nagykovacsi, A. Sokol, 2011: Nowcasting and very short range forecasting of supercell thunderstorms in a weakly or moderately sheared environment, *6th European Conference on Severe Storms, ECSS 2011*.

Davies, J. M., 1993: Hourly helicity, instability, and EHI in forecasting supercell tornadoes. Preprints, *17th Conf. on Severe Local Storms*, St. Louis, MO, Amer. Meteor. Soc., 107–111.

Davies-Jones, R. P., D. Burgess, and M. Foster, 1990: Test of helicity as a tornado forecast parameter. Preprints, *16th Conf. on Severe Local Storms*, Kananaskis Park, AB, Canada, Amer. Meteor. Soc., 588–592.

Davies-Jones, R. P., 1986: Tornado dynamics. *Thunderstorms: A social, Scientific, and Technological Documentary. Vol. 2: Thunderstorm Morphology and Dynamics* (E. Kessler, Ed.), Univ. of Oklahoma Press, Norman, OK, 197-236.

Doswell, C. A. III, 1991: A review for forecasters on the application of hodographs to forecasting severe thunderstorms. *Nat. Wea. Dig.*, 16 (1), 2-16.

Doswell, C. A. III, D. W. Burgess, 1993: Tornadoes and tornadic storms: A review of conceptual models. *The Tornado: Its structure, Dynamics, Prediction, and Hazards, Geophys. Monogr.*, No. 79. Amer. Geophys. Union, 161-172.

Doswell, C. A. III, R. Davies-Jones, D. L. Keller, 1990: On summary measures of skill in rare event forecasting based on contingency tables. *Wea. Forecasting*, 5, 576–585.

Doswell, C. A. III, E. N. Rasmussen, 1994: The effect of neglecting the virtual temperature correction on CAPE calculations. *Wea. Forecasting*, 9, 625–629.

Forbes, G. S., 1981: On the reliability of hook echoes as tornado indicators. *Mon. Wea. Rev.*, 109, 1457–1466.

French, A. J., and M. D. Parker, 2012: Observations of mergers between squall lines and isolated supercell thunderstorms. *Wea. Forecasting.*, 27, 255-278.

Fujita, T. T., 1960: A detailed analysis of the Fargo tornadoes of June 20, 1957. U. S. Weather Bureau Research Paper No. 42, 67 pp.

Fujita, T. T., 1982. Principle of stereoscopic height computations and their applications to stratospheric cirrus over severe thunderstorms. *J. Meteor. Soc. of Japan*, 60, 355-368.

Gilmore, M., and L. J. Wicker, 1998: The influence of midtropospheric dryness on supercell morphology and evolution. *Mon. Wea. Rev.*, 126, 943-958.

Hart, J. A., W. Korotky, 1991: The SHARP workstation v1.50 users guide. National Weather Service, NOAA, US. Dept. Of Commerce, 30 pp. [Available from NWS Eastern Region Headquarters, 630 Johnson Ave., Bohemia, NY 11716].

Heymsfield, G. M., Blackmer Jr., R. H., Schotz, S., 1983a: Upper level structure of Oklahoma tornadic storms on 2 May 1979, Pt. 1 radar and satellite observations. *J.Atmos.Sci.*, 40, 1740-1755.

Heymsfield, G. M., Szejwach, G., Schotz, S., Blackmer Jr., R. H 1983b. Upper level structure of Oklahoma tornadic storms on 2 May 1979, Pt. 2 Proposed explanation of "V" pattern and internal warm region in infrared observations. *J. Atmos. Sci.*, 40, 1756-1767.

Höller, H., V. N. Bringi, J. Hubbert, M. Hagen, and P. F. Meischner, 1994: Life cycle and precipitation formation in a hybrid-type hailstorm revealed by polarimetric and Doppler radar measurements. *J. Atmos. Sci.*, 51, 2500–2522.

Houze, R. A., Jr., 1993: Cloud dynamics, International Geophysics series, Volume 53, Academic Press, 573 pp.

Houze, R. A. Jr., Schmid, W., Fovell, R. G. & Schiesser, H. H., 1993. Hailstorms in Switzerland: left movers, right movers, and false hooks. Mon. Wea. Rev., 121: 3345 – 3370

Horvath, A., Simon, A., Csaplar, J., (2007). Case study of the 25 June 2007 supercell thunderstorm. Legkor. 52. 2-5.

Chisholm, A. J., J. H. Renick, 1972: The kinematics of multicell and supercell Alberta hailstorms, Alberta Hail Studies, 1972. Research Council of Alberta Rep. 72-2, 24-31.

Johns, R. H., J. M. Davies, P. W. Leftwich, 1993: Some wind and instability parameters associated with strong and violent tornadoes. Part II: Variations in the combinations of wind and instability parameters. *The Tornado: Its Structure, Dynamics, Prediction, and Hazards, Geophys. Monogr.*, No. 79, Amer. Geophys. Union, 583–590.

Klemp, J. B., 1987: Dynamics of tornadic thunderstorms. Ann. Rev. Fluid Mech., 19, 369-402.

Klemp, J. B., R. Rotunno, 1983: A study of the tornadic region within a supercell thunderstorm. *J. Atmos. Sci.*, 40, 359–377.

Klemp J. B., R. B. Wilhelmson, P. S. Ray, 1981: Observed and numerically simulated structure of a mature supercell thunderstorm. *J. Atmos. Sci.*, 38, 1558–1580.

Lemon, L. R., 1970: Formation and emergence of an anticyclonic eddy within a severe thunderstorm as revealed by radar and surface data. Preprints, *14th Conf. on Radar Meteor.*, Boston, Amer. Meteor. Soc., 323–32.

Lemon, L. R., 1980: Severe thunderstorm radar identification techniques and warning criteria: A preliminary report. NOAA Tech Memo. NWS NSS FC-1, 60 pp. [NTIS PB273049].

Lemon, L. R., C. A. Doswell III, 1979: Severe thunderstorm evolution and mesocyclone structure as related to tornadogenesis. *Mon. Wea. Rev.*, 107, 1184–1197.

Markowski, P. A. 2002a: Hook echoes and rear-flank downdrafts: A review. *Mon. Wea. Rev.*, 130, 852–876.

Markowski, P. M., J. M. Straka, and E. N. Rasmussen, 2002: Direct surface thermodynamic observations within the rear-flank downdrafts of nontornadic and tornadic supercells. *Mon. Wea. Rev.*, in press.

McCann, D. W., 1983: The enhanced-V: A satellite observable severe storm signature. *Mon. Wea. Rev.*, 111, 887-894.

Moller, A. R., C. A. Doswell III, R. Przybylinski, 1990: Highprecipitation supercells: A conceptual model and documentation. Preprints, *16th Conf. on Severe Local Storms*, Kananaskis Park, AB, Canada, Amer. Meteor. Soc., 52–57.

Moller, A. R., C. A. Doswell III, M. P. Foster, G. R. Woodall, 1994: The operational recognition of supercell thunderstorm environments and storm structures. *Wea. Forecasting*, 9, 327–347.

Moncrieff, M. W., Green, J. S. A, 1972: The properties and transfer properties of steady convective overturning in shear. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 98, 336-352.

Moncrieff, M., M. J. Miller, 1976: The dynamics and simulation of tropical cumulonimbus and squall lines. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 102, 373–394.

Outinen, K., and J. Teittinen, 2007: Case study of a tornadic supercell in Finland 28 August, 2005. *Proc. Fourth European Conf. on Severe Storms*, Trieste, Italy, European Severe Storms Laboratory, 5.14.

Rasmussen, E. N., D. O. Blanchard, 1998: A baseline climatology of sounding-derived supercell and tornado forecast parameters. *Wea. Forecasting*, 13, 1148–1164.

Rasmussen, E. N., J. M. Straka, 1998: Variations in Supercell Morphology. Part I: Observations of the Role of Upper-Level Storm-Relative Flow. *Mon. Wea. Rev.*, 126, 2406–2421.

Rasmussen, E. N., R. B. Wilhelmson, 1983: Relationships between storm characteristics and 1200 GMT hodographs, lowlevel shear, and stability. Preprints, *13th Conf. on Severe Local Storms*, Tulsa, OK, Amer. Meteor. Soc., J5–J8.

Rotunno, R., J. B. Klemp, 1982: The influence of the shearinduced pressure gradient on thunderstorm motion. *Mon. Wea. Rev.*, 110, 136–151.

Rotunno, R., J. B. Klemp, 1985: On the rotation and propagation of numerically simulated supercell thunderstorms. *J. Atmos. Sci.*, 42, 271–292.

Řezáčová, D., P. Novák, M. Kašpar, M. Setvák, 2007: Fyzika oblaků a srážek. Academia Praha.

Schmid, W., H.-H. Schiesser, B. Bauer-Messmer, 1997: Supercell storms in Switzerland: Case studies and implications for nowcasting severe winds with Doppler radar. *Meteor. Appl.* 4, 49-67.

Simon A., Sokol A., Kaňák J., Benko M., 2007: Case study of the 9 May 2003 windstorm in southwestern Slovakia, *Atmospheric Research*, Volume 83, 162-175.

Setvák, M., C. A. Doswell III., 1991: The AVHRR Channel 3 Cloud Top Reflectivity of Convective Storms. *Mon. Wea. Rev.*, 119, 842-847.

Setvák, M., Novák, P., Radová, M., 2008: Teplotní charakteristiky horní hranice oblačnosti konvektivních bouří na družicových snímcích a jejich interpretace. *Meteorologické zprávy*, roč. 61, č. 4, s. 97-105. ISSN 0026-1173.

Thompson, R. L., R. Edwards, J. A. Hart, K. L. Elmore, and P. Markowski, 2003: Close proximity soundings within supercell environments obtained from the Rapid Update Cycle. *Wea. Forecasting*, 18, 1243-1261.

Wang, P. K., 2007: The thermodynamic structure atop a penetrating convective thunderstorm. *Atmos. Res.*, 83, 254-262.

Weisman, M. L., J. B. Klemp, 1982: The dependence of numerically simulated convective storms on vertical wind shear and buoyancy. *Mon. Wea. Rev.*, 110, 504–520.

Weisman, M. L., J. B. Klemp, 1986: Characteristics of isolated convective storms. *Mesoscale Meteorology and Forecasting*, P. Ray, Ed., Amer. Meteor. Soc., 331–358.

Wilhelmson, R. B., 1974: The life cycle of a thunderstorm in three dimensions. J. Atmos. Sci., 31, 1629-1651.

Wilhelmson, R. B., J. B. Klemp, 1978: A three-dimensional numerical simulation of splitting that leads to long-lived storms. *J. Atmos. Sci.*, 35, 1037–1063.

Internetové zdroje:

http://www.shmu.sk/

http://www.eumetsat.int/Home/index.htm

http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html

http://www.wetterzentrale.de/topkarten/fsfaxsem.html

http://www.wetterzentrale.de/topkarten/fscfsreaeur.html

http://www.meted.ucar.edu/mesoprim/hodograf/print.htm

http://www.meted.ucar.edu/radar/severe_signatures/index.htm

http://old.chmi.cz/torn/cases/

http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/meteo/tornada/tortabcz.html

http://www.unwetterstatistik.at/

http://www.bourky.com/

http://www.stormeyes.org/tornado/stmtype.htm