

Dlouhodobé periodicity ve Wolfových číslech slunečních skvrn

Jaroslav Střeštit, Geofyzikální ústav AV ČR,
Praha, jstr @ig.cas.cz

Abstrakt

V publikovaných řadách ročních Wolfových čísel slunečních skvrn od r. 1500 do 2000 a publikovaných odhadů poloh minim a maxim slunečních cyklů již od roku 200 př. Kr. byly hledány dlouhodobé periodicity. K tomu byly použity jednak autokorelační funkce, jednak korelace úseku za poslední století se stejně dlouhými úseky posouványmi postupně zpět. Ukázalo se opětovné zvýšení autokorelační funkce, resp. hodnot korelačních koeficientů, při posuvu o 221 let, kromě toho menší podružné zvýšení při posuvu o 110 let. Zvýšení se dále opakuje při posuvech o 411 a 571 let, tyto hodnoty však jsou méně přesné. Také ve spektrech v oboru period nad 40 let se ukáže nejvýznamnější maximum v periodě kolem 206 let spolu s několika vrcholy mnohem menšími. Perioda kolem 210 let souhlasí s obdobnou periodou popsanou v literatuře u radioaktivního uhlíku za 8000 let. Z převládajících dlouhodobých period lze extrapolovat velikosti několika příštích slunečních cyklů. Jejich maxima až do roku 2070 by měla být nižší.

1. ÚVOD

Před časem bylo poukázáno (Charvátová, 1990) na nápadnou podobnost skupiny slunečních cyklů v 18. století (cykly č. -1 až +3) se skupinou cyklů ve 20. století (cykly č. 15 až 19). Korelace mezi řadou Wolfových čísel 1733–1784 a 1912–1963 činila 0,805, což bylo daleko nejvíc ze všech podobně sestavených kombinací. Z toho pak bylo dále usuzováno na existenci přibližně 180-leté periodicity ve sluneční aktivitě. Nebylo však zkoumáno, opakuje-li se tato periodicitá dále do minulosti (o dalších 180 let zpět), ani vyskytuje-li se také u jiných, zvláště delších, skupin cyklů.

2. MATERIÁL

Wolfova čísla pro každý den jsou k dispozici teprve od r. 1849. Pro roky před tím chybějí mnohé denní hodnoty, avšak měsíční a roční průměry (spočtené z dat doplněných lineární interpolací) jsou poměrně spolehlivé až k roku 1749. Dále do minulosti (až k r. 1500) jsou přijatelné pouze roční průměry (Schove, 1983). Později Letfus (1993) spočítal poněkud odlišné hodnoty ročních Wolfových čísel za období 1500–1749, když namísto lineární interpolace použil vhodnou křivku, která bere v úvahu též 27-denní periodicitu. Největší rozdíl mezi oběma řadami lze pozorovat ve druhé polovině 17. století – např. podle Letfuse nebylo Maunderovo minimum zdaleka tak hluboké.

Kromě toho Schove (1955) odhadl na základě sporadických dat a nepřímých údajů časové polohy maxim a minim slunečních cyklů zpětně až k roku 649 před Kristem. Současně uvádí přibližnou velikost Wolfova čísla v maximum s přesností asi 20 jednotek. Wolfova čísla. Na začátku jeho tabulky mnohá data chybí, takže souvislá řada časových poloh maxim a minim slunečních cyklů začíná až rokem 200 př. Kr., po roce 1500 ovšem pokračuje přesnějšími údaji. Schove v téže práci dále doplnil odhad časových poloh maxim a minim slunečních cyklů v dalších 60 letech (do roku 2015, pozorování s ním však příliš nesouhlasí. Na základě těchto údajů jsme sestavili schematickou řadu ročních Wolfových čísel od r. -200 do r. 2000. V roce minima jsme položili hodnotu W rovnou nule a v roce maxima hodnoty uváděné autorem v původním článku. Ty byly po roce 1500 nahrazeny hodnotami rekonstruovanými podle Letfuse (1993), pro roky 1849–2000 hodnotami skutečně pozorovanými. Hodnoty v ostatních letech byly odhadnuty interpolací tak, že mezi maximum a minimum byla proložena polovina kosinusoidy. Toto sice přesně neodpovídá skutečnému průběhu aktivity v průběhu cyklu, ale pro sledování dlouhodobých periodicit lze vzniklou chybu zanedbat.

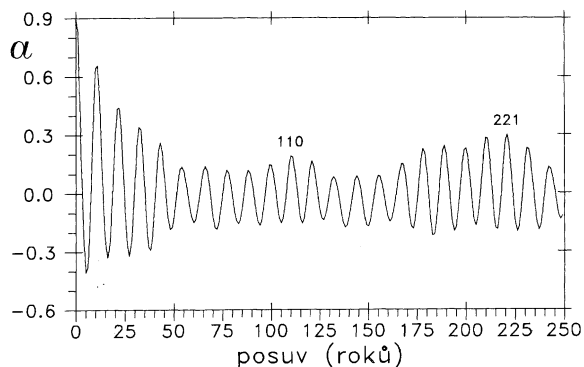
3. AUTOKORELAČNÍ FUNKCE

Dlouhodobou periodicitu názorně ukazuje autokorelační funkce definovaná vztahem

$$a_j = (n-j)^{-1} \sum W_i W_{i+j} ,$$

kde sumace probíhá od 1 do n , posuv j je možný od 0 do $a-1$. Předtím byla ještě řada Wolfových čísel upravena tak, aby $\sum W_i = 0$ pro všechna i . U takto upravené řady se pravidelně střídají kladné a záporné hodnoty a stejně tomu bude i u příslušné autokorelační funkce.

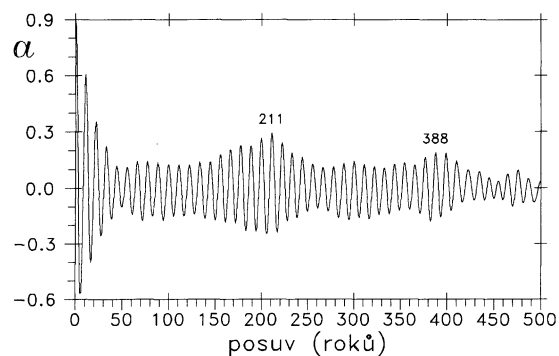
Na obr. 1 je uvedena část autokorelační funkce pro řadu Wolfových čísel pro období 1500–2000 podle Letfuse (zde $n = 500$) pro maximální posuv $j = 250$ let, na obr. 2 totéž pro schematickou řadu Wolfových čísel od r. –200 do r. 2000 sestavenou na základě roků maxim a minim sluneční činnosti podle Schove (zde $n = 2200$) pro maximální posuv $j = 500$ let. Obě funkce jsou normovány na maximální hodnotu rovnou 1 (nastává pro posuv $j = 0$). S rostoucími j hodnoty a_j nejprve klesají do záporných hodnot, dále oscilují. Nejvyšších (kladných) hodnot nabývají vždy pro posuv odpovídající průměrné délce slunečního cyklu, hodnota a_j v těchto maximech je však vždy menší než jedna právě z důvodu odlišnosti jednotlivých cyklů. Nejnižších (tj. nejvíce záporných) hodnot nabývají pro posuv rovnající se půl cyklu, jeden a půl cyklu atd. V lokálních maximech pozorujeme nejprve postupný pokles hodnot a_j , avšak při posuvech o určitý počet cyklů se hodnoty autokorelační funkce začnou opět zvyšovat, což znamená, že pro tyto posuvy existuje jistá podobnost v řadě cyklů. Pro data za posledních 500 let tento efekt nastává při posuvu o 221 let, což je 20 cyklů, menší podružné zvýšení nastává také po 110 letech (10 cyklů). U delší řady (2200 let) je obdobné zvýšení vidět při posuvu o 211 let (19 cyklů), které se opakuje po přibližně stejné době (388 let = 35 cyklů); zvýšení po 110 letech zde není patrné.



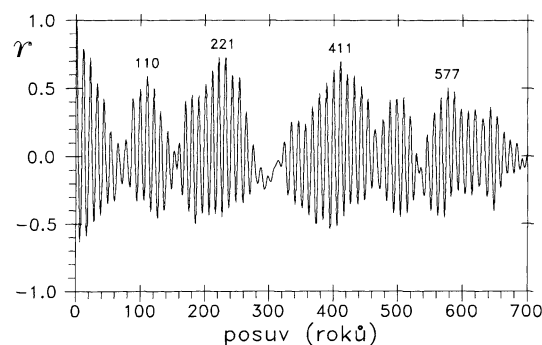
Obr. č. 1: Autokorelační funkce pro řadu Wolfových čísel 1500–2000, data před r. 1749 rekonstruovaná podle Letfuse (1993).

Ještě lépe tato zvýšení ukáže výpočet postupných korelací. Vybranou řadu Wolfových čísel pro období 1901–2000 koreluje postupně s úseky pro 1900–1999, 1899–1998 atd. Opět platí, že v závislosti na posuvu může být korelace kladná nebo záporná. Kladná je pro posuv o celistvé násobky průměrné délky slunečního cyklu (lokální maxima). Graficky jsou tyto korelační koeficienty nakresleny na obr. 3. Výpočty byly provedeny pro schematickou řadu dlouhou 2200 let, na obrázku je uvedena část do maximálního

posuvu 700 let. Na rozdíl od obr. 1 a 2 jsou lokální maxima pro některé posuvy velmi nízká a pro jiné vysoká. Opět pozorujeme opakující se zvýšení při posuvu o určitý počet roků, které se v podstatě shoduje s údaji na obr. 1 a 2. Při větších posuvech se však číselné hodnoty poněkud liší od údajů na obr. 2 (411 let = 37 cyklů, a dále 577 let = 54 cyklů).



Obr. č. 2: Autokorelační funkce pro schematickou řadu Wolfových čísel –200 – 2000, sestavenou z údajů minim a maxim slunečních cyklů podle Schove (1955).



Obr. č. 3: Korelační koeficienty řady Wolfových čísel 1901–2000 postupně s řadami 1900–1999, 1899–1998 atd. až po interval 1201–1299.

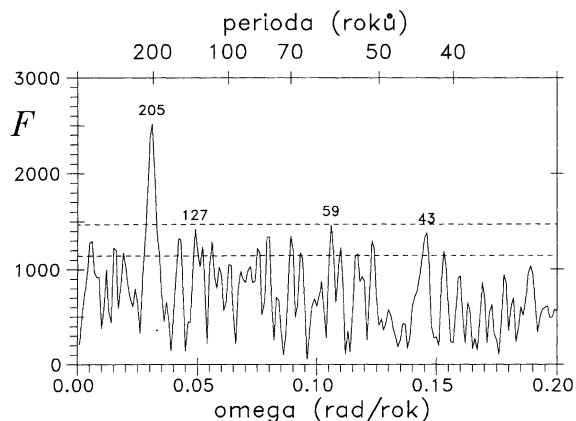
Intervaly opakování při větších posuvech mohou být určeny s menší přesností, protože původní data (polohy maxim a minim jednotlivých cyklů) vycházejí z málo přesných podkladů. Nicméně se zdá, že průměrný interval opakování je menší než ten první interval. Ten činil 19, resp. 20 cyklů, zatímco následující odpovídají spíše násobkům 18 cyklů. Tyto násobky pokračují dále při větších posuvech, již mimo obr. 3. Z toto hlediska se zdá perioda opakování v posledních dvou stoletích poněkud netypická (je delší). Je proto možné, že se zmíněný interval opakování v jistých mezích periodicky mění. Avšak zkrácení celé řady tím, že by se odebralo celé 20. století, nic nezmění na průběhu autokorelační funkce – intervaly opakování zůstanou stejné. Změní se však graf postupných korelací jak je uveden na obr. 3. Obalová křivka bude mnohem méně hladká, takže přesné určení intervalů opakování bude obtížné. To proto, že 19. století (tedy poslední 100-letý úsek vybraný pro korelace) bylo obdobím dlouhodobého minima sluneční aktivity a průběh Wolfových čísel

v této době je velmi málo podobný průběhu kdykoli jindy. Naproti tomu 20. století použité na obr. 3 bylo obdobím dlouhodobého maxima sluneční činnosti.

Pro postupné korelace ovšem nemusíme vyjít z řady hodnot právě za posledních 100 let. Stejným způsobem můžeme začít např. s obdobím 1931-2000, 1951-2000, nebo také 1921-1970 apod. Platí, že pro kratší vybrané úseky budou korelace obecně vyšší, zvláště v dlouhodobých minimech, a bude narůstat rozptyl. To znamená, že se neprojeví tak jasná dlouhodobá maxima jako na obr. 3. Při vhodné kombinaci délky intervalu a velikosti posuvu dojdeme k vysoké korelaci mezi dvěma obdobími, např. takové, jakou jsme uvedli na začátku. Zpravidla, zvláště pro delší vybrané úseky, je perioda opakování delší, kolem 210 let. Perioda 180 let se tedy nepotvrzuje. K tomu se vrátíme později.

4. SPEKTRA

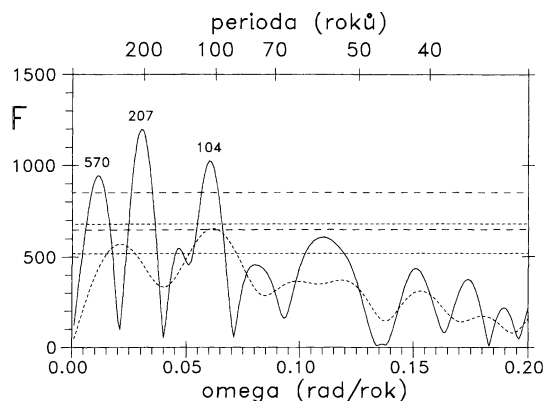
Dlouhodobou periodicitu dobře vidíme také ve spektru. Na obr. 4 je uvedeno spektrum celé schematické řady Wolfových čísel za 2200 let v oboru period nad 35 let. Jediné významné maximum leží v periodě 205 let, což odpovídá výše zmíněným 18 cyklům. Další menší maxima přesahují o něco hranici 95% významnosti, ne však hranici 99% významnosti. K ní se nejvíce blíží maxima v periodách 127, 59 a 43 let. Význam všech těchto period spočívá ve vytvoření nesinusového průběhu obalové křivky grafu na obr. 3. Zkrácením celé řady o jedno století, tj. odebráním 20. století, se spektrum téměř nezmění, pouze se mírně zvýší velikosti ostatních maxim v periodách mezi 40 a 100 lety.



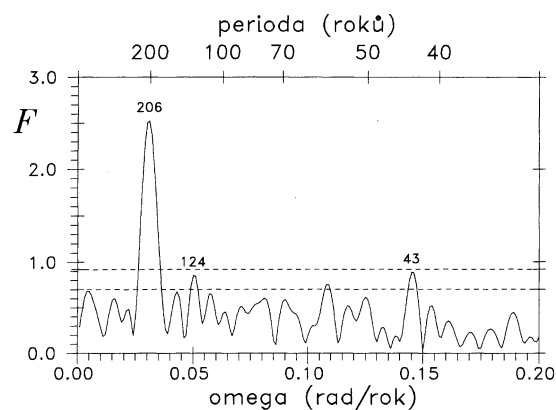
Obr. č. 4: Spektrum schematické řady Wolfových čísel sestavené z údajů minim a maxim slunečních cyklů podle Schove (1955) za celé období -200-2000. Vodorovné čárkované čáry označují meze 95% a 99% významnosti.

Velmi podobné je spektrum řady Wolfových čísel za období 1500-2000 na obr. 5. Hlavní maximum je na zcela stejném místě, objevuje se však další výrazné maximum v periodě kolem 104 roků a také 570 roků. Všechna přesahují hranici 99% významnosti, to poslední však vzhledem k délce řady nelze považovat za významné. Maximum v periodě kolem 104 roků je

podstatně vyšší než obdobné maximum na obr. 4. Spektrum pro řadu kratší (1849-2000), které je označeno na obr. 5 krátce čárkovaně, je jiné - převládá zde perioda 104 roků, avšak dosahuje stěží jen 95% významnosti. Druhá nejvýznamnější perioda kolem 300 roků je delší než je délka řady a proto nevýznamná.



Obr. č. 5: Spektrum řady Wolfových čísel za období 1500-2000 (rekonstrukce podle Letfuse). Vodorovné čárkované čáry označují mez 95% a 99% významnosti. Krátce čárkovaně je zakresleno spektrum za období 1749-2000 i s mezemi významnosti.



Obr. č. 6: Spektrum autokorelační funkce z obr. 2 za celý obor její definice. Vodorovné čárkované čáry označují meze 95% a 99% významnosti.

Konečně na obr. 6 je uvedeno spektrum autokorelační funkce z obr. 2, ovšem pro celý obor její definice (na obr. 2 je uvedena jen část). Je velmi podobné spektru řady Wolfových čísel (obr. 4), je však hladší. Hlavní vrcholy se objevují téměř přesně ve stejných periodách, za zmínku stojí zdaleka nejvyšší vrchol v periodě 206 roků, hranici 95% významnosti přesahují jen tři vrcholy v periodách 124, 59 a 43 roků.

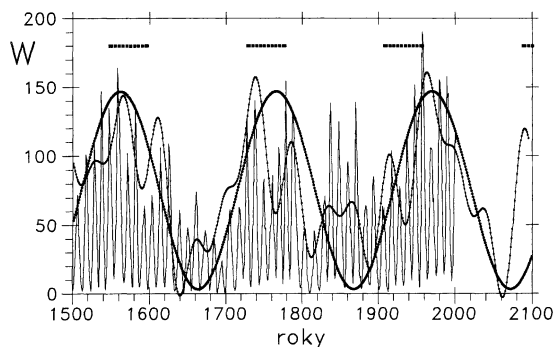
Perioda 180 let, kterou jsme uvedli na samém začátku, je významná perioda v pohybu Slunce kolem barycentra, společného těžiště všech těles sluneční soustavy. Podobná perioda byla nalezena v řadách průměrných ročních teplot vzduchu pozorovaných na různých stanicích za posledních více než 200 let. Avšak mechanismus možného ovlivňování klimatu na Zemi pohybem Slunce kolem barycentra není znám.

U sluneční aktivity se obdobná dlouhodobá perioda nerovná přesně 180 letům, což bylo interpretováno tak, že sluneční aktivita nevystupuje jako zprostředkovatel v předpokládaném mechanismu působení (viz např. Charvátová, Střeščík, 1995). Pak není důvod, aby perioda opakování slunečních cyklů v dlouhodobé škále odpovídala periodě v pohybu Slunce kolem barycentra.

Perioda kolem 210 let však byla nalezena jako významná u koncentrace radiokarbonu (radioaktivního uhlíku C^{14}) v atmosféře, na základě rekonstruované řady za 8000 let z přírodních archivů (Vasiliev, Dergachev, 2002). Radiokarbon vzniká v atmosféře vlivem kosmického záření a je mj. indikátorem dlouhodobých změn sluneční aktivity v dávné minulosti (Stuiver, Quay, 1980). Pozorovány jsou ještě některé periody delší, které v našich datech nemají obdobu.

5. DŮSLEDKY A ZÁVĚR

Převládající periody uvedené na obr. 4–6 si ještě ukážeme v časové doméně a porovnáme je se skutečně pozorovaných průběhem Wolfových čísel za posledních pět století. Ten je na obr. 7 nakreslen spolu se sinusovou křivkou pro periodu 206 roků a se superpozicí všech čtyř zmíněných sinusových vln. Samotná převládající sinusovka prakticky souhlasí s dlouhodobou změnou ročního Wolfova čísla, superpozice vyjadřuje i některé drobnější odchylky. Dlouhodobá maxima se nacházejí v 16., v 18. a ve 20. století, přidáním dalších tří vln se projeví většinou jako dvojitá a objeví se malé mimořádné maximum v 19. století, které vytvořilo 110-letou periodu na obr. 1, 2, 3 a 5. Podle převládající sinusové křivky připadají dlouhodobá maxima na roky 1562, 1766 a 1970 a dlouhodobá minima na roky 1664 a 1868. Nelze samozřejmě čekat, že superpozice vyplní všechny odchylky od hladkého sinusového průběhu, to se nestane ani v případě, když do superpozice zahrneme dalších sedm vrcholů z obr. 4, které přesahují hranici 95% významnosti.



Obr. č. 7: Průběh Wolfových čísel za období 1500–2000 spolu s aproximací sinusovou křivkou (dána řadou větších plných kroužků) a superpozicí čtyř nejvýznamnějších sinusových vln (dána řadou menších tmavých kroužků), které jsou extrapolovány až do roku 2100..

Vybereme z řady ročních Wolfových čísel hodnoty dosažené v letech maxim jednotlivých cyklů a přiřadíme

k nim hodnoty převládající sinusovky a superpozice z obr. 7 ve stejných letech. Korelace mezi pozorovanými hodnotami W v maximech a odpovídajícími hodnotami sinusovky je 0,34, pro superpozici 0,39. To platí pro celý interval od r. –200 do r. 2000, ne jen pro část uvedenou na obr. 7. Tato korelace je významná (hranice 99% významnosti pro 199 použitých maxim je 0,18). Přidáním dalších sedmi vln se již korelace nezlepší. Posunutím spočtených křivek o několik let doprava nebo doleva všechny korelace klesají.

Extrapolace za rok 2001, uvedená též na obr. 7, předpovídá pokračující pokles v rámci dlouhodobé variace, kdy další dlouhodobé minimum se očekává kolem roku 2072 (to ovšem nesouvisí s průběhem 11-letého slunečního cyklu kolem r. 2072). Superpozice čtyř hlavních vln dobře pokrývá menší dlouhodobé maximum v 19. století i rozštěpení hlavních dlouhodobých maxim na dva samostatné vrcholy. V dalším průběhu vykazuje také pokles po roce 2000, ten však není stejnoměrný. Pokles v letech 1980–2000 je pomalý, což znamená, že současný 11-letý cyklus ještě nebude ve svém maximu o mnoho nižší než byly předchozí cykly. Později kolem roku 2040 se vytvoří slabé podružné maximum (krátkodobé zvýšení aktivity), teprve potom klesne aktivita na minimum o něco dříve, než předpovídá samotná sinusová křivka. Na obr. 7 jsou ukázány úseky s uspořádaným pohybem Slunce kolem barycentra, kterém se opakují po 180 letech. Poslední již dobře nesouhlasí s dlouhodobým maximem sluneční aktivity, je zřejmé, že perioda opakování je delší.

Pravděpodobný dlouhodobý průběh sluneční aktivity v nejbližších několika desetiletích jsme se pokusili odhadnout poněkud jinou metodou před pěti lety na základě dat do roku 1995 (Střeščík, Mikulecký, 1997). Také tehdy předpověď naznačovala pokles velikosti maxim jednotlivých cyklů alespoň do roku 2040. Nejbližší cyklus (kolem r. 2000) tomu příliš nenasvědčuje, avšak zdejší obr. 7 naznačuje možné vysvětlení. Dále již jsou obě prognózy shodné: následující nejméně tři cykly po roce 2005 by měly být postupně nižší.

LITERATURA

- Charvátová I.: 1990, „On the relation between solar motion and solar activity in the years 1730–80 and 1910–60 A.D.“, *Bull. Astr. Inst. Czechosl.* **41**, 200–204.
- Charvátová I., Střeščík J.: 1995, „Long-term changes of the surface air temperatures in relation to solar inertial motion“, *Climatic Change* **29**, 333–352.
- Letfus V.: 1993, „Solar activity in the sixteenth and seventeenth centuries (a revision)“, *Solar Physics* **145**, 377–388.
- Schove D. J.: 1955, „The sunspot cycle, 649 B.C. to A.D. 2000“, *Journal Geophys. Research* **60**, 127–147.
- Schove D. J.: 1983, „Sunspot cycles“, Hutchinson-Ross, London.
- Střeščík J., Mikulecký M.: 1997, „Další pokusy o inferenční statistickou předpověď ročních Wolfových čísel“, XIX. seminář „Člověk ve svém pozemském a kosmickém prostředí“, sborník referátů, Úpice, 124–127.
- Stuiver M., Quay P. D.: 1980, „Changes in atmospheric carbon-14 attributed to a variable Sun“, *Science* **207**, 11–19.
- Vasiliev S. S., Dergachev V. A.: 2002, „The ~2400-year cycle in atmospheric radiocarbon concentration: bispectrum of ^{14}C data over the last 8000 years“, *Annales geophysicae* **20**, 115–120.