

# Střednědobé a dlouhodobé periodicity ve sluneční aktivitě

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

## Abstrakt

Je podán přehled hodnocení sluneční aktivity vycházející z pozorovaných slunečních erupcí nebo skvrn. Popsána jsou dostupná data jak pozorovaná, tak rekonstruovaná z nepřímých údajů až 2000 let zpět do minulosti. Uvažována je korelace mezi erupcemi a skvrnami v různém časovém měřítku. Uvedeny jsou různé parametry jedenáctiletých slunečních cyklů, jejich vzájemná korelace a dlouhodobá změna, to vše jednak pro období pozorovaných hodnot, tak pro delší období rekonstruovaných hodnot. Rekonstruované řady umožní najít dlouhodobé periodicity u jedenáctiletých cyklů. Zde je nejvýraznější perioda okolo 205 let. Nalezené periodicity jsou porovnány s obdobnými periodicitami u jiných jevů, pokud jsou známy. Z převládajících dlouhodobých period a dlouhodobých trendů lze extrapolací odhadnout průběh sluneční aktivity v několika příštích slunečních cyklech.

## 1. ÚVOD

Již dávno je známo, že naše Slunce není neměnné těleso, na němž se nepozorují žádné změny. Dlouho je známo, že se na Slunci objevují tmavší skvrny. Jejich objev bývá připisován Galileo Galileimu, který je pozoroval svým právě sestrojeným dalekohledem a měl si tím pohněvat představitele církve, neboť Slunce bylo považováno za symbol čistoty. Skvrny však byly pozorovány daleko dříve, především v Číně. Velké skvrny lze spatřit pouhým okem bez dalekohledu přes dostatečný filtr nebo mohou být náhodně spatřeny přes slabou vrstvu mraků. Třebaže skvrny na Slunci mají velkou popularitu (zmiňuje se o nich např. také Švejk), jejich přímý vliv na děje na Zemi je nulový. Jsou to v podstatě chladnější místa ve sluneční atmosféře (s teplotou pod 5000°C, zatímco jinak povrch Slunce má teplotu 6000°C), která se z toho důvodu jeví tmavá.

Skvrny se obvykle sdružují ve skupinách, kde postupně některé zanikají a jiné nově vznikají. Průměrná životnost skvrny je několik měsíců. Postupem času lze pozorovat, jak se skupiny skvrn na slunečním disku posunují z důvodu rotace Slunce, až zmizí za okrajem disku a po čase se znovu objeví na protějším okraji. Tak byla už dávno určena rotace Slunce v délce 27 dní pro pozorovatele ze Země. Zjistilo se také (podle polohy skvrn), že tato rychlost je různá v různých vzdálenostech od rovníku, protože Slunce není tuhé těleso – na rovníku bývá 26–27 dní, směrem do vyšších šířek se rotace zpomaluje, takže v blízkosti pólů činí až 30 dní. To se ovšem zjistilo později jinými metodami, neboť skvrny se vyskytují pouze do 30 stupňů šířky.

Po několika desetiletích soustavného pozorování slunečních skvrn se ukázalo, že jejich počet v průběhu let kolísá. Přibližně po 11 letech nastanou roky, kdy nejsou téměř žádné skvrny, přibližně mezi tím jsou roky, kdy je skvrn maximální počet. Tak byly objeveny cykly sluneční aktivity. Na počátku cyklu (za začátek cyklu se vždy považuje minimum) vznikají nové skvrny dále od rovníku, asi na 30° šířky, ke konci cyklu se nacházejí skvrny blízko rovníku. Na diagramu rozložení skvrn za několik desetiletí se zhuštěnou časovou osou jsou pak tmavá pole ve tvaru motýlích křídel.

Skvrny nejsou jediným jevem pozorovaným pravidelně na Slunci. Z hlediska odezvy na Zemi jsou mnohem důležitější sluneční erupce. Jde o náhlé a výrazné vzplanutí, při kterém se uvolňuje velké množství hmoty a energie v podobě záření. Erupce vznikají obvykle v blízkosti skupiny skvrn a proto jejich počet s časem kolísá podobně jako počet skvrn. Někdy se vyskytne až 10 erupcí za den, jindy po řadu dní žádná erupce. Vzplanutí je rychlé, obvykle několik minut (max. 15), pak následuje pomalejší pokles, který může vzácně trvat až několik hodin. Silné erupce lze spatřit dalekohledem (přes filtr) jako zjasnění v určitém místě slunečního povrchu. Erupce se jeví jasnější, protože teplota v místě erupce je vyšší než v okolí (až 10 000°C). Pro pozorování erupcí slouží speciální přístroj spektrohelioskop. Zjasnění v porovnání s jasným povrchem Slunce nemusí být dostatečně výrazné, takže erupce pouze dalekohledem s filtrem nemusí být vždy pozorovatelná.

Při vzplanutí erupce se vyzařuje intenzivní elektromagnetické záření v širokém rozsahu vlnových délek, od rádiových vln až po záření rentgenové a gama

paprsky. Podle toho se také rozlišují druhy erupcí. Toto záření může zasáhnout Zemi v případě, že je směřováno přímo k ní. Od Slunce k Zemi dorazí přibližně za 8 minut nezávisle na vlnové délce. Způsobuje pak zvýšení ionizace zemské ionosféry a jiné efekty. Současně je při erupci vyvržena hmota v podobě částic (především protonů, elektronů a iontů), které se dále pohybují meziplanetárním prostorem po Archimedově spirále. Zasáhnou-li Zemi (k ní dorazí za 1 až 2 dny podle rychlosti), způsobují poruchy v zemském magnetickém poli a v ionosféře, mj. též polární záře.

## 2. HODNOCENÍ SLUNEČNÍ AKTIVITY

Sluneční erupce jsou podle jasnosti klasifikovány jako slabé (F, faint), normální (N, normal) a jasné (B, bright). Podle velikosti plochy se dělí do pěti skupin: S, 1, 2, 3 a 4. Erupce skupiny S se nazývají suberupce. Jejich daleko nejvíce, až 97%, počty mohutnějších erupcí pak přiměřeně klesají. Data týkající se různých projevů sluneční aktivity lze najít na internetové adrese

[ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR\\_DATA/...](ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR_DATA/...)

(velká písmena jsou povinná) v dalších podadresářích. V podadresáři [.../SOLAR\\_FLARES/FLARE\\_PATROL](ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR_DATA/SOLAR_FLARES/FLARE_PATROL) je seznam všech erupcí od roku 1955 s uvedením času začátku a konce, avšak bez uvedení klasifikace. V seznamu chybí období od ledna 1965 do října 1967. Dále jsou zvlášť uvedeny silné erupce, rovněž od roku 1955, které autoři vybírali podle vlastního hodnocení tam popsaného.

Chceme-li hodnotit erupční aktivitu každý den jediným číslem, není takto sestavený katalog vhodný. Před 50 lety Kleczek (1952) zavedl jednoduchý erupční index, který shrnuje všechny erupce, které byly pozorovány v příslušném dni, s uvážením jejich intenzity a délky trvání. Pro každou erupci se určí hodnota  $Q = i \times t$ , kde  $t$  je doba trvání erupce a  $i$  je hodnocení intenzity podle tabulky:

klasifikace	hodnota $i$	klasifikace	hodnota $i$
SF, SN, SB	0,5	2B	2,5
1F, 1N	1,0	3F, 3N, 4F	3,0
1B	1,5	3B, 4N	3,5
2F, 1N	2,0	4B	4,0

Hodnota  $Q$  přibližně odpovídá množství uvolněné energie. Erupční index (solar flare index – SFI) je pak součet hodnot  $Q$  za příslušný den. V současné době zpracovávají a publikují tento index pracovníci observatoře Kandilli v Turecku. Jeho hodnoty jsou k dispozici na stejné internetové adrese v podadresáři [.../SOLAR\\_FLARES/INDEX](ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR_DATA/SOLAR_FLARES/INDEX) pro každý den od roku 1976, měsíční průměry již od r. 1966. Ty jsou zde uvedeny v Příloze 1. Erupční index je také zpracován zvlášť pro severní a jižní sluneční polokouli, je k dispozici na internetu v témže podadresáři.

Vzhledem k přímým vlivům slunečních erupcí na různé děje na Zemi je erupční index velmi vhodnou pomůckou pro porovnání sluneční aktivity s jinými ději.

Avšak pro sledování dlouhodobých zákonitostí je doba, za kterou je tento index k dispozici, příliš krátká. Jedinou informaci o sluneční aktivitě ve vzdálenější minulosti poskytují sluneční skvrny, jejichž stálé pozorování začalo mnohem dříve.

Množství či lépe aktivita slunečních skvrn se kvantitativně hodnotí speciální veličinou zvanou Wolfovo číslo ( $W$ ). Je definováno jako  $W = f + 10 \times g$ , celkový  $f$  je počet skvrn a  $g$  je počet skupin skvrn viditelných na slunečním disku.

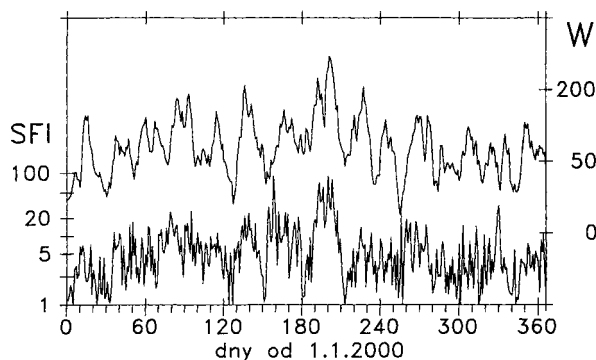
Wolfova čísla pro každý den jsou k dispozici teprve od r. 1849 (i to je v porovnání s erupčním indexem nesrovnatelně delší období). Pro roky před tím chybějí mnohé denní hodnoty, neúplná data jsou publikována už od r. 1818 (na stejné internetové adrese v podadresáři [.../SUNSPOT\\_NUMBERS](ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR_DATA/SUNSPOT_NUMBERS)), dále do minulosti jsou mezery příliš velké. Nicméně, pokud byla chybějící data doplněna lineární interpolací, jsou měsíční průměry z nich spočtené ještě poměrně spolehlivé. Tyto jsou k dispozici až k roku 1749. Dále do minulosti jsou přijatelné pouze roční průměry. Z nich byly určeny časové polohy minim a maxim jednotlivých cyklů počínaje rokem 1610. Tyto hodnoty jsou uváděny s přesností na desetinu roku (ne na měsíce) a zde jsou uvedeny v Příloze 2. Schove (1983) pokusně rozšířil řadu ročních hodnot Wolfových čísel až k roku 1500. Toto období 110 let je však popsáno méně přesně než další období po roce 1610 a uváděné hodnoty  $W$  nejsou oficiálně přijímány. Roční hodnoty Wolfových čísel 1500–2003 jsou uvedeny v Příloze 3a a na internetu v témže podadresáři jako denní hodnoty Wolfových čísel.

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 byly hodnoty  $W$  v té době vyšší. Roční hodnoty Wolfových čísel 1500–1749 opravené podle Letfuse jsou uvedeny v Příloze 3b.

Jiným parametrem pro hodnocení sluneční aktivity je sluneční rádiový tok (SRF – solar radio flux). Jde o intenzitu rádiového záření na frekvenci 2800 Mhz (to odpovídá vlnové délce 10,7 cm, tj. známá vodíková čára  $H\alpha$ ). Měří se radioteleskopem umístěným od r. 1947 nedaleko Ottawy v Kanadě. Od r. 1991 bylo měření přeneseno do Penticton, Britská Kolumbie, Kanada. V tabulkách se uvádějí hodnoty pro místní poledne (17.00 UT). Hodnoty v těchto tabulkách jsou udávány v jednotkách  $10^{-22}$  Joule/sec/m<sup>2</sup>/Hz. Jsou k dispozici na internetu v podadresáři [.../SOLAR\\_RADIO/FLUX](ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR_DATA/SOLAR_RADIO/FLUX).

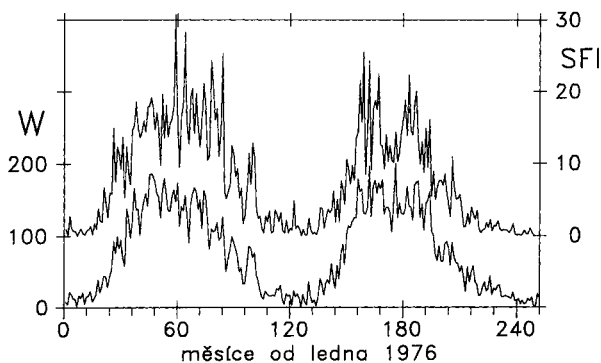
Porovnáme-li erupční indexy a Wolfova čísla v jednotlivých dnech, zjistíme, že korelace není příliš vysoká. Např. korelační koeficient mezi  $W$  a SFI za rok 2000 (celkem 366 dní) je pouze 0,43. To je dáno podstatným rozdílem v délce trvání erupcí a skvrn. Hodnocení skvrn nemůže zachytit rychlou proměnlivost erupční aktivity. Také rádiový tok je spíše „konzervativní“: korelace s erupčním indexem je jen

0,52, ale s Wolfovým číslem 0,83, to pro denní hodnoty za rok 2000. Kromě toho erupční index rychle roste s větším počtem erupcí, mnohem rychleji než roste Wolfovo číslo s rostoucím počtem skvrn. Proto je korelace např. mezi W a logaritmem SFI vyšší, pro denní hodnoty za rok 2000 dosahuje 0,51. Průběh sumárního erupčního indexu a Wolfových čísel v roce 2000 je nakreslen na obr. 1.



**Obr. č. 1.** Průběh hodnot W a SFI v jednotlivých dnech roku 2000. Horní křivka, stupnice vpravo = W, dolní křivka, stupnice vlevo (logaritmická) = SFI.

Jiné je to při porovnání měsíčních hodnot W a SFI. Krátkodobé změny se zde vyhladí a korelace je nesrovnatelně vyšší. Také výjimečně vysoké hodnoty SFI se při vyhlazení vyrovnají, takže použitím logaritmické stupnice se již korelace nezvýší. Pro období 1976 – 1996 (celkem 21 let) je korelační koeficient mezi měsíčními hodnotami W a SFI roven 0,90, mezi ročními 0,91. Tato vysoká korelace opravňuje použití Wolfových čísel pro hodnocení sluneční aktivity v době, kdy nejsou k dispozici erupční indexy. Korelační koeficient mezi měsíčními hodnotami SRF a SFI za stejné období je 0,99 a mezi SRF a W je 0,89. Průběh sumárního erupčního indexu a Wolfových čísel ve zmíněném období je nakreslen na obr. 2.



**Obr. č. 2.** Průběh hodnot W a SFI v jednotlivých měsících 1976–1996. Horní křivka, stupnice vpravo = SFI, dolní křivka, stupnice vlevo = W.

Schöve (1955) dále 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 maximu s přesností asi 20 jednotek Wolfova čísla. Na

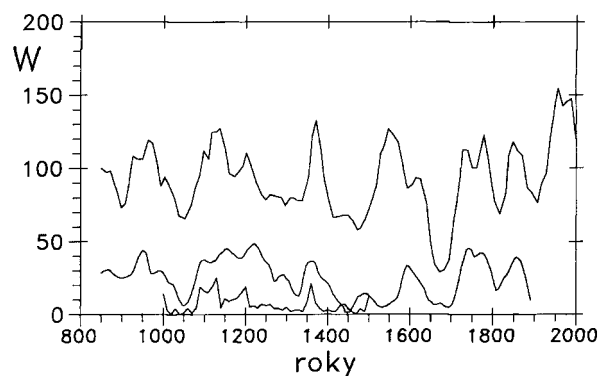
začátku jeho tabulky mnohá data chybí, takže souvislá řada časových poloh maxim a minim slunečních cyklů začíná až rokem 200 př. Kr., po roce 1500 ovšem pokračuje přesnějšími údaji. Schöve v téže práci dále doplnil odhad časových poloh maxim a minim slunečních cyklů v dalších 60 letech až do roku 1515, pozorování s ním však příliš nesouhlasí.

V nejnovější době Usoskin et al. (2003) odhadli z měřených koncentrací  $^{10}\text{Be}$  v ledovcích v Grónsku a v Antarktidě průběh Wolfových čísel od r. 850 a dále jej porovnali s výsledky získanými z obsahu radioaktivního uhlíku  $^{14}\text{C}$  v letokruzích stromů. Výsledky publikovali v grafické podobě. Údaje ze všech uvedených zdrojů se navzájem liší jen málo.

Podobnou rekonstrukci provedli Bard et al. (2000) na základě měření obsahu  $^{14}\text{C}$  a  $^{10}\text{Be}$  rovněž v ledovcích v Antarktidě, speciálně na jižním pólu. Z těchto měření odhadli intenzitu slunečního záření (ve  $\text{W}/\text{m}^2$ ) za posledních 1200 let. Poloha dlouhodobých maxim a minim se velmi dobře shoduje s daty Usoskin et al. (2003). Původní článek (časopis) není u nás k dispozici, ale data je možno nalézt na internetové adrese:

<http://www.ngdc.noaa.gov/paleo/forcing.html#solar> .

Další nepřímou informaci o sluneční aktivitě v dávné minulosti poskytuje katalog polárních září pozorovaných do 55 stupně šířky (Křivský, Pejml, 1988). Ze všech podobných katalogů je tento nejúplnější a sahá také nejdále do minulosti, až k roku 1000. Je zřejmé, že počet polárních září uvedených v katalogu závisí především na možnostech šíření a uchování informací v dané době. Proto je pozorován nárůst po vynálezu knihtisku kolem r. 1500 a především v době průmyslové revoluce v 19. století. V dobách dřívějších nenastal žádný podobný zlom, přesto je však dochováno více informací ze století dvanáctého než ze století následujících. To naznačuje celkově vyšší sluneční aktivitu v tomto století.



**Obr. č. 3.** Vyhlazený průběh odhadnutých hodnot W pro období 850 – 2000 podle Schöve, 1955 (horní křivka), podle Usoskin et al., 2003 (prostřední křivka) a počty polárních září pozorovaných v šířkách do 55° v jednotlivých dekádách 1000 – 1500 podle Křivský, Pejml, 1988 (křivka zcela dole).

Tento dlouhodobý chod je ukázán na obr. 3. Jako údaje od Schöve (1955) byla použita spojnice maxim jednotlivých cyklů a tato spojnice byla vyhlazena. Od autorů Usoskin et al. (2003) byla použita rekonstrukce

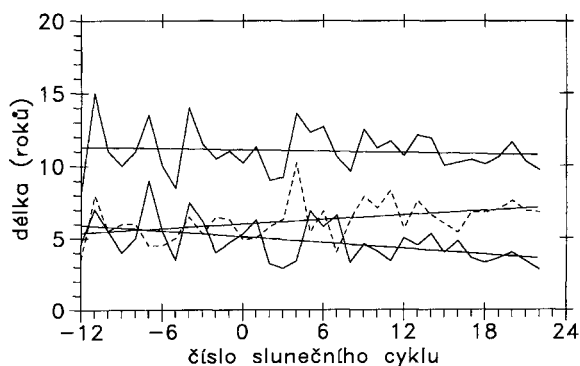
z Antarktidy. Udávány jsou zde průměrné hodnoty Wolfova čísla v dekadách, proto jsou hodnoty přibližně poloviční než je spojnice vrcholů. Data Křivský+Pejml byla použita jen do roku 1500, dále již počet pozorovaných polárních září rychle narůstá. Stupnice je pro všechny řady stejná. Průběh podle Schove i podle Usoskina se velmi dobře shodují (korelační koeficient 0,62, pro část 1600–1880 je dokonce 0,92). Také počty polárních září velmi dobře kopírují dlouhodobý chod sluneční aktivity (korelace s řadou podle Schove 0,66 a s řadou Usoskin 0,54).

### 3. JEDENÁCTILETÉ SLUNEČNÍ CYKLY

Průběh slunečního cyklu není symetrický. Na počátku cyklu počet skvrn rychle narůstá, brzy dosáhne maxima a pak pomaleji klesá. Často se objevuje podružné maximum na sestupné větvi cyklu, kdy asi po dvou letech počet skvrn opět vzroste. Pokud sledujeme aktivitu erupcí v průběhu cyklu, pak je zde častěji toto druhé maximum vyšší než první, a stejně tomu bývá u geomagnetické aktivity. Toto podružné maximum je dobře viditelné na obr. 2 ve druhém nakresleném cyklu.

Sluneční cykly jsou číslovány. První cyklus začíná v prvním minimu po začátku spolehlivé řady měsíčních Wolfových čísel, tedy v roce 1755. Současný cyklus má číslo 23 a začal v roce 1996. Zpětně rekonstruované cykly dále do minulosti (před rok 1755) mají čísla 0, -1, -2 ... , cyklus začínající v roce 1610 má číslo -12. V oficiálních tabulkách jsou polohy maxim a minim, a délky vzestupné a sestupné části jednotlivých cyklů uváděny na jednu desetinu roku. Celkem je takto k dispozici 34 úplných cyklů (viz tabulka v Příloze 2).

Sluneční cykly nejsou všechny stejné, liší se délkou, velikostí (hodnotou v maximu) a tvarem. Střední délka slunečního cyklu za uvedené období je 11,0 roků, jeho vzestupné části 4,7 roku, sestupné části 6,3 roku. Průměrná délka cyklu se od r. 1610 nemění, ale zkracuje se vzestupná část a prodlužuje sestupná část. Změna délky cyklu ani jeho částí nevykazuje žádnou významnou dlouhodobou periodicitu.

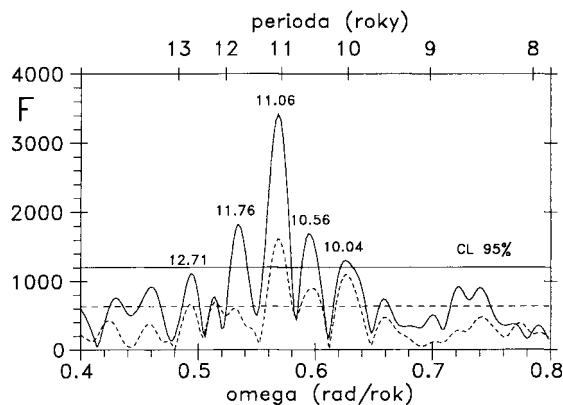


Obr. 4. Změna délek slunečních cyklů (nahore), jejich sestupných částí (uprostřed čárkovaně) a jejich vzestupných částí (dole) od r. 1611. Změny jsou aproximovány přímkou.

Podle některých prací četnostní rozdělení délek cyklů (po 0,1 roku) vykazuje dvojité maximum, kolem

10,5 a 11,5 roku. Mluví se tak o bimodalitě slunečních cyklů (Wilson, 1987). Malý počet dosud pozorovaných cyklů však neumožňuje spolehlivě rozhodnout, zda se délky cyklů pravidelně střídají s nějakou dlouhodobou periodou. Zdá se však, že pro poměrně krátké období přibližně od r. 1611, kdy jsou délky cyklů určeny přesněji, tato zákonitost existuje (Charvátová, Střeščík, 1991). Rozšíření materiálu o cykly rekonstruované až do r. 200 př. Kr. to však nepotvrzuje, může to ovšem být způsobeno malou přesností rekonstruovaných cyklů.

Existuje slabá korelace mezi délkou cyklu a hodnotou Wolfova čísla v maximu cyklu, korelační koeficient pro cykly od r. 1611 je však jen -0,18 (není statisticky významný). Kratší cykly by měly být vyšší (Charvátová, Střeščík, 1991). Významnější je korelace hodnoty W v maximu s délkou vzestupné části (-0,65), ale nulová je s délkou sestupné části. Významná je i záporná korelace mezi oběma délkami (-0,39) – po rychlejším vzestupu následuje pomalejší pokles.



Obr. 5. Spektra řady Wolfových čísel v oboru period kolem 11 roků. Čárkovaně – původní data 1611–2000, plně – jednotlivé cykly přepočítány na stejnou velikost v maximu.

Ve spektru řady Wolfových čísel převládá podle očekávání výrazné maximum v periodě kolem 11 roků (obr. 5). Nižší významné vrcholy v blízkosti hlavního vrcholu jsou dány nesymetrickým průběhem cyklu, nestejnou výškou jednotlivých cyklů a především tím, že zatímco maxima jsou u každého cyklu různě vysoká, minima jsou vždy velmi blízko nule. Řada tedy není symetrická kolem nějaké střední hodnoty.

Jestliže přepočítáme hodnoty W tak, aby maxima všech cyklů byla stejně vysoká, pak podružná maxima ve spektru budou rozložena více symetricky kolem hlavního maxima. Hodnoty ve spektru pro nižší frekvence (delší periody – na levé straně) se přitom zvýší více než na druhém konci spektra. To souhlasí se zmíněným vztahem mezi délkou cyklu a velikostí W v maximu.

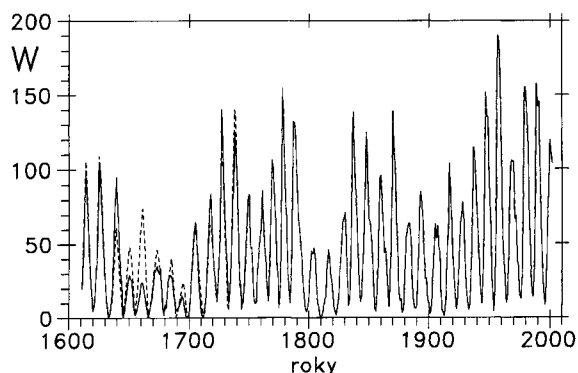
Jsou určité rozdíly mezi lichými a sudými cykly, tj. mezi prvními a druhými cykly v rámci 22-leté periodicity. Liché cykly jsou vyšší, tj. hodnota Wolfova čísla v maximu cyklu je asi o 10 jednotek W vyšší než v maximu následujícího cyklu sudého. Naopak sudé cykly jsou kratší a toto zkrácení jde na vrub pouze vzestupné části (o 0,3 roku). Toto pravidlo však platí

zhruba od 18. století, tedy pro cykly číslované kladnými čísly. V době před tím (záporné cykly) se zdá, že naopak liché cykly byly nižší.

Někdy se používají záporné hodnoty Wolfových čísel v rámci 22-letých cyklů. V lichých cyklech jsou měsíční a roční hodnoty uváděny s kladným znaménkem, v sudých se záporným. Spektra či periodogramy spočtené z takových dat jsou jednodušší. Převládá v nich výrazně 22-letá perioda a ostatní doprovodné periody jsou daleko slabší. To proto, že vstupní časová řada je „vycentrována“ kolem nuly, což u původních řad Wolfových čísel není.

#### 4. DLOUHODOBÉ PERIODICITY

Zmínili jsme se už, že každý sluneční cyklus je jiný. Přehlédneme-li všechny dosud pozorované cykly, ukáže se, že existuje jistá dlouhodobá periodicitata ve velikostech cyklů. Skupiny vysokých cyklů se opakují přibližně ve stejných časových odstupech kolem 100 let, jak ukazuje obr. 6. Zde jsou také doplněny hodnoty  $W$  opravené podle Letfuse (1993). Pro další závěry týkající se dlouhodobých periodicit jsou však tyto rozdíly zanedbatelné. Zdá se, že vysoké cykly se opakují přibližně po 100 letech, přičemž toto dlouhodobé maximum je zpravidla dvojitě. Výjimku tvoří 17. století, kdy byla sluneční aktivita mimořádně nízká.

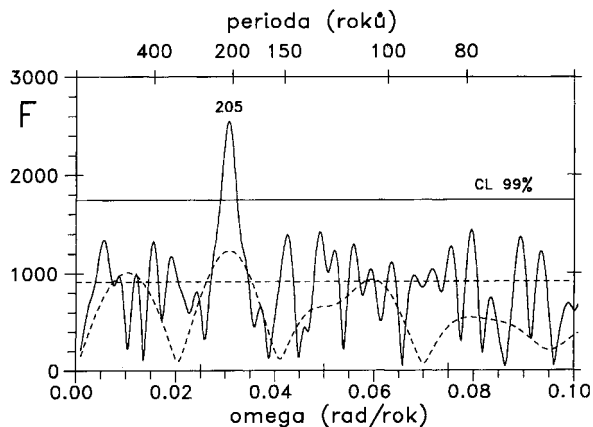


Obr. 6. Průběh cyklů sluneční aktivity od r. 1611 do současnosti. Čárkovaně je označen přepočtený průběh podle Letfuse (1993).

Vrátíme-li se k obr. 3, kde je ukázána dlouhodobá změna sluneční aktivity za 1200 let, uvidíme, že uvedená stoletá perioda se nepotvrzuje. Zcela zde převládá perioda kolem 200 let. S velkým rozptylem kolem hodnoty 200 let lze nalézt dlouhodobá minima ve sluneční aktivitě. Tato minima mají svá jména: Oortovo (kolem r. 1040), Wolfovo (1310), Spörerovo (1480), Maunderovo (1670) a Daltonovo (1810). Zdá se, jako by se střídaly delší a kratší intervaly mezi dlouhodobými minimy: 270, 170, 190, 140, ale pro potvrzení této představy je počet známých dlouhodobých minim příliš malý. V této souvislosti se dlouhodobé maximum ve druhé polovině 19. století jeví jako mimořádné.

Kromě toho obrázek naznačuje existenci jisté periodicity mnohem delší. Vzhledem k tomu, že

Maunderovo minimum v 17. století bylo nejhlubší a nejdelší, je sluneční aktivita ve století před ním i po něm vyšší. Nápadné je dlouhodobé maximum před rokem 1200, kdy byl současně větší odstup mezi dlouhodobými minimy. Pokud by další podobné maximum připadalo na období kolem r. 2000, pak by zde byla perioda kolem 800 let.



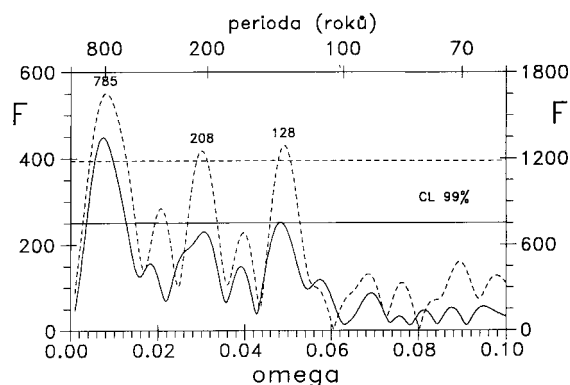
Obr. 7. Spektra řady Wolfových čísel v oboru dlouhých period. Plná čára spektrum z řady -200 - 2000 podle Schove (1955), čárkovaně z řady 1611-2000.

Hlavní dlouhodobou periodou dobře vidíme také ve spektru. Na obr. 7 je uvedeno spektrum řady Wolfových čísel vytvořené z poloh maxim a minim jednotlivých cyklů za 2200 let (Střeščík, 2002) v oboru period nad 60 let. Jediné významné maximum leží v periodě 205 let, což odpovídá 18 jedenáctiletým cyklům. Několik dalších menších maxim přesahují o něco málo hranici 95% významnosti, ne však hranici 99% významnosti. Na obr. 7 je současně uvedeno spektrum řady  $W$  pro období 1611-2000. Hlavní maximum je na stejném místě, další významná maxima (přes 99% významnost) jsou v periodách kolem 104 roků a také 570 roků. To poslední však vzhledem k délce řady nelze považovat za reálné. Spektrum pro řadu ještě kratší (1849-2000), zde neuvedené, je jiné – převládá perioda 104 roků, avšak dosahuje stěží jen 95% významnosti.

Perioda kolem 210 let (a některé delší) byla nalezena jako významná u koncentrace radioaktivního uhlíku  $^{14}\text{C}$  v atmosféře, na základě rekonstruované řady za 8000 let z přírodních archivů (Vasiliev, Dergachev, 2002). Radioaktivní uhlík vzniká v atmosféře vlivem kosmického záření a je mj. indikátorem dlouhodobých změn sluneční aktivity v dávné minulosti.

Také ve spektru rekonstruovaných řad podle Bard et al. (2000) nebo Usoskin et al. (2003) nalezneme převládající periodu kolem 208 let (obr. 8). Spektra spočtená z obou těchto zdrojů se navzájem liší velmi málo. V obou se dále vyskytuje výrazná perioda kolem 800 let, která odpovídá vzdálenosti výše zmíněných dlouhodobých maxim. Může být ovšem o něco delší, neboť není zatím jisté, že dlouhodobé maximum rokem 2000 končí. Na druhé straně navzdory výšce odpovídajícího vrcholu ve spektru je třeba uvážit, že dosud známe jen jeden cyklus této délky a to je příliš

málo. Velikost tohoto vrcholu ve spektrech pak snižuje významnost ostatních vrcholů. V obou spektrech je dále nápadný vrchol v periodě kolem 130 let. Tato hodnota neodpovídá periodicitě, jaká by se zdála za posledních 400 let (obr. 6), a nebyla také pozorována v řadě podle Schove (1955). Snad jediné čárkovaný graf na obr. 7 naznačuje dvojité maximum někde mezi periodami 100 a 150 let.



**Obr. č. 8. Spektrum rekonstruované řady slunečního záření podle Bard et al., 2000 (plně, stupnice vlevo) a sluneční aktivity podle Usoskin et al., 2003 (čárkovaně, stupnice vpravo) v oboru dlouhých period..**

Extrapolace za rok 2001 předpokládá pokračující pokles v rámci 205-leté periody, kdy další dlouhodobé minimum by mělo nastat kolem roku 2070. Pokud se současně uplatní také 104-letá perioda, výrazná pouze v posledních 2–3 stoletích, nastane dlouhodobé minimum o něco dříve (~ r. 2050) a menší dlouhodobé minimum znovu ještě před rokem 2100. Uplatnění 800-leté periody není jisté vzhledem k tomu, že dosud známe jediný cyklus této délky. Je-li však reálná pravidelná změna odstupů mezi dlouhodobými minimy, pak by současný odstup měl přesáhnout 200 let a následující dlouhodobé minimum mělo nastat v polovině 21. století, což souhlasí s výše popsanou úvahou. V každém případě v následujících desetiletích by již celková sluneční aktivita měla klesat (více Střeščík, 2002).

### Poděkování

Tato práce je součástí Výzkumného záměru GFÚ „Studium vnitřní stavby a fyzikálních vlastností Země a jejího okolí geofyzikálními metodami“, reg. č. Z 3012916, a badatelského projektu GFÚ „Vliv klimatických a antropogenních faktorů na živé a neživé prostředí“, reg. č. K 3046108.

### LITERATURA

- Bard, E., Raisbeck, G., Yiou, F., Jouzel, J.: 2000, „Solar irradiance during the last 1200 years based on cosmogenic nuclides“, *Tellus B* **52** (3), 985-992.
- Charvátová I., Střeščík J.: 1991, „Long-term variations in duration of solar cycle“, *Bull. Astr. Inst. Czech.* **42**, 90-97.
- Kleczeck J.: 1952, *Publ. Inst. Centr. Astron.* No **22**, Prague.
- Křivský L., Pejml, K.: 1988, „World list of polar aurorae <55° N and their secular variations“, *Travaux géophysiques 1985*, Academia, Praha.

- 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.: 2002, „Dlouhodobé periodicity ve Wolfových číslech slunečních skvrn“, *Zborník referátov z XVI. Slnečného seminára*, 78-81.
- Usoskin I. G., Solanki S., Schüssler M., Mursula K., Alanko K.: 2003, „Millenium-scale sunspot number reconstruction: Evidence for an unusually active Sun since the 1940's“, *Physical Review Letters* **91**, No 21.
- Vasiliev S. S., Dergachev V. A.: 2002, „The ~2400-year cycle in atmospheric radiocarbon concentration: bispectrum of <sup>14</sup>C data over the last 8000 years“, *Annales geophysicae* **20**, 115-120.
- Wilson, R. M.: 1987, „On the distribution of sunspot cycle periods“, *Journal Geophys. Research* **92**, A9, 10101-10104.

### Další prameny:

- Guth V., Link F., Mohr J.M., Šternberk B.: 1954, „Astronomie I“, Nakladatelství ČSAV, Praha.
- Hajduk A., Štohl J. a kolektiv: 1987, „Encyklopédia astronómie“, Vydavateľstvo Obzor, Bratislava.

Příloha 1. Měsíční hodnoty Kleczkova indexu slunečních erupcí

rok	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1966	2,08	2,86	11,24	4,96	4,43	2,42	6,40	6,02	6,43	4,18	2,21	5,83
1967	7,02	9,87	8,26	8,89	9,38	6,00	10,11	8,94	3,38	6,81	6,28	7,86
1968	5,59	5,97	2,55	1,53	2,58	4,75	3,54	3,71	5,14	8,83	4,20	5,00
1969	4,49	5,23	5,70	5,72	7,18	6,66	3,00	4,16	5,40	3,88	7,85	4,44
1970	5,36	7,70	9,60	5,21	6,40	7,90	6,84	3,14	3,07	4,58	8,64	3,59
1971	3,23	2,84	1,25	2,90	1,98	1,23	2,26	3,01	1,90	1,11	1,39	1,88
1972	2,19	3,35	1,72	0,90	2,95	2,80	1,94	6,64	2,26	3,13	0,93	1,28
1973	1,45	1,55	2,61	4,29	2,75	1,45	1,46	0,84	1,86	1,35	0,72	0,75
1974	0,68	0,76	0,17	2,91	1,86	1,91	4,03	0,56	2,88	2,34	0,93	0,65
1975	0,34	0,11	0,18	0,03	0,14	0,81	0,31	2,08	0,15	0,06	0,85	0,20
1976	0,99	0,17	2,82	1,17	0,74	0,75	0,11	0,64	1,08	0,34	0,23	0,82
1977	0,98	1,38	0,28	1,78	1,07	3,87	2,14	1,99	6,77	4,57	2,67	5,99
1978	5,88	15,00	7,58	12,34	11,37	9,40	13,69	5,42	12,32	9,00	7,22	14,68
1979	15,38	18,64	15,00	13,61	14,43	15,96	14,46	17,86	18,06	19,15	17,61	14,77
1980	17,06	14,66	9,89	19,61	13,60	18,17	13,74	15,65	16,26	18,16	30,73	16,07
1981	9,59	16,66	18,57	28,27	15,19	12,78	19,18	20,45	14,25	19,72	14,98	12,34
1982	16,53	21,12	17,90	10,52	11,17	24,35	20,79	16,09	17,67	11,03	14,67	25,30
1983	6,13	5,20	6,11	7,07	12,51	11,32	8,29	9,35	5,32	6,62	1,75	2,89
1984	6,48	11,49	7,20	12,81	10,82	3,63	2,46	2,74	1,12	0,43	2,76	2,01
1985	3,53	0,47	0,59	3,65	2,99	1,98	3,24	0,76	0,45	2,20	0,45	1,08
1986	0,81	4,91	0,98	1,41	1,02	0,05	0,90	0,12	0,15	2,44	0,86	0,25
1987	0,49	0,17	1,08	3,93	3,85	1,11	2,46	3,69	3,28	3,63	6,24	1,92
1988	5,10	1,84	7,59	6,32	4,46	10,58	9,32	7,18	9,73	7,75	13,54	14,33
1989	21,62	15,74	25,53	8,60	14,99	24,26	9,19	17,55	18,71	17,52	22,45	12,48
1990	12,44	9,32	14,02	10,27	12,48	10,40	10,20	14,37	10,27	11,61	14,42	16,19
1991	18,81	13,88	22,33	14,60	13,97	18,01	20,03	13,22	9,96	12,99	8,79	14,88
1992	9,53	16,10	5,51	8,96	5,03	6,79	7,67	7,69	6,99	8,57	5,90	4,13
1993	2,68	10,88	6,80	5,08	5,23	5,76	3,62	1,24	1,29	3,08	1,63	4,03
1994	2,97	2,27	3,52	0,89	0,38	0,80	0,90	1,77	1,11	2,21	0,69	1,40
1995	1,28	2,06	0,92	0,68	0,82	0,79	0,68	0,43	0,86	1,65	0,19	0,09
1996	0,18	0,04	0,22	0,73	0,25	0,26	1,04	0,47	0,03	0,00	1,07	0,70
1997	0,06	0,30	0,14	0,72	1,29	0,23	0,28	0,76	1,53	0,39	4,56	1,01
1998	0,96	1,25	3,93	5,22	5,22	2,40	3,05	5,60	5,12	2,01	7,35	5,76
1999	5,93	4,03	4,38	1,70	5,69	8,53	8,95	8,48	3,49	3,77	17,99	3,75
2000	2,14	5,21	9,25	6,81	6,83	14,50	22,94	4,30	6,97	3,47	5,77	3,07
2001	2,76	1,25	7,65	10,20	2,89	4,86	1,84	6,38	11,77	9,50	10,95	11,39
2002	4,15	3,95	3,06	4,72	3,39	1,17	7,54	8,18	4,21	5,92	5,10	3,10

Příloha 2. Tabulka maxim a minim jednotlivých slunečních cyklů.

Číslo cyklu	rok minima	rok maxima	max. W měsíční	vzestup (roků)	sestup (roků)	délka cyklu
-12	1610,8	1615,5	106,0	4,7	3,5	8,2
-11	1619,0	1626,0	109,0	7,0	8,0	15,0
-10	1634,0	1639,5	61,0	5,5	5,5	11,0
-9	1645,0	1649,0	50,0	4,0	6,0	10,0
-8	1655,0	1660,0	67,0	5,0	6,0	11,0
-7	1666,0	1675,0	46,0	9,0	4,5	13,5
-6	1679,5	1685,0	40,0	5,5	4,5	10,0
-5	1689,5	1693,0	40,0	3,5	5,0	8,5
-4	1698,0	1705,5	61,0	7,5	6,5	14,0
-3	1712,0	1718,2	63,0	6,2	5,3	11,5
-2	1723,5	1727,5	127,0	4,0	6,5	10,5
-1	1734,0	1738,7	140,0	4,7	6,3	11,0
0	1745,0	1750,3	92,6	5,3	4,9	10,2
1	1755,2	1761,5	86,5	6,3	5,0	11,3
2	1766,5	1769,7	115,8	3,2	5,8	9,0
3	1775,5	1778,4	158,5	2,9	6,3	9,2
4	1784,7	1788,1	141,2	3,4	10,2	13,6
5	1798,3	1805,2	49,2	6,9	5,4	12,3
6	1810,6	1816,4	48,7	5,8	6,9	12,7
7	1823,3	1829,9	71,7	6,6	4,0	10,6
8	1833,9	1837,2	146,9	3,3	6,3	9,6
9	1843,5	1848,1	131,6	4,6	7,9	12,5
10	1856,0	1860,1	97,9	4,1	7,1	11,2
11	1867,2	1870,6	140,5	3,4	8,3	11,7
12	1878,9	1883,9	74,6	5,0	5,7	10,7
13	1889,6	1894,1	87,9	4,5	7,6	12,1
14	1901,7	1907,0	64,2	5,3	6,6	11,9
15	1913,6	1917,6	105,4	4,0	6,0	10,0
16	1923,6	1928,4	78,1	4,8	5,4	10,2
17	1933,8	1937,4	119,2	3,6	6,8	10,4
18	1944,2	1947,5	151,8	3,3	6,8	10,1
19	1954,3	1957,9	201,3	3,6	7,0	10,6
20	1964,9	1968,9	110,6	4,0	7,6	11,6
21	1976,5	1979,9	164,5	3,4	6,9	10,3
22	1986,8	1989,6	158,5	2,8	6,8	9,7
23	1996,4	2000,3	120,8	4,0		



Příloha 3a. Roční Wolfova čísla: mezinárodně přijatá (1611–2003) a rekonstruovaná podle Schove (1983) (1500–1610).

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1500	5,0	3,0	11,0	26,0	47,0	61,0	80,0	65,0	51,0	33,0
1510	23,0	11,0	4,0	2,0	4,0	20,0	50,0	68,0	63,0	51,0
1520	33,0	18,0	9,0	5,0	2,0	14,0	42,0	88,0	131,0	103,0
1530	85,0	63,0	44,0	23,0	5,0	22,0	60,0	108,0	92,0	74,0
1540	45,0	25,0	15,0	3,0	13,0	40,0	88,0	138,0	115,0	100,0
1550	80,0	60,0	46,0	23,0	13,0	19,0	43,0	78,0	119,0	105,0
1560	98,0	81,0	58,0	45,0	30,0	18,0	10,0	8,0	15,0	40,0
1570	87,0	130,0	107,0	87,0	66,0	48,0	30,0	17,0	5,0	20,0
1580	70,0	110,0	89,0	72,0	50,0	25,0	9,0	5,0	7,0	18,0
1590	30,0	45,0	52,0	59,0	49,0	35,0	19,0	10,0	3,0	5,0
1600	9,0	25,0	48,0	70,0	88,0	70,0	50,0	21,0	5,0	5,0
1610	10,0	20,0	50,0	75,0	98,0	80,0	63,0	40,0	25,0	15,0
1620	5,0	9,0	20,0	38,0	68,0	105,0	95,0	80,0	55,0	40,0
1630	25,0	13,0	6,0	0,0	2,0	8,0	20,0	50,0	75,0	95,0
1640	80,0	63,0	43,0	30,0	18,0	0,0	4,0	11,0	17,0	25,0
1650	29,0	27,0	25,0	16,0	6,0	2,0	4,0	7,0	12,0	18,0
1660	24,0	24,0	20,0	15,0	9,0	5,0	0,0	4,0	9,0	14,0
1670	22,0	31,0	32,0	35,0	32,0	30,0	33,0	18,0	7,0	3,0
1680	9,0	7,0	24,0	27,0	29,0	28,0	26,0	15,0	12,0	5,0
1690	6,0	7,0	9,0	12,0	15,0	13,0	8,0	2,0	0,0	0,0
1700	4,0	15,0	32,0	46,0	58,0	65,0	53,0	38,0	22,0	14,0
1710	5,0	1,0	0,0	5,0	18,0	35,0	57,0	77,0	84,0	60,0
1720	42,0	32,0	23,0	12,0	21,0	44,0	85,0	140,0	120,0	90,0
1730	62,0	43,0	22,0	10,0	20,0	43,0	75,0	93,0	126,0	111,0
1740	86,0	53,0	28,0	20,0	8,0	13,0	25,0	45,0	65,0	81,0
1750	83,4	47,4	47,8	30,7	12,2	9,6	10,2	32,4	47,6	54,0
1760	62,9	85,9	61,2	45,1	36,4	20,9	11,4	37,8	69,8	106,1
1770	100,8	81,6	66,5	34,8	30,6	7,0	19,8	92,5	154,4	125,9
1780	84,8	68,1	38,5	22,8	10,2	24,1	82,9	132,0	130,9	118,1
1790	89,9	66,6	60,0	46,9	41,0	21,3	16,0	6,4	4,1	6,8
1800	14,5	34,0	45,0	43,1	47,5	42,2	28,1	10,1	8,1	2,5
1810	0,0	1,4	5,0	12,2	13,9	35,4	45,8	41,1	30,1	23,9
1820	15,6	6,6	4,0	1,8	8,5	16,6	36,3	49,6	64,2	67,0
1830	70,9	47,8	27,5	8,5	13,2	56,9	121,5	138,3	103,2	85,7
1840	64,6	36,7	24,2	10,7	15,0	40,1	61,5	98,5	124,7	96,3
1850	66,6	64,5	54,1	39,0	20,6	6,7	4,3	22,7	54,8	93,8
1860	95,8	77,2	59,1	44,0	47,0	30,5	16,3	7,3	37,6	74,0
1870	139,0	111,2	101,6	66,2	44,7	17,0	11,3	12,4	3,4	6,0
1880	32,3	54,3	59,7	63,7	63,5	52,2	25,4	13,1	6,8	6,3
1890	7,1	35,6	73,0	85,1	78,0	64,0	41,8	26,2	26,7	12,1
1900	9,5	2,7	5,0	24,4	42,0	63,5	53,8	62,0	48,5	43,9
1910	18,6	5,7	3,6	1,4	9,6	47,4	57,1	103,9	80,6	63,6
1920	37,6	26,1	14,2	5,8	16,7	44,3	63,9	69,0	77,8	64,9
1930	35,7	21,2	11,1	5,7	8,7	36,1	79,7	114,4	109,6	88,8
1940	67,8	47,5	30,6	16,3	9,6	33,2	92,6	151,6	136,3	134,7
1950	83,9	69,4	31,5	13,9	4,4	38,0	141,7	190,2	184,8	159,0
1960	112,3	53,9	37,5	27,9	10,2	15,1	47,0	93,8	105,9	105,5
1970	104,5	66,6	68,9	38,0	34,5	15,5	12,6	27,5	92,5	155,4
1980	154,6	140,0	116,0	67,0	46,0	18,0	14,0	29,2	99,9	157,6
1990	142,2	145,3	94,3	54,6	29,9	17,5	8,8	21,7	64,3	93,1
2000	119,5	111,0	104,1	63,6						

Příloha 3b. Roční Wolfova čísla: rekonstruovaná a opravená podle Letfus (1993) (1500–1749).

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1500	5,0	3,0	10,0	23,0	42,0	55,0	72,0	59,0	46,0	30,0
1510	21,0	10,0	4,0	2,0	6,0	30,0	75,0	101,0	98,0	80,0
1520	51,0	27,0	14,0	8,0	2,0	12,0	36,0	76,0	111,0	87,0
1530	72,0	53,0	37,0	19,0	5,0	30,0	82,0	147,0	125,0	101,0
1540	61,0	34,0	19,0	3,0	13,0	39,0	86,0	135,0	113,0	98,0
1550	78,0	59,0	45,0	22,0	11,0	26,0	59,0	107,0	164,0	145,0
1560	133,0	112,0	80,0	62,0	41,0	25,0	13,0	8,0	12,0	31,0
1570	68,0	102,0	84,0	68,0	52,0	38,0	23,0	13,0	5,0	25,0
1580	87,0	137,0	111,0	90,0	62,0	31,0	11,0	5,0	8,0	20,0
1590	33,0	49,0	56,0	64,0	53,0	38,0	21,0	11,0	3,0	7,0
1600	22,0	41,0	55,0	72,0	61,0	47,0	30,0	19,0	10,0	5,0
1610	11,0	22,0	54,0	81,0	106,0	86,0	68,0	43,0	27,0	15,0
1620	5,0	10,0	21,0	39,0	71,0	109,0	99,0	83,0	57,0	42,0
1630	26,0	14,0	7,0	2,0	3,0	7,0	13,0	32,0	51,0	61,0
1640	50,0	39,0	27,0	17,0	8,0	0,0	7,0	17,0	28,0	41,0
1650	48,0	44,0	38,0	26,0	9,0	2,0	12,0	21,0	37,0	55,0
1660	67,0	74,0	62,0	46,0	27,0	15,0	2,0	5,0	12,0	18,0
1670	27,0	34,0	41,0	46,0	42,0	37,0	29,0	21,0	9,0	2,0
1680	7,0	11,0	19,0	28,0	34,0	40,0	32,0	21,0	10,0	0,0
1690	3,0	7,0	12,0	17,0	21,0	24,0	19,0	11,0	5,0	0,0
1700	5,0	16,0	29,0	41,0	57,0	61,0	52,0	43,0	32,0	22,0
1710	13,0	5,0	2,0	4,0	14,0	29,0	51,0	63,0	61,0	52,0
1720	42,0	31,0	21,0	11,0	22,0	42,0	81,0	127,0	107,0	76,0
1730	49,0	36,0	11,0	5,0	20,0	43,0	88,0	112,0	140,0	127,0
1740	92,0	50,0	27,0	16,0	6,0	11,0	22,0	40,0	60,0	81,0