

# Atmosférická cirkulace a procesy pohledem konceptčního modelu přenosových pásů

mjr. Ing. Josef Novotný

Univerzita obrany, Brno

Vojenský geografický obzor, 2006, č. 2

Příloha 2

## OBSAH

Úvod .....	3
1. Koncept přenosových pásů .....	3
1.1 Isentropické proudění .....	3
1.2 Systém relativního proudění .....	5
1.3 Sloučení isentropického proudění a systému relativního proudění .....	5
1.4 Koncepční model přenosových pásů .....	6
1.4.1 Teplý přenosový pás (warm conveyor belt) – TPP .....	6
Dozadu nakloněný výstup v teplém přenosovém pásu (studená anafronta) .....	6
Dopředu nakloněný výstup v teplém přenosovém pásu (studená katafronta) .....	8
1.4.2 Studený přenosový pás (cold conveyor belt) – SPP .....	12
1.4.3 Intruze suchého vzduchu .....	13
Závěr .....	14
Literatura .....	15
Abstract .....	15

# Úvod

Od doby, kdy byl v polovině dvacátých let minulého století publikován koncept polární fronty, který s ostatními pracemi tohoto období položil základ synoptické meteorologie, se dynamická meteorologie a zvláště pak úroveň znalostí a zákonitostí cyklogeneze významně posunuly kupředu. Na druhou stranu – nepočítáme-li produkty numerické předpovědi počasí – je více než znatelné, že dramatický vývoj v dynamické meteorologii v mnohém předstihl přípravu „subjektivní předpovědi počasí“. „Klasická subjektivní“ předpověď počasí má v drtivé většině případů téměř na celém světě podobu přízemní mapy s předpovědí tlakového pole a polohou front, kterou doplňuje slovní předpověď ve formě bulletinu, popisující předpovídané počasí. Pokud se již začínají používat nové poznatky dynamické meteorologie v praxi (nemám teď na mysli čistě produkty numerické předpovědi), pak je to stále v daleko menší míře, než by odpovídalo jejímu významu (alespoň u nás). A jestliže se již uplatní, není možné vyjádřit závěry z nich vyplývající jinak než opět pomocí nástrojů (a nejen grafických) vytvořených a odpovídajících koncepčnímu rámci 20. let minulého století, což je samozřejmě v lepším případě značně omezující, zpravidla však spíše nevystihující, nezřídka i zavádějící.

Předkládaný článek představuje do značné míry odlišný přístup k chápání a analýze atmosférického proudění v *makroměřítku* a *mezoměřítku* v mírných zeměpisných šířkách. Jeho předností je, že oproti všeobecnému zažitému koncepčnímu modelu „norské školy“ dokáže jak teoreticky, tak prakticky vysvětlit procesy, se kterými si klasická „bergenská škola“ poradit nedokáže.

## 1. Koncept přenosových pásů

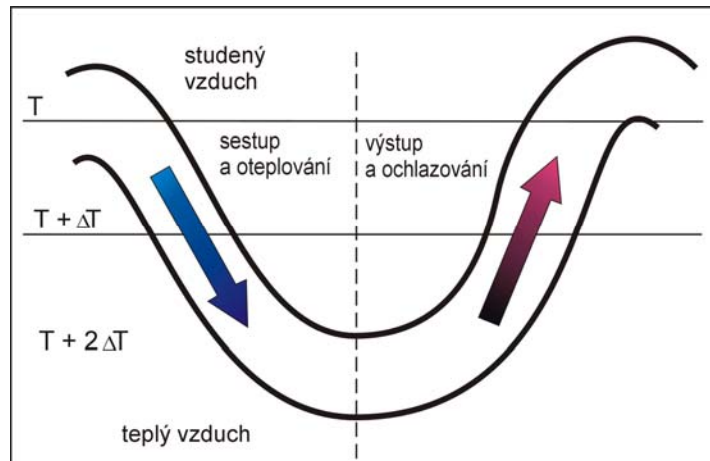
### 1.1 Isentropické proudění

Vzhledem k tomu, že se vzduch nepohybuje pouze podél hladin konstantního tlaku, získáváme tím, že jej takto na mapách barické topografie zobrazujeme, do jisté míry zkreslený dojem, jak se vlastně vzduch pohybuje. Ve skutečnosti je to transport vzduchu mezi tlakovými hladinami, který je rozhodující ve vývoji oblačných systémů.

Jestliže se vzduch pohybuje ve volné atmosféře, většina procesů, které probíhají v synoptickém měřítku, jsou procesy adiabatické, a proto má částice vzduchu tendenci zachovat si svou potenciální teplotu  $\Theta$  nebo vlhkou izobarickou potenciální teplotu  $\Theta_{iv}$  (v anglické literatuře wet bulb potential temperature  $\Theta_w$ ), jestliže je nasycená. Uvažujeme-li pohyb vzduchu podél isentropických hladin (kde  $\Theta = \text{konst.}$ , příp.  $\Theta_{iv} = \text{konst.}$ ), získáme mnohem reálnější přehled o vzestupu a poklesu vzduchových hmot v průběhu jejich pohybu atmosférou.

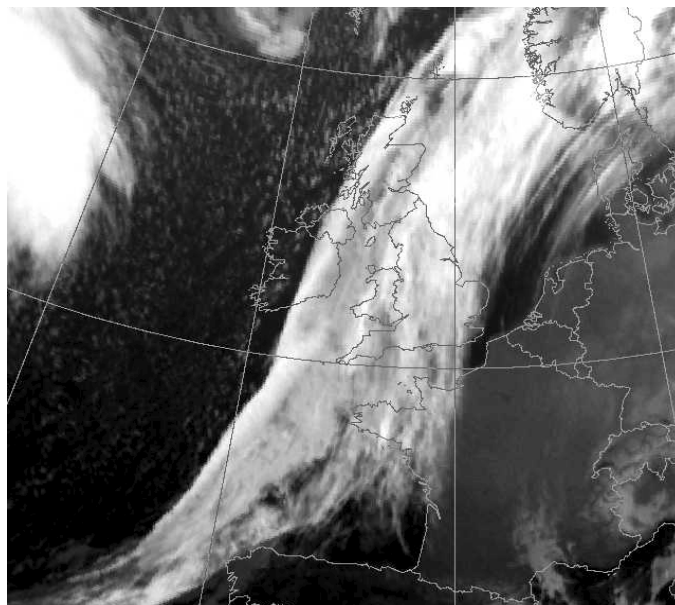
Hladiny konstantní potenciální teploty se směrem do studeného vzduchu zvedají. Toto tvrzení lze ověřit pomocí měření.

V idealizovaném případě výškové brázdy makrosynoptického měřítku a v oblasti se stálým teplotním gradientem ve směru pól–rovník bude vzduch pohybující se podél isentropických ploch za osou brázdy klesat a adiabaticky se oteplovat, před osou brázdy se pohybuje z teplejšího prostředí do chladnějšího, tedy bude stoupat a adiabaticky se ochlazovat (obr. 1).



**Obr. 1** Schéma idealizované dlouhovlnné výškové brázdy se znázorněným teplotním gradientem ve směru pól–rovník

Důkaz o tomto typu proudění nám podávají satelitní snímky (obr. 2). Oblast spojená s oblačností nacházející se za osou výškové brázdy se na satelitních snímcích v souladu s uvedenou teorií často při svém pohybu směrem k nejnižnější části brázdy rozpouští, zatímco před ní, jak stoupající vzduchová hmota dosahuje úrovně hladiny kondenzace, zpravidla pozorujeme vývoj oblačnosti. Vrcholky oblaků se jeví často studenější (a tedy i vyšší), což je způsobeno pokračujícím vzestupem vzduchu při dalším postupu k severu.

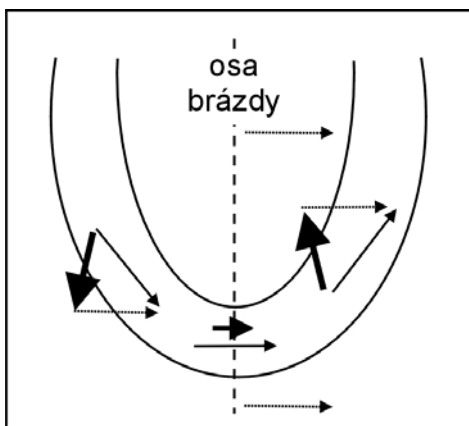


**Obr. 2** Družicový snímek z Meteosatu pořízený dne 22. 11. 1998 v IR-spektru; oblačnost se formuje na přední straně dlouhovlnné brázdy; je dobře patrné, že vrcholky oblačnosti jsou směrem k severu chladnější

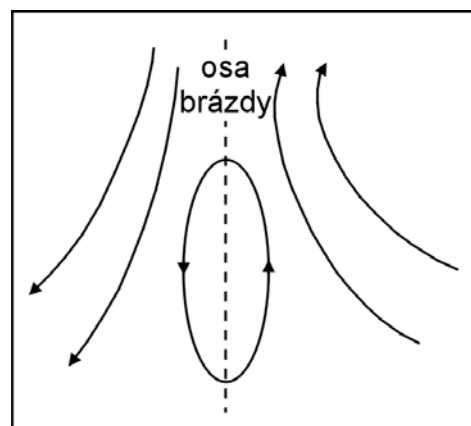
## 1.2 Systém relativního proudění

Základem koncepčního modelu přenosových pásů je porozumět tomu, jak se vzduch v okolí oblačných systémů pohybuje. Je nezbytné vzít v úvahu skutečnost, že se systém sám o sobě pohybuje, zatímco vyhodnocujeme napozorovaná a naměřená data.

Vzhledem k tomu, že Země je pro nás pevná vztažná soustava, ve které se provádějí měření, nebude rychlost větru relativní k brázdě samotné. Proto k tomu, abychom dokázali určit rychlost větru, která je relativní k pohybu brázdy, je nezbytné oddělit vektor pohybu brázdy od naměřené rychlosti větru [10]. Výsledkem je tzv. **systém relativních vektorů větru** (obr. 3). Jestliže se tedy například brázda pohybuje k východu rychlostí  $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  a rychlost západního větru činí v nejnižším místě brázdy  $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , pak vítr protíná osu brázdy relativní rychlostí vůči pohybující se brázdě  $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Jestliže takto sestrojíme relativní vektory větru v každém bodě brázdy a spojíme je, získáme proudnice systému relativního proudění v okolí brázdy (obr. 4).



**Obr. 3** Pohybující se výšková brázda



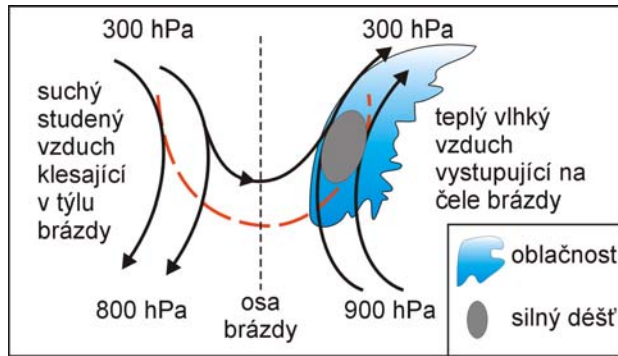
**Obr. 4** Systém relativního proudění, jak vyplývá ze situace na obr. 3

Legenda: tenké šipky – měřená rychlost větru; tečkované šipky – pohyb vlastní brázdy; výrazné šipky – systém relativních vektorů větru

Obrázek 4 reprezentuje případ, kdy mají proudnice před i za osou brázdy anticyklonální zakřivení. Uzavřenou cyklonální cirkulaci je ovšem možné pozorovat v blízkosti osy brázdy, což by nebylo patrné v případě zobrazení proudnic vztažených k soustavě spojené se Zemí. Je tomu proto, že brázda samotná se pohybuje k východu rychleji než vzduchová částice v severní části osy brázdy, a tak brázda předbíhá částici. Vezmeme-li tedy osu brázdy jako vztažnou soustavu, uvažované vzduchové částice protínají osu brázdy směrem k západu.

## 1.3 Sloučení isentropického proudění a systému relativního proudění

Kombinujeme-li pro Rossbyho dlouhovlnné brázdy, které se pohybují zvolna k východu, systém relativního proudění (reprezentovaný jeho proudnicemi) s pohybem částice podél isentropických hladin na čele a v týlu brázdy, zjistíme, že vzduch za osou brázdy klesá podél isentropických hladin, ohřívá se a vysušuje. Naproti tomu před osou vystupuje z nižších hladin, ochlazuje se a nasycuje. Jestliže jsou vertikální pohyby dostatečné, může se v některých hladinách formovat oblačnost, případně i srážky [8] (obr. 5).



Legenda:  
červená čárkovaná čára – tvar výškové brázd;  
černá čárkovaná čára – osa výškové brázd;  
plná černá čára – proudnice relativního proudění;  
údaje o tlaku indikují výšky isentropických hladin,  
na které proud vystupuje, nebo sestupuje; podle [8]

**Obr. 5** Sloučení isentropického proudění a systému relativního proudění

Systém relativního isentropického proudění je odlišný od původního konceptu „norské školy“ a tvoří základ, na němž stojí koncepční model vzduchu proudícího v okolí vyvíjejícího se oblačného systému.

## 1.4 Koncepční model přenosových pásů

### 1.4.1 Teplý přenosový pás (warm conveyor belt) – TPP

Teplý přenosový pás je obecně spojen s ochlazujícím se vystupujícím vzduchem podél isentropických hladin na čele výškových brázd. Oblast původu vystupujícího vzduchu leží zpravidla v blízkosti oceánických subtropických tlakových výší, proto je vzduch obecně teplý a vlhký, charakterizovaný vysokými hodnotami  $\Theta_{iv}$ . Často se formuje do souvislého proudu táhnoucího se stovky kilometrů a stoupajícího na své cestě skrz celou troposféru, přičemž transportuje teplý a vlhký vzduch z nižších do vyšších hladin.

Teplý přenosový pás probíhá často v oblačném systému rovnoběžně s přízemní studenou frontou, tak jak je definována koncepčním modelem cyklony „norské školy“. Z pozorování vyplývá, že rozhraní mezi vzduchem s vysokou  $\Theta_{iv}$  v přízemní vrstvě teplého přenosového pásu a vzduchem o nižší  $\Theta_{iv}$  v týlu oblačného systému téměř přesně odpovídá přízemní studené frontě, což ukazuje, že alespoň co se týče přízemní vrstvy jsou si oba koncepční modely blízké.

#### a) Dozadu nakloněný výstup v teplém přenosovém pásu (studená anafronta)

Jak je patrné z obrázku 5, vzduch se v teplém přenosovém pásu pohybuje převážně ve směru proudnic před osou brázd. Často však pozorujeme díky kladnému nebo zápornému zrychlení proudění jeho ageostrofičnou složku, která má směr kolmý k ose TPP.

Jelikož působení ageostrofičké složky proudění hraje důležitou roli v konceptu přenosových pásů, provedeme krátkou diskuzi, jak ageostrofičkový pohyb na severní polokouli působí.

Vyděme-li z  $x$ -složky pohybové rovnice a geostrofičké rovnováhy:

$$\frac{du}{dt} = -g \frac{\partial h}{\partial x} + f \cdot v + F_x \quad (1.1)$$

a

$$0 = -g \frac{\partial h}{\partial x} + f \cdot v_g, \quad (1.2)$$

kde  $du/dt$  je zrychlení ve směru osy  $x$ ,  $g$  tíhové zrychlení,  $\partial h/\partial x$  lokální změna výšky tlakové hladiny,  $f$  Coriolisův parametr,  $v_g$  vektor geostrofičké rychlosti a  $F_x$  je  $x$ -složka třecí síly. Odečteme-li rovnici (1.2) od (1.1) dostaneme:

$$\frac{du}{dt} = f(v - v_g) + F_x \quad (1.3)$$

Jelikož víme, že

$$v - v_g = v_{ag}, \quad (1.4)$$

kde  $v_{ag}$  je vektor ageostrofické složky rychlosti, pak

$$\frac{du}{dt} = f \cdot v_{ag} + F_x, \quad (1.5)$$

takže

$$v_{ag} = \frac{1}{f} \frac{du}{dt} - \frac{1}{f} F_x, \quad (1.6)$$

podobně

$$u_{ag} = -\frac{1}{f} \frac{dv}{dt} + \frac{1}{f} F_y, \quad (1.7)$$

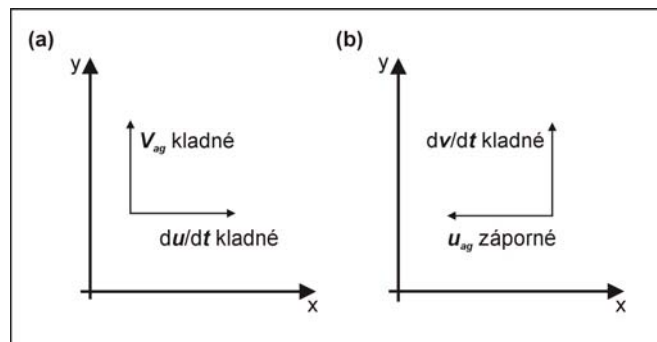
kde první člen na pravé straně rovnic (1.6) a (1.7) je zrychlení větru a druhý člen charakterizuje ageostrofickou složku proudění spojenou s existencí třecí síly. Druhý člen zpravidla uvažujeme pouze v případě mezní vrstvy, neboť ve volné atmosféře je v podstatě zanedbatelný. Vzhledem k tomu, že třecí síla vždy působí proti směru pohybu, směřuje zmíněná ageostrofická složka kolmo ke směru proudění, na severní polokouli vlevo.

Zanedbáme-li tření, dostáváme:

$$v_{ag} = \frac{1}{f} \frac{du}{dt}, \quad (1.8)$$

$$u_{ag} = -\frac{1}{f} \frac{dv}{dt}, \quad (1.9)$$

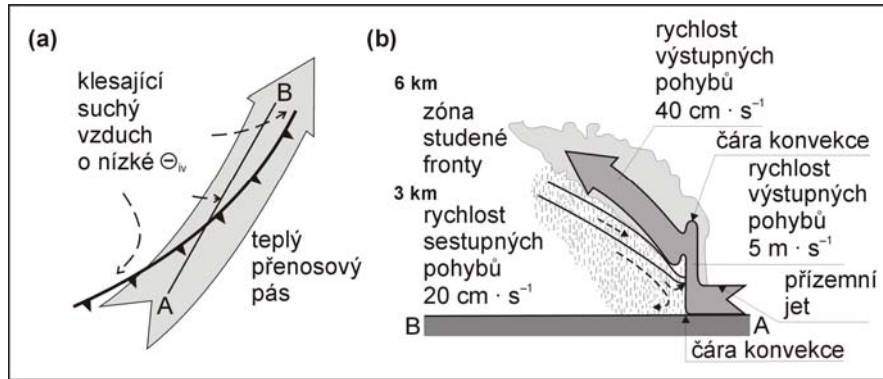
příčemž na severní polokouli svírají složky ageostrofického větru  $v_{ag}$  a  $u_{ag}$  pravý úhel se zrychlením, které jej způsobuje, a směřují od něj nalevo (obr. 6).



**Obr. 6** Směr ageostrofického pohybu: **(a)** při zrychlení ve směru osy x, **(b)** při zrychlení ve směru osy y

Takže, je-li zrychlení proudících vzduchových částic v teplém přenosovém pásu podél přízemní studené fronty kladné, směřuje ageostrofická složka proudění doleva. Pak můžeme pozorovat relativní pohyb směrem do studeného vzduchu v týlu oblačného systému. Tudiž teplý přenosový pás

bude stoupat nad vzduch o nízké  $\Theta_{iv}$ , což má za následek vznik dozadu nakloněného rozhraní. Dozadu nakloněné rozhraní koresponduje s klasickou studenou frontou „norské školy“ a bývá označováno jako *studená anafronta*. Uvedené schéma je příznivé pro silné vertikální pohyby, kdy se vzduch o nízké  $\Theta_{iv}$  při zemi podsouvá pod teplý přenosový pás, který postupně vystupuje nad něj. Výsledkem je mírný, případně silný déšť v blízkosti přízemní fronty; dále za frontou pak intenzita slábné až mizí úplně [5] (obr. 7).



**Obr. 7** Dozadu nakloněný výstup v teplém přenosovém pásu; podle [5]; (a) schéma teplého přenosového pásu a jeho vztah k přízemní poloze studené fronty; (b) vertikální řez podél spojnice bodů A–B

### b) Dopředu nakloněný výstup v teplém přenosovém pásu (studená katafronta)

Může nastat i případ, kdy zrychlení vzduchových částic pohybujících se v teplém přenosovém pásu podél přízemní studené fronty je záporné. V tom případě směřuje ageostrofická složka proudění vpravo od teplého přenosového pásu. Případně může mít klesající vzduch charakterizovaný nízkou  $\Theta_{iv}$  tak velkou relativní složku rychlosti přes teplý přenosový pás, že jej vzduch o nízké  $\Theta_{iv}$  překoná, namísto aby jej „podtekl“. Rozhraní mezi vzduchovou hmotou o nízké  $\Theta_{iv}$  a vzduchovou hmotou o vysoké  $\Theta_{iv}$  se pak na rozdíl od výše popsaného dozadu nakloněného výstupu nenaklání dozadu, nýbrž dopředu (obr. 8). Toto schéma je známé jako *výšková studená fronta* a v případě výškové studené fronty před polohou přízemní studené fronty hovoříme o *split* čili *dopředu nakloněné studené frontě*.

Za výškovou studenou frontou se nachází oblast, kde vzduch s nízkou  $\Theta_{iv}$  překrývá vzduch o vysoké  $\Theta_{iv}$ . Ačkoli to může být lehce zavádějící, neboť vlhký vzduch často sahá až do hladin 700 hPa či 800 hPa, je tato oblast známa jako *mělká vlhká zóna – MVZ (shallow moist zone)*. Při zemi je pro tuto zónu zpravidla charakteristická vrstevnatá oblačnost s občasným deštěm a mrholením.

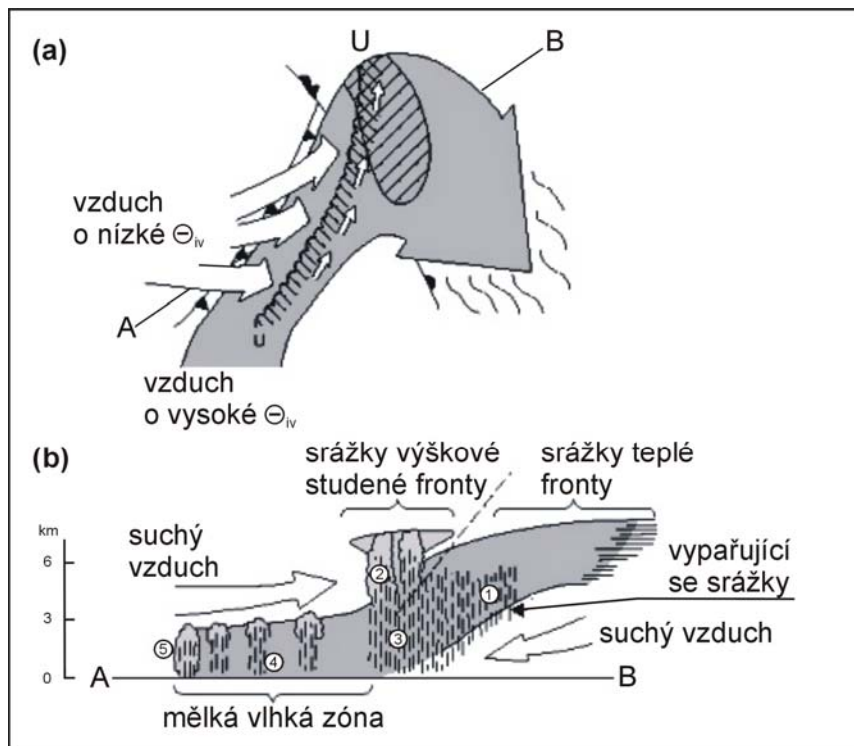
Důležitým rysem MVZ je, že vertikální profil je *potenciálně instabilní*, což signalizuje klesající  $\Theta_{iv}$  s výškou nad MVZ. Nucený orografický výstup nebo jiné vhodné dynamické podmínky mohou zapříčinit vyzvednutí vzduchové hmoty v MVZ, a tím uvolnění potenciální instability. Výsledkem je pak formování vyvinuté konvekční oblačnosti a místy i silných srážek.

Jestliže se uvolní instabilita na většině MVZ, může následná konvekce velmi rychle transportovat vlhkost z MVZ do vyšších vrstev troposféry, a tak způsobit vzestup  $\Theta_{iv}$  s výškou, a tím zmenšování vlhkostního kontrastu v blízkosti výškové studené fronty.

Obrázek 8 naznačuje rozložení srážek spojených s dopředu nakloněným výstupem v teplém přenosovém pásu. Viz čísla v kroužku na obr. 8(b): většina silných srážek (3) je situována před



výškovou studenou frontou (2), přičemž je tato oblast často spojena se srážkami před přízemní teplou frontou (1) a spolu tvoří nesouvislou oblast, kde se střídají mírné a silné srážky. Uvnitř MVZ (4) je intenzita srážek slabá a občasná – kromě výše popsaného případu, kdy se uvolní potenciální instabilita, jež má za následek spuštění konvekce [6]. Přízemní studená fronta (5) je často vymezena úzkým pásem většinou slabých srážek (obr. 9).

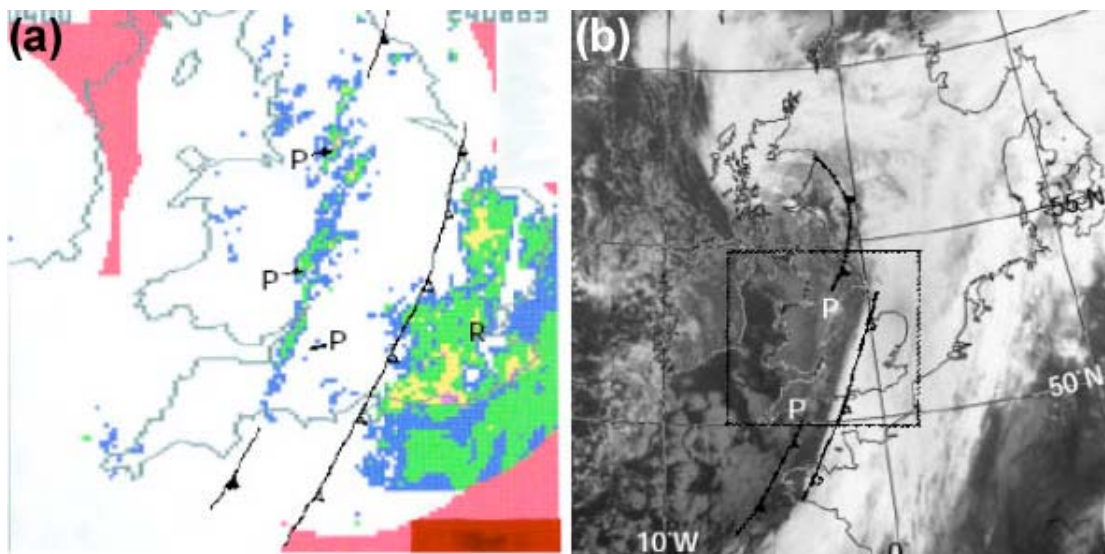


**Obr. 8** Dopředu nakloněný výstup v teplém přenosovém pásu; podle [6 ]  
**(a)** schéma výškové studené fronty vyznačené spojnici U–U; **(b)** vertikální řez podél spojnice A–B na obrázku (a); dále viz text

Avšak i zde se mohou vyskytovat silné srážky, jestliže je potenciální instabilita uvolněna právě v blízkosti přízemní polohy studené fronty. Ve velmi krátkém čase se mohou podmínky v MVZ změnit z nepříliš vertikálně silné vrstvy oblačnosti druhu stratocumulus spojené někdy se srážkami maximálně o intenzitě mrholení v intenzivní (zasahující větší část troposféry) konvekci („deep convection“), produkující silné srážky, případně i bouřky.

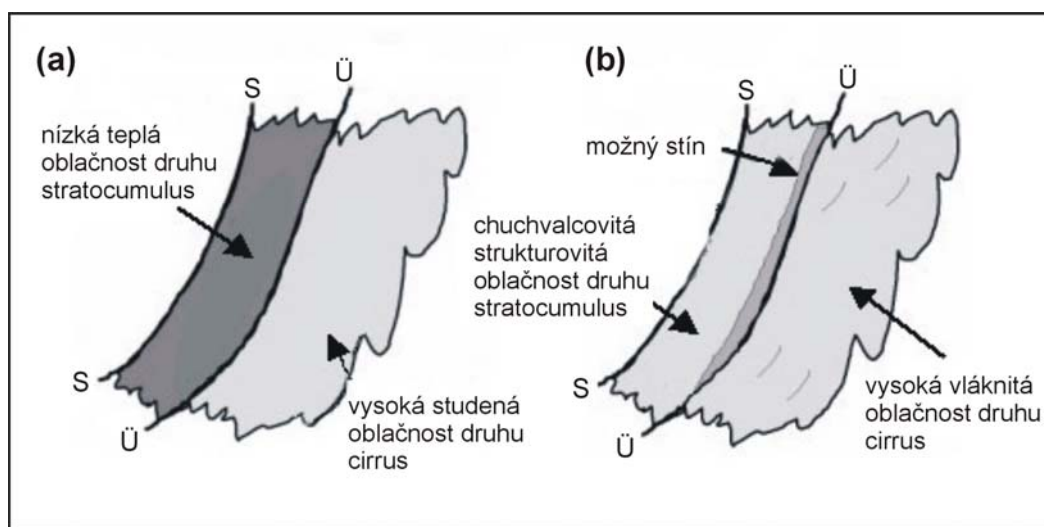
Výskyt **split** studené fronty a s ní spojené MVZ je možné detekovat pomocí satelitních snímků, na nichž lze rozeznat několik pro ni charakteristických znaků [1]:

- Vrcholky vysoké oblačnosti před výškovou studenou frontou jsou na IR-snímcích jasné. Avšak u nižší oblačnosti v MVZ se zdají v IR-kanálu tmavě šedivé, zatímco ve viditelném (VIS) spektru jsou stále jasné.
- Je možné rozeznat rozdíly ve struktuře mezi dvěma regiony na VIS-snímcích. Oblačnost před výškovou studenou frontou má charakteristickou cirrovitou strukturu s vlákny ve směru teplého přenosového pásu. Oblačnost v MVZ má více chuchvalcovitou strukturu, charakteristickou pro stratocumulus.
- Jestliže se v MVZ uvolní potenciální instabilita, pak je možné v této oblasti pozorovat vrcholky konvekční oblačnosti, které se v IR-spektru jeví jako jasněji bílé.
- V určité části dne může na snímcích pořízených ve VIS-kanálu vyšší oblačnost vrhat stín na oblaka v MVZ.



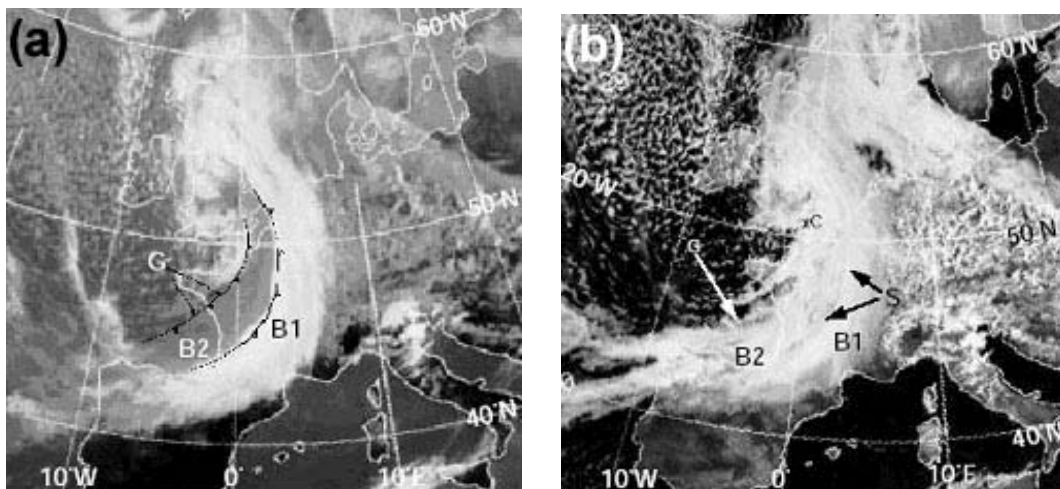
**Obr. 9 (a)** Rozložení srážek zaznamenané britskou sítí meteorologických radarů v 04.00 UTC dne 24. 8. 1985. Déšť v oblasti R je před výškovou frontou. Úhrny srážek v mm/h: tmavě modrá 0,3–1, zelená 1–4, žlutá 4–8, růžová 8–16. Pás dešťových srážek na linii PPP indikuje přízemní polohu studené fronty – tak ji signalizuje PP na IR-snímku (b) pořízeném družicí NOAA-9 v 03.53 hod. téhož dne; převzato z [1]

Na obrázku 10 je schematicky znázorněna situace odpovídající situaci na satelitních snímcích pořízených v infračerveném a viditelném spektru dopředu nakloněného teplého přenosového pásu. Obdobnou situaci ukazují snímky IR a VIS pořízené nad západní Francií (obr. 11).



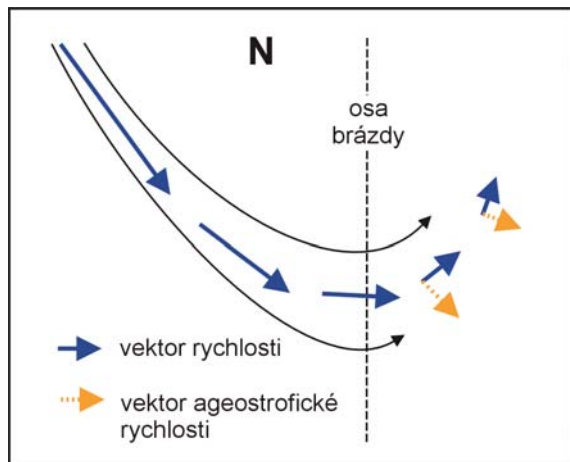
**Obr. 10** Schematické znázornění satelitních snímků split studených front

(a) typický vzhled a poloha oblačnosti na IR snímcích – vysoká a studená cirrovitá oblačnost před výškovou studenou frontou (UU) a teplejší vrcholky oblačnosti v MVZ  
 (b) vzhled a poloha oblačnosti na VIS snímcích s typickými vláknitými oblaky druhu cirrus před výškovou studenou frontou a druhu stratocumulus v MVZ; vysoká oblačnost vrhá stíny na nižší oblačnost v MVZ; v obou případech představuje čára SS polohu přízemní studené fronty



**Obr. 11** Snímky pořízené družicí METEOSAT ve 12.00 UTC 11. 4. 1985; (a) IR; (b) VIS  
 Legenda: B1 – pás oblačnosti s chladnými (vysokými) vrcholky; G – jasně viditelný zadní okraj; B2 – pás s teplými (nízkými) vrcholky; S – stín vrhaný B1 na B2

Většina **split** studených front se vyskytuje ve spojení s difluentní výškovou brázdou (obr. 12). Právě tato konfigurace způsobuje záporné zrychlení v teplém přenosovém pásu, který je před osou brázd, a vede k pohybu ve směru ageostrofixké složky proudění, tj. směrem doprava od teplého přenosového pásu. Vzduch o nízké  $\Theta_{iv}$ , který klesá v oblasti, kde je jet stream (tryskové proudění) nejsilnější, a pak slábne, se rychle dostává nad vzduch v teplém přenosovém pásu.

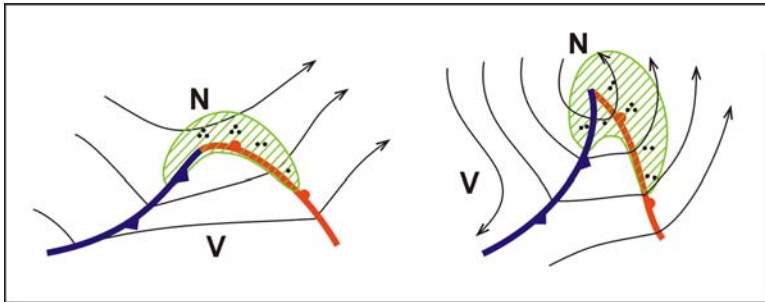


Legenda:  
 modrá šipka – rychlost ve směru proudění klesá (šipky symbolizující rychlosti proudění se zkracují), akcelerace je tedy záporná;  
 oranžová šipka – vektor ageostrofixké rychlosti směřuje vlevo ke směru zrychlení, v tomto případě tedy vpravo k vektoru rychlosti

**Obr. 12** Difluentní brázda nízkého tlaku vzduchu

Popsali jsme si dozadu nakloněný výstup v teplém přenosovém pásu (studená anafrota) a dopředu nakloněný výstup v teplém přenosovém pásu (studená katafrota). Oba případy jsou ve skutečnosti limitními situacemi v širokém spektru možností mezi nimi. Většina frontálních systémů patří někam mezi ně a je možné, že se v rámci doby existence jednoho teplého přenosového pásu situace kompletně změní od jednoho případu ke druhému. Rovněž je možné, aby jedna a tatáž fronta byla po určitý úsek dopředu nakloněnou – *split* – studenou frontou a na jiném *klasickou* dozadu nakloněnou studenou frontou.

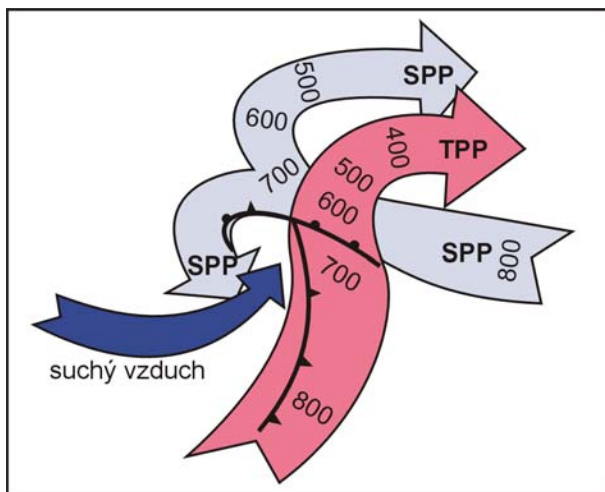
Zaleží to na relativním pohybu teplého přenosového pásu a klesajícím vzduchu o nízké  $\Theta_{iv}$  na různých místech podél frontálního systému. Tuto novou podstatu dynamiky front, která mění svůj charakter s časem, není možné uspokojivě vysvětlit klasickým frontálním modelem „norské školy“, který předpokládá, že fronty v průběhu času procházejí jednotnou a danou evolucí. Bergenský koncepční model předpokládá, že se nejsilnější srážky vyskytují pouze na studené straně přízemních front, tj. před teplou frontou a za studenou frontou (obr. 13).



**Obr. 13** Idealizované schéma vývoje mimotropické cyklony s frontálním systémem a oblastmi srážek, které leží především před a za studenou frontou (N – tlaková níže, V – tlaková výše)

#### 1.4.2 Studený přenosový pás (cold conveyor belt) – SPP

Studený přenosový pás se formuje na východní nebo severovýchodní straně vyvíjející se cyklony a je pro něj charakteristické, že hodnoty  $\Theta_{iv}$  jsou o několik stupňů nižší než ve vzduchu uvnitř teplého přenosového pásu. SPP proudí k západu, *relativně k pohybující se cykloně*, k severu vzhledem ke středu cyklony. Dále pak stoupá na hladinu o nižší  $\Theta_{iv}$ , než má teplý přenosový proud, a tak jej „podebírá“ často v místech, kde TPP naklání plochu spojenou s přízemní teplou frontou (obr. 14).



**Obr. 14** Vyvíjející se cyklona s teplým přenosovým pásem TPP a studeným přenosovým pásem SPP. Údaje uvnitř přenosových pásů představují tlakové hladiny, které jednotlivé proudy v daných místech protínají. V oblasti zvedání TPP od zemského povrchu nad SPP se formuje přízemní teplotní fronta; podle [7]

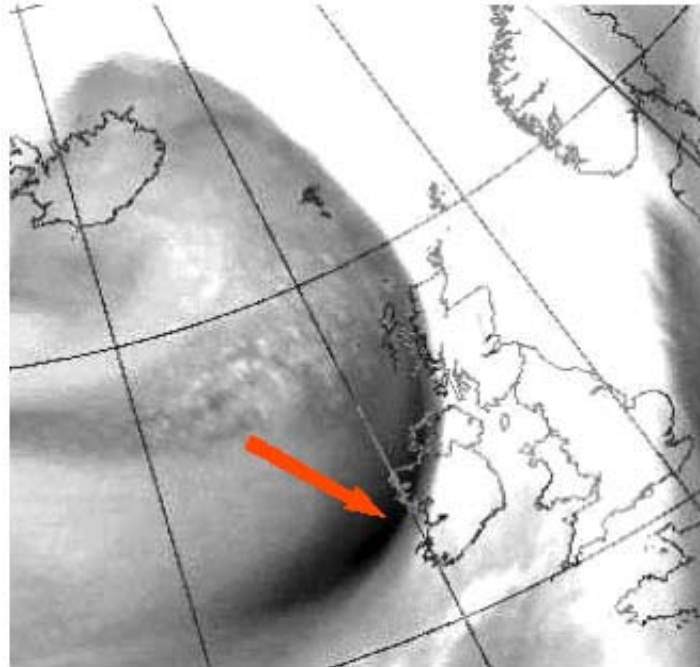
Vzduch je v SPP zpočátku relativně suchý, avšak v průběhu svého výstupu, kdy „podebírá“ TPP, se srážky vypadávající z TPP částečně vypařují do suššího vzduchu proudícího pod ním, a tak nasycují SPP. Vlhkost je pak dále přenášena po isentropických hladinách vzhůru a může se stát v oblasti, kde SPP vystupuje zpod TPP, zdrojem pro formování oblačnosti. Pozorování a distanční měření potvrzují, že tento způsob je typický pro vznik oblačnosti spodního a středního patra, kde se jeví vrcholky oblaků teplejší, než je tomu u oblačnosti na straně bližší pólu teplého přenosového pásu, což dokumentují satelitní IR-snímky [7].

V místě, kde SPP vystupuje zpod TPP, se proud často rozděluje do dvou větví. Vyšší větev se anticyklonálně stáčí, až proudí téměř rovnoběžně s TPP. Nižší větev proudu se v souvislosti se směrem větru vanoucího v nižších hladinách stáčí cyklonálně a směřuje do středu cyklony, jak je opět vidět na obrázku 14.

Oblast, kde SPP vystupuje zpod TPP, je možné označit rovněž za místo, kde se formuje další fronta, protože označuje rozhraní mezi vzduchem ve SPP a vzduchovou hmotou proudící v týlu vyvíjejícího se systému o nízké  $\Theta_{iv}$ . V klasickém koncepčním modelu „norské školy“ je taková situace analyzována jako okluzní fronta (obr. 14). Avšak měření dokazují, že formování této fronty nekoresponduje s procesem okluze, jak jej popisuje „norský model“, což je situace, kdy je teplý vzduch vytlačován studenější vzduchovou hmotou na čele a v týlu cyklony vzhůru. Přestože se většina současných analýz stále přidržuje konvence znázorňující toto rozhraní jako okluzní frontu, jeví se vhodnější a mnohem bližší realitě ji analyzovat jako teplou, nebo studenou frontu v závislosti na teplotním gradientu a směru pohybu v oblasti rozhraní.

### 1.4.3 Intruze suchého vzduchu

Jak vyplývá z předchozích oddílů, teplý i studený přenosový pás vznikají na přední straně výškové brázdy. Proud v týlové části brázdy taktéž vytváří důležitý komponent vyvíjejícího se oblačného systému. Interakce mezi TPP a vzduchem o nízké  $\Theta_{iv}$  proudícím do týlu systému je rozhodující při určování povahy a vlastností oblačnosti a rozložení srážek na studené frontě. Vzduch s nízkou  $\Theta_{iv}$  hraje důležitou roli rovněž při cyklogenezi, a to nejen výstup vlhkého vzduchu, který je určující při formování oblačnosti a srážek, ale i suchý sestupující vzduch. Situace je označována jako *intruze (průnik) suchého vzduchu*. Pokud se suchý sestupující a vlhký vystupující vzduch dostanou do blízkého kontaktu, jsou jejich rozdílné vlastnosti důvodem pro vznik velkých horizontálních i vertikálních gradientů veličin (jako je například  $\Theta_{iv}$ ) a pro výskyt potenciální vorticity v blízkosti oblačného systému [4]. Studie dokazují, že vzduch suché intruze má svůj původ v blízkosti místního snížení tropopausy. Jisté množství vzduchu může dokonce pocházet až ze stratosféry, nejčastěji však pochází z troposférické strany tropopausy (např. [11], [9]). Když vzduch klesá podél isentropických ploch, začne se adiabaticky oteplovat, a tak v případě, že se dostane do blízkosti TPP, může mít podobnou teplotu jako vzduch v TPP. Avšak kontrast v  $\Theta_{iv}$  mezi vzduchem suché intruze a vzduchovou hmotou TPP bude stále zřetelný. Ve skutečnosti je tedy lepší definovat výškovou studenou frontu spíše pomocí vlhkosti než teploty. Vlhkostní kontrast může často být dobře pozorovatelný na satelitních snímcích pořízených ve spektru citlivém na absorpci a emisi záření vodní párou (water vapour – WV-snímky), viz obr. 15. Velmi suchý vzduch ve střední a vysoké troposféře se jeví na WV-snímcích jako tmavé oblasti, zatímco velmi vlhký vzduch jako jasně bílé oblasti. Postupné tmavnutí suchého vzduchu, který se přibližuje TPP (suchá intruze), tedy indikuje vzduch o velmi nízké  $\Theta_{iv}$ , který klesá do nižších hladin troposféry. Nejtmavší oblasti jsou na snímcích na týlové straně jižní části TPP, kde suchá intruze pronikla nejdále. Studium sekvencí WV-snímků nám umožňuje sledovat, jak rychle suchý vzduch klesá. Jestliže snímky ukazují rychlé tmavnutí s časem, pak vzduch klesá skutečně rychle a signalizuje, že systém má potenciál výrazně a rychle se prohlubovat.



**Obr. 15** Snímek z Meteosatu pořízený ve spektru vodních par ukazuje klesající suchý vzduch v týlu TPP

## Závěr

Článek představuje nový pohled na vývoj oblačných systémů středních zeměpisných šířek. Základem je spojení proudění po isentropických hladinách se systémem relativního proudění, které spolu tvoří úhelný kámen nového koncepčního modelu přenosových pásů (conveyor belts), jenž dokáže nalézt odpověď i na otázky, na něž „norská škola“ odpověď nalézt nedokáže.

Jedná se zejména o novou podstatu dynamiky front, která mění svůj charakter s časem a kterou není možné uspokojivě vysvětlit klasickým koncepčním frontálním modelem, jenž předpokládá, že fronty v průběhu času procházejí jednotnou a danou evolucí. Jedním z dalších podstatných rozdílů je vysvětlení faktu, že nejsilnější srážky se nemusí vyskytovat pouze na studené straně přízemních front (tj. před teplou frontou a za studenou frontou). Koncept přenosových pásů je schopen vysvětlit i případy, kdy se právě nejsilnější srážky vyskytují na teplé straně přízemních front (např. uvnitř teplého sektoru).

Názorným případem, kdy popsané koncepty nejsou v souladu, jsou situace, kdy se například dle „bergenské školy“ (čili norské školy) spojí teplá a studená fronta. Většina současných analýz se stále přidrzuje konvence znázorňující toto rozhraní jako okluzní frontu. Avšak mnohem vhodnější a bližší realitě by bylo okluzní frontu analyzovat jako teplou, nebo studenou frontu v závislosti na teplotním gradientu a směru pohybu v oblasti rozhraní.

V některém z příštích čísel je možné navázat příspěvkem popisujícím strukturu a atmosférické procesy spojené s mimotropickou cyklonou v *mezoměřítku* a *mikroměřítku*.

## Literatura

- [1] BADER, M. J., FORBES, G. S., GRANT, J. R., LILLEY, R. B. E. and WATERS, A. J. (eds.) (1995): *Images in Weather Forecasting. A Practical Guide for Interpreting Satel–lite and Radar Imagery*. Cambridge : Cambridge Univ. Press. 499 p. ISBN 0521451116.
- [2] BLUESTEIN, H. B. (1993): *Synoptic-Dynamic Meteorology in Midlatitudes*. Vol. 2. Observations and Theory of Weather Systems. Oxford : Oxford University Press. 594 p. ISBN 019506268X.
- [3] BROWNING, K. A. (1986): Conceptual Models of Precipitation Systems. *Weather and Forecasting*, 1, no. 1, p. 23–41.
- [4] BROWNING, K. A. (1997): The Dry Intrusion Perspective of Extra-Tropical Cyclone Development. *Meteorological Applications*, 4, no. 4, p. 317–324.
- [5] BROWNING, K. A. (1985): Conceptual Models of Precipitation Systems. *Meteorological Magazine*, 114, no. 1359, p. 293–319. ISSN 0026-1149.
- [6] BROWNING, K. A. and MONK, G. A. (1982): A Simple Model for the Synoptic Analysis of Cold Fronts. *Quarterly J. of the Royal Meteorological Society*, 108, no. 456, p. 435–452.
- [7] CARLSON, T. N. (1980): Airflow through Midlatitude Cyclones and the Comma Cloud Pattern. *Monthly Weather Review*, 108, p. 1498–1509.
- [8] CARLSON, T. N. (1991): *Mid-Latitude Weather System*. London : Harper Collins Academic. 507 p.
- [9] SIGMOND, M. (1999): *Potential Vorticity Mixing Around the Tropopause*. IMAU [Institute of Marine and Atmospheric Research], University of Utrecht.
- [10] WELDON, R. B. and BOHAN, W. A. (1985): Relative Motions Associated with Moving Cloud Systems, Pacific and Atlantic Ocean. Walter A. Bohan Co. [video]
- [11] WIRTH, V. and EGGER, J. (1999): Diagnosing Extratropical Synoptic-Scale Stratosphere-Troposphere Exchange : A Case Study. *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, 125, p. 635–655.

*Recenze: Ing. František Hudec, CSc.*

## Abstract

Atmospheric Circulation and Processes in the View of Conceptual Model of Conveyor Belts.

At the beginning of the last century W. Bjerknes published the concept of polar front which hand in hand with the works of the other meteorologists found the synoptic meteorology. This framework has been effective so far with little modifications only – especially in an operational weather forecasting. However, along with a newly profiled specialization – dynamic meteorology – a level of knowledge of cyclogenesis has significantly risen. Particularly a new conceptual model of conveyor belts based on isentropic flow and system relative flow and their combination has contributed to the better understanding of atmospheric processes.