

Cumulonimbus – mezoměřítkové konvektivní systémy I.

Petr Zacharov¹, Jana Žďárská²

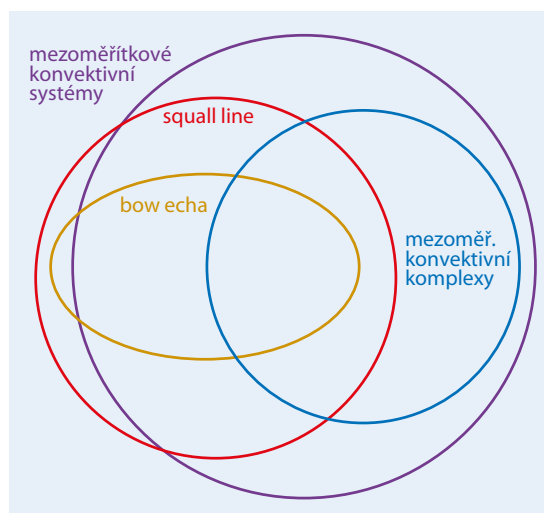
¹ Ústav fyziky atmosféry AV ČR, Boční II 1401/1a, 141 31 Praha 4; petas@ufa.cas.cz

² Fyzikální ústav AV ČR, Na Slovance 2, 182 00 Praha 8; zdarskaj@fzu.cz

Silná bouře nemusí znamenat jen jeden cumulonimbus, ale celou jejich řadu či shluk. Vzhledem k velké organizaci takového systému může bouře vytvářet silné porvy v větru či intenzivní srážky. A to nejen na malém území, ale i na rozsáhlých oblastech.

Jednoduché cely, multicely¹ a supercely² neboli konceptní modely silných bouří, které jsme popisovali v minulých dílech, představují buď jeden cumulonimbus, nebo několik cumulů a cumulonimbů v různých etapách života. Někdy ovšem můžete pozorovat poměrně velké pásy či systémy, pohybující se víceméně společně ruku v ruce. Takové systémy mívají vnitřní organizaci, díky níž mohou produkovat nebezpečné počasí na poměrně velké oblasti. Organizace může přijít zvenčí, když se bouřky tvoří např. na studené frontě. To je velké rozhraní zasahující velkou část Evropy, kdy se studený vzduch valí a nutí stoupat teplý vzduch vzhůru. Podél takového rozhraní mohou poměrně snadno vznikat bouře, často vypadající jako dlouhá linie. Pro nás je však zajímavější druhý případ, kdy si bouře vyvinou jednu mohutnou gust frontu, k níž všechny přispívají. Ta vlastně trochu supluje tu zmíněnou studenou frontu, ale rozdíl je v tom, že první proces je řízen zvenčí jevem většího měřítka – studenou frontou, kdežto druhý proces se vytvoří sám, třeba i z jedné konvektivní bouře³. A protože je to jev menšího měřítka než studená fronta, ale větší než jeden oblak, označujeme ho jako mezoměřítkový. Zároveň je to mnoho konvektivních bouří vedle sebe, a proto tedy mezoměřítkový konvektivní systém (MCS – *mesoscale convective system*). Podle definice se jedná o soustavu bouří, která má alespoň jeden rozměr přes 100 km.

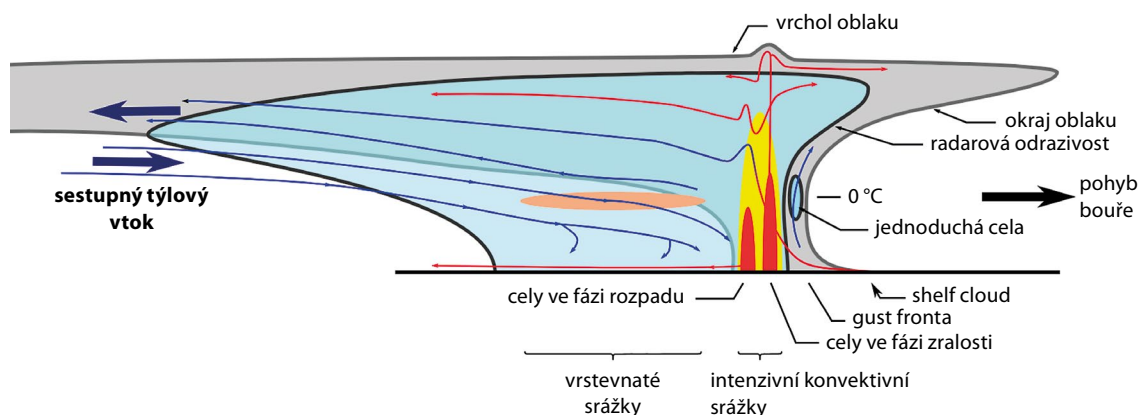
Mezoměřítkové konvektivní systémy si meteorologové trochu rozškatalkovali do několika kategorií, nicméně příroda měla v tomto rozdělení trochu navrch a škatulky tak nejsou úplně unikátní, ale trochu se překrývají. To vzniklo hlavně tím, že se bouře pozorova-



Obr. 1 Vennův diagram mezoměřítkových konvektivních systémů (podle Markowski, Richardson, 2010).

ly a studovaly jak na radarech, tak na družicích. Až později se ukázalo, že bouře, která je na družici vidět jako jedna obrovská kruhovitá kovadlina, zasahující pro srovnání přes celé Čechy, je na radaru protáhlá, a nikoli kruhová linie bouří. Systém bouří s obří kovadlinou, charakterizovanou svojí přibližnou kruhovitostí a definovanou nějakou minimální velikostí a výdrží, se označuje jako mezoměřítkový konvektivní komplex (MCC). Linie bouří se zase označuje jako *squall line* (SQL). A právě některé squall line mohou při pohledu shora být i mezoměřítkovými konvektivními komplexy, když budou mít opravdu rozsáhlou kovadlinu. Podmnožinou SQL pak jsou obdobné linie, jejichž menší či větší část je prohnutá směrem dopředu – *bow echa*. Ještě drobná poznámka: do MCS patří i squall line nebo bow echa, která jsou kratší než 100 km. Funkčně odpovídají, jen jsou prostě o málo kratší, než je umělá definice. Není tedy fyzikální důvod je z kategorie vyřazovat.

- 1 P. Zacharov, J. Žďárská: Cumulonimbus, oblak známý neznámý, díl třetí, vliv větru. Čs. čas. fyz. 74, 221–223 (2024).
- 2 P. Zacharov, J. Žďárská: Cumulonimbus, oblak známý neznámý, díl čtvrtý, supercela. Čs. čas. fyz. 74, 304–305 (2024).
- 3 P. Zacharov, J. Žďárská: Cumulonimbus, oblak známý neznámý, díl první, oblak. Čs. čas. fyz. 74, 60–62 (2024).



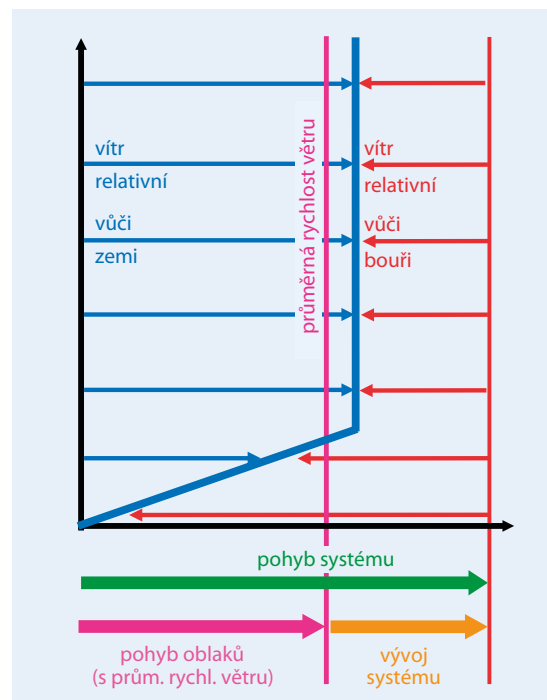
Obr. 2 Řez squall line. Šedou barvou jsou naznačeny kontury bouře, modrou, žlutou a červenou zvyšující se intenzity radarové odrazivosti (intenzivnější srážky). V přední části systému (vpravo) nad gust frontou vznikají nové jednoduché cely, které se postupně dostávají do stadia zralosti, kde produkují intenzivní konvektivní srážky a také produkují výraznou kovadlinu systému (horní vodorovná část). Ve fázi rozpadu se cely postupně transformují za přispění pomalého výstupného proudu do vrstevnaté zadní části oblaku a produkují vrstevnaté srážky. Proudění v oblaku je naznačeno tenkými šipkami, červeně rychlejší proudění v konvektivní části a modře pomalejší proudění v zadní části systému. Směrem od levé strany je naznačen týlový vtok vzduchu do bouře. Zdroj: wikipedia.com

Squall line jsou tvořeny protáhlou linií multicel naskládaných vedle sebe. V realitě se nejedná o přímku, čára bouří se může lehce vlnit, v současnosti se můžete také setkat s označením *quasi-linear convective systems*, které uvolňuje podmínku na striktně rovnou linii bouří. Bouře také nemusí být namačkané na sobě, ale mohou mít mezi sebou malé mezery. Ne že by někde chyběl oblak, ale na radaru můžeme mezi místy s nejvyšší intenzitou vidět oblasti s nižší intenzitou srážek.

Vznik SQL bychom si mohli představit jako pokračování života multicely, případně spojení více multicel. Multicela produkuje se srážkami i bazén studeného vzduchu s gust frontou na okraji⁴. Rozsáhlá gust fronta může podpořit vznik nových cel pouze na jednom místě, jako tomu bylo u multicely, ale v těsném okolí. Tím vznikne více nových cel vedle sebe, každá z nich postupně dojde do stadia zralosti, vytvoří srážky a posílí bazén studeného vzduchu a tím i gust frontu. Na čele bouře tak máme aktuálně ne jednu celu s gust frontou, ale několik cel vedle sebe. Jejich gust fronty se spojují a z původně přibližně kruhové gust fronty vytvářejí mohutnější a protáhlejší gust frontu. Postupným mohutněním se vytvoří protáhlý bazén studeného vzduchu s přibližně lineární gust frontou.

Na řezu takto vzniklým systémem (obr. 2) vidíme gust frontu, nad ní nově vznikající cumuly a hned za nimi cumulonimby produkující srážky a posilující gust frontu (cely ve stadiu zralosti⁵). Směrem dál se sice další cely rozpadají, ale díky proudění vzduchu bouří se transformují na vrstevnatou srážkovou oblačnost. Svým způsobem se jedná o vnořený nimbostratus, srážkový vrstevnatý oblak, který je vytvořen a živěn čelními cumulonimby. Díky proudění větru bouří do něj proudí oblačné i menší srážkové částice, které se nevypřely v přední konvektivní části. A to je koncepční model squall line. Ta je tedy tvořena dvěma srážkovými oblastmi. Na čele způsobují cumulonimby intenzivní konvektivní srážky, v zadní části (většinou) vypadávají vrstevnaté srážky z nimbostratu. Mezi srážkovými pásy bývá přechodné úzké pásmo se slabšími srážkami či beze srážek.

Už jsme zmínili, že díky proudění větru v SQL vzniká v zadní části vrstevnatá oblačnost. Toto proudění v SQL je docela zvláštní. Hraje tu totiž roli vítr relativní vůči bouři. Pro jednoduchost si představme v atmosféře prostředí, kdy vítr vane v celé vrstvě troposféry jedním směrem, řekněme ze západu na východ. Průměrnou rychlostí tedy vítr tlačí cumulonimby v SQL směrem na východ. Před nimi však na gust frontě narůstají nové cely, které postupně rostou do fáze zralosti



Obr. 3 Proudění vzduchu ve squall line. Modře je vyznačena změna rychlosti větru s výškou (vertikální osa – vítr relativní vůči zemi, pozemní měření), horizontální osa míří od západu na východ. Růžová šipka představuje rychlost, se kterou se pohybují jednotlivé cely (průměrná rychlost větru v oblačné vrstvě) a oranžová šipka vývoj systému, tzn. rychlost vzniku nových cel na gust frontě. Zelená šipka pak představuje pohyb celého systému – součet rychlosti pohybu cel a rychlosti vzniku nových cel na čele systému. Červenými šipkami je vyznačen relativní vítr vůči bouři, daný rozdílem pohybu čela systému (zeleně) a větru (modře), který proudí směrem proti bouři (podle Markowski, Richardson, 2010).

4 P. Zacharov, J. Žďárská: Cumulonimbus, oblak známý neznámý, díl třetí, vliv větru. Čs. čas. fyz. 74, 221–223 (2024).

5 P. Zacharov, J. Žďárská: Cumulonimbus, oblak známý neznámý, díl třetí, vliv větru. Čs. čas. fyz. 74, 221–223 (2024).

ti, a tudíž vlastně předbíhají ty původní cumulonimby, co už se rozpadají. Čelo systému, původně se pohybující s větrem, se posune do nových cumulonimbů. Vznikem nových a nových cumulů na gust frontě se vlastně celý systém v součtu pohybuje rychleji než samotné cumulonimby, a tedy o něco rychleji než okolní vítr. (obr. 3)

A teď vstupuje do hry ten relativní vítr. Představte si, že za bezvětří postáváte na louce. Kolem vás se vzduch ani nepohne. Když se rozběhnete, začne vám do tváří vanout vítr – nepohyblivý vzduch se relativně vůči vám pohybuje opačnou rychlostí. Úplně stejné je to u SQL – jelikož se pohybuje rychleji než vítr, začne relativně k jejímu pohybu na její čelo proudit vzduch. Ten stoupá do cumulonimbů a postupně pokračuje systémem dozadu do vrstevnatého nimbostratu.

Tím jsme se konečně dostali k tomu, že SQL protéká proudění odpředu dozadu. Odnáší s sebou oblačné i malé srážkové částice směrem do zadních partií bouře, a tím vytváří i poměrně rozsáhlou oblačnost za čelní linií. Vzduch proudící SQL se po výstupu v čelních cumulonimbech chvíli vrací zpátky dolů, načež začne zase zvolna stoupat vzhůru. Zadní výstupný proud už však není tak bujarý jako výstup v čelních cumulonimbech, je pomalý a dlouhotrvající. Pomáhá malým ledovým krystalkům postupně narůstat až do velikostí, kdy začnou pomalu propadávat směrem dolů, potkávají další a další krystalky a shlukují se do sněhových vloček. Vločky postupně propadávají směrem dolů, a když se dostanou do teplot $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, tají a pokračují v pádu jako kapičky deště. Popsaný způsob vzniku srážkových částic je typický pro vrstevnatý oblak nimbostratus, který tvoří zadní část celého systému. Odtud tedy pramení rozdělení SQL na přední konvektivní část s rychlými výstupnými pohyby a na zadní vrstevnatou část s pomalými výstupnými pohyby.

Aby toho nebylo dost, tak se v SQL vyvíjí ještě jedno proudění, tentokrát zezadu dopředu. Tím už se ale



Obr. 4 Petr Zacharov na observatoři Milešovka, na níž probíhají meteorologická pozorování již od roku 1905 a která v roce 2025 oslaví již své stovacetileté výročí pozorování. Foto: Jana Plavec, Akademie věd

celé proudění v SQL uzavírá. Toto proudění je vyvolané snížením tlaku vzduchu za čelní linií bouří. Tím, jak se čelo SQL urychluje vůči okolnímu proudění, což jsme si před chvílkou popsali, vzniká za čelními cumulonimby pásmo nižšího tlaku vzduchu. Můžete si představit, že jak se začne pás bouří na čele rychleji pohybovat, tak vlastně za nimi trochu vzduch malinko „chybí“. Tenhle tlakový deficit vyvolává zmíněné proudění směrem zezadu dopředu, které označujeme jako týlový vtok, anglicky *rear inflow jet*.

Proudění vzduchu v SQL směrem zepředu dozadu je tedy vytvořeno urychlením SQL vůči okolnímu proudění a vytváří zadní vrstevnatou oblačnost. Opačné proudění, směrem zezadu dopředu, je vyvoláno cirkulací v bouři. Tento sestupný týlový vtok pak může na povrchu zapříčinit silný vítr včetně škod způsobených tímto silným větrem. A pokud bude týlový vtok velmi intenzivní, může urychlit část linie bouří a způsobit její prohnutí. Tím přechází SQL do druhého koncepčního modelu, chcete-li škatulky, s názvem *bow echo* – a to už bude zase další kapitola.



**Nakladatelství MFF UK
MatfyzPress**



**Odborná edice
MatfyzPress**

*publikace pro výuku matematiky, fyziky
a informatiky*



**Edice popularizace
MatfyzPress**

*publikace propagující a popularizující
matematiku, fyziku, informatiku a příbuzné obory*

dárkové předměty MFF UK

Prodej knih z odborné a popularizační edice nakladatelství MatfyzPress MFF UK a dárkových předmětů fakulty zajišťuje prodejna v budově MFF UK Sokolovská 83, Praha 8-Karlín a také e-shop www.matfyzpress.cz