

Detekce pohybů supergranulárních struktur

M. Švanda, *Astronomický ústav Univerzity Karlovy v Praze,
Česká republika, svanda@asu.cas.cz*

M. Klvaňa, *Astronomický ústav Akademie věd České republiky,
observatoř Ondřejov, Česká republika, mklvana@asu.cas.cz*

M. Sobotka, *Astronomický ústav Akademie věd České republiky,
observatoř Ondřejov, Česká republika, msobotka@asu.cas.cz*

Abstrakt:

V práci popisujeme vlastní metodu určování horizontálních rychlostních polí ve sluneční fotosféře, založenou na sledování pohybu supergranulárních struktur. Pohyby supergranulárních struktur vyhledáváme metodou LCT (Local Correlation Tracking). Supergranulární struktury získáváme zpracováním dopplerogramů, měřených přístrojem MDI družice SoHO. Zjistili jsme, že hledané pohyby mohou být pod úrovní šumu a proto dále popisujeme způsob jeho odstranění. Uvádíme hodnoty parametrů pro LCT, které jsme určili na základě numerických testů. Výsledky, získané popisovanou metodou, demonstrujeme na rychlostním poli celého slunečního disku bez výrazných magnetických polí a projevů fotosférické aktivity a na křivkách diferenciální rotace a meridionální cirkulace. Diskutujeme přednosti a nedostatky metody a námi získané výsledky.

1. ÚVOD

Dynamika sluneční fotosféry je obestřena četnými tajemstvími již od dob prvních vizuálních pozorování. Nejzřetelnějším a nejdéle známým projevem je diferenciální rotace, která je historicky popisována Fayovou formulí ve tvaru:

$$\omega = A + B \sin^2 b + C \sin^4 b \quad (1)$$

kde ω je průměrná úhlová rotační rychlost v pásu heliografické délky b . Diferenciální rotace není hydrodynamickou veličinou, nýbrž pouze popisuje průměrnou rotační rychlost objektů, z nichž byla změřena. Koeficienty A , B a C rovnice (1) se ze změřené závislosti úhlové rotační rychlosti $\omega(b)$ získávají metodou nejmenších čtverců. Více o měření diferenciální rotace viz Ambrož (1980).

Hydrodynamickým fenoménem největších rozměrů je bezpochyby meridionální cirkulace, mohutný podfotosférický proud roztékající se od rovníku směrem k pólům rychlostí s amplitudou řádu 20 m/s (přehled DeRosa (2001)). Četné teoretické modely Rüdiger a Kükera (např. Küker a Rüdiger (2002)) ukazují, že sama existence meridionálního proudění v součinnosti s Coriolisovou silou je dostačující k vysvětlení pozorované diferenciální rotace.

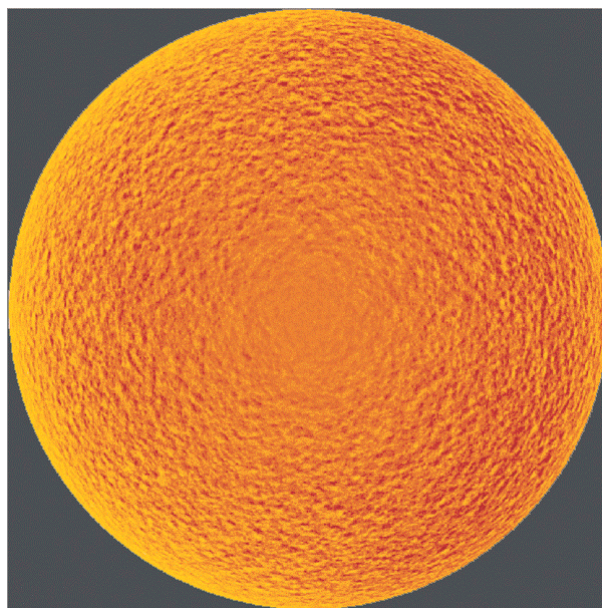
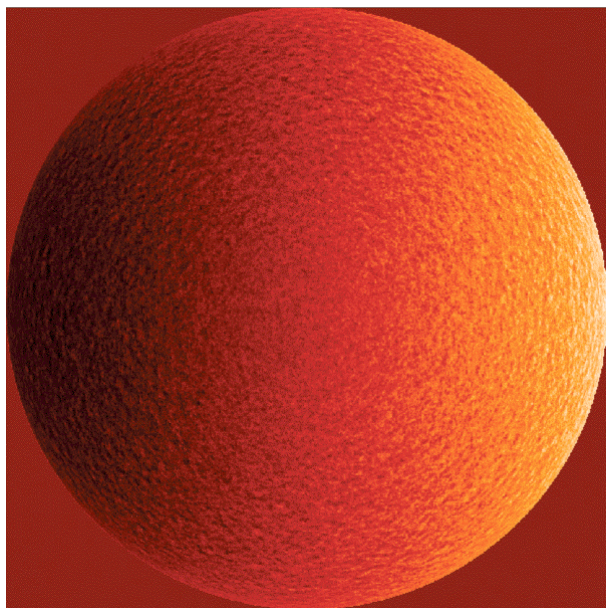
Zmíněné velkorozměrové rychlostní struktury mají ovšem velmi nízkou vypovídací hodnoty o pohybech na nižších škálách. Zvláště nás tíží vzájemná kvalitativní vazba mezi rychlostními a magnetickými poli.

Na konci roku 1995 byla do libračního bodu L_1 vypuštěna automatická sluneční observatoř SoHO, která poskytuje homogenní materiál pro systematické studie. Rozhodli jsme se využít sérii dopplerogramů *Dynamics program* pozorovaných na přístroji MDI, které byly původně určeny pro studium slunečních oscilací. V těchto obdobích (vždy cca 2 měsíce během roku) byly pořizovány celodiskové dopplerogramy s vysokou kadencí (po jedné minutě), což poskytuje jedinečný materiál.

2. METODY MĚŘENÍ RYCHLOSTNÍCH POLÍ

Pozorování rychlostních polí ve sluneční fotosféře hraje klíčovou roli při studiu dynamiky turbulentní konvekce. V zásadě existují tři metody, které umožňují studovat pohyb hmoty:

- *Přímé dopplerovské měření*, které obecně popisuje jen jedinou složku obecně tříložkového vektoru rychlosti – průmět do směru k pozorovateli. Mnohé z objevů sluneční fyziky byly učiněny na základě přímého dopplerovského měření, např. supergranulace (Leighton et al, 1962), nicméně jeho použití pro studium horizontálních rychlostních polí je poněkud problematické, protože bychom museli zavést předpoklady o zbyvajících dvou složkách vektoru.



Obr. 1: Vlevo – primární dopplerogram stažený z archívu MDI/SoHO. V dopplerogramu jsou obsaženy různé rušivé projevy, především sluneční rotace a pětiminutové oscilace, struktura supergranulární sítě je potlačena. Vpravo – redukovaný dopplerogram, z něhož byly zmíněné rušivé efekty odstraněny. Zde převládá signál supergranulace, jejíž síť je docela dobře patrná. Tmavé oblasti na obou obrázcích znamenají pohyb k pozorovateli, světlé oblasti pohyb od pozorovatele.

- Využití *helioseismologické inverze*, která poskytuje informace o celém vektoru rychlosti. Je však výpočetně velmi náročná a díky tomu obtížně aplikovatelná na systematické studie.
- Dvě složky vektoru poskytuje *sledování tracerů*. Rychlostní pole může být odvozeno ze sledování dobře definovaných struktur (tracerů) a pokud známe prostorovou dráhu těchto objektů (v našem případě půjde o povrch koule), můžeme vypočítat úplný vektor rychlosti. V zásadě existují dva různé přístupy – *feature tracking* a *local correlation tracking*.

V této práci používáme metodu local correlation tracking (LCT), navrženou Novemberem a Simonem (1988). Tato metoda umožňuje vypočítat rychlostní pole ze sekvence dvojrozměrných dat na základě algoritmu „nejlepší shody“. Program pracuje tak, že v okně volitelné velikosti koreluje zpracovávaný obraz s obrazem referenčním a zjišťuje subpixelový vektor posuvu okna v obou obrazech tak, aby bylo dosaženo maximální korelace. Výsledkem procedury je dvojsložková mapa vektorů popisující rychlost v každém bodě vstupního obrazu. Pro analýzu používáme program `flowmaker.pro`, napsaný v jazyce IDL (Molowny-Horas, 1994). Algoritmus aplikujeme na obraz supergranulární sítě v sekvenci celodiskových dopplerogramů.

Supergranulaci jsme zvolili pro její časovou stálost (střední životnost udávaná v literatuře je 24 hodin) a také kvůli tomu, že pokrývá rovnoměrně celý sluneční disk (vlastnosti supergranulace viz Wang & Zirin, 1989). Studie je vázána na předpoklad, že supergranule jsou ve fotosféře unášeny rychlostním polem většího

rozměru, které může mít původ například v konvektivních pohybech většího rozměru (např. v obřích buňkách, o nichž pojednává např. Stix (1989), případně novější studie Moore et al (2000)).

Primární data je nutné nejdříve připravit, neboť se v nich vyskytuje velké množství rušivých vlivů a aplikace LCT přímo na primární dopplerogramy vede k falešným výsledkům.

Metoda LCT byla s úspěchem použita při studiu velkorozměrových rychlostních polí ze sekvence map pozadových magnetických polí (Ambrož, 2001a, 2001b a 2002).

3. METODIKA ZPRACOVÁNÍ DAT

Pro tuto práci jsme využili jednu patnáctidenní sérii z Dynamics program, pokrývající období 26. 5.–9. 6. 1996. Zdrojová data jsou uložena jako dvojrozměrná pole 1024×1024 pixelů ve formátu FITS v datovém archívu University ve Stanfordu a jsou přístupná přes služby sítě internet. Popisovaná datová série se vyskytuje v období minima sluneční činnosti, kdy byla ve fotosféře jen pozadová magnetická pole.

Metodiku redukce dat lze shrnout do několika bodů:

1. *Odstranění chybných snímků:* I přes neporovnatelnou kvalitu dat z MDI jsou některé snímky postiženy výpadky řádků. Takové snímky z datové řady odstraňujeme.
2. *Odstranění sluneční rotace:* V dopplergramech se dominantně projevuje sluneční rotace, jejíž amplituda na rovníku činí $v_{rot}=1855$ m/s. Tento projev v dopplergramu odstraňujeme na základě

modelového výpočtu dopplerovského profilu Carringtonovy rotace. Pro každý bod disku lze její hodnotu vypočítat ze vzorce:

$$v_c = -v_{rot} \sin \alpha \cos \delta \cos b_0 \quad (2)$$

kde α a δ jsou heliografická délka a heliografická šířka odečítaná od středu slunečního disku a b_0 je heliografická šířka středu slunečního disku v Carringtonově souřadnicovém systému.

3. *Odstranění oscilací:* Pětiminutové oscilace jsou nežádoucím rušivým projevem, které zásadním způsobem narušují obraz supergranulace v dopplerogramech. Jejich odstranění provádíme na základě váhovaného průměru přes 31 minut s vzorkováním výsledných snímků po 15 minutách. Tento přístup potlačuje pětiminutové oscilace více než o dva řády (Hathaway, 1988). Jednotlivé snímky průměrované série je třeba upravit tak, aby jejich l_0 (heliografická délka středu slunečního disku) byla stejná – je třeba kompenzovat carringtonovskou rotaci. Popis algoritmu viz Klvaňa et al (2002).
4. *Korekce na přístrojové chyby:* Hathaway et al (2002) upozornil na chybnou kalibraci přístroje MDI, který v dopplerogramech špatně počítá rychlosti směrem k okraji disku a navrhli korekci, kterou aplikujeme na redukovaná data i my. Současně opravujeme dopplerovskou rychlost o pohyb SoHO kolem libračního bodu – tato hodnota je uložena přímo v hlavičce dat pod klíčovým slovem VCOR.
5. *Úprava dat:* Před dalším zpracováním je nutné kompenzovat carringtonovskou rotaci, čili je přepočítat tak, aby jejich l_0 bylo stejné. Dále redukovaná data přepočítáváme z projekce do disku do pravoúhlé souřadnicové sítě $b-l$, čímž zamezujeme ovlivnění LCT geometrickým zkreslením.
6. *Filtrace dat:* V redukovaných dopplerogramech sice převládá signál supergranulace, přesto v nich nadále zůstává velké množství šumu. Původ toho šumu musíme hledat ve zbytkovém signálu skupin granulí (které jsou jinak pod rozlišovací schopností dat) a hlavně v morfologických změnách samotné supergranulární sítě, spočívající ve změně tvaru, vzniku a zániku. Tyto změny jsou algoritmem LCT interpretovány jako pohyb a narušují tak zásadním způsobem vypočtená rychlostní pole. Tento šum má vysokofrekvenční charakter, proto jej můžeme odstranit aplikací filtru ve Fourierově doméně. Zvolili jsme odstranění fázových rychlostí přesahujících hodnotu $v_{ph}=0,7$ km/s. Pro tento účel používáme program `bigsonic.pro` (Hirzberger et al, 1997).

Výsledkem celé procedury jsou redukované dopplerogramy vhodné pro aplikaci LCT. Data jsou uložena jako dvojrozměrná pole 1520×1520 pixelů v celočíselné reprezentaci s vzorkováním 15 minut, což znamená datový objem přibližně 420 MB za den (96 snímků za den).

4. PARAMETRY LCT

Metoda local correlation tracking je mocným nástrojem pro výpočet dvojrozměrných rychlostních polí. Má však několik volných parametrů, jejichž volba zásadním způsobem ovlivňuje výsledek výpočtu. Pro účely stanovení jejich hodnot jsme zkonstruovali numerické testy, vycházející z histogramů výsledných rychlostních polí, jejich hladkosti a reprodukovatelnosti. Prováděli jsme též testy na umělých rychlostních polích, které nám poskytly informaci o vhodnosti kombinace metody a dat.

V této práci jsme pro LCT použili následující hodnoty volných parametrů:

- Korelační okno jsme zvolili s gaussovským průběhem s pološířkou 200“.
- Časová vzdálenost korelovaných obrazů v porovnávané dvojici nabývá hodnoty 4 hodin.
- Parametr *shift*, charakterizující maximální nalezitelné posuvy a současně popisující do jisté míry přesnost vypočtených polí, používáme s hodnotou 1 pixel (2“).

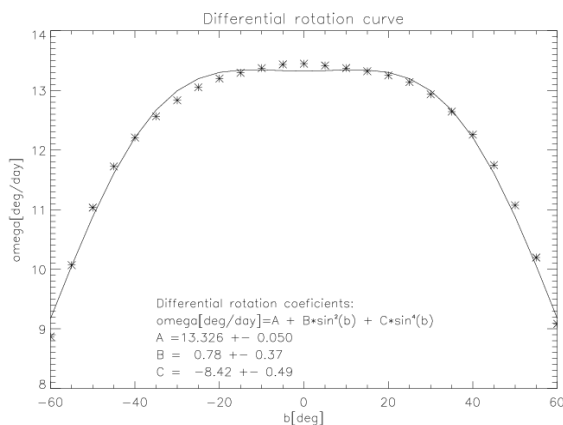
5. ZOBRAZOVÁNÍ

Získaná rychlostní pole je nutné kvůli analýze a interpretaci nějakým způsobem vizualizovat. Podle typu analýzy používáme tři druhy zobrazení:

1. Zobrazení rychlostního pole *orientovanými úsečkami (vektory)* je nejjednodušší a přitom přehledné. Postrádá však informaci o dynamice systému a návaznosti jednotlivých částí rychlostního pole.
2. Zobrazení pomocí dlouhých proudnic s konstantním krokem. Jde v podstatě o nefyzikálně dlouhou integraci statického pole, která nám však dává přehled o návaznostech jednotlivých částí a také topologických strukturách v rychlostních polích. Toto zobrazení používáme nejčastěji.
3. Zobrazení pomocí krátkých proudnic s krokem úměrným amplitudě rychlosti kombinuje obě předchozí zobrazení. Popisu používaných proudnic se věnuje jiný referát v tomto sborníku (Klvaňa, Švanda & Bumba, 2004).

6. VÝSLEDKY

Jak již bylo napsáno, zpracovali jsme jednu kontinuální patnáctidenní sérii (26. 5.–9. 6. 1996) dat pořízených přístrojem MDI/SoHO. Vytvořili jsme modulární programový balík v jazyku IDL, který umožňuje automatickou redukci těchto vstupních dat do podoby, která je již použitelná pro analýzu horizontálních rychlostních polí.

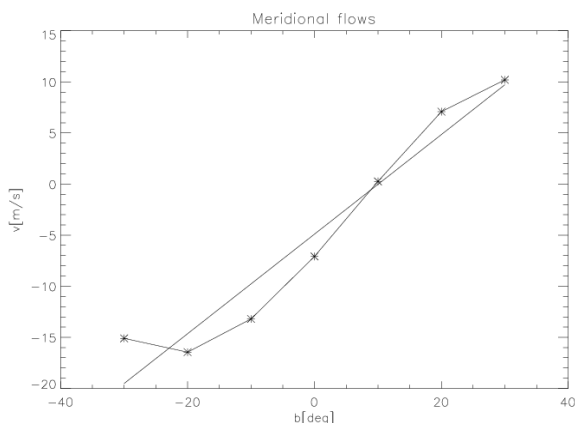


Obr. 2: Závislost průměrné zonální rychlosti na heliografické šířce dne 26. 5. 1996. Průměrná rychlost byla počítána v pět stupňů širokých pásech heliografické šířky v rozsahu -60° až $+60^\circ$. Čarou je proložena křivka synodické diferenciální rotace podle rovnice (1) a sepsány hodnoty regresních koeficientů rovnice (1) v oblíbených jednotkách „stupně za den“.

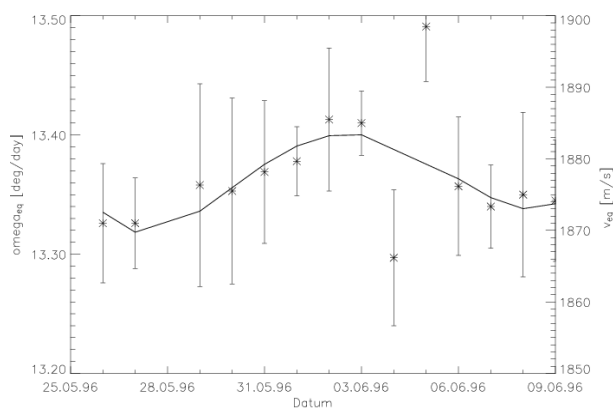
Na redukovanou datovou řadu jsme aplikovali program implementující algoritmus LCT s parametry, které jsou popsány v kapitole 5. Z důvodu snížení šumu a potlačení lokálních změn jsme vypočtená rychlostní pole ustředili vždy přes jeden den.

Ze získaných horizontálních rychlostních polí jsou bez problémů prokazatelné integrální projevy – tedy diferenciální rotace a meridionální cirkulace. Příklady vypočtených křivek diferenciální rotace a meridionální cirkulace jsou na obr. 2 a 3.

Věnujme se dále koeficientu A rovnice (1), který popisuje průměrnou rotační rychlost v těsném okolí slunečního rovníku. Na obr. 4 je vidět vývoj tohoto koeficientu během zpracované patnáctidenní série.



Obr. 3: Závislost meridionální složky rychlosti na heliografické šířce dne 26. 5. 1996. Průměrná rychlost byla počítána v pět stupňů širokých pásech heliografické šířky v rozsahu -30° až $+30^\circ$. Je patrné, že dochází k roztékání směrem od rovníku k pólům, což je zdůrazněno proložením přímkou metodou nejmenších čtverců. Křivky konstruované pro jiné dny vypadají velmi podobně.



Obr. 4: Vývoj koeficientu A rovnice (1) v průběhu zpracované série. Koeficient pro 28. 5. 1996 je mimo rozsah grafu. Spojitá křivka vznikla z důvodu zdůraznění trendu proložení polynomu čtvrtého stupně, přičemž byly vynechány odlehle hodnoty z 28. 5., 4. 6. a 5. 6. 1996. Na svislé ose je vynesena jak úhlová, tak i lineární rotační rychlost na rovníku

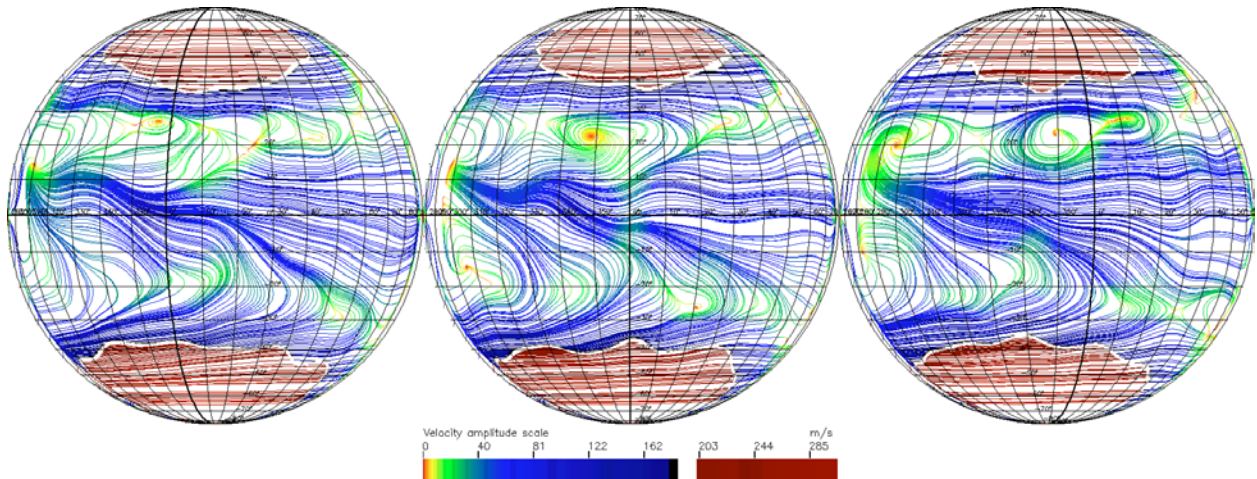
Vynecháme-li odlehle hodnoty, můžeme datovou řadu proložit pro zvýraznění např. polynom 4. stupně. Z grafu je patrné, že průměrná rotační rychlost na rovníku dosáhla svého maxima mezi 2. 6. a 3. 6. 1996, kdy tato hodnota narostla o přibližně 10 m/s. To může být náznakem rychlostní struktury velkého rozměru, v současnosti však nemáme k dispozici dostatek dat, abychom tuto domněnku potvrdili, nebo vyvrátili.

Podobné trendy se vyskytují i v časových vývojech koeficientů B a C rovnice (1) a extrém jejich závislosti nastává vždy v již zmíněném intervalu 2. 6. až 3. 6. 1996. Tento fakt považujeme za velmi zajímavý a budeme se mu dále věnovat.

Série tří po sobě jdoucích rychlostních map je zobrazena na obr. 5. Je zvoleno zobrazení dlouhými proudnicemi, kde barevná škála poskytuje informaci o celkové amplitudě rychlosti v daném místě. Na těchto mapách prezentujeme obecné vlastnosti horizontálních rychlostních polí vypočtených navrženou metodou.

Vektorová pole lze rozdělit podle vlastností do tří skupin:

- *Oblast vysokých heliografických šířek* (40° a vyšších) vykazuje zřetelné a reprodukovatelné zonální proudění ve směru od západu k východu vzhledem k Carringtonovu souřadnicovému systému s typickou amplitudou rychlostí 150–250 m/s.
- V *oblasti rovníku* v pásu -10° až $+10^\circ$ heliografické šířky se typicky vyskytuje proudění ve směru od východu k západu vůči Carringtonovu systému s amplitudou 100–150 m/s. V této oblasti dominuje zonální složka vektoru rychlosti, zatímco meridionální složka je prakticky o řád menší. Zdá se, že některé rychlostní mapy jsou v této oblasti narušeny efektem středu disku, kde horizontální pohyby probíhají kolmo na směr k pozorovateli, což se projeví změnou kontrastních poměrů v dopplerogramu. To zřejmě ovlivňuje činnost LCT.



Obr. 5: Topologický systém proudnic ve třech po sobě jdoucích dnech – vlevo 31. 5., uprostřed 1. 6. a vpravo 2. 6. 1996. Všechny mapy byly získány shodným způsobem popsáním v textu referátu. Zajímavá je oblast nulové rychlosti na souřadnicích $l \sim 80^\circ$, $b \sim 15^\circ$, která se zřetelně reprodukuje ve všech třech mapách, ale v každé z nich vypadá topologický systém proudnic odlišně.

Výsledkem je „propojení“ systému proudnic ze severní na jižní polokouli a opačně. V současnosti si nemyslíme, že by toto propojení odpovídalo reálným pohybům ve fotosféře.

- V oblasti středních heliografických šířek (ohraničených oběma výše popsanými oblastmi) se vyskytuje proudění, které obsahuje zonální i meridionální složku. V této oblasti klesají amplitudy rychlostí pod 40 m/s vůči Carringtonovu systému, v oblastech s rychlostmi menšími než 10 m/s se často tvoří víry, jejichž reprodukovatelnost v po sobě následujících mapách je nízká (viz obr. 4). Topologický systém proudnic zde podléhá rychlým změnám. V současnosti nejsme schopni rozhodnout, zda se jedná o změny reálné (pak je potřeba najít příčinu tak rychlé proměnnosti), nebo jde o artefakt použitých filtrací.

7. ZÁVĚR

Navrhli a zpracovali jsme metodiku výpočtu horizontálních rychlostních polí určených na základě sekvence dopplerogramů ze SoHO/MDI. Získané prozatímní výsledky nás přesvědčují, že je tato metodika dostatečně použitelná pro systematické studie pohybů plazmatu ve fotosféře. Přesto je zde několik problémů, které je zapotřebí vyřešit.

Máme v úmyslu navrženou metodiku zpracovat všechna dostupná data z *Dynamics Program* a využít je ke studiu vazeb magnetických a rychlostních polí. Systematická kvalitativní studie by mohla pomoci objasnit otázky dynamiky vrchních částí konvektivní zóny nebo pohybu sluneční skvrn vůči okolnímu plazmatu.

Poděkování

Rádi bychom poděkovali Grantové agentuře ČR za grant 205/04/2129 a GAAV ČR A3003404 za jejichž podpory byla tato práce realizována. Data byla poskytnuta konzorciem SoHO/MDI. SoHO je projekt mezinárodní spolupráce mezi ESA a NASA.

Literatura

- Ambrož, P.: 1980, Zborník referátov z 5. Celoštátného seminára, p. 65
 Ambrož, P.: 2001a, Sol. Phys., **198**, 253
 Ambrož, P.: 2002a, Sol. Phys., **199**, 251
 Ambrož, P.: 2002, ESA SP-506: Solar Variability: From Core to Outer Frontiers, 827
 DeRosa, M. L.: 2001, Dynamics in the Upper Solar Convection Zone, Ph.D. Thesis, University of Colorado
 Hathaway, D.: 1988, Sol. Phys., **117**, 1
 Hathaway, D., Beck, J. G., Han S. & Raymond, J.: 2002, Sol. Phys., **205**, 25
 Hirzberger, J., Vazquez, M., Bonet, J. A., Hanslmeier, A. & Sobotka, M.: 1997, ApJ, **480**, 406
 Klvaňa, M., Švanda, M., Sobotka, M., Bumba, V.: 2002, Zborník referátov z 16. Celoštátného seminára, p. 73
 Klvaňa, M., Švanda, M., Bumba, V.: 2004, „Vizualizace fotosférických rychlostních polí“ v tomto sborníku
 Küker, M., Rüdiger, M.: 2002, 1st Potsdam Thinkshop Poster Proceeding, p. 107
 Leighton, R. B., Noyes, R. W. & Simon G. W.: 1962, ApJ, **135**, 474
 Molowny-Horas, R., Yi Z.: 1994, ITA (Oslo) Internal Report No. 31
 Moore, R., Hathaway, D. & Reichmann, E.: 2000, Bulletin of American Astronomical Society, **32**, 835
 November, L. J. & Simon, G. W.: 1988, ApJ, **333**, 631
 Stix, M.: 1989, The Sun – An Introduction, Springer-Verlag, Berlin
 Wang, H. & Zirin, H.: 1989, Sol. Phys., **120**, 1