

Bow echo - obloukové echo

Tomáš Psika

29. července 2006

Abstrakt

Článek se zabývá charakteristickou radarovou ozvěnou vyskytující se často v silně vyvinutých mezoměřítkových konvektivních systémech (MCS) a čarách bouřek (squall lines). Naznačuje, jaké faktory způsobují vývoj těchto situací a jaké nejčastější projevy jsou vázány na tyto významné konvektivní systémy. Také se zde zmiňuji o jednotlivých stádiích vývoje této ozvěny.

Předem bych asi měl také upozornit na to, že podobné bouřkové struktury a systémy jsou v posledních letech pod velmi intenzivním drobnohledem meteorologů (mám teď na mysli odbornou meteorologickou společnost), a tak některé poznatky v tomto článku jistě nemusí být s nimi v souladu. Nejsem odborník, jen se občas ještě trochu snažím vyznat v problematice.

Obsah pojmu

Nebudu zde uvádět nějakou sofistikovanou definici tohoto úkazu. To rád přenechám odborníkům na radiologii. Nás spíše budou zajímat bouřkové projevy a faktory vzniku výskytu fenoménu. „Bow echo“, tj. česky nejspíš „oblouková ozva“, je zvláštní úkaz pozorovatelný na radarových snímcích a který se vyskytuje zejména v silných a dobře organizovaných bouřkových systémech. Samotný systém, ve kterém dochází k výskytu této struktury, začíná svůj vývoj obvykle v podobě lineárně protáhlého útvaru typického pro bouřkové fronty (squall lines) a během svého pokračujícího rozvoje se začíná deformovat do podoby oblouku či podkovy. To vše v důsledku vzniku speciální větrné cirkulace, při které dochází často k vývoji ničivých přímočarých větrů a vzduchových průtrží/propadů (tj. downbursts). Ničivé větry se v těchto situacích nalézají jak na okrajích systému ve směru postupu systému, tak také ve středu a ve vedoucí části útvaru. V systému s obloukovou ozvěnou se nikoliv ojedinele vyskytují i tornáda, a to především v severozápadních (sub)částech systému (při západním zonálním proudění), nejen na gust frontu.

Proces a faktory vzniku obloukového echa

Hlavní podmínkou pro vznik obloukového echa je existence určitého typu mezoměřítkového konvektivního systému (dále jen MCS). Pro vznik takové struktury je nutná samozřejmě silná instabilita, často alespoň $MLCAPE > 2000 \text{ J.kg}^{-1}$.

Současně je nutné, aby byla ve středních výškách (3-5 km) patrná oblast silnějšího proudění významně suššího vzduchu. Rychlost větru v ideálních podmínkách má dosahovat kolem 20 m/s. Vyšší rychlost větru může způsobit nestabilitu jevu (ale nemusí), naopak příliš slabý vítr ve středních výškách vede k vývoji pouze intenzivních bouřek, nikoliv však struktury obloukového echa. Velmi důležitá je především změna směru větru s výškou, difference v hodnotách rychlostí větru nemusí být až tak důležitá. Díky příznivým podmínkám se mohou vytvářet silné sestupné pohyby a tedy i průtrže vzduchu (downbursts), které jsou při výskytu obloukového echa velmi časté, vlastně stěžejní. Tyto podmínky jsou splněny poměrně často v letním období v konvergenčních zónách před pomaleji postupujícími studenými frontami. Při těchto podmínkách se mohou tvořit organizované shluky bouří, které občas doprovází silná krupobití, ojedinělá tornáda a velmi silný nárazový vítr s rychlostmi až 20 - 40 m/s. Ale přesto se i tak nemusí obloukové echo vyskytnout.

Bylo zjištěno, že se obloukové echo nevyskytuje u pomalu postupujících bouřek. Pravděpodobnost výskytu echa výrazně zvyšuje rychlost postupu samotného systému a s ním často související spíše mělké brázdy nízkého tlaku vzduchu ve středních výškách. Dá se tedy říci, že tyto podmínky bývají v naší oblasti splněny obvykle nejméně jednou za rok. Vždy takové situace přináší nárazové větry působící alespoň malé škody. V daleko silnějších a nebezpečnějších situacích s výskytem obloukového echa, které již jsou u nás ale velmi zřídka, dochází ke vzniku jevu „derecho“. Tento fenomenální jev pak může působit rozsáhlé škody, které se s projevy běžných bouřek v našich zeměpisných šířkách nedají příliš srovnávat. Tyto fenomenální bouře dokáží mnohdy doslova „pokosit“ stovky hektarů lesů, vymazat celé vesnice z mapy a způsobit obrovské materiální škody. Škody mívají často charakter škod po tornádech střední intenzity, ale svým plošným rozsahem způsobuje derecho daleko větší škody. Ani ty nejsilnější a nejdéle trávající tornáda nemohou zpravidla způsobit tolik škod jako silné derecho. Intenzita škod se dá zčásti přirovnat k situaci po přechodu velmi silného hurikánu, ale plošný rozsah je samozřejmě výrazně menší.

Z uvedeného plyne, že „bow echo“ se obvykle nevyskytuje u supercelárních bouří, jak už jsem nejednou viděl kdesi uvedeno. Ty mají jiný charakter, jinou strukturu, projevy a následky. Je však pravdou, že se v průběhu vývoje MCS mohou téměř kdykoliv za příznivých podmínek vytvářet, zanikat a modifikovat i supercely. Často se supercely v takových situacích přeměňují v průběhu vývoje systému na silné multiceleární bouře nebo zcela zanikají hned poté co jim je přerušen gust frontem vtok teplého vzduchu. Jen ve výjimečných případech se supercela osamostatní a žije delší dobu téměř nezávisle na mateřském systému.

Nasnadě je otázka, zda se obloukové echo může objevit i v chladnější polovině roku. Pokud si dostatečně dobře uvědomíme faktory vzniku, dojdeme nejspíš k závěru, že je to pravděpodobné, ale asi ne příliš časté. V zimním období a také v brzkém jarním období se navíc vyskytuje jiný typ bouřkové formace, který částečně může obloukovou ozvu připomínat. Jsou to především systémy se znatelnou konvergenční čarou bouřek či přeháněk vzniklých v přesně ohraničených, horizontálně protáhlých a nerozsáhlých oblastech podél kraje gust frontu, kde je soustředěn krátkodobě instabilně zvrstvený vzduch. Iniciační podmínky zahrnují nejen existenci instabilního zvrstvení, ale na rozdíl od zde popisované situace, malý stříh větru. Dále pak hraje významnou roli v chladnější polovině roku nízká hladina volné konvekce.

Obrázek 1: Kumuly v prostředí bez významného stříhu větru



Vývoj

Podrobněji se zmíníme o tom, jaká stadia jsou charakteristická při vývoji obloukového echa.

Ale nejdříve se alespoň stručně podíváme na strukturu a cirkulaci ve vlastním mezoměřítkovém konvektivním systému. Pro dobrý a bližší popis i s ilustracemi odkazují na článek Romana Maňáka (<http://bourky.astronomie.cz/clanky/cl09.html>).

Existuje více typů MCS, jejichž charakter ovlivňuje případná přítomnost fronty, silné proudění ve vysokých výškách, stříhové charakteristiky, instabilita vzduchové masy či vlhkostní poměry.

Obloukové echo vzniká často v takových MCS systémech, kde dochází k rozvoji srážkové oblasti i proti směru postupu systému. Jde o tzv. „backbuilding formations“ (nechám raději dále nepřeloženo). Při vzniku systému se uplatňuje i generování nových bouřkových buněk před gust frontem, ale nemusí to být hlavní motor vývoje systému. Tím je zejména interakce dvou odlišných vtoků do bouřkového systému, jak zmíním později.

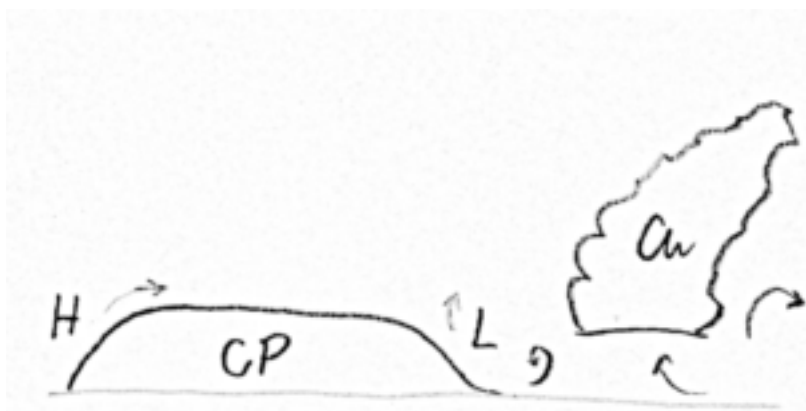
Iničiační bouřky nemusí mít typickou strukturu intenzivních bouřek, kdy je díky příznivým stříhovým podmínkám dobře oddělen výstup z bouře od jejího vstupu, čili základní podmínka pro dosažení delší doby života bouřkových cel. První bouřky mohou mít zčásti i jiným způsobem lokalizovanou oblast srážek než v pozdějším období vývoje (viz obr.2). To je možná trochu matoucí, ale příčinou je pozdější prosazení vlivu hlavního iničiačního faktoru, kterým je tzv. „cold pool“ (dále jezero chladného vzduchu) a působení sil proti okolnímu vektoru stříhu větru.

Aby to nebylo tak jednoduché, tak obvykle přicházejí do všeho promluvit i místní podmínky. Chladný „pytel“ vzduchu, resp. čára znázorňující jeho okraj v úrovni zemského povrchu, nemusí být nutně až za prvními bouřkami. Bývá to však obvyklé. První bouřky dokonce ani nemusí být poblíž okraje chladného vzduchu při zemi. Velmi záleží na podmínkách před čarou konvergence, na tvaru jezer(a) chladného vzduchu (a to nejen při zemi), na stabilitě přízemní vrstvy vzduchu apod. Vliv může mít např. gravitační vlnění a jiné vlivy. A to už vůbec nemluví o orografických vlivem, které

Obrázek 2: Kumuly v prostředí s výrazným rychlostním stříhem větru



Obrázek 3: Jezero chladného vzduchu (cold pool, CP)



se nejvíce projevují v oblasti alpského pohoří, ale také Šumavy a i u menších pohoří v oblasti střední Evropy. Vliv insolace, důsledků předešlých srážek a dalších vlivů je nutné také vzít do úvahy. Situace je skoro vždy před a v prvních momentech vývoje bouřek velmi nepřehledná a velmi ztěžuje předpověď i jen na pár desítek minut. Proto je nowcasting bouřek tak obtížně řešitelným oříškem i pro velmi zkušené meteorology, protože numerické předpovědní modely nemají dostatečně dobré rozlišení inicializace a nepočítají s „méně významnými faktory“. Je nutné mít velké množství informací, které se někdy ani nedají získat pasivním prohlížením předpovědních modelů, které téměř vždy počítají jen s omezenou množinou faktorů.

Po nepříliš příznivě vyhlížejících závěrech předchozího odstavce ale můžeme s klidem říci, že v nemálo případech není situace až tak komplikovaná a kopíruje předešlé výstupy podrobnějších předpovědních modelů.

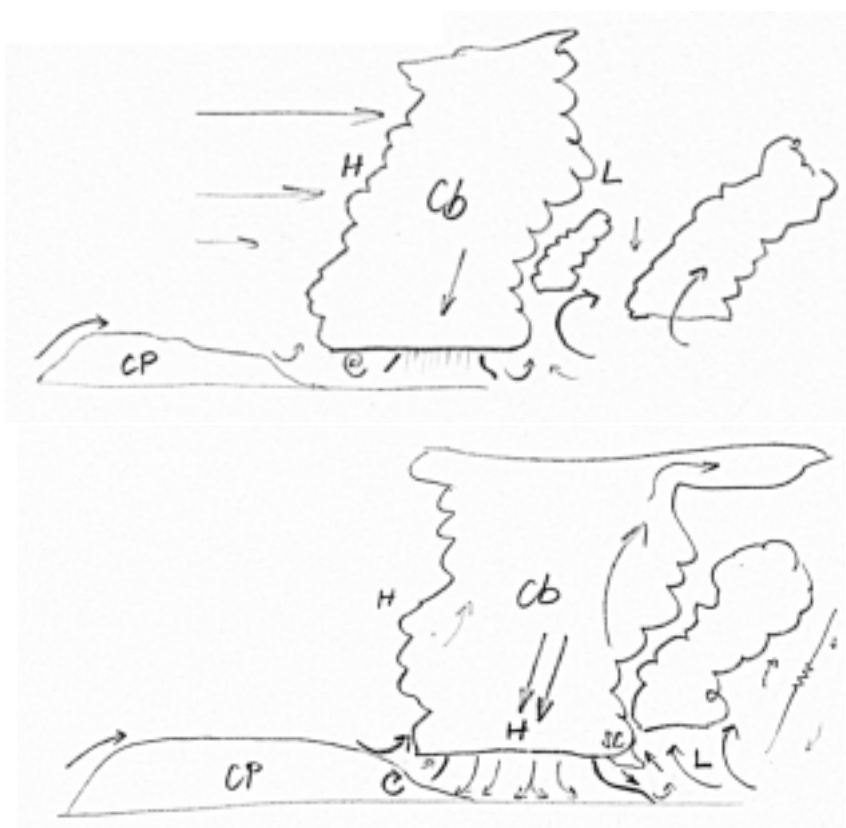
To co přichází později, tj. poté co již první bouřky dosáhly určité intenzity a vytvoří ještě souvislý systém, také nemusí být zrovna jednoduchým procesem. Bouřkové

cely se ještě nazačaly významně navzájem ovlivňovat, přesto však již díky stříhovým podmínkám mohou svou oblačností pokrývat významnou část oblohy a na určitých místech postupem času eliminovat vliv insolace. Podle pozice bouře vůči jezeru chladného vzduchu (počítáme-li s tím, že je oblast nad chladným jezerem vzduchu bez oblačnosti) je vliv insolace obvykle stále významným. Často se stává, že i velmi nadějně vypadající bouře vzniklá především vlivem insolace a umístěná i daleko před čarou konvergence pak rychle „zhasne“ a přenechá často alespoň „energeticky obohacený vzduchový materiál“ pro nově vyvinuté bouřky přicházející z oblastí blíže k hlavnímu gust frontu měnícího se v lineární systém bouřek. Tyto řeklo by se perfekcionista detaily mají zřejmě ohromný vliv na to, jak velkou intenzitu ta která bouře v systému získá a jak dlouho přežije nebo posílí jiné bouřkové cely. A přitom nejsou zatím podrobněji zkoumány.

Abychom nezabředly do přílišných podrobností, nastiňme, co se děje poté, co se již v oblasti okraje jezera chladného vzduchu vytvořilo několik více souvislých bouří, které se začínají navzájem ovlivňovat. Budeme absolutně ignorovat situaci, kdy je jezero chladného vzduchu s pokračující výškou rozsahově nehomogenní a budeme předpokládat, že s výškou a časem se obsah a pozice jezera chladného vzduchu významně nemění a bouře tak získají snadněji a rychleji podobu přímé linie. U těchto liniových bouřek (nově vzniklé „squall line“) se začíná více projevovat vliv jezera chladného vzduchu, které se za nimi tlačí (obrázky 4). Výstup z bouře je již lokalizován tak, že je blíže okraje jezera a začíná jej díky vlastnímu gust frontu bouřky významně posilovat, což se projevuje často rychlým vzrůstem negativní horizontální vorticity poblíž okraje jezera. Tento vliv dokáže převážit dokonce i nad vlivem stříhu větru s vektorem opačného směru a tak způsobit zakonzervování tepla v oblaku nad oblastí cold poolu. Následuje podpora déle trvajících vzestupných proudů bouřek, které pak přestávají nadále tolik živit vývoj kovadliny bouřkového oblaku v oblasti před bouřkovou frontou a naopak posilují vznik vývoje bouřkového oblaku proti směru tahu bouřek (to je trochu nepřesné, ale nevádí). V oblaku se v této oblasti vytvoří stabilní zvrstvení, které je společně s vývojem nízkého tlaku vzduchu ve středu bouře předpokladem pro vývoj více stratiformních srážek za čelem bouřkového oblaku. To je nejtypičtější znak liniových bouřek. Popsaná změna polarit výstupných proudů je základním stavebním kamenem vývoje pozdější obloukové ozvy na radaru, jak si uvedeme dále.

Jako drobnou poznámku, která však vyplývá už z předchozího textu, bych měl upozornit na to, že je žádoucí v situaci popsané dříve, aby bylo nebo začalo být jezero chladného vzduchu alespoň po určité době po iniciaci prvních bouřek v oblasti jeho okraje aktivním prvkem vývoje systému. To znamená, že je nutné, aby se pohybovalo či lépe zrychlovalo svůj postup žadaným směrem. To bývá v konvergenčních zónách před studenými frontami velice často, protože je zde významný stříh větru a pomáhá i přibližování vlastní studené fronty či dokonce rozšiřování jezera chladného vzduchu díky činnosti na vlastní frontě. Pokud tomu tak není a jezero chladného vzduchu vzniklo např. v důsledku statického uložení vzduchu ze stratiformních srážek předešlých dní uvnitř vzduchové hmoty bez tlakového gradientu a bez významného vertikálního stříhu větru, MCS se zřejmě nevytvoří. Jako úplně statické v tomto ohledu nelze považovat stacionární rozhraní. V úplně statických prostředích nehraje jezero chladného vzduchu aktivní roli, tudíž je degradováno jen na neperspektivní chladný „rybník“, který se zvolna rozplývá do okolí. Určitě to však neznamená, že nelze v tomto prostředí s významnými bouřkami počítat. V takovém prostředí může za vhodných podmínek (např. při pozvolné studené advekci ve vyšších hladinách) vzniknout MCC, což je však již docela jiné téma.

Obrázek 4: Začátek interakce bouřek s jezerem chladného vzduchu



Pozorného čtenáře jistě napadne, proč vlastně je třeba, aby byl stříh větru tak významný a proč by nemělo vést ke změně polarity výstupných proudů snáze prostředí s bezvýznamným stříhem větru, tj. v prostředí typických multicelárních bouřek. Nebo kdyby byl dokonce stříhu větru souhlasný se směrem vývoje „backbuilding formation“? Pokusme se stručně vysvětlit proč a popíšme si obě varianty.

V prostředí s malým stříhem větru a za přítomnosti jezera chladného vzduchu vede vývoj bouřek v prvotní fázi k vývoji nestálých bouřek, které nemusí často ani „dožít“ stádia, kdy by mohlo dojít k jakékoliv významné interakci s jezerem chladného vzduchu. Navíc tyto bouřky se více a někdy velmi rychle snaží propagovat ve směru nejteplejšího vzduchu (řečeno přesněji ve směru ascendentu potenciální ekvivalentní teploty). To je obvykle opačný směr vůči konvergenční zóně. Pokud však i přesto dojde ke střetu s jezerem chladného vzduchu, vývoj bouřek není zdaleka tak významným a výsledný často méně souvislý systém nemá tak silnou intenzitu jako v námi sledovaných případech. Bude navíc také zřejmě potřeba prostředí s daleko vyšší instabilitou.

V případě stříhu větru souhlasného s požadovaným směrem výstupných proudů na linii bouřek je situace asi složitější a nejsem si jist, zda se vůbec taková situace v našich podmínkách může vyskytnout. Asi by šlo o krátkodobý a limitní případ doprovázený netypicky silným směrově významným stříhem větru (directional shear).

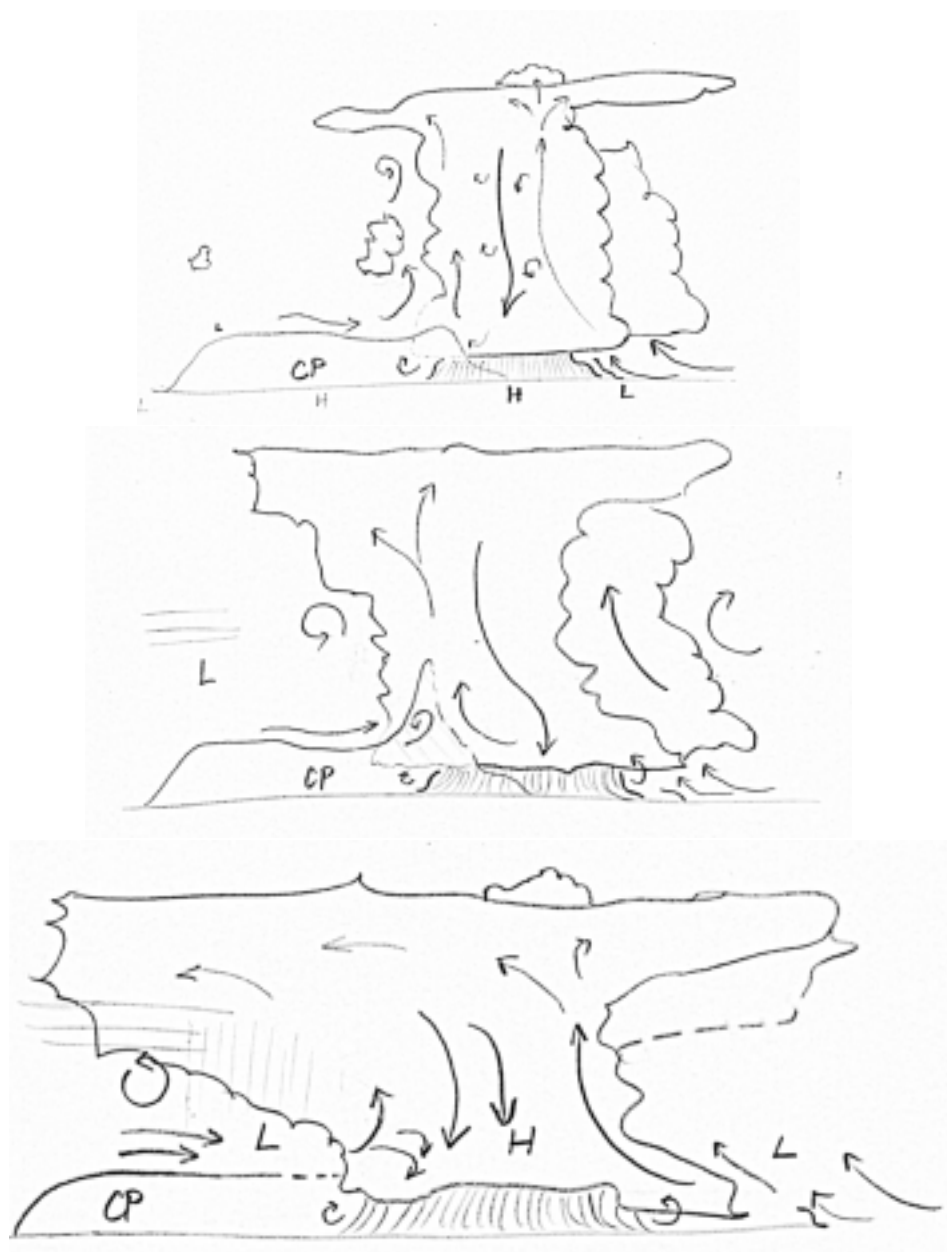
Vrátíme se teď opět k popisu vzniku bouřkové fronty. Poté, co se vytvoří oblast bouřkové oblačnosti s jednotlivými charakteristickými oblastmi horizontální vorticity, dojde k dalšímu procesu, který dále zesiluje a udržuje bouřkovou činnost. V oblasti střední části oblaku vzniká díky specifické cirkulaci oblast s nižším tlakem vzduchu. Aby se zajistila kontinuita proudění, vzniká díky tomu další vtok vzduchu do bouře (detailně zobrazují obrázky č.5). Tentokrát však z opačného směru. Vzduch vtahovaný ze zadní strany má jiné vlastnosti než ten, který se soustředí před bouřkou. Je studený a obvykle sušší. Vzduch se dostává do středních částí oblaku a ještě více stabilizuje zvrstvení. Přes tuto vrstvu propadají převážně stratiformní srážky z vyšších částí oblaku a částečně se vypařují a prochlazují jezero chladného vzduchu.

Čím je toto vtahování ze zadní části silnější, tím více dochází k vytlačování bouřky směrem kupředu. To je hlavní důvod, proč dochází k degeneraci linearit radarového odrazu (obr. 7) a přechodu na odraz ve tvaru podkovy (obloukové echo). Významnou roli za určitých podmínek může hrát i entrainment suchého vzduchu, díky kterému se střední část oblaku může z velké části vypařovat a dochází ke vzniku propadů vzduchu (downbursts). Ty mohou dojít až k hlavnímu gust frontu a velmi silně zesílit sestupné proudění podél jeho čáry. Díky tomu se ještě více prodlouží a zakříví vlastní systém. Platí pravidlo, že čím relativně bezvýznamněji se projeví změna rychlosti větru s výškou a čím blíže se nalézá výtok z bouře poblíž gust frontu, tím intenzivnější propady vzduchu jsou zaznamenávány, neboť se sčítá vlastní rychlost sestupného proudu na gust frontu s vlastní sestupnou rychlostí bouřkového výstupu.

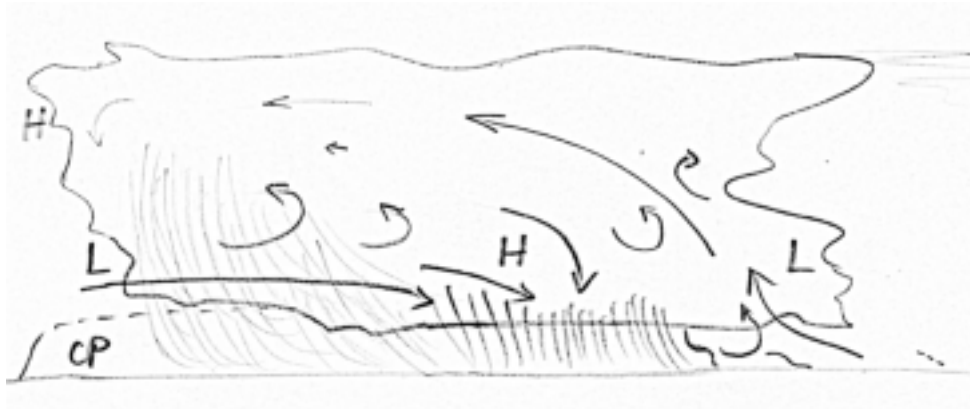
Na obou koncích systému vzniká díky existenci zadního přílivu vzduchu vorticity opačných znamének a severní část systému se mění do podoby cyklonálního víru. V těchto místech a také před gust frontem se mohou rodit i nesupercelární tornáda, ojediněle vznikají i mezocyklóny. Často v těchto místech lze vidět jev, který bych snad nazval 'pseudookluzí'. V jižní části obvykle dochází k rozpadu oblačnosti nebo k občasně regeneraci, která může vyústit i ve vývoj dalšího systému více východním směrem.

Podle výzkumů se zdá, že nejvíce pravděpodobným místem vývoje případného derecha je oblast před bouřkovým systémem s největšími hodnotami ekvipotenciální

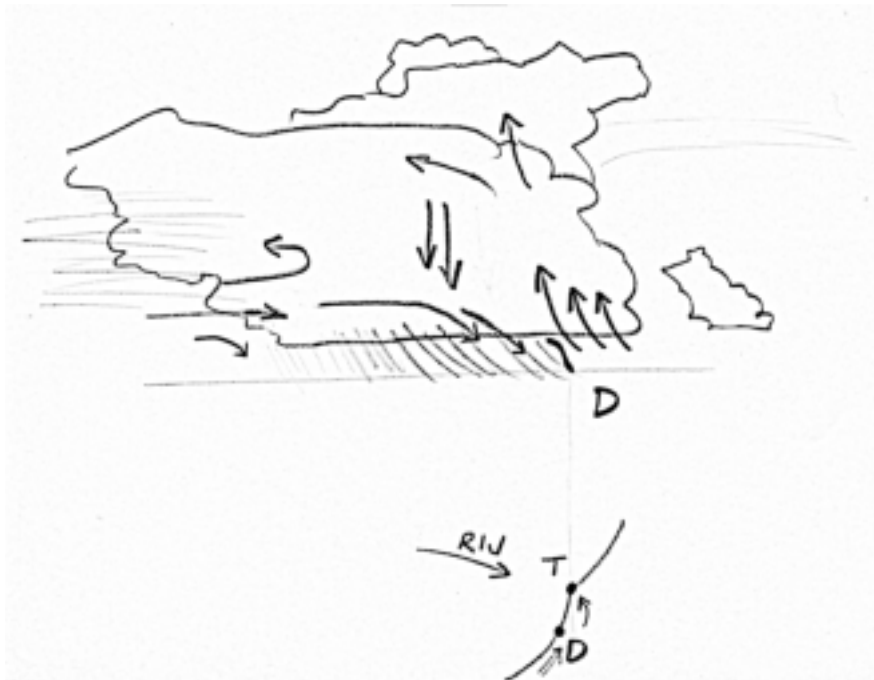
Obrázek 5: Postupný vznik nové cirkulace a zadního vtoku vzduchu do bouře



Obrázek 6: Plně vyvinutá struktura squall line



Obrázek 7: Bližší náhled na část systému s obloukovou ozvou



teploty. V tomto místě dochází při postupu systému logicky nejen k posílení vzestupných proudů, ale také díky cirkulaci k ještě silnějšímu „vtahování“ vzduchu ze zadních částí oblaku. Součinnost obou jevů vede k radikálnímu zesílení rychlosti větru v oblasti gust frontu. Díky opravdu velkým rychlostem (více jak 60 m/s) už ani nedokáže vzduch klesat až k přízemní čáře gust frontu a zasahuje i do větších výšek, kde se střetává přímo s velmi teplým a předchozím ochlazováním nedotčeným vzduchem ve výstupném proudu. Zde dojde k extrémnímu zesílení teplotního gradientu, stříhu větru a zejména prudkému snížení tlaku nad gust frontem. Toto místo je nejpravděpodobnějším místem výskytu tornáda, ačkoliv nemusí v místě být lokalizována supercela. Projevy počasí v tomto místě nejvíce připomínají HP supercelu. Tornáda v tomto místě mají charakter krátkodobý, brzy zanikají. Podél osy oblouku může však rychle vzniknout další vír jižněji. Ojedinele se tak vytvoří i celá rodina tornád. V případě výskytu skutečné a dostatečně silné supercely se může celý útvar odklonit a přetvořit zčásti celý systém. Většinou jsou ale supercely v těchto podmínkách slabší intenzity a sloučí se s celým systémem. Na radarových odrazech ale jde velmi často poznat, kde původní supercela byla a v místě pohybu jsou největší odrazy. Takže supercela vtažená či vzniklá v systému může výrazně prodloužit dobu života MCS.

Na závěr bychom asi měli zmínit, jak je to s horizontálním rozložením tlaku vzduchu uvnitř systému. Jak je zvykem i u jiných bouřkových situací, zpočátku je místo iniciace charakteristické nižším tlakem vzduchu. V oblasti vzniku sestupného proudění tvořícího později gust front vzniká oblast vyššího tlaku vzduchu, mezoanticyklóna. Před gust frontem se naproti tomu občas vytváří nerozsáhlé 'prohlubně' nízkého tlaku vzduchu, zejména pak v horních částech systému.

To však není vše. Díky přízemní anticyklóně ve střední části systému a specifickému proudění v systému se i na zadní straně tvoří podružné centrum nízkého tlaku vzduchu. Zde se totiž nejvíce projevuje existence obvykle mělké brázd nízkého tlaku v mezní atmosféře, která je pro vývoj „squall line“ typická a která napomáhá i vývoji bouřek proti směru postupu. V tomto místě za vhodných podmínek vzniká jakási „druhá vlna“ bouřkové fronty, která někdy regeneruje systém na konci aktivity čela bouřek. Tato druhá vlna se již netvoří tak živelně jako první, neprojevuje se již ani velkým množstvím blesků, ale dokáže výrazně prodloužit životnost celého systému a přinášet vydatné srážky. Ve docela ojedinělých případech, kdy se systém ani během pozdní noční aktivity nerozpadne, může zadní část systému při rozpadu čelních bouřek celý systém zregenerovat a postupně obnovit rovnováhu do té podoby, že se opět vytvoří stejná struktura a celý proces se znovu opakuje. Takto se může cyklus opakovat a mohou se tak tyto systémy udržet při životě i několik desítek hodin. Pamatují si jeden takový systém, který vznikl v severní polovině Španělska a rozpadl se až ve střední části Skandinávie.

Závěr

Mezoměřítkové systémy s výskytem obloukové ozvy na radaru nezdědka patří jednoznačně k těm nejsilnějším projevům bouřkové aktivity v průběhu bouřkové sezóny. Obvykle způsobují přinejmenším významné škody, a to zejména v důsledku výskytu ničivého přímočarého větru, krupobití a silných přívalových srážek. Výskyty tornád v systému nejsou zdaleka vyloučeny, ale jejich intenzita se pohybuje nejčastěji v rozmezí kategorií F0–F1, ojedinele F2, a mají krátké trvání.

Jde o poměrně stabilní formace bouřkových buněk, jejichž životnost se pohybuje v řádu několika hodin. Při déletrvajících vhodných podmínkách a schopnostech regenerace mohou přetrvat i několik desítek hodin a projít obrovským územím. Zejména v USA jsou pro to velmi vhodné podmínky.

Ve velmi silně instabilním prostředí ($>4000 \text{ J.kg}^2$) s významnými střihovými podmínkami vedou podobné systémy k vývoji jevu derecho. Ten již může způsobit katastrofální škody srovnatelné s přechodem série silných tornád nebo hurikánu.

Zmínit taktéž musím skutečnost, že oblouková ozvěna na radaru není pouze doménou mezoměřítkových konvektivních systémů. Rozlišují se dva typy ozev, přičemž ta druhá je vázána na jednotlivou bouřkovou buňku (CBE). Ta vzniká však více v důsledku naklonění vektoru horizontální vorticity do vertikální souřadnice. Je spojen zejména s vlastními bouřemi produkujícími silné větry při downdraftu.

Záměrně jsem v článku nepoužil některé obvyklé termíny existující zřejmě pouze v anglickém jazyce, a současně vynechal více věcí, které by rovněž stály za zmínku, ale jejich popis by neúměrně rozšířil a znepřehlednil článek. Není mým účelem a není to ani v mých silách poskytovat nějaké odborné přednášky.