

Klimatologie teplotních inverzí nad Prahou

Mgr. Jan Stryhal

Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy v Praze

katedra fyzické geografie a geoekologie

Albertov 6, 12843 Praha 2

Anotace

Cílem práce je analýza teplotních inverzí v mezní vrstvě atmosféry v řadě aerologických měření teploty v Praze-Libuši. V práci jsou postupně analyzovány denní a roční chod četnosti a vybraných parametrů inverzí (např. mocnosti a průměrného teplotního gradientu), dlouhotrvající přízemní inverze (vč. jejich synoptických příčin) a trendy inverzí. Značná pozornost je věnována testování homogenity vertikálních profilů teploty i odvozených řad inverzí.

Klíčová slova

teplotní inverze, mezní vrstva atmosféry, klima města, Praha

Annotation

The main objective of this paper is to analyse low-level temperature inversions (TIs), based on a dataset of atmospheric soundings from the aerological station at Prague-Libus. First, the homogeneity is carefully tested, both of the radiosonde data, and all inferred time series of TIs. Secondly, diurnal and annual regimes are described. Thirdly, persistent surface-based inversions are analysed, incl. their synoptic forcing. Lastly, the trends in TIs are analysed.

Key words

temperature inversions, boundary layer, urban climate, Prague

Abstract

Temperature inversions (TIs) have been closely studied for a variety of reasons. Most of the studies, utilizing aerological data, however, focused only on winter surface inversions with considerable depth a spatiotemporal stability. No research has been so far published (or at least is not known to the author), covering the complete climatology of temperature inversions, including the annual and diurnal regimes, based on an aerological station in the temperate climate zone.

Here, we present a study on temperature inversions, based on a dataset of atmospheric soundings from the aerological station in Prague-Libus (Czech Republic). Measurements have been carried out here since 1974, at all main synoptic hours (00, 06, 12, and 18 UTC). It was shown by previous research that changes in the routine of collecting data at aerological stations can influence the inferred time series of temperature inversions substantially, via shifts in the vertical resolution (number of levels) of the profiles.

Therefore, the homogeneity of the data from Prague-Libus was carefully tested, both of the original data, and the inferred time series of frequency and main parameters (depth, strength, and the mean temperature gradient) of inversions. Since several changes in the observation routine affected the homogeneity, analyses were conducted for the homogenous period of 1992–2012 only.

First, the diurnal and annual regimes of both surface-based (SBTIs) and elevated (ETIs) temperature inversions were analysed. Maxima of SBTIs occurred at 00 UTC, and in September and October. Persistent SBTIs often occurred during autumn, as a result of decreased cyclonicity.

Second, changes in TIs were evaluated, and some of the trends were compared to the close station in Kümmersbruck (Germany), in order to estimate their spatial stability. In summer, frequency of SBTIs decreased almost identically at both stations at 00 UTC. Although the same trend was apparent at 06 UTC, too, it was considerably more pronounced in Prague; it was also mirrored by a major increase in ETIs. Since only a weak relationship of these trends with the large-scale circulation was found, local factors (spreading urban heat island) are hypothesised to stand in the background of this development.

Klimatologie teplotních inverzí nad Prahou

1. Úvod

Teplotní inverze, vrstvy vzduchu v atmosféře, ve kterých roste teplota s výškou, jsou velmi běžným jevem zemského klimatu. Na jednu stranu jsou přirozeným produktem řady klimatotvorných faktorů a procesů (jako např. radiační ochlazování zemského povrchu a přilehlých vrstev vzduchu, advekce relativně teplejších vzduchových hmot či subsidence vzduchu), na stranu druhou mají samy potenciál významně ovlivnit počasí a klima tím, že inhibují transport energie a hmoty v atmosféře či vývoj oblačnosti (Devasthale a kol. 2010). Právě tato zpětná vazba je často zmiňována jako hlavní důvod, proč jsou inverze ve spodní troposféře studovány.

V posledních zhruba dvou dekadách byly popsány vlastnosti a statisticky významné trendy inverzí teploty, a to v různých částech Země; např. v Antarktidě (Connolley 1996, Andreas a kol. 2000, Zhang a kol. 2011), Arktidě (Kahl 1990, Hartmann a Wendler 2005, Bourne a kol. 2010, Zhang a kol. 2011), JZ USA (Iacobellis a kol. 2011), Indickém poloostrově (Iyer a Nagar 2011) a Číně (Li a kol. 2012). Základním datovým zdrojem pro všechny tyto analýzy byla aerologická měření teploty. Ačkoli v řadě oblastí mírného klimatu, vč. střední Evropy, mají sondážní měření dlouhou tradici a skýtají tak relativně dlouhý a přesný popis teplotní stratigrafie spodní troposféry, žádná komplexnější studie o zdejších teplotních inverzích prozatím publikována nebyla, nebo alespoň není autorovi této práce známa.

Zde předkládaný text je věnován analýze inverzí teploty v časové řadě vertikálních profilů teploty z Prahy-Libuše. Ačkoli teplotní inverze se hojně vyskytují v celém profilu, primárním cílem je popis inverzí přízemních, případně i výškových, ovšem pouze do výšky 2 km nad zemským povrchem, neboť tyto mají největší dopad na stav ovzduší. Uvedená výška je zvolena také s ohledem na studie věnované (mj.) i měření rozsahu mezní vrstvy atmosféry v Česku (Keder 1999, Volná a Černíkovský 2005).

Jak již bylo zmíněno, aerologická měření jsou zajímavým datovým zdrojem k analýze inverzí teploty. Převaha studií v polárních oblastech (a typicky v zimních měsících) má zřejmou příčinu – mocnost inverzních vrstev a jejich stabilitu v čase i prostoru. I v takových podmínkách byla nicméně vypořazována řada problémů spojených s užíváním sondážních dat. Zásadní se jeví především otázka vertikálního rozlišení teplotního profilu. Karppinen a kol. (2001) upozorňuje na skutečnost, že nedostatečné vertikální rozlišení (již cca 50–200 m) vede k mylnému výpočtu některých parametrů, např. podhodnocení síly inverze. Dle Waldena a kol. (1996) ke změnám ve vertikálním rozlišení může dojít při jakékoli, i dílčí změně v užívaném navigačním systému a procesu zpracování dat. Větší počet hladin v takovém případě vede ke snížení mocnosti inverzní vrstvy, ale projeví se i ve všech dalších parametrech. Zhang a Seidel (2011) nedávno upozornili na skutečnost, že značná část předchozích studií kvůli změnám vertikálního rozlišení došla k patrně mylným závěrům, a to zejména v případě výpočtů dlouhodobých trendů.

Vzhledem k tomu, že inverze ve středoevropském prostředí jsou, až na výjimky, daleko méně výrazné než v polárních oblastech, dopady možných nehomogenit měření by se v analýzách mohly projevit o to zásadnějším způsobem. Prvním krokem, předcházejícím samotné studii inverzí, je proto podrobná analýza homogenity měření v Praze-Libuši, za účelem odhalení možných dopadů technologických i metodických změn měření a zpracování dat na odvozené řady inverzí teplot.

Text je koncipován následně: v kapitole 2 jsou představeny zdrojová data a základní v práci užitá metodika, v kapitole 3 je diskutována homogenita řad. V kapitolách 4 až 6 jsou představeny a diskutovány výsledky. V kapitole 7 jsou shrnuty hlavní dosažené výsledky práce.

2. Data a metody

Základním datovým zdrojem využitým v předkládané analýze jsou aerologická měření z Prahy-Libuše. Stanice leží na jižním pražském předměstí, zhruba 10 km od centra; její nadmořská výška je 304 m n. m. a souřadnice 50° 01' s. z. š. a 14° 27' v. z. d. V období 1974 až 2012 vč. se zde měřilo 4 -

krát denně, v hlavních synoptických termínech (00, 06, 12, 18 UTC). Počínaje rokem 2013 bylo zanecháno měření ve večerním termínu.

Aerologický systém se skládá ze sondy, navigačního systému a jednotky přijímající a zpracovávající data. V současnosti jsou používány sondy VAISALA RS92-SGP, obsahující senzory měřící přímo tlak vzduchu, teplotu a relativní vlhkost. Pozemní jednotka následně, i na základě obdrženého, sondou retranslovaného GPS signálu, dopočítává rychlost a směr větru a výšku sondy, a také teplotu rosného bodu. V posledním kroku jsou vypočítány samotné vertikální profily teploty a vlhkosti vzduchu a rychlosti a směru větru, a to pro standardní izobarické hladiny a další význačné zlomové hladiny v profilech teploty, vlhkosti a větru (ČHMÚ 2014a).

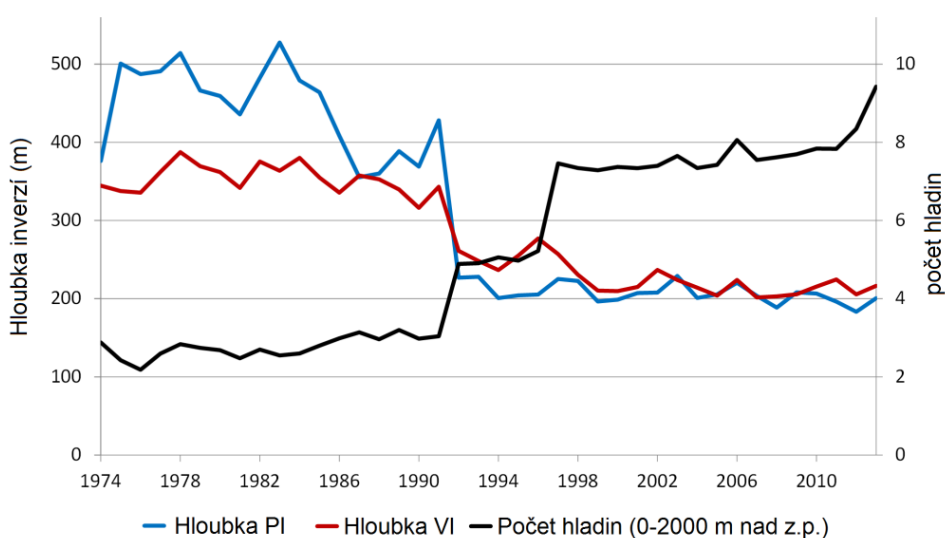
Za účelem analýzy synoptických příčin teplotních inverzí je využit kalendář povětrnostních typů, sestavovaný pracovníky Českého hydrometeorologického ústavu podle typizace Brádky (ČHMÚ 2014b). Kromě studia závislosti inverzí na jednotlivých povětrnostních typech zde také definujeme jednoduchý index cyklonality, a to jako poměr četnosti cyklonálních a anticyklonálních dnů za dané období.

Data zde analyzovaná byla získána z volně dostupné globální databáze aerologických dat (University of Wyoming 2013) ve formě textových souborů. Všechny dostupné profily, s výjimkou těch, které postrádaly údaj o přízemní teplotě, byly analyzovány algoritmem do výšky předem určené, jako horní limit (2000 m nad z. p.). V případě, že se v profilu vyskytlo více inverzí, vzájemně oddělených vrstvami, kde teplota s výškou klesala, každá z inverzí byla zaznamenána jako zvláštní jednotka a byly pro ni dopočítány základní parametry – hloubka, síla (teplotní rozdíl mezi horní a dolní hranicí inverze) a průměrný teplotní gradient (na 100 m) a pro VI navíc výška báze. Posledním parametrem přiřazeným inverzi byl typ (PI vs. VI), a v případě většího počtu VI v profilu i pořadí (VI₁, VI₂, atd.).

3. Homogenita časových řad

Během dlouhého období aerologických měření v Praze-Libuši došlo k řadě více či méně významným zásahům do měření. Zásadní změna nastala v roce 1992, kdy začaly být používány systémy finské firmy Vaisala. Součástí této změny byla i plná automatizace celého procesu sběru a zpracování dat. Zejména automatizace zaměřování pozice sondy, ruku v ruce se zkrácením vertikálního časového rozlišení profilování z 30 na 10 s, znamenaly značný kvalitativní posun měření. Možné dopady pozdějších změn typu sondy a navigačního systému na homogenitu řady byly diskutovány v odborné literatuře (Skřivánková 2000, 2004a,b) a zamítnuty jako nevýznamné. Testy se nicméně nijak nezaměřovaly na počet hladin uvedených ve výsledných profilech. Z tohoto hlediska by se i další změny v užívaných navigačních systémech (v září 1997 z Omegy na Loran-C, a od léta 2012 definitivně na GPS), typu sondy (1999, 2004) či dalšího snížení časového rozlišení na 5 sekund (2004) mohly negativně projevit na homogenitě odvozených řad inverzí.

K ověřování statistické významnosti zlomů přítomných v časových řadách je běžně užíváno množství testů. Na základě práce Rodionova (2005) zde byla zvolena robustní metoda STARS, která je schopna odhalit v řadě více zlomů, vč. těch, nacházejících se blízko sebe, a to i na pozadí trendu.



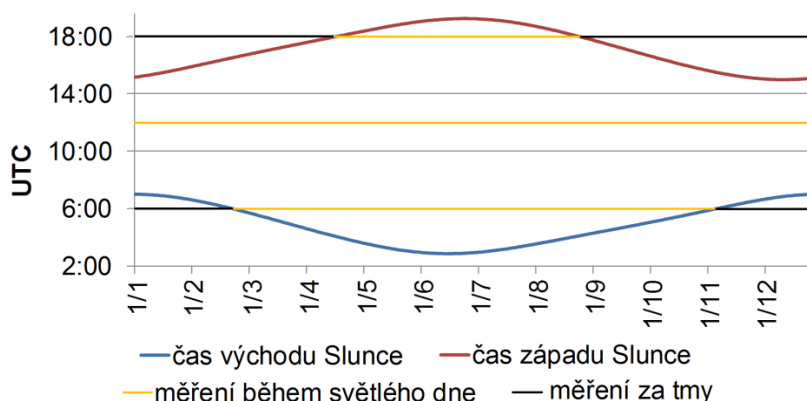
Obr. 1. Roční průměry počtu hladin v profilech teploty ve vrstvě 0–2000 m nad zemským povrchem a průměrná hloubka přízemních a výškových inverzí v Praze-Libuši (1974 – 2013). Přízemní („nulová“) hladina není do hodnoty počtu hladin zahrnuta.

Test odhalil tři významné zlomy v průměrném počtu hladin, v letech 1992, 1997 a 2013, viz obrázek 1, které mají zřejmě vazbu na změny navigace. První nárůst měl zcela zásadní dopad na veškeré řady četnosti i vlastností inverzí, další nárůsty vertikálního rozlišení se, až na výjimky, podobným způsobem neprojevily. Je tedy pravděpodobné, že již zhruba šest hladin, přítomných v profilu od 1992, je dostatečné na to, aby byly přítomné inverzní vrstvy zachyceny věrohodně.

Vzhledem ke všem uvedeným skutečnostem bylo z důvodu snahy o minimalizaci případného vlivu nehomogenit na výsledky analýz využito pouze období 1992 – 2012.

4. Denní a roční chod inverzí

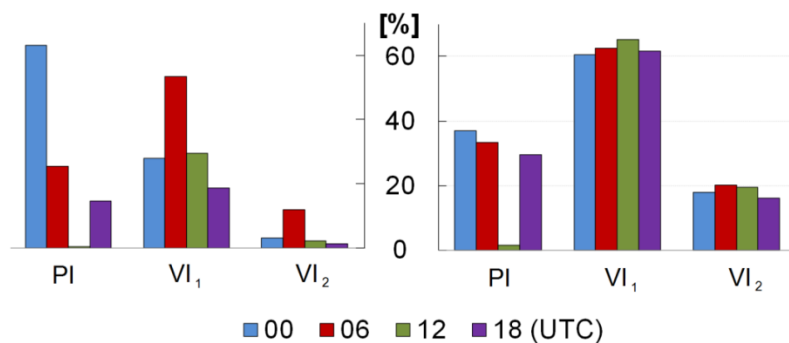
Poměrně nízký počet měření během dne na aerologických stanicích omezuje možnosti studia denního režimu inverzí. V Praze-Libuši je taková analýza do určité míry možná (před rokem 2013) díky 4 denním měřením, na rozdíl od běžného 12-hodinového kroku. Vzhledem k tomu, že se přízemní radiační inverze začínají vyvíjet krátce před západem Slunce, maximálního rozvoje dosahují před východem Slunce a rozpadají se v průběhu několika málo následujících hodin (Garratt 1992), významnou roli hraje sezonní proměnlivost výšky Slunce nad obzorem v čase měření (obrázek 2).



Obr. 2. Čas východu a západu Slunce ve vztahu k hlavním synoptickým termínům. Skutečná doba vypouštění sondy předchází termín o 30–45 minut (ČHMÚ 2014a).

Maximální rozvoj PI by tak měl být nejlépe zachycen v 06 UTC během podzimu, zimy a časného jara, resp. v 00 UTC ve vrcholném létě. PI lze očekávat i ve večerním termínu, s výjimkou léta, kdy je v době měření tepelná bilance zemského povrchu ještě kladná (Lutgens a Tarbuck 1979).

V průběhu roku jsou patrné dva základní typy denního režimu (obrázek 3). Během zimního půlroku (na obrázku vpravo) se četnost i vlastnosti všech typů inverzí v průběhu dne mění jen velmi málo. Jedinou výjimku představuje termín 12 UTC, kdy přízemní inverze mizí v naprosté většině případů v průběhu celého roku. V zimním půlroce je tepelná bilance zemského povrchu značně záporná, povrch emituje málo tepla, výskyt nízké oblačnosti a vyšší koncentrace pevných aerosolů v atmosféře navíc zintenzivňují zpětné dlouhovlnné záření, denní amplituda teploty je poměrně malá. Četnost inverzí v 00 UTC je tak oproti letnímu půlroku podstatně menší, ve všech ostatních případech podmínky nicméně naopak, napomáhají rozvoji inverzí. Poměrně běžně se v profilu vyskytují dvě a více výškových inverzí, na jejichž genezi se kromě radiačního vyzařování podílí také subsidence vzduchu, spojená s adiabatickým oteplováním nebo advekce relativně teplejších vzduchových hmot.



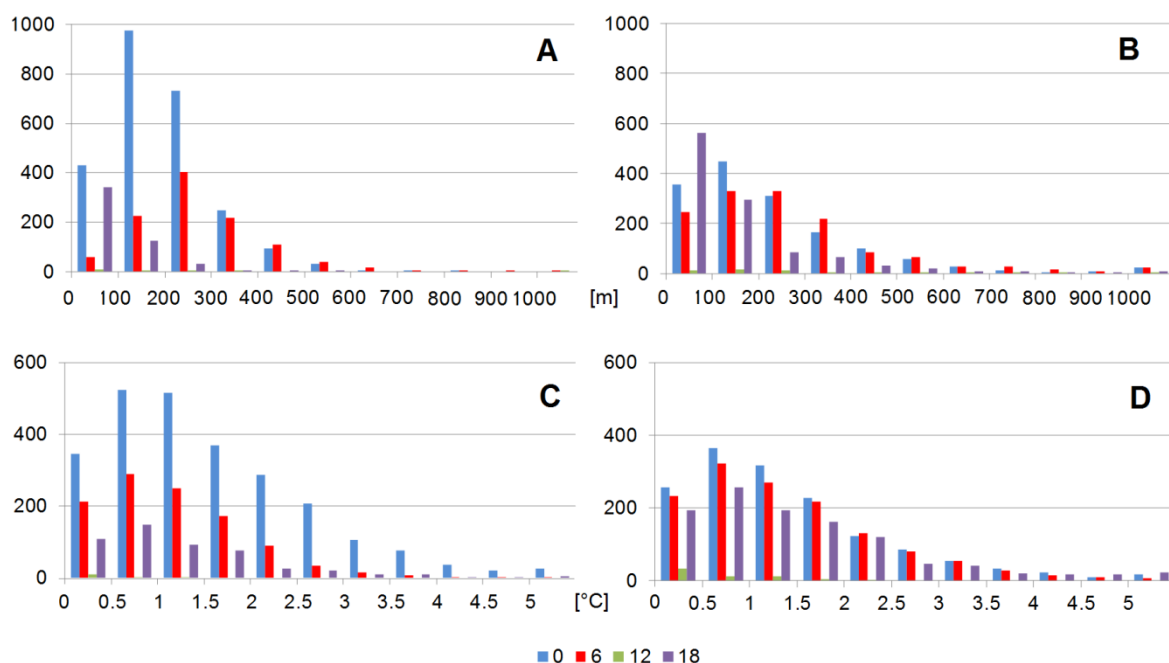
Obr. 3. Denní chod relativní četnosti přízemních (PI), 1. výškových (VI₁) a 2. výškových (VI₂) inverzí v Praze-Libuši. Na obrázku vlevo průměr pro letní půlrok (IV–IX), v pravo pro zimní půlrok (X–III).

Celý den (či dokonce několik dnů v řadě) přežívají převážně pouze velmi mocné přízemní inverze, zesilované právě subsidencí či advekcí; zhruba 25 % PI v 12 UTC tak v zimním půlroce přesahuje 500 m (medián je cca 250 m), průměrný teplotní gradient v takových případech ovšem bývá

naopak velmi nízký (obrázek 4D). V 18 UTC jsou PI v zimním půlroce ovšem již opět dobře patrné a v 00 UTC dosahují prakticky maximálního rozvoje, jak co do mocnosti, tak i průměrného gradientu.

V letním půlroce je situace odlišná. Díky převažujícímu radiačnímu typu počasí jsou PI častější než v zimě, ovšem kvůli dlouhému dni je jejich plný rozvoj zachycen výrazněji jen v 00 UTC, s výjimkou začátku a konce období. Po východu Slunce se PI rychle rozpadají, ve směru od zemského povrchu vzhůru. Jejich zbytky jsou pak patrné ve spodní troposféře, kde fungují jako zádržné vrstvy pro výstupné konvekční proudy (Garratt 1992). Tento proces byl patrný i v datech: zatímco relativní četnost PI klesá v 06 UTC pod polovinu četnosti v 00 UTC, četnost výškových inverzí naopak, podstatně roste. Pouze malá část těchto výškových inverzí nicméně přetrvává do večerního měření.

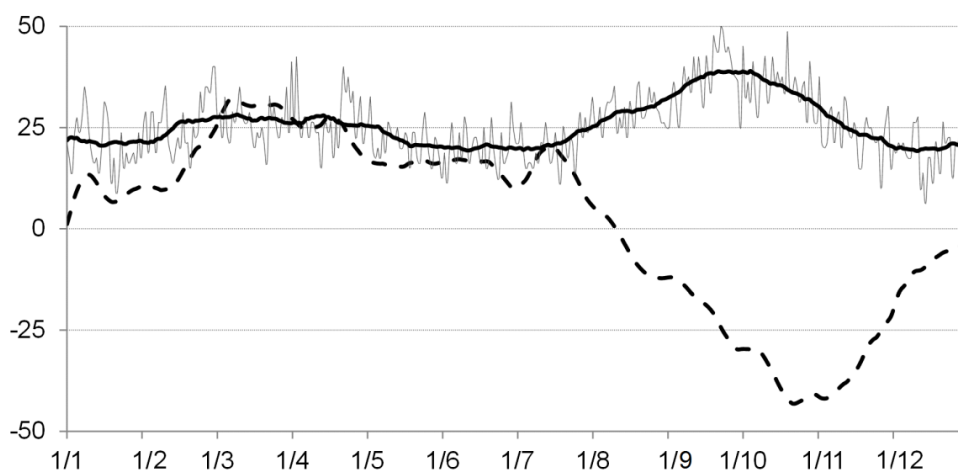
Pro ranní termín měření je oproti půlnoci patrná větší mocnost PI, která je způsobena rychlým rozpadem mělkých inverzí časně ráno (obrázek 4A). Medián gradientu dosahuje maxima naopak, již v 00 UTC, což značí, že v druhé půlce noci již teplota povrchu klesá pomaleji a inverze zvětšuje spíše svoji mocnost než sílu.



Obr. 4. Denní chod mocnosti (nahore) a průměrného gradientu (dole) přízemních inverzí v Praze-Libuši (1992 – 2012). Na obrázcích vlevo průměry pro letní půlrok (IV–IX), v pravo pro zimní půlrok (X–III).

Specifická situace nastává v 18 UTC vlivem proměnlivé výšky Slunce nad obzorem v době měření. Během srpna čas měření začíná východu Slunce předcházet a relativní četnost PI postupně roste až do období plochého maxima během září a října (PI v cca 50 % měření). Mocnost těchto inverzí je ovšem ještě velmi malá (medián je výrazně pod 100 m).

Vzhledem k charakteristickému přechodnému středoevropskému klimatu, plynoucímu z proměnlivého vlivu oceánských a kontinentálních vzduchových hmot, je roční chod teplotních inverzí poměrně pestrý. Předpokládáme-li, že většina PI v Praze jsou radiačního původu, lze očekávat poměrně dobrou shodu PI a cyklonality počasí. Na obrázku 5 je tato souvislost patrná v případě podzimního maxima PI shodujícího se s obdobím s nadprůměrným zastoupením anticyklonálních dnů.



Obr. 5. Roční chod relativní četnosti PI v Praze-Libuši ve vztahu k cyklonalitě podnebí. Relativní četnost PI (černá křivka), spočtená pro všechny termíny, je proložena 31- denním klouzavým průměrem. Přerušovaná křivka značí součtovou řadu denních odchylek indexu cyklonality od průměru 1992 – 2012.

Během roku je možné vidět dvě lokální minima PI – v létě hraje významnou roli délka dne, zatímco v zimě jsou to zvýšená cyklonalita a malá denní amplituda teploty. Je zřejmé, že spíše než samotná anticyklonalita tlakového pole má na tvorbu PI vliv radiační typ počasí, což odpovídá zjištěním Křivancové (1991), která studovala vliv typu počasí a cyklonality proudění na chod teploty na Šumavě. Spolu s Andreasem a kol. (2000) se dá říci, že životní cyklus inverzí je výsledkem komplexních interakcí radiačních faktorů, synoptické aktivity a řady lokálních vlivů. Ačkoli toto

tvrzení do značné míry platí pro většinu zde provedených analýz, situace se dramaticky mění, pokud se zaměříme na dlouhotrvající přízemní inverze.

5. Dlouhotrvající přízemní inverze

Analýza persistence PI je poměrně značně omezena nízkým časovým rozlišením aerologických měření, i proto je v podobně zaměřených studiích často opomíjena. Zde pod pojmem dlouhotrvající PI rozumíme situaci, kdy alespoň dva po sobě jdoucí dny mají PI ve všech termínech měření, s povolenou výjimkou ve 12 UTC. V 21-leté řadě se nachází 736 (9,6 %) dnů s alespoň 3 termíny s PI (tedy s tzv. celodenní inverzí) a 164 období s persistentní PI o délce trvání 2–8 dnů. Pravděpodobnost takových období kolísá během roku, maxima dosahuje v průběhu druhé poloviny září (cca 30 %), naopak prakticky nulová je od května do poloviny srpna.

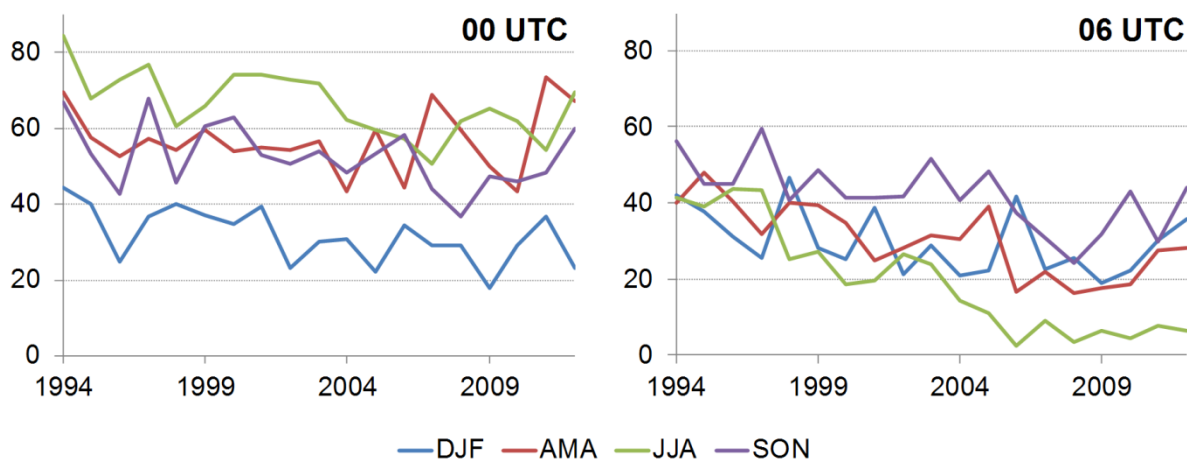
Oproti normálu, který činí zhruba 1,95, je hodnota indexu cyklonality při zaznamenání celodenní inverze výrazně nižší ($I_c=0,75$), naopak ve dnech bez zaznamenané PI převažují cyklonální typy ($I_c=4,1$). Při dlouhodobých inverzích (o délce trvání aspoň 4 dny) naopak, dominují typy anticyklonální – v první den je $I_c=0,3$, v druhý klesá dokonce pod 0,2. Jediná cyklonální situace, která se poměrně často při těchto obdobích vyskytuje (zhruba v pětina dnů), je jihozápadní cyklonální (typy SW_1 a SW_2). Vysoká hodnota indexu v poslední den inverzního období ($I_c=1,7$) a dnu následujícím ($I_c=2,4$) značí, že inverze bývá typicky ukončena až silným prouděním na postupujícím frontálním rozhraní.

6. Trendy inverzí teploty

Vzhledem k nutnosti zkrátit časovou řadu na polovinu je hodnocení významnosti trendů poněkud problematické. Obtížným se stalo i porovnávání s výsledky jiných studií o klimatu Prahy a Česka, které analyzují převážně řady 1961 – 1990 (2000). Zároveň v Česku není další aerologická stanice s dostatečně dlouhou řadou, která by umožnila přímé srovnání. Jistou možnost nicméně skýtá stanice

v bavorském Küssmetsbrücken, která se nachází v podobných geografických podmínkách jako Praha a leží relativně blízko (cca 200 km). Testy homogenity řady naznačují výrazný zlom v počtu hladin i v odvozených řadách inverzí počínaje rokem 1994, proto pro srovnání trendů bude využita řada 1994 – 2012.

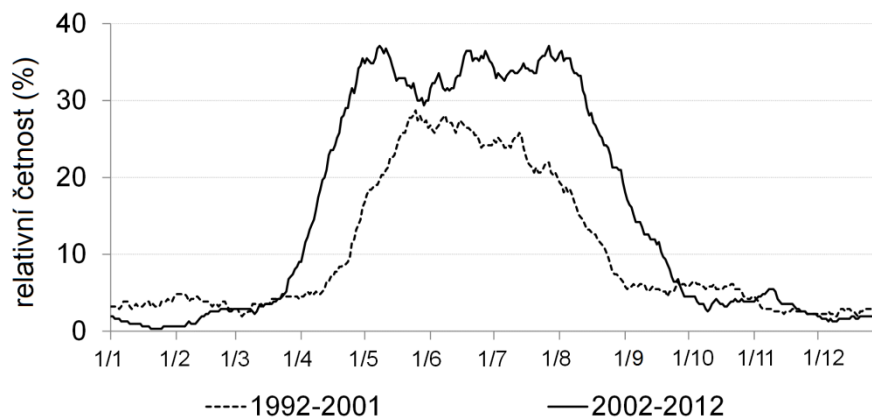
V průběhu hodnoceného období byla zjištěna řada změn v počtu i parametrech inverzí. Relativní četnost přízemních inverzí v Praze-Libuši měla obecně klesající tendenci, a to ve všech sezonách (obrázek 6). Zhruba třetinu tohoto poklesu je možné (na základě koeficientu determinance) přímo vysvětlit nárůstem inverzí výškových. Změny četnosti je tedy hypoteticky možné vysvětlit tak, že poměrně výrazná část PI byla v jednom či více termínech nahrazena inverzemi výškovými. V denním režimu by to znamenalo, že PI se začínají vyvíjet později a (nebo) rozpadat dříve. Za účelem ověření této hypotézy byla provedena detailní analýza změn inverzí v 18 a 06 UTC.



Obr. 6. Trendy relativní četnosti PI v Praze-Libuši (1994 – 2012). V termínu 00 UTC je pokles statisticky významný v zimě ($\alpha=0,05$) a v létě ($\alpha=0,01$). V 06 UTC je s výjimkou zimy ($\alpha=0,1$) pokles ve všech sezonách významný na $\alpha=0,01$

V ranním termínu byly trendy obou typů inverzí nejvýraznější. Počet PI se sice v letním půlroce snížil v ranním i večerním termínu, pouze ráno byl ovšem doprovázen nárůstem VI. Tento souběžný vývoj v 06 UTC dále analyzujeme tak, že se soustředíme na situace, kdy je noční PI nahrazen v ranním profilu výškovou inverzí. Je třeba podotknout, že tato analýza neřeší genezi ranní VI, nemusí

se tedy v jejím případě jednat nutně o vyzdviženou noční PI. Vzhledem k tomu, že se nicméně zaměřujeme pouze na trendy tohoto jevu, výsledek by neměl být významně ovlivněn. Trend ročního chodu tohoto jevu je zobrazen na obrázku 7, odděleně pro dvě dekády.



Obr. 7. Relativní četnost dnů s ranní VI nahrazující noční PI v Praze-Libuši (1992 – 2012). Křivky jsou shlazeny 31- denním průměrem.

Období s vysokou relativní četností tohoto jevu spadá dle očekávání do letního půlroku. Na první pohled je ale zejména patrné, že došlo ke změně data nástupu i konce tohoto období, v obou případech zhruba o měsíc. K otestování statistické významnosti těchto posunů definujeme novou statistiku jako počet rozpadů noční PI na ranní VI, pro každý den v roce v daném období (1992 – 2001, resp. 2002 – 2012). Porovnání tvaru rozdělení této statistiky pro dvě období bylo provedeno dvouvýběrovým Kolmogorovovým-Smirnovovým testem; rozdělení jsou odlišná na hladině významnosti $\alpha=0,01$.

Ukázané změny denního režimu teplotních inverzí v Praze-Libuši a jejich interpretace jsou v souladu s trendy vlastností inverzí. Především během jara a léta klesala báze VI v 00 a 06 UTC. Během ranních měření dále klesal i průměrný gradient PI, což značí postupné zeslabování těch inverzí, které navzdory obecně výrazné tendenci k zániku přetrvaly až do ranního měření.

Zajímavý, byť statisticky o poznání méně významný, byl i vývoj VI v zimě. V 00 UTC statisticky významně klesá mocnost VI, v 00 i 06 UTC roste zároveň výška jejich báze. Tyto změny nicméně ještě neovlivňují průměrný gradient, který roste až během dne. Popsaný vývoj je hypoteticky

možné vysvětlit nárůstem mocnosti směšovací (resp. reziduální) vrstvy. K ověření této hypotézy by ovšem bylo zapotřebí provést dodatečnou detailní analýzu teplotního vrstvení celé mezní vrstvy, což nebylo předmětem této práce. V takovém případě by bylo současně zapotřebí rozlišit jednotlivé genetické typy výškových inverzí, což se zdá značně problematické, protože při vzniku inverzí v zimě se obvykle spolupodílí více faktorů, které není možné pouze na základě sondážních dat rozlišit.

Vztah trendů inverzí a změn atmosférické cirkulace (četnosti povětrnostních typů, resp. změny cyklonality proudění) se ukázal velmi slabý. Tendence k vyšší anticyklonalitě patrná na podzim se zdá být jedním z faktorů poklesu četnosti PI v 00 UTC. Nutno ovšem dodat, že počty PI klesají celoročně, vesměs nezávisle na vývoji indexu cyklonality; a zároveň v létě, kdy PI mizely nejrychleji, se index neměnil. Tyto výsledky ovšem nejsou překvapivé. Studie zaměřené na vztah změn atmosférické cirkulace vesměs naznačují, že rozhodující část dlouhodobých změn klimatických prvků nelze vysvětlit změnami četnosti jednotlivých cirkulačních typů, nicméně změnami vlastností těchto typů (např. Pavcová a Kyselý 2013).

Otázkou tedy zůstává, co je příčinou výrazných změn PI v Praze. Částečně odpovědět na tuto otázku může srovnání s Kümmersbruckem. V 00 i 06 UTC mají trendy četnosti PI na obou stanicích stejné znaménko. V noci se poměrně dobře shoduje i intenzita změn, v 06 UTC jsou trendy v Praze znatelně výraznější, zejména na jaře a v létě. Trend četnosti výškových inverzí se nicméně na obou stanicích naprosto liší. V Kümmersbrucku totiž pokles PI nevede k nárůstu VI a tato neshoda s Prahou ústí i v odlišnosti v trendech parametrů VI.

Pomineme-li možnost, že trendy jsou v Praze umocněny nějakou nehomogenitou přítomnou v časové řadě aerologických měření, která nebyla odhalena provedenými testy, zdá se, že trendy četnosti ranních inverzí jsou v letním půlroce zesíleny místními faktory. V tuto dobu je patrný výrazný nárůst teploty ($+0,07\text{ }^{\circ}\text{C/rok}$) a pokles relativní vlhkosti ($-0,4\text{ }\%/rok$). Duckworth a Sandberg (1954) ukázali, že silné radiační PI se vyskytují výrazně častěji v rurálních oblastech v porovnání s městskými. V noci nad městem často přetrvává aspoň mělká směšovací vrstva (Clarke 1969). To vede k relativně vyšší povrchové teplotě, vzduch ve výškové inverzi se ovšem tímto v porovnání

s předměstím stává relativně chladnější a výškové inverze intenzivnější (Bornstein 1968). Změny v Praze-Libuši naznačují, že se teplotní struktura noční, a zejm. ranní mezní vrstvy, stala více „městskou“. Vzhledem k tomu, že dosavadní studie pražského městského ostrova se zaměřovaly na stanice v centru městě, tuto hypotézu není možné v současnosti potvrdit.

7. Závěr

Studium inverzí založené na sondážích teploty je poměrně běžné, nicméně běžně se omezuje na sezony a regiony s masivními přízemními inverzemi; dosud nebyla publikována žádná ucelená klimatologie inverzí, založená čistě na měřeních aerologických stanic umístěných čistě v mírném klimatickém pásu. Předkládaná studie se proto zabývá klimatologií inverzí teploty v Praze-Libuši, na základě řady aerologických měření za období 1992 – 2012.

Dosavadní výzkum naznačil, že na homogenitu odvozených časových řad inverzí má zcela zásadní vliv vertikální rozlišení (počet hladin) profilu teploty a jeho změny. Analýza pražské stanice ukázala, že z důvodu skokového nárůstu rozlišení profilu v roce 1992 je nutné se při analýzách zdejších inverzí spokojit pouze s měřeními novějšími.

Přízemní inverze teploty v Praze-Libuši mají charakteristický roční chod četnosti s maximem na podzim a dvěma minimy v létě a zimě. Během dne je maximum PI v 00 UTC, ovšem denní chod je výrazný jen v letním půlroce. Vazba PI na anticyklonalitu vychází v průměru jen slabá, situace se ovšem mění v případě persistentních inverzí (o délce trvání 2 a více dnů).

Přízemní inverze v Praze mají celoročně klesající trend, ovšem statistická významnost i stabilita trendu může být ovlivněna krátkou řadou. Nejvýraznější pokles byl patrný v letním půlroce, v termínech 00 a 06 UTC. Zatímco trend v noci se dobře shoduje s blízkou aerologickou stanicí s bavorským Kümmersbrucku, ranní pokles počtu PI je v Praze výraznější a doprovázený nárůstem VI. Na těchto změnách se pravděpodobně podílí lokální vlivy, tomuto tvrzení nahrávají i nárůst přízemní teploty a pokles relativní vlhkosti vzduchu. Na základě čistě aerologických dat ovšem není možné tuto hypotézu potvrdit či vyvrátit, do budoucna se nabízí analýza změn krajinného pokryvu v okolí stanice.

Citované zdroje

- ANDREAS, E. L., CLAFFY, K. J., MAKSHITAS, A.P. (2000): Low-level atmospheric jets and inversions over the western Weddell Sea. *Bound.-Layer Meteor.*, 97, 459–486.
- BORNSTEIN, R. (1968): Observations of the urban heat island effect in New York City. *J. Appl. Meteor.*, 7, 575–582.
- BOURNE, S. M., BHATT, U. S., ZHANG, J., THOMAN, R. (2010): Surface-based temperature inversions in Alaska from a climate perspective. *Atmos. Res.*, 95, 353–366.
- CLARKE, J. F. (1969): Nocturnal urban boundary layer over Cincinnati, Ohio. *Mon. Wea. Rev.*, 97, 582–589.
- CONNOLLEY, W. M. (1996): The Antarctic temperature inversion. *Int. J. Climatol.*, 16, 1333–1342.
- ČHMÚ (2014a): Základní aerologické měření [online]. [cit. 10. 9. 2014]. Dostupné na: http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/meteo/oa/sondaz_PTU_vitr.html
- ČHMÚ (2014b): Typizace povětrnostních situací pro území České republiky [online]. [cit. 1. 9. 2014]. Dostupné na: http://portal.chmi.cz/portal/dt?portal_lang=cs&menu=JSPTabContainer/P4_Historicka_data/P4_1_Pocasi/P4_1_12_Typizace_situaci&last=false
- DEVASTHALE, A., WILLEN, U., KARLSSON, K.-G., JONES, C. G. (2010): Quantifying the clear-sky temperature inversion frequency and strength over the Arctic Ocean during summer and winter seasons from AIRS profiles. *Atmos. Chem. Phys.*, 10, 5565–5572.
- DUCKWORTH, F. A., SANDBERG, J. S. (1954): The effect of cities upon horizontal and vertical temperature gradients. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 35, 198–207.
- HARTMANN, B., WENDLER, G. (2005): Climatology of the winter surface temperature inversion in Fairbanks, Alaska. Eighth Conference on Polar Meteorology and Oceanography, JP2.26, 1–7 [online]. [cit. 10. 2. 2014]. Dostupné na: <https://ams.confex.com/ams/pdfpapers/84504.pdf>
- IACOBELLIS, S., CAYAN, D., NORRIS, J., KANAMITSU, M., (2010): Impact of climate change on the frequency and intensity of low-level temperature inversions in California. Final report to the California Air Resources Board. Project 06-319. Scripps Institution of Oceanography, University of California San Diego, pp. 136.
- IYER, U. S., NAGAR, S. G. (2011): Variability in surface inversion characteristics over India in winter during the recent decades. *J. Earth Syst. Sci.*, 120, 73–84.
- KAHL, J. D. (1990): Characteristics of the low-level temperature inversion along the Alaskan Arctic coast. *Int. J. Climatol.*, 10, 537–548.
- KARPPINEN, A., JOFFRE, S. M., KUKKONEN, J., BREMER, P. (2001): Evaluation of inversions strengths and mixing heights during extremely stable atmospheric stratification. *Int. J. Environ. Pollut.*, 16, 1–12.
- KEDER, J. (1999): Detection of inversions and mixing height by REMTECH PA2 sodar in comparison with collocated radiosonde measurements. *Meteorol. Atmos. Phys.*, 71, 133–138.
- KŘIVANCOVÁ, S. (1991): Teplotní zvláštnosti Šumavy. *Meteorologické zprávy*, 44, 143–150.
- LI, Y., YAN, J., XINGBIN, S. (2012): Tropospheric temperature inversion over central China. *Atmos. Res.*, 116, 105–115.
- LUTGENS, F. K., TARBUCK, E. J. (1979): The atmosphere: An introduction to meteorology. Prentice-Hall, New Jersey, 413 s.
- PLAVCOVÁ, E., KYSELÝ, J. (2013): Projected evolution of circulation types and their temperatures over Central Europe in climate models. *Theor. Appl. Climatol.*, doi 10.1007/s00704-013-0874-4.

- RODIONOV, S. N. (2005): A brief overview of the regime shift detection methods. In: V. Velikova and N. Chipev (Eds.): Large-Scale Disturbances (Regime Shifts) and Recovery in Aquatic Ecosystems: Challenges for Management Toward Sustainability, UNESCO-ROSTE/BAS Workshop on Regime Shifts, 14–16 June 2005. Varna, Bulgaria, 17–24.
- SKŘIVÁNKOVÁ, P. (2000): Srovnávací měření dvou aerologických systémů firmy VAISALA. Meteorologické zprávy, 54, 97–102.
- SKŘIVÁNKOVÁ, P. (2004a): Ověřovací testy radiosond Vaisala RS92 v Praze-Libuši. Meteorologické zprávy, 57, 53–58.
- SKŘIVÁNKOVÁ, P. (2004b): Comparing GPS and Loran-C windfinding performance. Vaisala Radiosonde RS92 validation trial at Prague-Libus. Vaisala News, 164, 4–8.
- UNIVERSITY OF WYOMING (2013): Atmospheric soundings [online]. [cit. 5. 3. 2013]. Dostupné na: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>
- VOLNÁ, V., ČERNÍKOVSKÝ, L. (2005): Results of measurements by means of the SORAR-RASS system taken in Ostrava in the years 1998–2003 (in Czech). Meteorologické zprávy, 58, 171–175.
- WALDEN, V. P., MAHESH, A., WARREN, S. G. (1996): Comment on Recent changes in the North American Arctic boundary layer in winter“ by R. S. Bradley et al. J. Geophys. Res., 101, 7127–7134.
- ZHANG, Y., SEIDEL, D. J. (2011): Challenges in estimating trends in Arctic surface-based inversions from radiosonde data. Geophys. Res. Lett., 38, doi:10.1029/2011GL048728.
- ZHANG, Y., SEIDEL, D. J., GOLAZ, J.-C., DESER, C., TOMAS, R. A. (2011): Climatological characteristics of Arctic and Antarctic surface-based inversions. J. Clim., 24, 5167–5186.