

Analýza turbulentního proudění nad zalesněným terénem

Potužníková K., Sedlák P., Šauli P.

Ústav fyziky atmosféry AVČR v.v.i., Boční II/1401, 141 31 Praha 4 – Spořilov

Úvod

Turbulentní proudění v přízemní vrstvě atmosféry je významnou součástí globálního přenosu látek a energie mezi zemským povrchem a atmosférou. Jeho výzkum se v poslední době zaměřuje na studium turbulentních toků nad reálným terénem pokrytým vysokou vegetací. Přízemní vrstvu atmosféry uvnitř a nad vegetací lze rozdělit na dvě části s různým charakterem proudění vzduchu (Finnigan, 2000). Spodní část, dosahující od zemského povrchu zhruba do dvojnásobné až trojnásobné výšky vegetace, bývá označována jako vegetační drsnostní podvrstva. Na ni navazuje část přízemní vrstvy atmosféry, v níž jsou vertikální turbulentní toky s výškou prakticky konstantní a lze ji přibližně popsat známou Moninovou-Obuchovovou teorií podobnosti (Bednář, Zikmunda, 1985). Proudění uvnitř drsnostní podvrstvy je naopak velmi nehomogenní. Od osmdesátých let minulého století umožnily nové metody turbulentních měření jak pomocí třídimenzionálních sonických anemometrů, tak nejnověji pomocí dopplerovského sodaru (Thomas et al., 2006), prohloubit experimentální výzkum turbulentního proudění. Díky uvedeným metodám je možné zaznamenávat aktuální stav atmosféry s frekvencí řádově 1 až 10 Hz.

Turbulentní přenos nad zalesněným komplexním terénem se podstatně liší oproti proudění nad nízkou vegetací nebo nad rovinným terénem. Zdrojem turbulence je zde kromě výrazného stříhu větru na horní hranici porostu také stříh větru generovaný složitou morfologií a vysokou aerodynamickou drsností lesního porostu. Stříh větru na jedné straně vyvolává turbulentní víry velkých měřítek, na druhé straně urychluje proces disipace turbulentní kinetické energie, při němž se velké víry kaskádovitě rozpadají na víry stále drobnější. Doba úplné disipace kinetické energie na teplo je ale poměrně dlouhá díky tenké vrstvě stříhu vznikající v okolí listů. Dalším zdrojem turbulence je výrazný denní chod vlhkostní a radiální bilance lesního porostu. Většina solární radiace je v denních hodinách absorbována pouze přibližně horními 30% vegetační vrstvy, která v noci naopak intenzivně tepelně vyzařuje. Ve vzduchu uvnitř vegetace je takto generována termická turbulence spojená s emisí vnitřních gravitačních vln.

Projevem turbulence v drsnostní podvrstvě vysoké vegetace jsou kromě nepravidelných vysokofrekvenčních perturbací a nízkofrekvenčních oscilací také koherentní struktury (KS). Existence těchto jasně rozlišitelných, uspořádaných, aperiodicky se opakujících struktur byla prokázána v časovém vývoji polí rychlosti větru, teploty, tlaku i vlhkosti nad různými druhy porostu (Finnigan, 2000; Wesson et al., 2002; Collineau, Brunet, 1993). KS jsou dále charakteristické velmi výraznými amplitudami hodnot meteorologických veličin (v případě teploty bývají např. v průběhu jedné minuty zaznamenávány oscilace až o několik °C oproti průměrným hodnotám). Další zřetelnou vlastností koherentních struktur je jejich relativně dlouhá životnost (Turner et al., 1994). Podle (Gao et al., 1989) je pro KS navíc typické, že se objevují současně v časových řadách složek rychlosti větru i skalárních veličin a jsou identifikovatelné v několika měřených hladinách uvnitř vegetační podvrstvy. Konkrétní podoba KS se u různých veličin může lišit jak tvarem, tak i délkou pozorované periody. V časových řadách teploty bývají při indiferentním teplotním zvrstvení pozorovány aperiodické tzv. „ramp“ struktury charakteristické pozvolným nárůstem hodnot následovaným jejich prudkým poklesem. V časových řadách vertikální rychlosti bývají obvykle symetričtější trojúhelníkové struktury. Oba charakteristické tvary oscilací jsou vytvářeny nevýrazným výtokem teplého vzduchu z horních partií vegetace, který je ukončen vpádem chladnějšího vzduchu z oblastí nad vegetací. Cykly trvají od několika sekund až po několik minut.

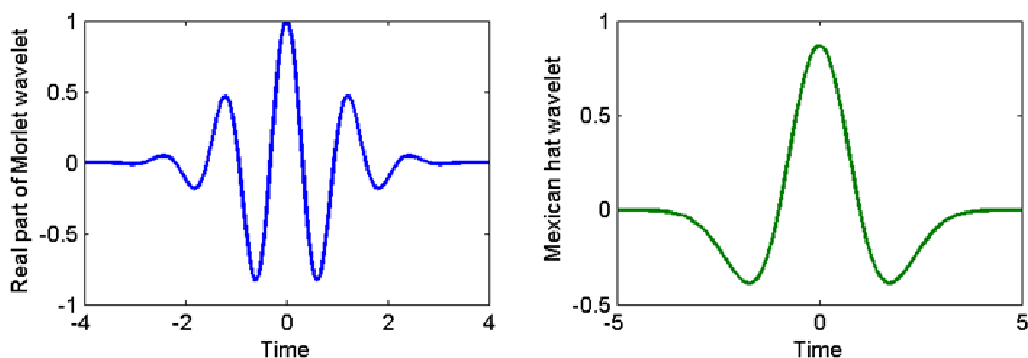
Význam studia koherentních struktur souvisí s jejich vysokým podílem na celkovém přenosu látek a energie mezi zemským povrchem a atmosférou. Ten může v některých případech převyšovat podíl kontinuálních toků zajišťovaných turbulentními víry malých měřítek. Ve studii (Gao et al., 1993) se uvádí, že při instabilním teplotním zvrstvení přispívají KS k celkové bilanci toků a hybnosti uvnitř lesa ze 70 - 80%. Nad vrcholky stromů se tento příspěvek snižuje, na úrovni dvojnásobné výšky vrstvy vegetace dosahuje hodnot 50 až 60%.

Waveletová analýza

Pro identifikaci koherentních struktur a určení jejich parametrů je velmi důležitá volba objektivní metody detekce, neboť signál reprezentující struktury může být velmi nepravidelný v čase a navíc narušený vysokofrekvenční pozadovou turbulencí. Ještě v relativně nedávné době bylo k detekci KS využíváno např. kvadrantové analýzy, nebo jiných statistických metod založených na časovém průměrování s proměnnou délkou intervalu (Gao et al., 1989). Při použití uvedených metod je však kvalita získaných dat vždy závislá na výběru délky časového intervalu a na vhodně zvolených okrajových podmínkách, proto jsou v současné době využívány pouze doplňkově.

Waveletová analýza poskytuje informaci jak o časovém vývoji, tak o frekvenčním složení studovaného signálu. Umožňuje rozpoznat a zároveň sledovat časový vývoj dominantních struktur (typu turbulentních vírů, nebo např. gravitačních vln) různých měřítek, (Torrence, Compo, 1998). Matematický popis metody založené na *waveletové transformaci* včetně jejího využití k analýze turbulentního proudění nad vegetací lze nalézt ve studii (Thomas, Foken, 2004). V češtině byla waveletová transformace v aplikaci na klimatologická data popsána v článku (Pišoft, Kalvová, 2005). Na stránkách Úpického sborníku byla pomocí waveletové transformace interpretována ionosférická měření (Šauli at al., 2005). V našem příspěvku uvádíme pouze slovní charakteristiku základního principu metody analýzy dat založené na waveletové transformaci:

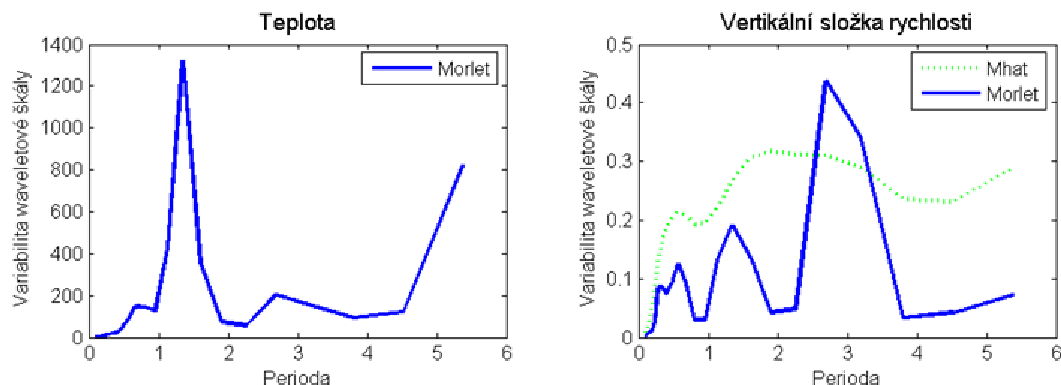
Waveletová transformace převádí spojitý časový signál do pole dvou proměnných – měřítka, které lze pro daný wavelet jednoznačně přepočítat na periodu oscilace, a polohy, která určuje okamžik výskytu oscilace. K úspěšné časové lokalizaci oscilací a k přesnému určení jejich měřítka je nutné vhodně zvolit tzv. mateřský wavelet (v překladu „vlnku“). Tvar waveletu je vybírán tak, aby vystihoval skutečný průběh oscilací. Změnou měřítka mateřského waveletu jsou generovány tzv. dceřiné wavelety, pomocí kterých lze v signálu (posuvem podél signálu) lokalizovat tvarem navzájem podobné oscilace s různě velkou periodou. Na Obr. 1 jsou zobrazeny tvary dvou waveletů, s nimiž pracujeme při analýzách turbulentního proudění na Bílém Kříž. Dva různé typy waveletů používáme proto, že výsledky waveletové transformace podléhají principu neurčitosti – čím přesněji známe polohu (časový výskyt) oscilace, tím vzrůstá nejistota v určení periody. Pro přesné stanovení periody oscilací se nám osvědčilo použití komplexního Morletova waveletu. Wavelet Mexican hat (Mhat) využíváme k potvrzení výskytu dané periody a ke zpřesnění okamžiku jejího výskytu.



Obr. 1: Wavelety používané při analýzách turbulentních měření na Bílém Kříž.

Na Obr. 2 je uveden příklad analýzy dvou nestacionárních časových řad dat s využitím programu (Torrence, Compo, 1998). Jedná se o půlhodinovou časovou řadu teploty a vertikální složky rychlosti větru, které byly naměřeny pomocí třídimenzionálního sonického anemometru umístěného těsně nad vegetací ve výzkumné lokalitě Bílý Kříž (viz následující odstavec). Zhruba v polovině časového intervalu jsou v polích výkonového spektra velmi zřetelné struktury se zhruba 70 s periodou. Objevují se jak v analýze teploty, tak i ve výkonovém spektru vertikální složky rychlosti, a lze je tudíž označit za koherentní struktury.

K přesnějšímu určení charakteristických period koherentních struktur je kromě výše uvedených grafických výstupů dále využíván graf závislosti variability (proměnlivosti) waveletového spektra na periodě (Obr. 3). Metoda vychází z vlastností waveletové transformace, kde hodnota variability jednoho z parametrů waveletové funkce – měřítka - udává relativní intenzitu (ostrost) struktur různých měřítek. Výrazná lokální maxima variability proto korespondují s charakteristickými periodami KS.



Obr. 3: Bílý Kříž 22.6. 2004 4:00 – 4:30: Analýza period nízkofrekvenčních koherentních struktur ze spektra variability waveletové škály.

Studie proudění na Bílém Kříži

V tomto odstavci představíme výsledky analýz turbulentních měření z výzkumné lokality Ústavu systémové biologie a ekologie krajiny AV ČR Bílý Kříž v Moravskoslezských Beskydech. Experimentální pozemek, na kterém se provádí měření, se nachází v blízkosti horského hřebene na poměrně prudkém svahu se sklonem 13°, který je orientován JJZ směrem. Na pozemku byla na ploše 6,15 ha v roce 1981 vysázena monokultura smrkového porostu; v průběhu analyzovaného období vzrostl z původní 10 m výšky na 12 m. K waveletovým analýzám turbulence využíváme měření složek rychlosti větru a teploty vzduchu pomocí třídimenzionálních akustických anemometrů. K analýze vlivu lokálních cirkulačních systémů máme k dispozici navíc měření vertikálního profilu teploty, vlhkosti vzduchu a rychlosti větru na meteorologickém stožáru od zemského povrchu do 21 m; měření globální radiace a radiační bilance.

Proudění nad měřicím stanovištěm je ovlivňováno složitou orografií, (Havránková, Sedlák, 2004). Měřicí stanoviště se nachází téměř na vrcholu výrazného horského hřebene s mělkým sedlem. V lokalitě celoročně výrazně převládají jižní směry proudění, v četnosti výskytu následované severními směry. Pro rychlosti větru větší než 3 m/s se dokonce vyskytují výlučně jižní směry proudění směřující po svahu vzhůru. V podkorunové vrstvě obvykle dochází v nočních hodinách ke katabatickému stékání vzduchu, které zaniká pouze působením relativně silného jižního, tzn. výstupného, proudění nad vegetací. Výjimkou nejsou případy vzájemně zcela opačných směrů proudění v podkorunové vrstvě a nad porostem.

Analýza turbulentního proudění na Bílém Kříži probíhá ve dvou postupných krocích. *Výsledky získané zpracováním dat naměřených v jedné hladině* bezprostředně nad smrkovým porostem prokázaly existenci nízkofrekvenčních oscilací jak v časových řadách teploty, tak i v časových řadách složek rychlosti větru. Periody oscilací detekovaných u vertikální složky rychlosti jsou obecně kratší než u teploty. Příčinou je zřejmě požadová vysokofrekvenční turbulence, která se podílí na lokálních změnách vertikální rychlosti, narušuje hranice mezi výstupnými a sestupnými pohyby a redukuje tak šířku ostře definovaných částí organizovaných struktur. Dále byl studován vliv směru a rychlosti zprůměrovaného horizontálního proudění nad porostem na periody, četnost výskytu a celkovou dobu trvání nízkofrekvenčních oscilací. Závětný efekt spjatý se severním prouděním se jednoznačně projevuje zkrácením periody a zvýšením četnosti oscilací. Rychlost proudění měřená těsně nad vegetací má překvapivě nevýrazný vliv na velikost period oscilací, vyšší rychlosti větru však způsobují častější výskyt a delší dobu trvání oscilací a to nezávisle na směru proudění. *V současné době zpracováváme data ze tří hladin* ($z/h = 0.3, 0.5$ a 1 , kde h je výška vegetace) měřených při různých atmosférických podmínkách v průběhu září a října 2006. Srovnání waveletových analýz dlouhých (několikahodinových) časových řad vypovídá o uspořádanosti vertikálního turbulentního přenosu uvnitř vegetace. Při slabém proudění jsou ve spodních dvou hladinách detekovány termické koherentní struktury s periodami kolem 120 a 300 s. Díky stříhu větru na horní hranici vegetace se při jižním proudění objevují v horních dvou hladinách KS s periodami o velikostech mezi 25 a 60 s, a to nezávisle na teplotním zvrstvení uvnitř vegetace.

Závěr

Analýza turbulentních měření na Bílém Kříži založená na metodě waveletové transformace prokázala existenci nízkofrekvenčních oscilací. Ve shodě s publikovanými výsledky zpracování dat naměřených v různých zalesněných lokalitách, zahrnutých do evropského projektu CarboEurope, se nezávisle na stabilitě zvrstvení vyskytují řádově 10 s oscilace vyvolané stříhem větru na horní hranici vegetace. V podmínkách Bílého Kříže se délka periody těchto oscilací i četnost jejich výskytu mění v závislosti na dvou převládajících směrech zprůměrovaného horizontálního proudění nad porostem. Především v nočních a ranních hodinách byly pozorovány výrazné oscilace termického původu, které svým vertikálním rozsahem několikanásobně přesahují tloušťku vegetační vrstvy.

Do budoucna je naším cílem kromě popisu uvedených oscilací také stanovení jejich podílu na celkovém přenosu mezi vegetací a atmosférou. Předpokládáme, že na základě uvedených poznatků budeme jednou schopni zásadně zpřesnit například výpočty bilance toků CO₂.

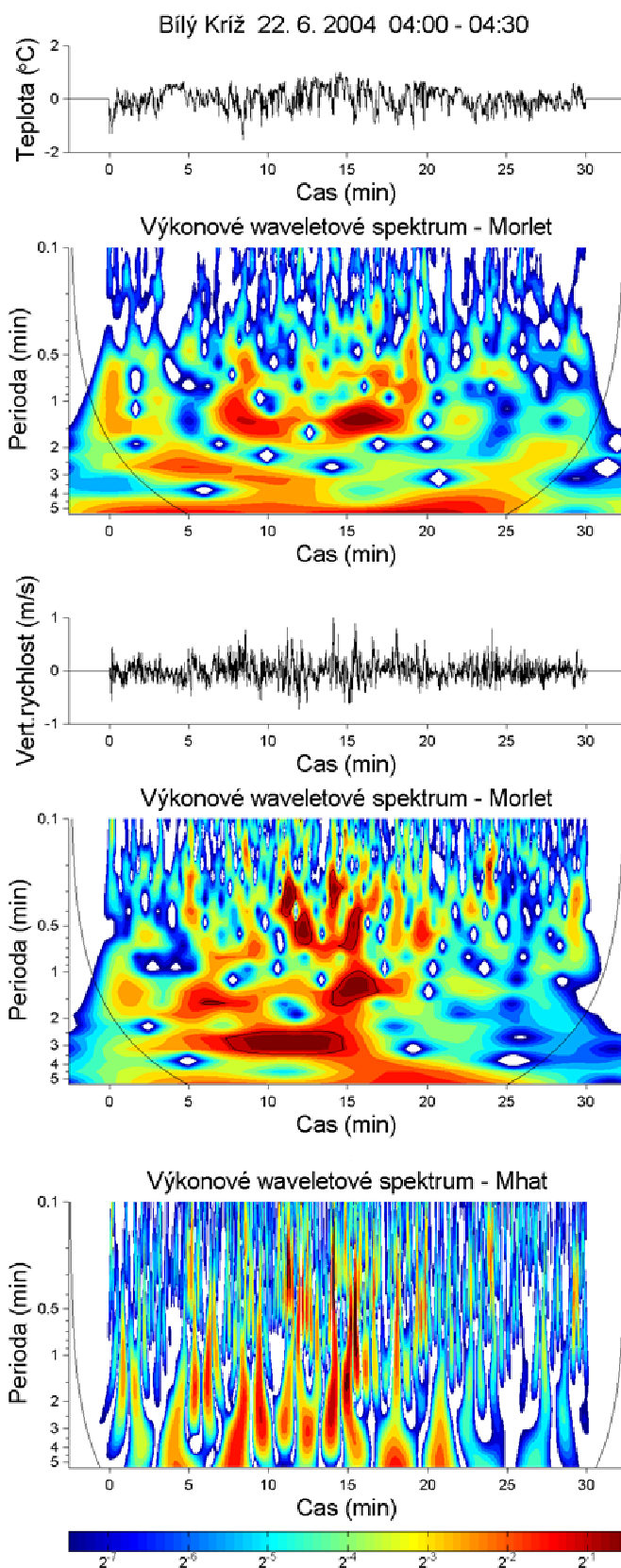
Poděkování

Autoři děkují Ústavu systémové biologie a ekologie krajiny AV ČR za laskavé poskytnutí dat pro tuto práci, která vznikla za podpory projektů GA ČR 205/05/P564 a 205/06/1619.

Literatura

- Bednář J., Zikmunda O., 1985: Fyzika mezní vrstvy atmosféry. *Academia (Praha)*, 245 pp.
Collineau S., Brunet Y., 1993: Detection of turbulent coherent motions in a forest canopy. Part II: Time-scales and conditional averages. *Boundary-Layer Meteorol.*, **66**, 49-73.
Finnigan J., 2000: Turbulence in plant canopies. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, **32**, 519-571.
Gao W., Li B.L., 1993: Wavelet Analysis of Coherent Structures at the Atmosphere-Forest Interface. *J. Appl. Meteorol.*, **32**, 1717-1725.

- Gao W., Shaw R.H., Paw U K.T., 1989: Observation of organized structure in turbulent flow within and above a forest canopy. *Boundary-Layer Meteorol.*, **47**, 349-377.
- Havránková K., Sedlák P., 2004: Wind velocity analysis for mountainous site Bílý Kříž. *Ekológia (Bratislava)*, **23** (Suppl. 2), 46-54.
- Pišoft. P., Kalvová J., 2005: Wavelet analýza v meteorologii: Teorie a přehled dosavadních výsledků. *Meteorol. Zpr.*, **58**, 1-6.
- Šauli P., Abry P., Boška J., Potužníková K. A., 2005: Charakterizace akusticko-gravitačních vln na základě Fourierovy a Waveletové analýzy pozorovaných v elektronové koncentraci měřené pomocí vertikálního ionosférického sondování. *Sborník referátů z 26. konference „Člověk ve svém pozemském a kosmickém prostředí“*, Úpice, Czech Republic.
- Thomas Ch. and Foken T., 2004: Detection of long-term coherent exchange over spruce forest using wavelet analysis. *Theor. Appl. Climatol.*, DOI 10.1007/s00704-004-0093-0.
- Thomas Ch., Mayer J. Ch., Meixner F. X. and Foken T., 2006: Analysis of low-frequency turbulence above tall vegetation using a doppler sodar. *Bound.-Layer Meteor.*, DOI 10.1007/s10546-005-9038-0.
- Torrence Ch., Compo G.P., 1998: A practical guide to wavelet analysis with significance and confidence testing. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, **79**, 61-78.
- Turner B.J., Leclerc M.Y., Gauthier M., Moore K. E. and Fitzjarrald D. R., 1994: Identification of turbulence structures above a forest canopy using a wavelet transform. *Journal of Geophysical research*, **99**, 1919-1926.
- Wesson K. H., Katul G. G., Siqueira M., 2002: Quantifying organization of atmospheric turbulent eddy motion using nonlinear time series analysis. *Bound.-Layer Meteor.*, **106**, 507-525.



Obr. 2: Ukázka waveletové analýzy časové řady teploty a vertikální rychlosti. Nahoře je vynesena záznam teplotní časové řady. Pod ním je zobrazen výsledek její waveletové analýzy v poli tzv. výkonového waveletového spektra spočtený pomocí Morletova waveletu. Následuje časová řada vertikální složky rychlosti a její výkonové waveletové spektrum spočtené nejprve pomocí Morletova waveletu, a dále pomocí waveletu Mexican hat. Rozsah period hledaných struktur je 6 s až 10 min. Zvýrazněny jsou oblasti s více než 95 % pravděpodobností výskytu koherentních struktur. Černá křivka ve spodní části výkonového waveletového spektra se nazývá „zóna vlivu“ (z anglického „cone of influence“). Vymezuje oblast, pod kterou se může projevit hraniční efekt a vliv nedostatečného množství vzorků pro analýzu.