

Cumulonimbus – oblak známý i neznámý

Díl třetí: vliv větru

Petr Zacharov¹, Jana Žďárská²

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

²Fyzikální ústav AV ČR, Na Slovance 2, 182 21 Praha 8; zdarskaj@fzu.cz

Pro vznik cumulonimbu jsou zapotřebí tři základní přísady – připravenost atmosféry, dostatečná vlhkost vzduchu a počáteční impuls. Speciálním kořením do této směsi je ale ještě změna rychlosti a směru větru s jeho výškou. Tahle dráždivá přísada dokáže úžasně organizovat život bouře. Čím větší je rozdíl rychlosti větru s výškou, tím složitější struktura bouře může být a tím se dokonce může vyskytnout i nebezpečnější počasí.

Rozdíl směru a rychlosti větru s výškou označují meteorologové jako vertikální **stříh větru**. Pro organizaci bouří se většinou uvažuje stříh větru mezi přízemní hladinou (běžně měřením v 10 metrech nad povrchem) a šesti kilometry nad povrchem. Kromě této mohutné vrstvy uvažujeme často ještě stříh větru mezi zemí a třemi nebo jedním kilometrem výšky. Stříh větru v šestikilometrové vrstvě do velikosti 10 m/s označujeme jako slabý, stříh mezi hodnotami 10–20 m/s jako střední a stříh větru nad 20 m/s jako silný.

Pokud zatím pomineme celé systémy cumulonimbů, které označujeme jako mezoměřítkové konvektivní systémy, rozeznáváme tři základní koncepční modely konvektivních bouří. V prostředí se slabým stříhem větru vzniká **jednoduchá cela**, v prostředí se středním stříhem větru **multicela** a v prostředí se silným stříhem větru vzniká **supercela**. Nicméně stejně jako vždy, když si člověk vymyslí pěkné škatulky, příroda je neuznává, a tak se v realitě jednotlivé kategorie stříhu větru pro zmíněné koncepční modely trochu překrývají.

Se stříhem větru je spojena ještě jedna fyzikální veličina, kterou nazýváme **vorticita**. Matematicky je to rotace vektoru pole větru, jednoduše řečeno, je to tendence větru rotovat. Tuto tendenci využívají oblaky ke svému růstu nebo ke své vlastní rotaci, ale mohou ji využít i ke vzniku tornáda. Vertikální stříh větru je zodpovědný za vznik horizontální vorticity neboli vorticity s horizontální osou, horizontální stříh větru (změna větru v horizontále) je zodpovědný za vznik vertikální vorticity.

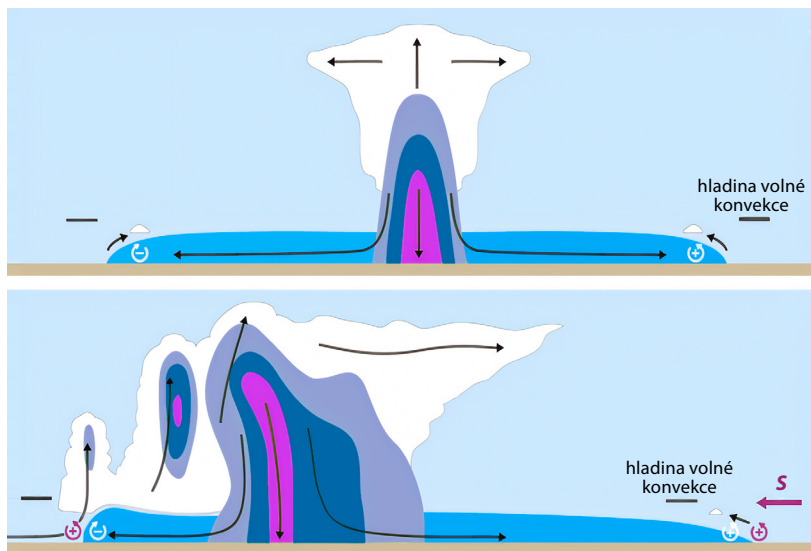
Koncepční modely konvektivních bouří vznikly díky numerickému modelování bouří, které ovšem probíhalo a i v současných studiích stále probíhá v kontrolované atmosféře. V modelu se používá nejčastěji



Obr. 1 Příklad vertikálně vzpřímené jednoduché cely. Autor: Carl Wycoff, flickr.com

horizontálně homogenní atmosféra. Zemský povrch je většinou plochý s výjimkou nepočtených studií o vlivu terénu na chování bouří.

Takové zjednodušení umožňuje studovat chování bouře za daného stříhu větru v kombinaci s danou



Obr. 2 Jednoduchá cela ve fázi rozpadu (nahore) a multicela (dole). Z oblaku (bílé) vypa-
dávají srážky znázorněné šedou, modrou a fialovou barvou (radarové odrazivosti
srážek). Pod oblakem se vytváří bazén studeného vzduchu (modře). Na jeho okraji,
gust frontě, vzniká horizontální vorticity (vyznačeno bíle). U jednoduché cely (nahore)
se teplý okolní vzduch sice dostává nad bazén vzduchu, ale ne nad hladinu volné
konvekce (vyznačeno černou vodorovnou čarou). V prostředí se stříhem větru (spodní
obrázek, vyznačeno fialovou šipkou) vzniká v prostředí díky stříhu větru také hori-
zontální vorticity (vyznačeno fialově). Spojením vorticity, která vzniká na gust frontě,
a vorticity v prostředí díky stříhu větru vzniká v levé části dolního obrázku posílený
výstup vzduchu, který dokáže zdvihnout teplý vzduch až nad hranici volné konvekce.
Na této straně dochází k nárůstu nových cel – na dolním obrázku úplně vlevo cela
ve fázi cumulu, pak cela ve fázi zralosti a nakonec cela ve fázi rozpadu – multicela.
Převzato z Markowski, Richardson²

instabilitou (velikostí CAPE)¹. Do tohoto prostředí je na začátku vložena teplá bublina vzduchu, která začne v takto nastavené atmosféře vytvářet oblak. Základní práci v tomto směru odvedli v USA koncem minulého století pánové Joe Klemp, Richard Rotunno a Morris Weisman. Použití reálné atmosféry v modelu je značně složité, protože je atmosféra v prostoru i čase velmi proměnlivá a na bouři tak působí mnoho různých faktorů, které se mohou doplňovat i překrývat. Proto se na odvození základních vlastností bouře používá kontrolovaná atmosféra. Z takového modelování byly vytvořeny základní koncepční modely, které v atmosféře v zásadě pozorujeme. I když je každá bouře trochu jiná, základní principy chování bouří víceméně splňují zjednodušené koncepční modely.

Při zjednodušeném modelování silných bouří se často od proudění větru v modelu odečítá průměrný směr a rychlost větru v oblačné vrstvě, která „tlačí“ oblak a určuje směr a rychlost jeho pohybu. Oblak tak vlastně „stojí“ uprostřed modelové domény. Pro bouři totiž není důležité, jak vane vítr relativně vůči zemskému povrchu (měření směru a rychlosti větru na stanicích či pomocí vertikální sondáže atmosféry), ale jak vane vítr relativně vůči bouři. A to je právě určeno odečtením směru a rychlosti pohybu bouře od proudění relativního vůči zemskému povrchu.

Nejjednodušším koncepčním modelem je **jednoduchá cela**. Ta vzniká v prostředí se slabým stříhem větru. To znamená, že se rychlost větru s výškou nijak zásadně nemění. Na oblak tedy po celé jeho výšce pů-

sobí přibližně stejná rychlost větru. Oblak se pak vyvíjí vertikálně vzpřímeně (viz obr. 1). Ve výstupném proudě se vyvíjejí srážkové částice, které do něj zvolna začínou vypadávat a oslabují ho. Vytváří se tak sestupný proud, který ukončí život výstupného proudě a po vypadnutí srážkových částic zůstává pouze vrchní část oblaku, která obsahuje už jen malé oblačné částice (viz obr. 2 nahore).

Gust fronta, kterou jsme si v minulém díle popsali jako čelo studeného vzduchu³, jenž vytekl se srážkami z bouře a který známe jako studené rozfoukání před letní přeháňkou či bouřkou, se postupně vzdaluje od bouře. Na čele gust fronty se při roztékání studeného vzduchu vyteklého z bouře vyvíjí horizontální vorticity. Teplý vzduch je sice nucen stoupat nad bazén studeného vzduchu, může vytvářet shelf cloud, ale vzduch nevystoupí až nad hladinu volné konvekce⁴, kde už by stoupal sám na úkor energie atmosféry a vytvářel další cumulonimby (viz obr. 2 nahore).

Život jednoduché cely trvá 30–60 minut a skládá se ze tří fází: fáze cumulu, zralosti a rozpadu. Ve fázi cumulu roste oblak. Ten je tedy tvořen výstupným proudem, v němž vznikají oblačné částice. Ve fázi zralosti už v oblaku vznikají srážkové částice, které začínají propadávat výstupným proudem. Zároveň se v této fázi začíná vytvářet kovadlina oblaku. Díky slabému stříhu větru je výstupný proud vzpřímený a srážkové částice propadávají výstupným proudem, čímž snižují jeho sílu. V okamžiku, kdy dominuje sestupný proud, se cumulonimbus dostává do fáze rozpadu. Nakonec se ze starého konvektivního oblaku stane samotná kovadlina, složená výhradně z ledových krystalků. Kovadlina se buď časem pomalu vypaří, nebo se rozpadne do oblačnosti jiných druhů. Oblak se pohybuje s průměrným větrem v oblačné vrstvě, jednoduchá cela tedy pluje s větrem.

Tato jednoduchá cela většinou přináší kratší přeháňku. V prostředí s vysokou hodnotou CAPE⁴ se může vytvořit mohutný oblak přinášející intenzivní přeháňku. Srážky mohou být doprovázeny silnými nárazy větru, obzvláště když vypadávají do relativně suchého vzduchu. V tom případě se totiž hodně dešťových kapek vypaří, což ochlazuje a urychluje proud vzduchu vytékající z oblaku.

Multicely jsou u nás asi nejčastějšími formami cumulonimbů. Multicela je charakterizovaná opakovaným nárůstem jednoduchých cel na určité straně gust fronty, jedná se tedy o shluk či linii jednoduchých cel v různých fázích života (viz obr. 2 dole a obr. 3). Vytváří tak oblačný systém, který může žít dlouho i přes to, že délka života jednotlivých jednoduchých cel je zmíněných 30–60 minut.

Na rozdíl od jednoduché cely vznikají multicely v prostředí, kde už svoji roli hraje vertikální stříh větru. Ten dává vznik horizontální vorticity v prostředí vzniku oblaku. Výše popsaná vorticity na čele gust fronty se pak může setkat s vorticitou prostředí, vzniklou stříhem větru (viz obr. 2 dole). Na části gust fronty, kde se setkají tyto vorticity s opačným smyslem rotace, může dojít k dostatečné podpoře vystupujícího vzduchu, aby vystoupal až nad hladinu volné konvekce a spustil tak vývoj další jednoduché cely. Tato situ-

1 P. Zacharov, J. Žďárská: Cumulonimbus, oblak známý neznámý, díl druhý, srážky. *Čs. čas. fyz.* 74, 148–150 (2024).

2 P. Markowski, Y. Richardson: *Mesoscale Meteorology in Midlatitudes*. Wiley-Blackwell 2010, 407 s.

3 P. Zacharov, J. Žďárská: Cumulonimbus, oblak známý neznámý, díl první, oblak. *Čs. čas. fyz.* 74, 60–62 (2024).

4 P. Zacharov, J. Žďárská: Cumulonimbus, oblak známý neznámý, díl druhý, srážky. *Čs. čas. fyz.* 74, 148–150 (2024).



Obr. 3 Multicela nad Prahou. V přední části narůstají nové cely, ve střední je plně vyvinutá cela i s přestřelujícím vrcholem a v zadní části zbytky kovadlin rozpadlých cel. Autor: *Martin Setvák*

ace nastává ovšem pouze na preferované straně gust fronty tam, kde se setkají vorticity s opačným smyslem rotace. Na jiných stranách gust fronty k tak mocné podpoře vystupujícího vzduchu nedochází. Záleží tedy na stříhu větru, kde bude ono preferované místo, na němž budou vznikat nové cely, obnovující a prodlužující život multicely.

Pohyb multicely už není tak jednoduchý jako u jednoduché cely. Výsledný pohyb multicely je totiž vektorovým součtem pohybu jednotlivých jednoduchých cel s průměrným větrem a směru nárůstu nových cel. Díky tomu se často celý systém pohybuje rychleji či pomaleji než průměrný vítr a také se často odklání od směru původního proudění. Aby neměl meteorolog jednoduchý život, může ještě do výsledného pohybu zasáhnout také interakce gust fronty naší multicely s jinou gust frontou nebo s jiným rozhraním v atmosféře, jako je např. studená fronta, či dokonce s terénem, horskými svahy



Obr. 4 Supercela s viditelnou rotující strukturou, v zadní části obrázku se nachází přední sestupný proud se srážkami. Autor: *Niccolò Ubalducci, flickr.com*

a hřebeny. To může také značně ovlivňovat výsledný směr pohybu multicely.

Bohužel, může se i stát, že nové cely narůstají na zadní straně celé multicely a k vývoji a vypadávání srážek pak může dojít takřka na stejném místě. Takový případ pak může vést i k lokálním záplavám, jako 15. 7. 2002, kdy v Olešnici na Svitavsku spadlo 171,7 mm srážek během několika málo hodin.

Supercela, již letmo zmíněná v pilotním článku o tornádech⁵, je oblač definovaný rotujícím výstupným proudem. Rotace vzniká díky sklápění horizontální vorticity prostředí na vertikální výstupným proudem oblaku. Díky vysokým rychlostem větru ve výstupném proudu supercely (až 50 m/s) je vzniklá vertikální vorticity protažena do užší trubice, která se díky zákonu zachování hybnosti začne točit rychleji.

Uprostřed rotace dochází k poklesu tlaku a vzniku mezocyklóny – tlakové níže v měřítku oblaku (mezoměřítku). Pokles tlaku v bouři pomáhá nasávat další teplý vzduch do bouře a značně tak prodlužovat život bouře, který může být i několik hodin. Na rozdíl od multicely je supercela tvořena jednou celou, s jedním setrvalým výstupným proudem a dokonce dvěma sestupnými proudy. Přední sestupný proud je tvořen stejně jako u jednoduché cely i multicely srážkami, zadní sestupný proud může také přinášet srážky z jádra bouře a zároveň i teplejší vzduch, který pochází z okolí bouře (viz obr. 4). I pohyb supercely je odlišný, i když se jedná o jeden oblač, nepostupuje supercela s průměrným větrem, ale většinou se stáčí vpravo, někdy vlevo od průměrného proudění.

Na vznik a další vlastnosti supercely, ale také na příklad výskytu supercel v České republice se podíváme v následujícím díle našeho seriálu.

5 J. Žďárská: Tornádo jako nepředvídatelný jev. *Čs. čas. fyz.* 73, 482–485 (2023).