

TORNÁDA 31. KVĚTNA 2001 NA ÚZEMÍ ČESKÉ REPUBLIKY

Tornadoes on May 31 2001 on the territory of the Czech Republic. The paper documents a large (F3) tornado on the territory of the Czech Republic, which occurred on 31 May 2001, close to the Sázava River. Though several other smaller tornadoes were reported on that day (being spawned by two different tornadic storms), the biggest one caused damage swath of about 0.5 km wide and about 4.5 km long. Moreover, this is the first case of an unambiguous radar detection of supercell storm in the Czech Republic, and also the first case of secondary suction vortices being captured in the Czech Republic by amateur video camera.

KLÍČOVÁ SLOVA: tornádo – supercela – víry sekundární savé – helicity – CAPE – pozorování radarová a družicová

Upozornění: Obrázky 1, 2, 3, 6, 11c, 13, 15, 17, 18, 19 a 20 jsou uvedeny v barevné příloze. Podpisky k obrázkům 11c, 19 a 20 jsou vzhledem k rozsahu uvedeny na konci článku. Legends to Figs. 11c, 19 and 20 are for technical reasons at the end of the paper.

1. ÚVOD

Celkovým přehledem význačnějších tornád, které se vyskytly na území České republiky v letech 2000 a 2001, se zabývá [1]. Dokumentaci tornád na našem území, od prvního známého případu v roce 1119 až do současnosti, a diskusi nárůstu dokumentovaných případů za posledních několik let je věnována práce [2].

V následujícím článku, který je volným pokračováním [1], se autoři vrací s tříletým odstupem ke dni 31. května 2001, kdy se na našem území vyskytlo během odpoledních hodin hned několik tornád, doprovázejících dvě nezávislé konvekční bouře. Tento den však není výjimečným díky celkovému počtu tornád za jediný den – v tomto směru nejspíš drží dosavadní „rekord“ 20. červenec 2001 (podrobnosti viz [1] a [3]) – 31. květen 2001 je významným z jiných pohledů. Nejmohtnější tornádo toho dne a konvekční bouře, jež jej „zplodila“, které jsou níže popsány podrobněji, mají totiž dvě významná prvenství: jednak je to první případ, kdy byla na našem území jednoznačně dokázána přítomnost tzv. *sekundárních savých vírů*, vyskytujících se uvnitř či na periférii primárního „mateřského“ tornáda, jednak je to první případ jednoznačně radarově doložené supercelární struktury bouře, na které se toto tornádo vyskytlo.

Článek si nečiní být vyčerpávajícím rozбором meteorologické situace, která k těmto tornádům a supercelární bouři vedla, všímá si především dvou aspektů: detailů a zvláštností škod způsobených tornády v oblasti měst Zruč nad Sázavou, Ledec nad Sázavou a Světlá nad Sázavou (ve vazbě na charakter tornáda a jeho doprovodných jevů) a struktury supercelární bouře, která toto tornádo vygenerovala, „zplodila“.

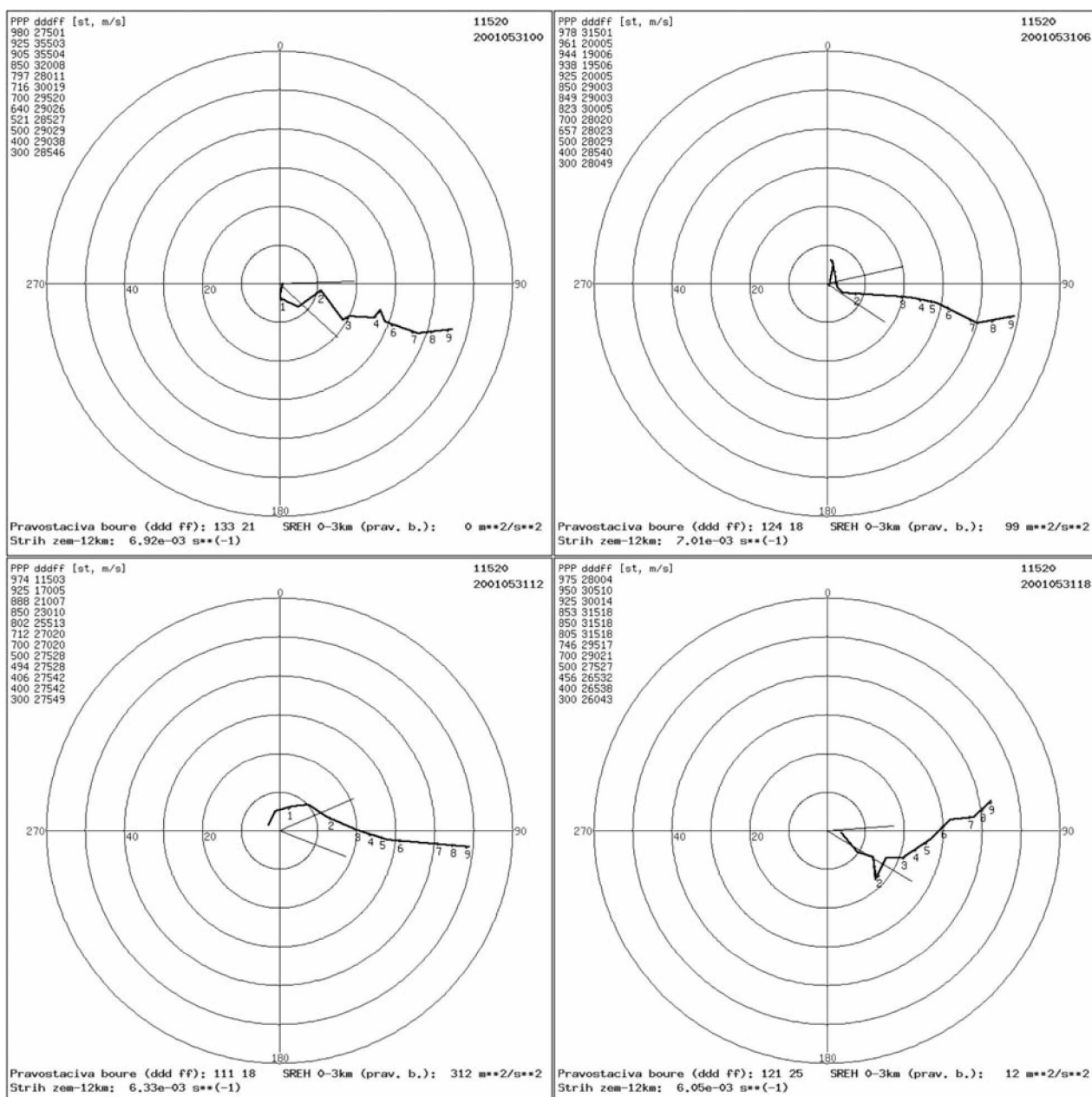
2. SYNOPTICKÁ SITUACE A VLASTNOSTI ATMOSFÉRICKÉHO PROSTŘEDÍ

Vývoj celkové povětrnostní situace ze dne 31. května 2001 nad Evropou a přilehlou částí Atlantského oceánu ilustruje obr. 1, na němž jsou v termínech 06 a 18 UTC zobrazena pole geopotenciální výšky v hladinách 500 a 850 hPa a přízemní tlakové pole, přičemž geopotenciál hladiny 850 hPa je doplněn stínováním naznačujícím pole teploty v téže hladině. Z obr. 1 vyplývá, že střední Evropa ležela uvedeného dne ráno v době vyjádřené frontální zóně, patrné z prvního pohledu na pole geopotenciálu hladiny 500 hPa (viz též obr. 18, snímek z družice

Meteosat). Při zemi se na frontální vlně prohlubovala menší podružná tlaková níže postupující z Německa dále k východu až jihovýchodu. Ještě lépe je to patrné z obr. 2, na němž jsou analýzy mezoměřítkového modelu ALADIN. Tlaková níže s vyvíjející se frontální vlnou, dobře patrnou na teplotním poli v hladině 850 hPa, je lokalizovaná nad územím Čech. V hladině 500 hPa se přitom nad střední Evropou během dne přesouvala brázda nižšího tlaku vzduchu, což odpovídá nastupující studené advekci a současně probíhající cyklogenezi.

Analýza aerologického měření v Praze-Libuši (obr. 3) ve 12 UTC ukazuje podmíněnou instabilitu s horní hranicí konvekce v hladině kolem 7 km, přičemž teplota konvekce byla přibližně 20 °C. Hodnota dostupné konvekční energie (Convective Available Potential Energy, CAPE) se pohybovala kolem 260 J/kg, s modifikací CCL 270 J/kg, což je hodnota dostatečná k vývinu bouří, ale nijak mimořádná. Doplnujeme, že podle Sulana et al. [13] začíná výpočet CAPE s modifikací CCL v modifikované konvekčně kondenzační hladině, která se stanoví jako průsečík křivky zvrstvení a izogramy, jejíž počáteční bod při zemi se odvodí ze středního směšovacího poměru vrstvy zemský povrch – hladina 850 hPa. Hodnota CAPE je sice poměrně dobrý parametr instability, ale, jak mj. uvádí Doswell [4] nebo Kerr a Darkow [5] a potvrzuje např. Sulan et al. [13], i při relativně malých hodnotách CAPE může docházet k vývinu silných konvekčních bouří supercelárního typu. Z obr. 3 je dále možné vyčíst, že kolem tropopauzy dosahovala rychlost větru značných hodnot kolem 50 m/s, což znamená přítomnost tryskového proudění.

Pro vývoj supercelárních bouří je důležitý vertikální stříh větru, jak dokumentuje mj. práce Doswella [4], Manzata [6] a Kerra a Darkowa [5]. Pro kvalitativní zhodnocení podmínek vzniku supercelárních bouří se využívá hodograf, tj. graf ukazující změnu vektoru větru s rostoucí výškou. Hodografy pro stanice Praha-Libuš a Brno-Sokolnice je možné analyzovat na obr. 4 a 5. Na těchto grafech je patrné výrazné stáčení větru s výškou směrem doprava především u poledních termínů. Jak píše Doswell [7], vhodné stáčení směru vektoru větru s výškou, charakteristické hodografem zakřivujícím se doprava, vyústí do horizontální vorticity s významnou složkou ve směru proudění. Tato horizontální vorticity se při vývoji konvekčního výstupného proudu naklání a výsledná interakce má za následek cyklonálně rotující výstupný proud. Je zřejmé, že i horizontální vorticity s významnou složkou kolmo ke směru

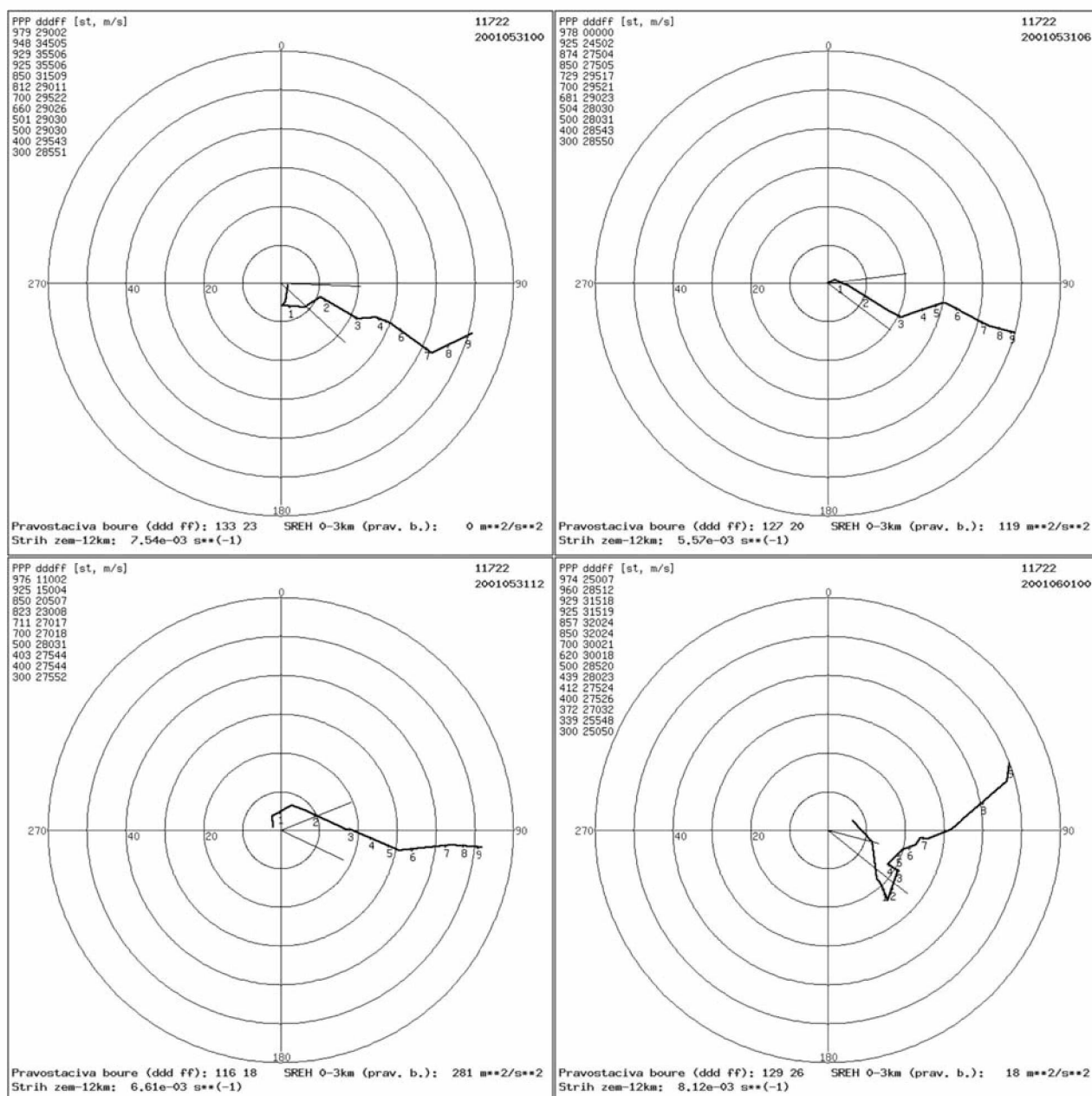


Obr. 4 Hodografy odvozené z měření aerologické stanice Praha-Libuš ze dne 31. 5. 2001 z termínů (zleva doprava, shora dolů): 00, 06, 12 a 18 UTC. Jednotlivé kružnice představují rychlosti větru 10, 20, 30, ..., 60 m/s. Čísla na křivce průběhu vektoru větru s výškou označují nadmořskou výšku v kilometrech a vlevo nahoře je výpis všech hladin a příslušných údajů větru ze zprávy TEMP. Světlymi čarami vycházejícími z průsečíku hlavních os jsou naznačeny odhady drah případných supercelárních bouří. Hodografy jsou ve své spodní části doplněny údaji o vektoru přesunu pravostáčivé bouře, hodnotou SREH a údajem o stříhu větru mezi zemí a hladinou 200 hPa (přibližně 12 km).

Fig. 4. Hodographs derived from the aerological sounding of the station Prague-Libuš from May 31, 2001, 00, 06, 12 and 18 UTC (from left to right, from top to bottom). The circles denote wind velocity 10, 20, 30, ..., 60 m/s. The numbers at the hodograph curve are altitude in kilometers and in the left top corner is the list of the levels and corresponding wind vectors from the TEMP code. The lines starting at the center of the graph are the estimates of the motion of the possible supercells. At the bottom of the hodographs you find the estimate of the right moving supercell motion vector, SREH value and wind shear of the layer surface 200 hPa (approx. 12 km)

proudění může být konvekci „nakloněna“ do svislého směru. Při tomto naklonění a při rozdělování bouře (storm splitting, viz např. Doswell [16]), které je v těchto případech běžnější, vzniká přibližně rovnocenná dvojice konvekčních buněk s divergujícími trajektoriemi, z nichž levostáčivá (tj. pohybující se doleva od průměrného směru proudění) má anticyklonální rotaci a pravostáčivá má rotaci cyklonální. Při případném rozdělení konvekční bouře v prostředí charakteristickém výrazně pravostáčivým hodografem (a tedy vysokou hodno-

tou SREH, viz dále) však anticyklonálně rotující levostáčivá buňka poměrně rychle zaniká a je „preferována“ bouře pravostáčivá s cyklonální rotací. Doplňme, že u levostáčivého hodografu jsou tyto závěry „zrcadlově“ opačné [16]. Je však nutno poznamenat, že tato koncepce je nutně velmi zjednodušená, neboť v reálné atmosféře se vyskytují víry a stříhy větru různě orientované. Navíc, procesy spojené s konvekční bouří modifikují pole proudění též významnou měrou. Uvedené koncepční modely slouží spíše k základnímu



Obr. 5 Hodografy odvozené z měření aerologické stanice Brno-Sokolnice ze dne 31. 5. 2001 z termínů (zleva doprava, shora dolů): 00, 06, 12 a ze dne 1. 6. 2001, 00 UTC. Vysvětlení ke grafu – viz obr. 4.

Fig. 5. Hodographs derived from the aerological sounding of the station Brno-Sokolnice from May 31, 2001, 00, 06, 12 and from June 1, 2001, 00 UTC (from left to right, from top to bottom). For details see Fig. 4.

vysvětlení možnosti vzniku rotace supercelárních konvekčních bouří a nečiní si nárok na úplnost.

Na zmíněných obrázcích 4 a 5 je též uvedena hodnota SREH (Storm-relative Environmental Helicity) a odhadu postupu supercelární bouře. Helicity je parametr udávající „náchyllost“ prostředí tekutiny vytvářet helikální proud, tj. proud, ve kterém se vlivem střihu větru vytváří horizontální vorticity s významnou složkou ve směru proudění [7]. Matematicky je (integrální) helicity H vyjádřena jako integrál skalárního součinu horizontálního větru a vektoru horizontální vorticity:

$$H = \int_{z_0}^{z_1} \vec{v}_H \cdot \vec{\omega}_H dz. \quad (1)$$

Ve vzorci (1) značí vektor $\vec{v}_H$ horizontálního proudění, $\vec{\omega}_H$ představuje vektor horizontální vorticity, z_0 a z_1 jsou spodní a horní hranice vrstvy, pro kterou se integrál počítá. Většinou je to výška zemského povrchu a výška 3 km nad zemským povrchem, případně výška hladiny 700 hPa. Předpokládá se (např. [9]), že hodnota integrální helicity prostředí vyjádřená v souřadném systému pohybujícím se s bouří (Storm Relative Environment Helicity, SREH) ve vrstvě sahající od zemského povrchu do 3 km je jedním z parametrů, který naznačuje náchyllost atmosférického prostředí k tvorbě mezocyklon. Symbolicky vyjadřujeme hodnotu SREH pomocí vzorce 2:

$$SREH = \int_{z_0}^{z_1} (\vec{v}_H - \vec{c}) \cdot \vec{\omega}_H dz. \quad (2)$$

kde $\vec{c}$ značí vektor postupu bouře. Pro vektor $\vec{c}$, tj. odhad postupu supercely, byl použit algoritmus Bunkerse et al. [8], který je založen na advekci bouře průměrným větrem a interakci uvažovaného výstupného proudu s prostředím. Spočívá v následujících krocích (viz vzorce 3):

1. Z příslušného aerologického měření se vypočte průměrný vítr od zemského povrchu do 6 km nad zemí ($\vec{V}_{mean}$).
2. Je vypočítán vektor střihu větru mezi průměrným větrem vrstvy 0,0–0,5 km a průměrným větrem vrstvy 5,5–6,0 km nad zemským povrchem ($\vec{V}_{shear} = \vec{V}_{6km} - \vec{V}_{0km}$).
3. K vektoru průměrného větru (0–6 km nad zemí) se přičte, resp. odečte vektor, který je kolmý ke střihu větru, vypočteného podle bodu 2., a jenž má velikost $D = 7,5$ m/s.

Symbolicky je výpočet postupu pravostáčivé, resp. levostáčivé supercely vyjádřen následujícími vzorci:

$$\begin{aligned}\vec{V}_{RM} &= \vec{V}_{mean} + D \left[\frac{\vec{V}_{shear} \times \vec{k}}{|\vec{V}_{shear}|} \right], \\ \vec{V}_{LM} &= \vec{V}_{mean} - D \left[\frac{\vec{V}_{shear} \times \vec{k}}{|\vec{V}_{shear}|} \right],\end{aligned}\quad (3)$$

kde $\vec{V}_{RM}$, resp. $\vec{V}_{LM}$ značí vektor pohybu pravostáčivé, resp. levostáčivé bouře, a $\vec{k}$ je jednotkový vektor ve směru osy z kolmé k horizontální rovině. Je nutno zdůraznit, že jak rozsah vrstev, pro které se počítá vektor větru $\vec{V}_{mean}$ nebo vektor střihu větru $\vec{V}_{shear}$, tak hodnota D byly v práci Bunkerse et al. [8] stanoveny pomocí statistického vyhodnocení skutečného pohybu supercell pouze na území USA, nicméně tento postup z důvodu nedostatku jiných použitelných metod zatím přejímáme. Výše popsanou metodou byl vypočten následující vektor postupu supercely pro 12. hodinu UTC: 118°, 18 m/s. Pro srovnání uvádíme změřený vektor postupu dále rozebírané „posázavské“ bouře mezi Berounem a oblastí asi třináct kilometrů východně od Havlíčkova Brodu, který byl zjištěn pomocí meteorologických radiolokátorů: 108°, 16 m/s.

Davies-Jones [9] uvádí přibližné hodnoty SREH 150–299, 300–449, ≥ 450 m²/s² pro slabé, střední a silné mezocyklony. Podrobná diskuse tohoto parametru, jehož experimentální výpočty v ČHMÚ začaly teprve na počátku dubna 2004, sice není předmětem tohoto článku, ale pro srovnání uvedme v tab. 1 hodnoty SREH pro aerologické stanice Praha-Libuš a Brno, které jednoznačně vykazují maxima kolem poledních hodin. Pro úplnost poznamenejme, že hodnoty SREH jsou vztaženy pouze k pohybu pravostáčivé supercely. Pro případné levostáčivé supercely jsou hodnoty SREH podstatně menší, a proto se většinou neuvádí.

Tab. 1 Integrální hodnoty SREH (0–3 km) z měření aerologických stanic Praha-Libuš a Brno dne 31. 5. 2001.

Table 1. Integral values of SREH (0–3 km) from measurements of the meteorological stations Praha-Libuš and Brno on 31 May 2001.

	SREH Praha – Libuš [m ² /s ²]	SREH Brno [m ² /s ²]
31.5. 2001, 00 UTC	0	0
31.5. 2001, 06 UTC	99	119
31.5. 2001, 12 UTC	312	281
31.5. 2001, 18 UTC	12	–
1. 6. 2001, 00 UTC	–	18

Pro hodnotu SREH je důležité stáčení větru s výškou doprava, jak uvádí např. Doswell [7]. Tento charakteristický rys je patrný u poledních termínů obou analyzovaných stanic, a to Prahy-Libuše i Brna (viz obr. 4 a 5). Ve večerních hodinách je už patrný vliv studené advekce se stáčením větru s výškou doleva.

3. TORNÁDICKÁ¹ BOUŘE V SEVEROZÁPADNÍCH A STŘEDNÍCH ČECHÁCH

První, relativně slabší ze dvou bouří toho dne, na kterých byla prokázána tornáda, vznikla kolem 11.00 UTC v Němcu v okolí Lipska, na naše území přešla přes Krušné hory kolem 13.30 UTC a dále pokračovala přes Chomutovsko, Lounsko, Kralupy nad Vltavou, a ve slabší podobě (alespoň dle radarových měření) směrem na Nymburk a Poděbrady. Na této bouři se v Čechách vyskytla dvě svědecky doložená slabší tornáda. Souvislost této bouře s tornádem hlášeným v Sasku není zcela jednoznačná.

První z tornád na našem území, která se vyskytla na této bouři, je doloženo severozápadně od Kralup nad Vltavou, mezi obcemi Dušníky nad Vltavou a Všestudy, v těsné blízkosti dálnice D8. Podle svědka ze Všestud mělo tvar klasického trychtýře. Jeho spodní část lámala vzrostlé topoly a poničila část střechy místní sušičky chmele, chmelnice a elektrické rozvody, dle charakteru způsobených škod hodnotíme toto tornádo stupněm F1 (dle tzv. Fujitovy stupnice, viz [1]). Tornádo bylo pozorováno² po dobu ca 1 minuty, poté zesláblo a rozpadlo se. Je možné, že jev souvisel s nepotvrzeným výskytem tornáda v Kralupech a na Kladensku.

Mezi výskytem tohoto a následujícího pozorovaného tornáda je pravděpodobně nepřímo doložen výskyt ještě jednoho tornáda. Na jeho existenci usuzujeme na základě hodnověrného popisu charakteru škod v trajektorii bouře, který se nám dostal do rukou sice se značným zpožděním od výskytu jevu, o to je však zajímavější. Severně od Prahy, mezi obcemi Hovorčovice a Měšice, byl po přechodu bouře (tentýž den) nalezen na polích pruh území, široký ca 10 metrů, dlouhý zřejmě několik set metrů, zcela zbavený vegetace („pruh čisté hlíny, jako vyluxován“), orientovaný zhruba ve směru pohybu bouře („vysátá stopa byla jen ca 100 m rovná, jinak se různě klikatila a nebyla všude stejně silná“, nejvýraznější část byla orientována k východu, dále uhýbala k jihovýchodu). Je jen škoda, že o tomto případě jsme se dozvěděli až s odstupem 2,5 roku, a ne bezprostředně po výskytu jevu. Byl by to první takový zdokumentovaný případ u nás. Výjimečnost (a zároveň závažnost) tohoto svědectví spočívá v tom, že takto odstranit vegetaci dokáží pouze tornáda síly F4 a silnější.

Další, slabší tornádo, doprovázející tuto bouři, je svědecky doloženo kolem 15.10 UTC z obce Vyšeňovice, okres Praha-východ. Doba trvání tornáda dle výpovědi svědků byla kolem 3 až 4 minut, odhadovaný průměr přibližně 5 metrů.

¹ Autoři v tomto článku rozlišují termíny **tornádový** a **tornádický**. Zatímco termín **tornádový** používáme jako běžné přídavné jméno, odvozené od slova **tornádo** (např. **tornádová** alej, protitornádový kryt), termín **tornádický** používáme pouze pro specifikaci typu konvekční bouře, která alespoň jednou během své existence „zplodí“ **tornádo** – **tornádická** bouře. Termín **tornádová** bouře by totiž znamenal výskyt **tornád**, jejichž počet (na daném území či za určitý čas) nebo intenzita dosáhly mimořádné úrovně, tj. **stádia** bouře (v analogii s např. **sněhovou** bouří, **písečnou** bouří, **větrnou** bouří, apod.). Pojem **tornádová** bouře se spíše blíží překladu anglického termínu **tornado outbreak**.

² Vzhledem k velkému počtu svědků, zejména u dalších tornád, jednotlivá jména (až na výjimky) neuvádíme.

Tornádo, doprovázené výraznými akustickými projevy, způsobilo pouze menší škody (F0) na několika střechách; nejzávažnější škodu způsobil kus střešního eternitu, který po překonání vzdálenosti ca 250 až 300 m od místa původu prorazil vakuované okno rodinného domku a vlétl do místnosti – naštěstí se vše obešlo bez zranění osob v zasažené místnosti.

Následné škody na Nymbursku a Poděbradsku byly nejspíš způsobeny downbursty, žádné tornádo však zde svědecky doloženo nebylo. Nicméně vzhledem k předchozím výskytům tornád na této bouři je nelze vyloučit ani zde, chybí však buď přímé svědectví nebo alespoň popis škod, které by jeho přítomnost indikovaly.

4. TORNÁDICKÁ BOUŘE A TORNÁDA V POSÁZAVÍ

Druhá tornádická bouře, jednoznačně nejsilnější toho dne na našem území, začala svou pouť kolem 11.50 UTC na západě Čech, prošla (ještě ve slabší podobě) přes Křivoklátsko a jižní okraj Prahy, a nad okresem Benešov začíná její „tornádická“ etapa – kromě Benešova řádila tornáda především mezi Zručí nad Sázavou až po Světlou nad Sázavou. Bouře pak zeslábla na Havlíčkovodsku kolem 16. hodiny UTC (18. hodiny SELČ).

První svědecky prokázané tornádo na této bouři se vyskytlo na Benešovsku, mezi obcemi Kochánov a Střížkov. Dle svědka z Kochánova tornádo rotovalo cyklonálně (čemuž odpovídal i charakter škod v obou zmíněných obcích), průměr tornáda odhadl na ca 150 metrů, pozoroval jej po dobu asi tří minut, poté mu zmizelo z dohledu. Další lokalita možného výskytu byla kolem silnice č.111 na Divišov. Zde na výskyt tornáda usuzujeme pouze nepřímo, na základě charakteru poškození stromů. Podle neověřených zpráv viděli vír další svědci ze vzdálenějšího okolí ve směru postupu bouře (směrem na Býkovice, Třebešice a Bílkovice), tyto svědky se však nepodařilo identifikovat, na výzvy v oblastním tisku nikdo nezareagoval.

Další oblastí, zasaženou tornádem (tornády), byl dlouhý pás území v okolí Sázavy, mezi Zručí nad Sázavou a Světlou nad Sázavou (viz obr. 6). Nejvýznamnějšímu tornádu z této

oblasti (Milošovice – Velká paseka) je věnována následující samostatná kapitola, zde se stručně zmíníme o ostatních tornádech, která se v tomto prostoru vyskytla.

Důvodem, proč si nejsme jisti „počtem“ tornád v této oblasti, je skutečnost, že nevíme, zda jednotlivá tornáda byla projevem zeslabení a opětovného zesílení jediného děle „žijícího“ tornáda (a tudíž několika oddělených stop doteku tornáda se zemí), nebo zda se jednalo o několik skutečně nezávisle vzniklých jevů. Výpovědi svědků a charakter škod naznačují spíše druhou alternativu. V mapě (obr. 6) je sytější odstínem vyznačena oblast, kde je výskyt tornád jednoznačně prokázán; světlejší odstín pak vyznačuje oblasti výskytu dalších škod, které nejspíš s tornády nesouvisí.

První a zároveň nejmohutnější tornádo se vyskytlo přibližně mezi 14.30 až 14.40 UTC poblíž obce Milošovice a po ca 10 až 15 minutách existence se rozpadlo západně od obce Zahájí. Jak již bylo naznačeno, podrobnosti k tomuto tornádu jsou v následující samostatné kapitole.

V prostoru Pekelsko - Kožlí - Bojiště není výskyt žádného víru doložen, škody zde byly pravděpodobně způsobeny silnějším downburstem, resp. microburstem (například lesní polom severně od Kožlí). Nicméně podle (bohužel jediného) svědectví z Ledče nad Sázavou byl spatřen „rotující hladký kornout, nedotýkající se zemského povrchu“ ve směru na Bojiště, tudíž ani zde přítomnost tornáda zcela vyloučit nelze.

Další pás nesouvislých škod se táhne od Vilémovic (východně od Světlé) přibližně po Okrouhlici, přičemž svědecky je doložen výskyt tornáda ve Vilémovicích a jejich okolí, jednak v Mrzkovicích (v obou případech více nezávislých svědků). V ostatních částech tohoto pásu území není výskyt tornáda svědecky doložen, snad jediné u Dobré nad Sázavou (mezi Novou Vsí u Světlé a Babicemi – zde je však k dispozici jediné, ne zcela jednoznačné svědectví).

V souvislosti s tornádem u Mrzkovic stojí za zmínku (vedle dalších, spíše „lokálních“ škod, napáchaných ve vlastní obci) velmi zajímavý charakter poškození stodoly na okraji obce – viz obr. 7. Tornádo zde prošlo pravou polovinou stodoly, kterou zcela zničilo, zatímco levá polovina stodoly a její pravý bok zůstaly prakticky netknuté (pravá boční stěna stodoly se však následně naklonila do „amputované“ pravé části stodoly). Toto velmi názorně dokumentuje značnou územní omezenost či proměnlivost škod, která je charakteristická právě pro tornáda. Zároveň tento případ názorně dokumentuje, že takovéto chatrné stavby, jakými stodoly bezesporu jsou, rozhodně bezpečný úkryt před tornády neposkytují.

Obr. 7 Stodola u Mrzkovic, částečně zničená jedním z tornád. Tornádo prošlo pravou polovinou budovy, levá polovina zůstala nedotčena. Foto M. Setvák.

Fig. 7. A barn (close to Mrzkovice village) partially damaged by a smaller tornado. The tornado passed through the right side of the barn, while the left part remained intact. Photo by M. Setvák.



5. DETAILNÍ POPIS TORNÁDA V OBLASTI MILOŠOVICE – VELKÁ PASEKA

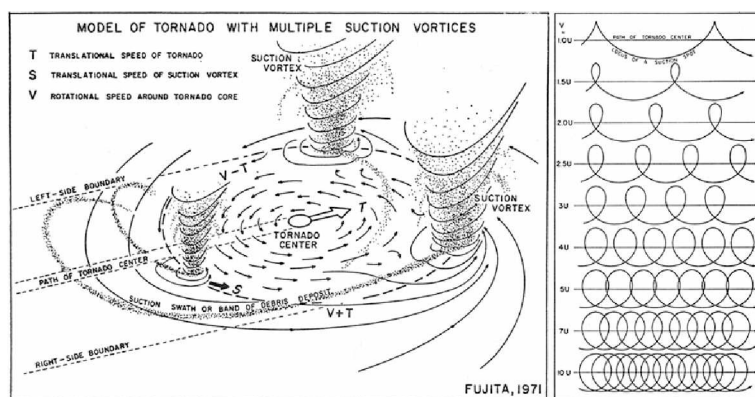
Tato kapitola je pokusem o rekonstrukci jevu, tak, jak na jeho průběh usuzujeme na základě shrnutí poznatků získaných z výpovědí mnohých svědků a z charakteru škod. Přestože se naše verze jevu od jeho skutečného, detailního průběhu a charakteru nejspíš do jisté míry liší, jednotlivé výpovědi svědků do sebe velmi dobře zapadají a vzájemně se doplňují, čímž můžeme považovat předložený „obrázek“ tornáda do značné míry za objektivní a kompletní.

Tornádo pravděpodobně vzniklo kolem 14.30 UTC (16.30 SELČ) v prostoru nad Milošovicemi (nebo západně od nich), svědci z okolních obcí jej popisují jako mohutný kužel či trychtýř, který se postupně spustil k zemskému povrchu. V této rané fázi tornáda jsou k dispozici jeho dvě nezávislé fotografie, pořízené ze stejného místa a ve stejnou dobu různými kamerami, jedna z nich je zde uvedena na obr. 8. Fotografie ukazují mohutný široký, tupý kužel, se zaobleným vrcholem, spouštějící se ze spodní základny oblačnosti bouře směrem k zemskému povrchu. Vlevo od tohoto kužele a pod ním jsou dobře patrné protáhlé „oblačné chuchvalce“, které jsou nejspíš jedněmi z mnoha sekundárních savých vírů, které se na tornádu vyskytly. Pod hlavním kuželem je pak ne příliš zřetelný sloup prachu, který svědčí o tom, že cirkulace tornáda v době pořízení fotografie již dosahovala až k zemskému povrchu, i když jeho vlastní kondenzační trychtýř (= popisovaný kužel) ještě k zemi nedosahuje.



Obr. 8. Snímek počáteční fáze tornáda nad Milošovicemi pořízený ze vzdálenosti několika kilometrů v době, kdy se mohutný kondenzační kužel ještě nedotýkal zemského povrchu. Foto B. Kykalová, Chřenovice.

Fig. 8. Snapshot of the tornado above Milošovice, as captured at its very early stage from several kilometers away. At this stage, the lowest part of the funnel cloud can be seen still well above ground. Photo B. Kykalová, Chřenovice.



Obr. 9. Sekundární savé víry podle Theodora Fujity [10, 11]. Obrázek vlevo schematicky znázorňuje případ, kdy se na periferii „mateřského“ tornáda vytvořily tři sekundární savé víry; obrázek vpravo znázorňuje hypotetickou trajektorii jediného sekundárního savého víru v závislosti na poměru rychlosti postupu „mateřského“ tornáda a jeho obvodové rychlosti (čím je postup tornáda pomalejší a/nebo obvodová rychlost rotace vyšší, tím se jednotlivé cykloidy trajektorie sekundárního víru více překrývají). Převzato z [10].

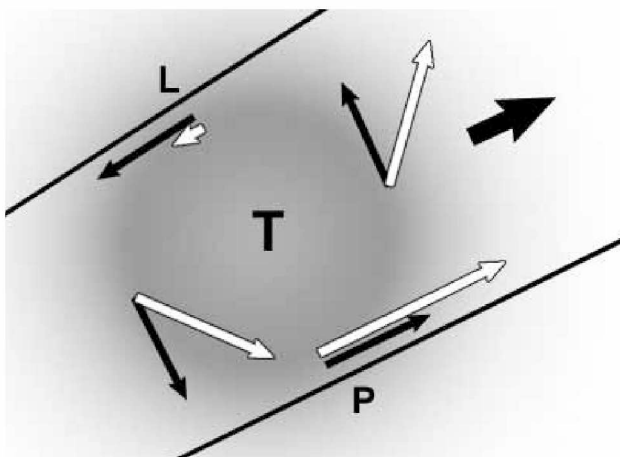
Fig. 9. Secondary suction vortices after Theodore Fujita [10, 11]. While the drawing at left shows a case with three vortices present at the outer part of the parent tornado, the schematics at right shows possible trajectories for a case of one secondary vortex being present, at different combinations of main tornado transition speed and its rotation intensity. From [10].

„Savými“ jsou označovány pro svůj zjevně velmi silný savý efekt, směřující směrem vzhůru. Jejich typická doba života se pohybuje řádově v sekundách až desítkách sekund. V „mateřském“ tornádu jich může být až několik současně. Mechanismus jejich vzniku není doposud zcela zřejmý, jejich výskyt, doba života a cirkulace úzce souvisí s cirkulací, resp. strukturou „mateřského“ tornáda, viz [17]. V současnosti jsou předmětem jak teoretických prací, viz např. [18], tak laboratorního modelování, viz např. [19].

Záleží pak na kombinaci doby života jednotlivých sekundárních savých vírů, rychlosti rotace „mateřského“ tornáda a rychlosti jeho postupu, jakou křivku sekundární savé víry na zemském povrchu opisují. Může to být cokoliv, od otevřených oblouků či nepravidelných křivek, až po různé cykloidy či uzavřené smyčky. Ideálním „médiem“ pro zaznamenání těchto stop je travnatý povrch či různé zemědělské plodiny. Z hlediska škod to bývají právě tyto sekundární savé víry, které mívají na svědomí nejtěžší škody, ostré územně lokalizované. Rovněž značná územní proměnlivost (ostrá vymezenost) škod může být projevem výskytu těchto „podružných“ vírů. V našich podmínkách jsme na jejich výskyt první usuzovali v souvislosti s „Rokycanským“ tornádem, viz [12], resp. tornádem „Málkov“, viz [1].

Na přítomnost sekundárních savých vírů již v této rané fázi tornáda usuzujeme nejen na základě výše zmíněných fotografií, ale i na základě charakteru začátku stopy škod tornáda poblíž Milošovic. Zde tornádo mimo jiné „vysálo“ větší část střešní krytiny (tašek), přičemž část těchto tašek následně „složilo“ do několik desítek centimetrů široké a několik metrů dlouhé stopy, umístěné ca 15 až 20 metrů proti směru postupu bouře (společně s větvemi z okolních stromů). Patrně není nutné dodávat, že si nedokážeme představit jiný meteorologický mechanismus, který by toto dokázal, než právě sekundární savé víry (případně menší tornádo samo o sobě).

Tornádo se následně rozšířilo do podoby širokého válce, zužujícího se směrem dolů. V této



podobě přešlo přes první souvislý lesní porost západně od Velké Paseky, ve kterém zanechalo první ze dvou rozsáhlých, souvislých polomů, přes obec Velká Paseka, a konečně přes další souvislý les v prostoru mezi Velkou Pasekou a Zahájím. Celkově byla stopa souvislých škod široká ca 400 až 500 m, dlouhá kolem 4,5 km. Západně od Zahájí pak trychtýř tornáda po ca 10 až 15 minutách jeho existence zanikl („prostě najednou zmizel“), někteří svědci mluví o úplném zániku jeho kužele, jiní popisují rychlý „rozpad tornáda na dvě části“ – nejspíš popisují zánik kondenzační části tornáda (trychtýře), po kterém zřejmě dále přežívaly jednotlivé savé víry (přibližně po Štičci). Hukot tornáda byl přirovnáván k hluku jedoucího metra nebo přeletu několika letadel současně. Většina svědků rovněž vypověděla, že bezprostředně po přechodu tornáda se spustil silný déšť s kroupami („bílá stěna“) a silným větrem (zřejmě downburst).

Stromy v obou lesních polomech, převážně vzrostlé smrky, byly polámané v různé výšce nad zemí, případně vyvráceny (viz obr. 11). Prvotní dojem byl, že v prvním polomu jednoznačně převládá v pravé části stopy (míněno z hlediska postupu tornáda) směr zlomů či vývrátů ve směru postupu tornáda (obr. 11a), zatímco v jeho levé části směr opačný (obr. 11b). Tato orientace zlomených či vyvrácených stromů jednoznačně svědčí o výskytu tornáda – viz obr. 10. Naproti tomu ve druhém polomu se stromy při prvotním ohledání zdály být vyvráceny převážně ve směru postupu tornáda, pouze na konci stopy a na její levé části převládal směr polomu zhruba vlevo od směru postupu tornáda. Tato orientace by nutně nemusela být projevem tornáda, za určité konstelace by ji mohl způsobit i přiměřeně velký microburst.

Výraznou změnu náhledu na polomy pak přinesl s dvoutýdenním odstupem provedený letecký průzkum oblasti. Zpracované fotografie ukázaly podstatně komplexnější obrázek obou polomů, než jaký byl možný ze země. V prvním polomu, obr. 11c, resp. na jeho okrajích sice převládaly směry tak, jak bylo naznačeno výše, avšak uvnitř polomu byla situace výrazně složitější, byly zde lokality s velkou proměnlivostí lokálně převládajících směrů, která není vysvětlitelná pouhou

Obr. 10 Schematické znázornění působení směru a rychlosti větru v různých částech stopy tornáda. Silná černá šipka znázorňuje vektor pohybu (postupu) samotného tornáda, tenké černé šipky znázorňují vektory rychlosti rotace tornáda na jeho okrajích. Bílé šipky pak znázorňují vektorový součet pohybu tornáda a jeho rotace. Dlouhé tenké čáry pak vymezují pravý (P) a levý (L) okraj stopy tornáda. Jak je z obrázku zřejmé, destrukční působení tornáda (vyvolané horizontální složkou větru) je v rámci stopy tornáda značně proměnlivé. Nejsilnější je vždy (při cyklonálně rotujícím tornádu na severní polokouli) v pravé části stopy, proměnlivost směru působení větru je zde minimální. Největší změny směru působení větru jsou v střední části stopy tornáda, kde se v průběhu přechodu tornáda změnil směr větru téměř o 90° (tento efekt bývá pěkně „zdokumentován“ pravidelnou proměnlivostí směru popadaných stromů, jak tomu bylo např. v polomu po tornádu jižně od Kláštera Teplá v noci ze 21./22.7.1998, viz [3]). V levé části stopy pak záleží na rychlosti postupu a rotaci tornáda, zda zde vůbec k nějakým škodám dojde, resp. jaká je orientace škod. V případě, kdy obvodová rychlost rotace tornáda je větší, než rychlost jeho postupu, lze v této části stopy očekávat směr zlomů či vývrátů stromů proti směru postupu tornáda. Schéma M. Setvák.

Fig. 10. This figure illustrates forces imposed by wind vectors at different parts of a tornado. Thick black arrow depicts the vector of motion (transition) of the tornado itself; thin black arrows indicate vectors of wind speed driven by rotation of a tornado at its periphery. White arrows represent a vector sum of tornado's transition and rotation. Long thin lines define left (L) and right (P) edge of the tornado swath. As obvious, the destructive potential of the tornado, enforced by its horizontal wind component, varies a lot within the tornado track. For a cyclonic tornado at northern hemisphere, it is always strongest close to its right side, and the direction variability is lowest here. The biggest wind direction changes can be found within the central part of the tornado damage swath, where the direction of resultant wind vectors changes by almost 90° as the tornado passes overhead (this is typically nicely recorded by treefall direction variability). At the left part of the tornado swath, the damage can be minimal and direction of wind forces can have both orientations (along or against the vector of tornado transition), depending on the sum of wind vectors. For those cases, when wind rotation is faster as compared to wind transition vectors, the treefall can be expected against the movement of the tornado. By M. Setvák.

Obr. 11a Lesní polom mezi Milošovicemi a Velkou pasekou. Snímek z pravého okraje polomu. Západ je vlevo. Foto M. Setvák.

Fig. 11a. Broken and uprooted trees between Milošovice and Velká Paseka. Photo taken at right edge of the tornado damage swath. Photo M. Setvák.





Obr. 11b Lesní polom mezi Milošovicemi a Velkou pasekou. Snímek levého okraje polomu. Západ je vlevo. Foto M. Setvák.

Fig. 11b. Broken and uprooted trees between Milošovice and Velká Paseka. The same at left edge (the west is in both cases at left side of the image). Photo M. Setvák.

přítomností samotného „hlavního“ tornáda, jejich jediným možným vysvětlením je opět výskyt sekundárních savých vírů, působících z různých směrů. Na tomto místě je nutné podotknout, že nelze vyloučit ani přítomnost menších, samostatných tornád, vyskytujících se v blízkosti „hlavního“ tornáda. Tomu by napovídalo i jedno ze svědectví, kdy dotyčný líčil poměrně malé, ale akusticky velmi výrazné tornádo, které postupovalo od Sázavy kolmo na směr postupu hlavního tornáda, přičemž svědek si hlavního tornáda nevšiml. Zde není zcela zřejmé, zda jej jako tornádo nevnímal pro jeho mohutnost, či zda zmiňované „malé tornádo“ pozoroval až po přechodu hlavního tornáda.



Ve druhém polomu letecké snímky víceméně potvrdily pozemní dokumentaci, avšak počet stromů složených na konci stopy kolmo (vlevo od směru postupu tornáda) je výrazně větší, než se zdálo ze země. Na levém okraji stopy pak na leteckých snímcích bylo možné (při detailním zpracování) najít i skupiny stromů, složených proti postupu bouře, podobně jako tomu bylo v prvním polomu. Na rozdíl od něj jsou zde však směry „homogennější“, méně proměnlivé. To naznačuje, že se zde již sekundární savé víry buď nevyšly, nebo že zde nedosahovaly až k zemskému povrchu.

Většina stavení ve Velké Pasece a samot v jejím okolí, které stály ve stopě tornáda, přišla zcela nebo z větší části o střešní krytinu, případně i o krovy, jejichž nosné trámy pak byly rozesety na značné vzdálenosti po okolí. Na základě charakteru těchto škod bylo tornádo klasifikováno stupněm F3 (Fujitovy stupnice, kde F0 je přiřazeno nejslabším tornádům, F5 nejsilnějším). Právě různé létající trosky (kusy stromů, případně celé stromy, střešní krytina a trámy, plechové střechy, aj. viz obr. 12) představovaly pro obyvatele oblasti největší ohrožení. Je překvapivé, že nedošlo ani k žádnému smrtelnému úrazu, ale dokonce ani k žádnému zranění (alespoň jsme se o žádném nedozvěděli). V oblasti jsme se setkali převážně s velkou chválou hasičů, a to jak profesionálních, tak dobrovolných, kteří pomáhali jak s likvidací bezprostředních následků tornáda, tak s opravou střech poškozených stavení.

Část ovocných stromů, které byly ve stopě tornáda, byla vykroucena či vytrhána z kořenů a ve více případech přenesena na větší vzdálenosti, některé z těchto stromů byly vláčeny po zemi, viz obr. 13.

Zatímco v některých částech tornáda (nebo jeho savé víry) dle svědků doslova „uválcovaly“ trávu, jinde „šlo“ těsně nad zemí – zatímco ovocné stromy byly vytrhány z kořenů, v jejich bezprostřední blízkosti stojící zeleninové zahrádky či políčka zůstaly netknuty (včetně ochranných fólií). Nutno podotknout, že již necelé dva dny po výskytu tornáda nebylo uválcování trávy patrné.

Mezi další zajímavosti lze zařadit například tornádem přeražené („jako přestřižené“) tři dřevěné sloupy a jeden betonový sloupek (ca 25 x 25 cm) elektrického rozvodu, či „vycucnutou“ vaničku s prádlem a s vodou.

Z vývojové fáze, kdy se již částečně rozpadlé tornádo vyskytovalo v prostoru mezi Velkou Paskou a Zahájím, pořídil pan Kamil Volek z Chřenovic unikátní videozáznam. Jsou na něm zřetelně vidět jednotlivé dílčí savé víry (viz obr. 14, případně viz [3], kde lze shlédnout část tohoto videozáznamu), rotující zvolna kolem středu rozpadajícího se tornáda. V detailu jednoho z těchto vírů je pak zřetelně vidět prudké vzestupné proudění, zřejmě úzce související se savým efektem víru. Je to tak první případ výskytu sekundárních savých vírů na území ČR, doložený kvalitním videozáznamem.

Obr. 12 Trám, původně součást krovy budovy vzdálené ca 150 metrů. Právě podobné „létající projektily“ představují vůbec jedno z největších rizik v blízkosti tornád. Foto M. Setvák, Velká paseka.

Fig. 12. Joist, originally part of the roof of a building about 150 m away, carried here by the tornado. Photo M. Setvák, Velká paseka.



Obr. 14 Část videozáznamu závěrečné fáze tornáda, zobrazující jednotlivé „sekundární savé víry“ po rozpadu „mateřského“, nosného tornáda. Na originálním záznamu je dobře patrný silné vzestupné proudění (savý efekt) uvnitř vírů, jednak jejich pomalejší rotace kolem středu rozpadajícího se tornáda. Video K. Volek, Chřenovice.

Fig. 14. Part of a video record of the final (dissipating) stage of the tornado, showing individual secondary suction vortices. The original of the record shows both – slow rotation of these vortices round the axis of the parent tornado leftover, and strong updraft motions inside the individual vortices. Video K. Volek, Chřenovice.

Toto video zřejmě vysvětluje i jisté rozpaky svědků, popisujících zánik tornáda. Někteří svědci totiž popisují blíže nespecifikované „cosi“, co je po rozpadu tornáda „obešlo“ ze dvou stran, doprovázené dalšími škodami. Ono „cosi“ jsou zřejmě jednotlivé savé víry, kroužící kolem středu víru rozpadajícího se tornáda, které v této fázi již nebylo zviditelněno kondenzačním kuzelem v důsledku zeslabení své cirkulace.

6. RADAROVÁ POZOROVÁNÍ

Postup obou tornádických bouří byl dobře detekován dvojicí meteorologických radarů ČHMÚ [14], přičemž ve všech termínech byly bouře pozorovány alespoň jedním radarem bez výskytu mezilehlých cílů, které by znehodnocovaly radarové pozorování vlivem útluhu radarového paprsku. Vývoj radarového echa je znázorněn na obrázku 15 pomocí polí maximální radarové odrazivosti z 11.50, 12.50, 13.40, a 14.50 UTC (základní a nejvíce využívaný radarový produkt) a pole radarového odhadu srážek za období 11.50 – 15.20 UTC. Trajektorie pohybu bouří byla již popsána v předchozích kapitolách, pro doplnění jsou ještě obě dráhy vyznačeny i v poli radarového odhadu srážek černými čarami.

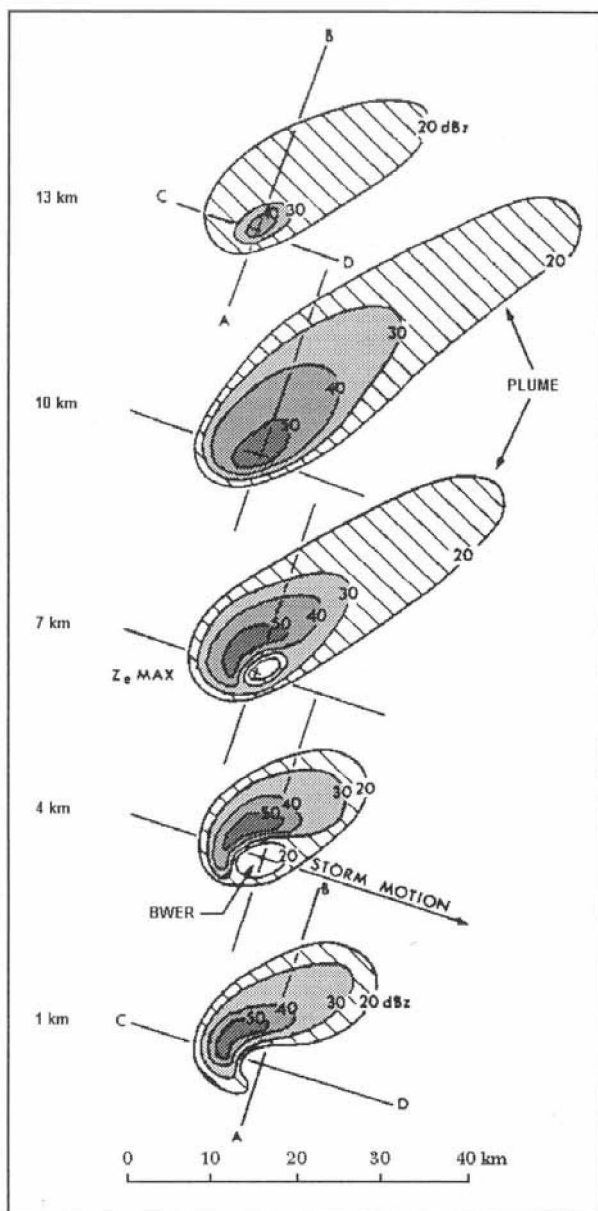
Obě bouře byly z hlediska radarové odrazivosti dosti silné, v nejsilnějším stádiu (severní bouře mezi 14.00–14.30 UTC, jižní bouře mezi 13.30–14.50 UTC) dosahovaly maximální

odrazivosti až 60 dBZ a výšky horní hranice radioecha až 14 km. Takto silné bouře však nejsou výjimkou a lze je pozorovat relativně často. Z pohledu radarového pozorování byl tento den významným především prvním objektivním prokázáním existence supercely v ČR pomocí radarových měření.

Z definice supercely (viz např. [4]) vyplývá, že by k jejímu jednoznačnému prokázání mělo být použito pole dopplerovských radiálních rychlostí, na kterém je za vhodných okolností možno identifikovat projevy rotace prokazující existenci tzv. mezocyklony. Tato definice, resp. její současná podoba, však vznikla ve Spojených státech a opírá se o tam využívané parametry radarových měření, které jsou do značné míry technicky optimalizované právě pro detekci silné konvekce (vlnová délka, opakovací frekvence, průměrování paprsku) a poskytují pole dopplerovských radiálních rychlostí vhodné pro detekci mezocyklon.

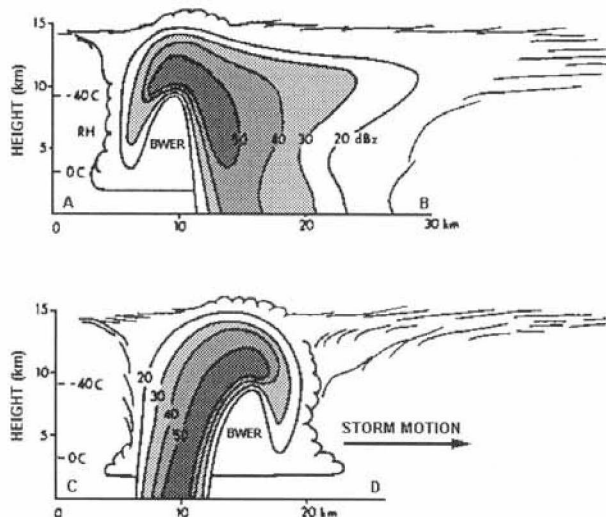
Kromě detekce mezocyklony v poli radiálních dopplerovských rychlostí lze ale pro prokázání supercely využít i pole radarové odrazivosti, viz např. [20]. Typická struktura třírozměrného radarového echa v supercele je znázorněna na obr. 16. V supercelách, ale slaběji i v multicelech, v oblasti silného výstupného proudu dochází k tomu, že srážkové částice nestačí narůstat do větších rozměrů a ve střední troposféře (ve výškách ca 3–9 km) vzniká oblast výrazně zeslabené odrazi-

(a)



vosti (Weak Echo Region = WER) v porovnání s okolím. Ve vyšších hladinách, typicky ca 9 až 14 km, silné rychlosti výstupného proudu zformují a následně umožňují udržovat ve vzduchu dostatečné množství srážkových částic (včetně velkých) a díky tomu nad WER vzniká oblast vysoké radarové odrazivosti. Výše popisované vlastnosti je možné pozorovat nejen u supercel, ale i u multicele. Zcela typické pro supercely je ale to, že díky delší době života a silným vertikálním rychlostem vzestupného konvekčního proudu WER postupně prorůstá do vyšších hladin, kde je již přítomno významnější množství větších srážkových částic, tj. do oblasti vyšší radarové odrazivosti. Zároveň s tím dochází ke snižování spodní hranice této vysoké odrazivosti. Díky těmto dvěma efektům se oblast WER postupně obklopuje ze všech stran oblastí vyšší odrazivosti a WER tak přechází do tzv. BWER (Bounded Weak Echo Region). V horizontálním řezu pak lze BWER identifikovat jako centrum uzavřené kruhové struktury, kdy prstenec vysoké odrazivosti obklopuje střed s nízkou odrazi-

(b)



Obr. 16 Typická struktura radarové odrazivosti v supercele (a) v různých výškových hladinách a (b) ve vertikálních řezech. Hodnoty odrazivosti jsou udávány v dBZ. Převzato z [4], původně publikováno v [15].

Fig. 16. Typical radar structure of a supercellular storm at (a) various horizontal levels and (b) vertical cross-sections. Reflectivity values are

vosti. S dospíváním supercely se vytváří mohutný sestupný proud a vyšší odrazivost se protahuje přes celý vertikální rozsah supercely až k zemi. Sestupný proud se vlivem rotace jádra bouře kolem jejího výstupného proudu stáčí a vytváří tzv. hákovité echo (hook echo) o vysoké odrazivosti, detekovatelné většinou od střední troposféry až k zemi.

V České republice (ale i ve většině ostatních evropských zemí) jsou radarová měření optimalizována především pro radarové odhady srážek a potřeby letecké meteorologie (frekvence vysílaného pulzu ca 5 cm, maximální dosah ca 260 km, opakovací frekvence na nižších elevacích ca 560 Hz). Z těchto důvodů je maximální jednoznačně určitelná radiální rychlost rovna pouze $\pm 7.7 \text{ ms}^{-1}$ a často proto dochází k „překlápění“ radiálních rychlostí (tzv. aliasing) a určení skutečné rychlosti je proto problematické. Dalším, a důležitějším, problémem při analýze polí radiálních rychlostí je, že v některých oblastech, kde jsou dostupná korektní data radarové odrazivosti, není radar schopen vyhodnotit velikost dopplerovských radiálních rychlostí (pole radiálních rychlostí jsou poté „rozbitá“ – obsahují oblasti bez dat). Dopplerovské rychlosti nejsou vyhodnoceny z důvodu nižší kvality vstupních dat (nízká hodnota SQI = signal quality index), která je způsobena nedostatečným průměrováním měření (vynuceným potřebou časté obnovy dat) a častým „překlápěním“ rychlostí. Z uvedených důvodů proto u nás nelze data dopplerovských rychlostí k detekci mezocyklon využít. Hlavní využití těchto dat v našich podmínkách proto spočívá v eliminaci pozemních odrazů a k výpočtu vertikálního profilu proudění z měření na vysokých elevacích a kratším dosahu.

Lépe jsme na tom však s daty radarové odrazivosti, což dokládá obr. 17, znázorňující třírozměrnou strukturu radarové odrazivosti jižnější tornádické bouře, naměřenou radarem Brdy v 13.40 UTC. Je vidět, že velmi dobře odpovídá teoretické struktuře z obr. 16. Jednoznačně je zřetelná BWER ve spodní troposféře i vysoká odrazivost ve vyšších hladinách.

Tato struktura, spolu s výskytem výrazného hook echa vyjádřeného pěkně na snímcích maximální odrazivosti (viz. pole ze 14.50 UTC na obr. 15), resp. na jednotlivých PPI obr. 20, celkem jednoznačně potvrzují, že v případě této bouře se jednalo o supercelu.

Na závěr této kapitoly budíž zdůrazněno, že pro identifikaci supercely je zapotřebí analyzovat třírozměrnou strukturu bouře. Při použití pouze pole maximálních odrazivostí totiž zpravidla dochází k zamaskování důležitých rysů bouře odrazivostí z jiných hladin. Toto velmi dobře dokumentuje obr. 17, kde v poli maximálních odrazivostí nic nenaznačuje na přítomnost BWER ve spodní troposféře.

7. DRUŽICOVÁ POZOROVÁNÍ

Samotné družicové snímky (ať z geostacionární družice Meteosat 7, či z družice na polární dráze NOAA 14) příliš mnoho nových informací o bouřích, které tato tornáda zplodila, neposkytnou. Na obr. 18 je pohled na oblast střední Evropy, pořízený přibližně ve 14.52 UTC družicí Meteosat 7; snímky jsou zde spíše uvedeny pro doplnění synoptické situace. Zatímco snímek vzniklý kombinací VIS+IR (nahore) se zpracováním blíží pohledu lidského oka, snímek vzniklý kombinací IR+WV (dole) zobrazuje rozložení střední až vysoké oblačnosti (bíle) a celkového množství vodní páry v horní polovině troposféry (modře). Z obou snímků je patrné, že značná část střední Evropy leží (jak již bylo řečeno v kapitole 2) pod oblastí jet streamu (tryskového proudění), projevujícího se rozsáhlou cirrovitou oblačností jižně od jeho osy. V důsledku toho je většina konvekčních bouří v oblasti střední Evropy částečně maskována právě touto vysokou oblačností, a to ve všech spektrálních pásmech, i v jejich kombinacích. Vzhledem k rozlišení družic Meteosat (pro oblast střední Evropy je velikost jednoho pixelu přibližně 6 km x 9 km) a rozměrům bouře, resp. jejich aktivních částí, nemá sebemenší smysl pokoušet se o jakékoliv kvantitativní vyhodnocení družicových snímků. Nepřesnosti způsobené málo přesnou kalibrací senzorů Meteosatu (první generace, tedy do Meteosatu 7 včetně) pro nízké teploty a průměrování skutečných hodnot přes oblast, odpovídající rozměru jednoho pixelu, dokonale „shladí“ jakékoliv kvantitativně zajímavé údaje – např. o nejnižší teplotě horní hranice oblačnosti (HHO).

Z pohledu družice NOAA 14 (obr. 19) se zájmová oblast nalézala téměř v nadiru družice, tudíž v oblasti maximálního rozlišení přístroje AVHRR (rozměr jednoho pixelu v nadiru družice je 1,1 km x 1,1 km.). Přesto i z pohledu této družice byla „mateřská“ bouře tornáda v Posázaví poměrně malá, její aktivní oblast má napříč rozměr jen několik pixelů. Přesto na tomto snímku (především viz výřezy B až D) zaujme vertikální výběžek, který se ve viditelném a blízkém infračerveném oboru (kanály 1 a 2) prozrazuje stínem vrženým na okolní HHO. Lze tudíž předpokládat, že by se mohlo jednat o tzv. overshooting top („přestřelující vrchol“), oblast, kde vrcholí silné vzestupné proudění uvnitř bouře. Snímek v tepelném pásmu (výřez C) zobrazuje rozložení teplot HHO, červená oblast vyznačuje teploty nižší než 215 K, žlutá tečka uprostřed je pak absolutním teplotním minimem HHO této bouře (213,5 K). Přenesení této nejchladnější (červeně vyznačené) oblasti do kombinace kanálů 1, 2 a 4 (výřez D) ukazuje, že nejchladnější oblast není přesně totožná s nejvyšším vrcholem, nýbrž je mírně posunuta na „návětrnou“ (západní) stranu „přestřelujícího vrcholu“.

Tyto „přestřelující vrcholy“ většinou u silnějších bouří pronikají až několik kilometrů nad rovnovážnou hladinu HHO, přičemž

korespondují jednotlivým „bublinám“ vzestupného konvekčního proudu. Lze je pozorovat buď při pohledu „z boku“ (ať ze zemského povrchu z větších vzdáleností, či přibližně z úrovně HHO – např. z dopravních letadel). Typická doba jejich života bývá v rozmezí 7 až 15 minut. V důsledku pokračujícího ochlazování během výstupu nad HHO (a nedostatku času na vyrovnaní teploty s okolím) bývají právě na jejich vrcholech naměřeny teploty až o 20 až 35 °C nižší než je teplota okolní HHO či teplota tropopauzy. Samotná přítomnost těchto „přestřelujících vrcholů“ v žádném případě není příznakem supercelární podstaty bouře!

Jak již bylo řečeno v úvodu této kapitoly, samotné družicové snímky samy o sobě příliš zajímavé nejsou. Zajímavými se stávají až při kombinaci s radarovým pozorováním ze stejného termínu. Obr. 20 ukazuje stejné výřezy jako obr. 19(D), avšak s postupně vkládanými jednotlivými radarovými měřeními (PPI). Zde je nutné zdůraznit, že pro geografické přiřazení snímku a vzájemnou kombinaci s radarem byla provedena co nejpresnější navigace družicového snímku (transformace do geografických souřadnic), případná chyba by neměla být větší než 1 družicový pixel (tudíž ca 1 km). Nejnižší PPI byl snímán ca 4 minuty před přeletem družice, nejvyšší použitý PPI pak přibližně v době přeletu družice (odchylka časů by měla být menší než 1 minuta).

Z této kombinace snímku z družice NOAA 14 a měření radaru Brdy pak vyplývá několik zajímavostí. První z nich je skutečnost, že jak oblast nejvyšších radarových odrazivostí pro nejnižší PPI, tak polohu středu hákovitého echa v tomto PPI se svou polohou značně liší od polohy přestřelujícího vrcholu. Vzhledem ke směru postupu bouře tuto disproporci nelze vysvětlit rozdílným časem měření (ca 4 minuty pro nejnižší PPI), a vzhledem k nadirové poloze bouře vzhledem k družici tato odchylka není vysvětlitelná ani paralaxou družicového měření. S použitím vyšších a vyšších PPI se pak střed radarového echa čím dál více blíží poloze přestřelujícího vrcholu, až konečně pro poslední nejvyšší PPI je shoda dokonalá. To je plně ve shodě s teorií struktury supercely, resp. třírozměrné struktury její radarové odrazivosti, jak je pojednána v předchozí kapitole. Navíc toto porovnání naznačuje, že osa vzestupného proudu (resp. BWER) byla v době pozorování silně nakloněna směrem k severovýchodu až k severu. Tento příklad opětovně potvrzuje, že nelze přesně ztotožňovat oblasti nejnižších teplot HHO konvekčních bouří s oblastí výskytu maximálních přízemních srážek, resp. polohou jádra bouře (oblastí středu BWER nebo centra hákovitého echa).

8. ZÁVĚR

Výše popsany případ není až tak výjimečným z hlediska mohutnosti tornáda a způsobených škod, jako spíše komplexností dokumentace jak samotného tornáda, tak jeho „mateřské“ konvekční bouře. Je však pravděpodobné, že pokud by se toto tornádo vyskytlo v hustěji osídlené oblasti, např. v městské zástavbě, byly by škody výrazně větší. Případ je důležitým především díky dvěma „prvenstvím“: je to první případ v ČR, kdy se podařilo zcela jednoznačně prokázat radarem supercelární podstatu bouře (a tudíž i to, že se jednalo o supercelární tornádo), a zároveň je to první případ v ČR jednoznačně zdokumentovaných sekundárních savých vírů, natočených amatérskou videokamerou. Na existenci těchto „podružných“ savých vírů se již déle nepřímou usuzovalo na základě charakteru způsobených škod, až do tohoto případu však chyběl jednoznačný důkaz.

Poděkování autorů článku patří především všem obyvatelům postižené oblasti i z jejího okolí, kteří svým svědectvím, fotografiemi či videozáznamem pomohli s dokumentací a následnou odbornou rekonstrukcí případu. Rovněž děkujeme svým dalším kolegům, kteří se na odborné dokumentaci škod podíleli a z jejichž práce tento článek částečně čerpá. Velké poděkování patří i zástupcům postižených obcí a měst, kteří nám i v tak pro ně kritické době ochotně věnovali svůj čas, jakož i hasičům z Havlíčkova Brodu za veškeré poskytnuté informace. Dokumentace jevu a zpracování dalších informací byly částečně podpořeny grantem GA ČR č. 205/00/1451; následná letecká dokumentace škod byla provedena z letiště Zbraslavice.

Literatura a odkazy na internet

- [1] ŠÁLEK, M. – SETVÁK, M. – SULAN, J. – VAVRUŠKA, F., 2002. Významné konvektivní jevy na území České republiky v letech 2000–2001. *Meteorologické Zprávy*, roč. **55**, s. 1–8.
- [2] SETVÁK, M. – ŠÁLEK, M. – MUNZAR, J., 2003. Tornadoes within the Czech Republic: From early medieval chronicles to the “internet society”. *Atmospheric Research*, Vol. **67–68C**, s. 607–627.
- [3] Tornáda a jevy příbuzné na území České republiky a Slovenska. <http://www.chmi.cz/torn> (internetové stránky ČHMÚ, 1996–2004).
- [4] DOSWELL, C. A., 2001. Severe Convective Storms, Meteorological Monograph, American Meteorological Society, Vol. **28**, Number 50, Boston.
- [5] KERR, W. K. – DARKOW, G. L., 1996. Storm-Relative Winds and Helicity in the Tornadoic Thunderstorm Environment. *Weather Forecasting*, Vol. **11**, s. 489–505.
- [6] MANZATO, A., 2003. A climatology of instability indices derived from Friuli Venezia Giulia soundings, using three different methods. *Atmospheric Research*, Vol. **67–68**, s. 417–454.
- [7] DOSWELL, C. A., 2000. A Primer on Vorticity for Application in Supercells and Tornadoes. http://www.cimms.ou.edu/~doswell/vorticity/vorticity_primer.html
- [8] BUNKERS, M. J. – KLIMOWSKI, B. A. – ZEITLER, J. W. – THOMPSON, R. L. – WEISMAN, M. L., 2000. Predicting supercell motion using a new hodograph technique. *Weather Forecasting*, Vol. **15**, s. 61–79.
- [9] DAVIES-JONES, R. D. – BURGESS, W. – FOSTER, M., 1990. Test of helicity as a tornado forecast parameter. Preprints, 16th Conf. Severe Local Storms (Kananaskis Park, Alberta), Amer. Meteor. Soc., 588–592.
- [10] FUJITA, T. T., 1971. Proposed mechanism of suction spots accompanied by tornadoes, in Preprints of papers presented at the 7th Conference on Severe Local Storms, Kansas City. Boston: American Meteorological Society, p. 208–213.
- [11] FUJITA, T. T. – FORBES, G. S. – UMENHOFER, T. A., 1976. Close-up view of 20 March 1976 tornadoes: Sinking cloud tops to suction vortices, *Weatherwise*, 29, s. 116–131, 145.
- [12] SULAN, J. – SETVÁK, M. – NOVÁK, P., 1998. Silná konvektivní bouře v Čechách v noci z 27.–28.6.1997. *Meteorologické Zprávy*, roč. **51**, s. 118–125.
- [13] SULAN, J. – PEŠICE, P. – STAŠA, P., 2004. Výpočet konvektivní dostupné potenciální energie „CAPE“ a možnosti jeho využití v provozu ČHMÚ. *Meteorologické Zprávy*, roč. **57**, s. 61–68.
- [14] Internetové stránky ČHMÚ, oddělení radarových měření. <http://www.chmi.cz/meteo/rad>
- [15] CHISHOLM, A. J. – RENICK, J. H., 1972. The kinematics of multicell and supercell Alberta hailstorms. Alberta Hail Studies, Research Council of Alberta Hail Studies Rep. 72-2, s. 24–31.
- [16] DOSWELL, C. A., 1985. The operational meteorology of convective weather. Volume II: Storm scale analysis. NOAA Tech. Memorandum, Boulder, Colorado.
- [17] LEWELLEN, W. S., 1993. Tornado vortex theory. The Tornado: its structure, dynamics, prediction, and hazards. Geophysical monograph 79. Washington, D.C.: American Geophysical Union, s. 19–39.
- [18] FINLEY, C. A. – LEE, B.D., 2000. Numerical simulation of secondary vortex development in a tornadic vortex. Preprints, 20th Conf. Severe Local Storms (Orlando, Florida), Amer. Meteor. Soc., s. 230–233.
- [19] CHURCH, C. R. – SNOW, J. T., 1993. Laboratory models of tornadoes. The Tornado: its structure, dynamics, prediction, and hazards. Geophysical monograph 79. Washington, D. C.: American Geophysical Union, s. 227–295.
- [20] BURGESS, D. W. – LEMON, L. R., 1990. Severe thunderstorms detection by radar. Radar in meteorology: Battan Memorial and 40th Anniversary Radar Meteorology Conference. Edited by David Atlas. Boston: American Meteorological Society, s. 619–647.

Lektoři RNDr. D. Řezáčová, CSc. a RNDr. J. Strachota, rukopis odevzdán v červnu 2004.

Podpisky k obrázkům v barevné příloze

Obr. 11c Lesní polom mezi Milošovicemi a Velkou pasekou. Letecký snímek celého polomu (sever je nahoře, tornádo postupovalo zleva doprava, šířka stopy je přibližně 500 m; tři světlé obloučky vlevo od středu snímku jsou projevem začátku prací, souvisejících s likvidací polomu). Foto M. Setvák.

Fig. 11c Broken and uprooted trees between Milošovice and Velká Paseka. Aerial photo of this treefall area (north is at the top of the photo, tornado transition was from left to right, damage swath width was about 500 m; the three brighter curved lines show the beginning of the treefall removal works). Photo M. Setvák.

Obr. 19 Snímek oblasti ČR, pořízený družicí na polární dráze NOAA 14 přibližně ve 14.54 UTC. A – celkový pohled na ČR, kombinace kanálů AVHRR 1, 2 a 4. Obdélník vyznačuje oblast, zobrazenou na výřezech B, C a D. B – zvětšený výřez oblasti, vyznačené v A obdélníkem. C – tatáž oblast v tepelném pásmu (AVHRR kanál 4), červeně vyznačena nejchladnější oblast ($T \leq 215$ K), žlutá tečka uprostřed vyznačuje absolutní minimum v oblasti (213.5 K). D – totéž co B, avšak s vyznačením nejchladnější oblasti z tepelného snímku C. Archiv ČHMÚ, zpracoval M. Setvák.

Fig. 19. Region of the Czech Republic, as captured by polar orbiting satellite NOAA 14 at 14.54 UTC. A – global view of the Czech Republic in composite image of the AVHRR spectral bands 1, 2 and 4. The rectangle depicts area, which is shown in detail in B, C and D. B – zoomed detail from A. C – the same area as in B, in the AVHRR band 4; red area depicting lowest brightness temperatures ($T \leq 215$ K), yellow dot in the center corresponds to absolute minimum (213.5 K). D – the same as in B, with marked lowest brightness temperatures from C. Archive CHMI, processing M. Setvák

Obr. 20 Tatáž oblast jako na snímcích B a D obrázku 19, avšak s proloženou informací z radaru Brdy z termínu 15.00 UTC (čas konce měření) pro jednotlivé PPI. V závorce je vždy uvedena odpovídající nadmořská výška pro dané PPI ve vzdálenosti 110 km od radaru Brdy. A – PPI 0,1° (1,8 km); B – PPI 0,5° (2,6 km); C – PPI 1,1° (3,7 km); D – PPI 1,8° (5,1 km); E – PPI 2,6° (6,6 km); F – PPI 3,7° (8,7 km). Podrobný komentář viz text článku. Archiv ČHMÚ, zpracovali M. Setvák a P. Novák.

Fig. 20. The same area as in B – D of the figure 19, shown in composite with radar reflectivity information from the radar Brdy, at 15.00 UTC (end of the measurement) for individual PPI's. The value in brackets gives corresponding ASL for the given range (110 km) from the radar. A – PPI 0.1° (1.8 km); B – PPI 0.5° (2.6 km); C – PPI 1.1° (3.7 km); D – PPI 1.8° (5.1 km); E – PPI 2.6° (6.6 km); F – PPI 3.7° (8.7 km). Archive CHMI, processing M. Setvák and P. Novák.