

AUTOMATIZACE MĚŘENÍ SLUNEČNÍHO SVITU NA STANICÍCH ČESKÉHO HYDROMETEOROLOGICKÉHO ÚSTAVU POMOCÍ ELEKTRONICKÝCH SLUNOMĚŘŮ

Jiří Pokorný, Český hydrometeorologický ústav, Solární a ozonová observatoř Hradec Králové, Hvězdárna 456, 500 08 Hradec Králové, e-mail: jiri.pokorny@chmi.cz

Karel Vaníček, Český hydrometeorologický ústav, Solární a ozonová observatoř Hradec Králové, Hvězdárna 456, 500 08 Hradec Králové, e-mail: vanicek@chmi.cz

Automation of measurements of sunshine duration at stations of the Czech Hydrometeorological Institute by electronic sensors. Automation of meteorological measurements at stations of CHMI also included installation of the electronic sunshine detectors. There were three types of sensors examined – the DSU12 (bimetallic), the SD4 (flat photodiode array) and the SD5 (cylindrical photodiode array). In the period 2001–2006 the detectors were tested at the Solar and Ozone Observatory of CHMI in Hradec Králové by the laboratory calibration unit and by means of comparative measurements of reference sunshine duration DIR performed with the pyrheliometer CM1. The best results have been achieved for the sensor SD5 that has significantly higher accuracy of measurement than the classic Campbell-Stokes (CSS) recorder. Accuracy of the SD5 was estimated by the standard deviation of differences between totals of sunshine and DIR that was about 7% for daily and 2% for yearly sums respectively. Within the tests there were procedures of routine calibration of electronic detectors developed and implemented at the SOO. By the end of 2006 the SD5 sensors were installed at 90 automated weather stations (78%) of the CHMI network where they have replaced the CSS recorders. Due to better accuracy of sensors SD5 it is expected that their large use will affect long-term homogeneity of sunshine duration series measured in the territory of the Czech Republic.

KLÍČOVÁ SLOVA: slunoměr elektronický – kalibrace – automatizace měření

KEY WORDS: electronic sunshine recorder – calibration – automation of measurements

1. ÚVOD

Automatizace staniční sítě Českého hydrometeorologického ústavu (ČHMÚ) vedla k nutnosti zavedení elektronických slunoměrů jako jednoho z čidel automatických meteorologických stanic (AMS). Tato nová přístrojová technika představuje zásadní změnu v technologii měření doby trvání slunečního svitu (dále jen slunečního svitu nebo SSV), který je významným klimatickým prvkem. Pro budoucí hodnocení kvality dlouhodobých řad SSV a pro informaci o zachování mezinárodních standardů měření je proto třeba seznámit odbornou veřejnost s technickým popisem, funkcí a způsobem používání těchto nových slunoměrů. Tento příspěvek je zaměřen především na výsledky testů a zavedení provozních kalibrací elektronických slunoměrů typu SD4 a SD5 vyráběných firmou Meteoservis Vodňany, které byly od r. 2001 postupně instalované na stanicích ČHMÚ. Testy byly prováděné na Solární a ozonové observatoři ČHMÚ v Hradci Králové (SOO). Autoři se záměrně nevěnují obecnému hodnocení kvality historických řad měření SSV uložených v klimatické databázi ČHMÚ, která mohla být ovlivněna i dalšími faktory, např. nevhodnou instalací slunoměrů, nesprávným vyhodnocováním registrace SSV nebo nevyhovujícím horizontem na jednotlivých stanicích. Takováto studie, zaměřená například na analýzu dlouhodobých změn slunečního svitu na území ČR, by si vyžádala samostatný výzkumný klimatologický úkol.

2. SLUNEČNÍ SVIT – ZÁKLADNÍ DEFINICE

K správnému pochopení dalších částí příspěvku je třeba uvést definice některých základních pojmů, které jsou naší odbornou veřejností někdy odlišně používány nebo různě vykládány. Některé upřesňují i definice uváděné v Meteorologického slovníku [1]

Doba trvání slunečního svitu (sluneční svit)

Teoreticky doba, po kterou je přímé sluneční záření dopa-

dající na zemský povrch nenulové. Subjektivně lze SSV ztožnit s dobou, po kterou volně exponované předměty vrhají rozpoznatelný stín.

Sluneční svit měřený

Doba, po kterou je sluneční svit možno přístrojově měřit. Jedná se o skutečně měřené hodnoty SSV, které závisí mimo atmosférických podmínek i na citlivosti použitého slunoměru. Pro potřeby mezinárodní standardizace měření slunečního svitu byla stanovena Komise pro přístroje a metody pozorování (CIMO) Světové meteorologické organizace (SMO) jako detekční úroveň pro začátek registrace SSV intenzita toku přímého slunečního záření dopadajícího na plochu kolmou k paprskům $120 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ [2]. V meteorologické praxi je měřený sluneční svit totožný se slunečním svitem.

Sluneční svit astronomicky možný

Doba mezi východem a západem Slunce vzhledem k ideálnímu obzoru slunoměru s nulovým převýšením.

Sluneční svit efektivně možný

Astronomicky možný sluneční svit zkrácený o dobu stínění Slunce reálným převýšením horizontu slunoměru včetně okolních překážek. Efektivně možný SSV tedy závisí na umístění slunoměru v terénu.

Relativní sluneční svit

Poměr mezi měřeným a efektivně možným slunečním svitem.

Detekční úroveň

Intenzita toku přímého slunečního záření, při které dochází ke změně výstupní informace elektronického slunoměru mezi stavy SVÍTÍ – NESVÍTÍ. Pro zjednodušení bude v následujícím textu nahrazována detekční úroveň výrazy citlivost, nebo prahová citlivost.

3. MĚŘENÍ SLUNEČNÍHO SVITU CAMPBELLOVÝM-STOKESOVÝM SLUNOMĚREM

Doba trvání slunečního svitu se až dosud na meteorologických stanicích v ČR měřila výlučně pomocí Campbellova-Stokesova slunoměru (CSS) – viz. obr. 1. V centrální klimatologické databázi ČHMÚ CLIDATA bylo v r. 2006 uloženo celkem 186 řad měření SSV. Pouze 88 stanic má ale za období 1961–2000 řadu delší než 20 let. Nejstarší údaje o SSV na území ČR jsou k dispozici z Milešovky, kde se sluneční svit měří již od r. 1908.



Obr. 1. Campbellův-Stokesův slunoměr.

Fig. 1. The Campbell-Stokes sunshine recorder.

Princip měření slunečního svitu pomocí CSS je technologicky velmi jednoduchý. Skleněná koule, která funguje jako spojná čočka, soustřeďuje sluneční paprsky přicházející ve formě přímého slunečního záření ze slunečního kotouče. V jejím ohnisku je umístěna papírová páska, na které čočka soustředěné paprsky vypalují registrační stopu. Pomocí předtištěné časové stupnice lze z vypálené stopy vyhodnotit denní průběh a celodenní sumu SSV s přesností na desetiny hodiny. Přístroj musí být pevně umístěn v horizontální poloze s přesnou orientací na jih a nemá žádné pohyblivé části. Jednoduchá konstrukce a obsluha spolu s robustním provedením zaručují jeho značnou technickou stabilitu. Proto se CSS používal až do éry automatizace více než jedno století jako celosvětově nejrozšířenější slunoměr. K zajištění mezinárodní srovnatelnosti naměřených údajů SSV doporučila SMO zavedení národních referenčních Campbellových-Stokesových slunoměrů IRSR (Interim Reference Sunshine Recorder) vybavených standardními páskami [3]. Takovýto přístroj je k dispozici od r. 1964 i na SOO. V důsledku nedořešené kompetence k udržování kvality měření SSV mezi SOO, přístrojovým oddělením a vedením staniční sítě však nebyla až do r. 1988 tímto referenčním CSS prováděna pravidelná srovnávací měření slunoměrných pásek používaných v síti ČHMÚ.

Zachování dlouhodobé přesnosti měření slunečního svitu pomocí CSS však je i při správné instalaci a obsluze přístroje spojeno s některými technickými problémy. Mezi nejdůležitější patří zajištění stabilní tepelné citlivosti papírových pásek vůči dopadající sluneční energii a stále optické trans-

parentnosti skleněné koule. Těmito otázkami se v minulosti zabývali i pracovníci SOO. Podrobnosti mohou zájemci nalézt v publikacích [4, 5].

4. MĚŘENÍ SLUNEČNÍHO SVITU ELEKTRONICKÝMI SLUNOMĚRY A POČÁTKY AUTOMATIZACE MĚŘENÍ SLUNEČNÍHO SVITU V ČHMÚ

Nutnost automatizace měření SSV v síti ČHMÚ pomocí elektronických slunoměrů vedla v druhé polovině 90. let k potřebě technicky vhodného a cenově dostupného přístroje. Nejpresněji je možné určovat SSV měřením přímého slunečního záření pomocí pyrheliometrů nebo aktinometrů napojených na registrační jednotky, které zaznamenávají dobu, kdy je intenzita toku vyšší než 120 W.m^{-2} . Takovýto měření však není možné z důvodu vysokých nákladů provádět provozně a na větším počtu stanic. Velmi dobře ale mohou sloužit pro testování nebo kalibraci provozních slunoměrů ze sítí.

Obecně lze elektronické slunoměry rozdělit na dva základní typy. První skupinu tvoří přístroje s rotujícím stínítkem, štěrbinou nebo zrcátkem, které střídavě vrhají stín nebo světelný odraz na fotočlánek nebo termočlánek. Zde vytvářejí pulzující elektrický signál s periodou danou rychlostí otáčení (obvykle nižší než 1 s). Doba, po kterou signál přichází do registrační jednotky (přímé záření je nenulové – je možno vytvořit stín), je zaznamenána v digitální formě jako doba trvání slunečního svitu. Pomocí zvolené úrovně registrovaného signálu je možno nastavit citlivost čidla na požadovaných 120 W.m^{-2} . Mezi přístroje tohoto typu patří například slunoměry japonské firmy EKO model MS-091, které jsou velmi rozšířené v řadě meteorologických služeb, viz: <http://www.eko.co.jp/>. Nevýhodou rotujících slunoměrů je jejich pohyblivá část, která může být při dlouhodobém používání přístrojů zdrojem rychlejšího opotřebení a tím i nákladného servisu.

Druhou skupinou tvoří slunoměry, ve kterých je přímé sluneční záření separováno pevnými štěrbinami a snímáno různým počtem fotodiód. Vhodným geometrickým umístěním štěrbin a fotoelementů je zajištěna funkce slunoměru při různých polohách Slunce během roku a dne. Doba slunečního svitu je registrována jako čas, po který je fotoelektrické napětí mezi osvětlenou a referenční fotodiódou (stíněnou nebo orientovanou na sever) vyšší, než prahová hodnota odpovídající 120 W.m^{-2} . Ta se určuje buď laboratorní kalibrační umělým zdrojem, nebo aktinometricky pomocí přímého slunečního záření. Výhodou těchto slunoměrů jsou nižší pořizovací a provozní náklady. V Evropě je patrně nejrozšířenější slunoměr vyráběný holandskou firmou Kipp-Zonen, model CSD1, viz: <http://www.kippzonen.com/>

Ceny elektronických slunoměrů nabízených renomovanými výrobci meteorologických přístrojů jsou poměrně vysoké a blíží se cenám kvalitních pyranometrů. Při jejich nákupu pro plošnou automatizaci meteorologických stanic je proto třeba zvážit nejen vyšší počáteční investice, ale i náklady na zabezpečení provozu. První měření slunečního svitu pomocí elektronických slunoměrů bylo zavedeno v ČHMÚ v polovině 90. let pomocí elektronických slunoměrů DSU12 na stanicích automatizovaných systémy MONITWIN. Toto čidlo, které bylo dodávané firmou Vaisala od australského subdodavatele, bylo postupně instalováno na všech profesionálních stanicích ČHMÚ. Provozní měření slunečního svitu prováděná DSU12 a současně i CSS na stanicích spolu s testováním na SOO však ukázala, že tento slunoměr není vhodný pro geografické podmínky středních šířek z důvodu vysoké úrov-

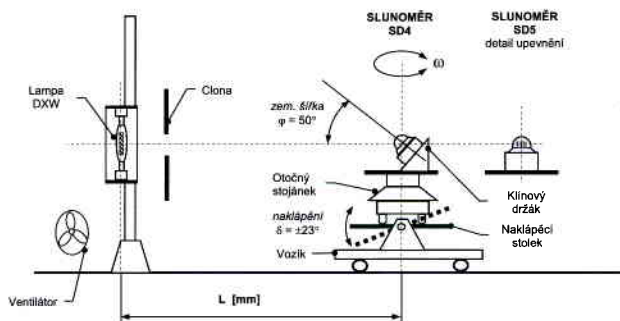
ně rozptýleného záření a nízké výšky Slunce nad obzorem v zimních měsících. Rovněž kalibrování DSU12 bylo velmi obtížné. Proto bylo další používání tohoto čidla v síti ČHMÚ postupně ukončeno. Přesto jsou základní výsledky jeho testování na SOO uvedeny v kapitole 6. V návaznosti na toto rozhodnutí a vzhledem k plánované komplexní automatizaci nejen profesionálních ale i klimatických stanic doporučili pracovníci SOO hledat tuzemské výrobce, kteří by byli schopni ve spolupráci s ČHMÚ vyvinout, vyrábět a servisně zajistit elektronické slunoměry požadované kvality. Na výzvu reagovala firma Meteoroservis, v. o. s. nabídkou vlastních slunoměrů typové řady SD. Jejich popisu a výsledkům testování na SOO je věnována hlavní část tohoto příspěvku.

5. TESTOVÁNÍ A KALIBRACE ELEKTRONICKÝCH SLUNOMĚRŮ NA SOO

SOO plní v rámci struktur SMO funkci Národního střediska pro měření slunečního záření, které mimo jiné odpovídá za kalibraci radiometrů používaných k měření slunečního záření na území ČR. Proto byla observatoř pověřena testováním a později i kalibrací elektronických slunoměrů instalovaných v staniční síti ČHMÚ. K tomuto účelu slouží dosavadní technické a přístrojové vybavení, které je dále rozšiřováno a zdokonalováno tak, aby pracoviště kapacitně zvládlo každoroční kalibraci několika desítek slunoměrů. K testování a kalibraci se používají dvě navzájem navazující technologie. První spočívá v laboratorním měření závislosti prahové citlivosti slunoměrů na jejich orientaci pomocí laboratorní jednotky se zdrojem umělého záření. Druhá vychází z expozice přístrojů v provozních podmínkách vůči přirozenému slunečnímu záření na měřicí plošině SOO.

5.1 Laboratorní kalibrační jednotka

Laboratorní jednotka používaná na SOO byla v uplynulých letech postupně vyvíjena. Její uspořádání pro testy a kalibrace slunoměrů řady SD je znázorněno na obr. 2. V případě elektronického slunoměru SD4 je přístroj připevněn prostřednictvím klínového držáku k otočnému stojanu tak, že svislá osa jeho otáčení prochází středem vstupní šterbiny čidla. Držák zajišťuje trvalý odklon čidla $90^\circ - \varphi$ od osy otáčení. Otáčení čidla kolem osy stojanu umožňuje simulovat rotaci Země se slunoměrem umístěným na $\varphi = 50^\circ$ zeměpisné šířky (území ČR). Sklonem osy otáčení v rozmezí $\pm 23^\circ$ je možné simulovat změnu deklinace Slunce (δ) pro různá roční období mezi zimním a letním slunovratem. S rozlišením $0,1^\circ$ lze na stupnici odečítat úhel, který v provozních podmínkách představuje hodinový úhel Slunce ω . Odpovídající pravý sluneč-



Obr. 2 Schéma laboratorní jednotky používané na SOO Hradec Králové ke kalibraci elektronických slunoměrů.

Fig. 2. The scheme of the laboratory unit used for calibration of electronic sunshine recorders at the SOO Hradec Králové.

ní čas TST [h], ve kterém je měřen sluneční svit, lze přepočíst vztahem:

$$\omega = 360 (TST - 12) / 24 \quad [^\circ] \quad (1)$$

Detekční úroveň slunoměrů SD4 i SD5 lze nastavovat pouze jedním parametrem. Změna se projevuje proporcionálně pro všechny směry dopadajícího slunečního záření. Pro seřizování slunoměrů byla definována základní poloha, $\omega = 0^\circ$ a $\delta = 0^\circ$, tj. postavení čidla a lampy simuluje polohu Slunce v pravé poledne při rovnodennosti. Citlivost slunoměru v základní poloze je definována jako základní citlivost. Zdrojem záření v jednotce je stabilně žhavená projekční lampa DXW firmy General Electric s maximálním příkonem 1 000 W. Intenzitu záření dopadajícího na čidlo je možno nastavit změnou jeho vzdálenosti od lampy posunem stojánu s čidlem. V případě slunoměrů typu SD5, které mají odlišnou geometrii umístění fotoelementů a skloněnou provozní polohu (viz kapitolu 8), se slunoměr připevňuje přímo k desce otočného stojánu bez jakýchkoli úhlových držáků. Proměřování SD5 je analogické s výše uvedeným postupem používaným pro slunoměry SD4.

5.2 Referenční měření slunečního svitu v reálných podmínkách

Laboratorní kalibrační jednotka umožňuje velmi rychle a bez ohledu na počasí proměřit technické parametry daného slunoměru (citlivost, azimutovou a elevační závislost) a v případě nevyhovujících hodnot čidlo vyřadit. Pro konečné výsledky testů (kalibrací) jsou však rozhodující měření prováděná v reálných podmínkách, kdy jsou přístroje umístěny na měřicí plošině (obr. 3) a vystaveny slunečnímu záření (reálná difuzní složka, přirozené spektrum). S periodou 1 minuta je zaznamenáván počet sekund, po které čidlo detekuje sluneční svit. Souběžně se registruje minutová průměrná intenzita toku přímého slunečního záření H_S , měřená buď přímo pomocí pyrhelometru, nebo je určena z rozdílu globálního a rozptýleného záření. Doba, po kterou je $H_S > 120 \text{ W.m}^{-2}$, slouží jako referenční doba trvání slunečního svitu (DIR).

Do srpna 2005 se k testování používaly hodnoty DIR počítané z provozních měření globálního a difuzního záření pyranometry CM11, které byly za příznivého počasí kontrolovány pyrhelometrem CM1. Od září 2005 se přímé sluneční záření na SOO měří nepřetržitě pomocí nově instalovaného pyrhelometru CH1 připevněného k automatickému solárnímu nosiči 2AP (obr. 3). Tato měření již nejsou zatížena systematickou chybou (přibližně 1–2 %), kterou do výpočtu referenčních hodnot DIR vnášela anizotropie rozptýleného záření. Přesnost měření DIR se tím zvýšila, zůstává však nadále částečně ovlivněna chybou vznikající v důsledku dlouhé registrační periody pro H_S , (1 minuta), kterou používaný AMS nedovoluje zkrátit. Velikost této chyby ale autoři odhadují na desetiny procenta. Všechny přístroje používané pro určení referenčního slunečního svitu DIR jsou kalibračně navázány na Národní radiační standard – absolutní dutinový radiometr HF-30497.

6. TESTY ELEKTRONICKÉHO SLUNOMĚRU DSU12

6.1 Popis slunoměru DSU12

Slunoměr DSU12 je přístroj jednoduché konstrukce pro použití v nenáročných aplikacích – obr. 4. Hlavní část přístroje tvoří 6 párů paralelně zapojených bimetalových kontaktních pásků, jejichž povrch je opatřen černým absorpč-

ním nátěrem. Pásky jsou připevněny k bílé základové desce a kryty akrylátovou polokoulí s větracím komínkem. Princip detekce slunečního svitu spočívá v sepnutí elektrického kontaktu nestejně ohřívány segmenty, které se teplem ohýbají. Vnější pásky jsou ohřívány složkami záření přicházejícími ze směru od Slunce, vnitřní rozptýleným zářením oblohy, které se odráží od bílého nátěru základové desky (odečtení difuzní složky).

6.2 Způsob testování slunoměru DSU12

V průběhu roku 1998 bylo na SOO testováno 9 slunoměrů DSU12. V laboratorních podmínkách byla nejprve kontrolována výrobně nastavená citlivost jednotlivých segmentů přístrojů v uspořádání odpovídajícím doporučením výrobce. Laboratorní kalibrační jednotka existovala v r. 1998 teprve v jednodušší verzi sestavy, popsané v kapitole 5.1. Nicméně s dostatečnou přesností a stabilitou bylo možno kontrolovat radiační tok lampy EPI1653 a reprodukovatelně nastavovat polohu DSU12. Byl zjištěn překvapivě vysoký rozptyl citlivostí jednotlivých segmentů nastavených výrobcem, které se pohybovaly v intervalu $220 - 550 \text{ W.m}^{-2}$.

V další fázi byl slunoměr DSU12-325 instalován na SOO ve venkovních podmínkách společně s provozním slunoměrem CSS s cílem sjednocení získávaných dlouhodobých sum SSV. Optimalizovaná detekční úroveň, která činila 200 W.m^{-2} , byla pomocí laboratorní kalibrační jednotky přenesena na dalších 8 slunoměrů DSU12, určených k nasazení na stanicích.

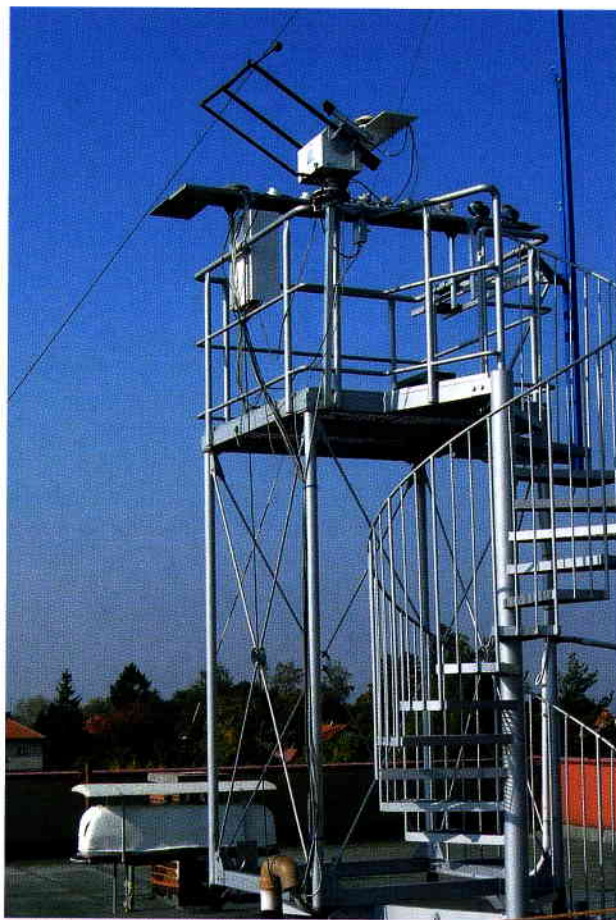
6.3 Výsledky testů slunoměrů DSU12

V době testování slunoměrů DSU12 ještě technické prostředky SOO nedovolovaly automatické, nepřetržité měření referenčních hodnot DIR (nebyla k dispozici AMS s registračním intervalem 1 min.). Slunoměry byly proto srovnávány vůči provoznímu CSS navázanému na referenční přístroj IRSR. Při několika typických stavech oblačnosti byly okamžité hodnoty přímého slunečního záření kontrolovány pomocí pyrheliometru CM1. Datová řada rozdílů denních sum měřených pomocí DSU12-325 a CSS v období červen – prosinec 1998 je znázorněna na obr. 5. Z grafu je zřejmý výrazný trend a velký rozptyl odchylek, na kterém se ale částečně podílí i samotný přístroj CSS – srovnej s obr. 13. Použitím Gaussova zákona o přenášení chyb je možno pro denní sumy SSV odhadnout STD samotného čidla DSU12 vůči DIR na 0.80 hodiny. Detailním studiem odchylek se potvrdila zkušenost získaná při kontrolních měřeních pomocí CM1, že k záporným extrémům dochází při jasných dnech, zatímco ke kladným ve dnech s dostatečně dlouhým slunečním svitem a vysokým podílem rozptýleného záření. Konstruktivním nedostatkem slunoměrů typu DSU12 je tedy nedostatečné potlačování difuzní složky dopadajícího záření, která činí sezonní sumy SSV pořízené tímto přístrojem silně závislé na četnosti výskytu jasných a oblačných dnů. Slunoměr tedy nelze kvalitně kalibrovat pro celý rozsah meteorologických podmínek. U všech 9 slunoměrů DSU12, určených k instalaci do staniční sítě, byla nakonec jednotně nastavena detekční úroveň na 200 W.m^{-2} a uživatelům bylo doporučeno nepoužívat data z těchto přístrojů ke klimatickým studiím.

7. TESTY ELEKTRONICKÉHO SLUNOMĚRU SD4

7.1 Popis slunoměru SD4

Slunoměr SD4 byl prvním modelem řady SD vyvinutým a patentově chráněným firmou Meteoservis, v. o. s., Vodňany. Celkový pohled na přístroj se stínicím krytem je na obr. 6. Optický systém slunoměru, který je krytý skleněnou polo-



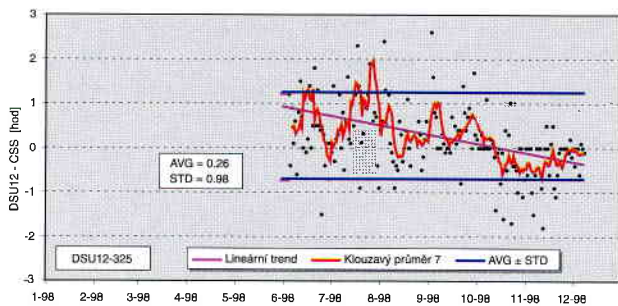
Obr. 3 Plošina pro měření slunečního svitu a slunečního záření na SOO Hradec Králové.

Fig. 3. The platform for measurements of sunshine duration and solar radiation at the SOO Hradec Králové.



Obr. 4 Slunoměr DSU12.

Fig. 4. The sunshine recorder DSU12.



Obr. 5 Rozdíly denních sum slunečního svitu naměřených slunoměry DSU12 a CSS na SOO Hradec Králové v období červen–prosinec 1998.
Fig. 5. Differences between daily totals of sunshine duration measured with the DSU12 and CSS sunshine recorders at SOO Hradec Králové in the period June–December 1998.

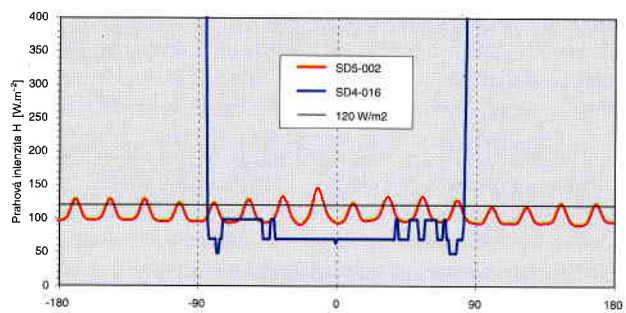
koulí, tvoří horizontální clona s podélnou štěrbinou orientovanou od jihu k severu. Pod štěrbinou je umístěna soustava fotovoltaických článků z monokrystalického křemíku. Na každý článek se promítá výřez (pruh) oblohy. Pokud je Slunce nad obzorem a není zakryto oblačností nebo jinou překážkou, tak při svém pohybu po obloze vždy osvětluje jeden z článků s maximální intenzitou. Elektronický systém slunoměru vybírá během dne nejvíce osvětlený článek, měří intenzitu toku dopadajícího přímého slunečního záření H_S a porovnává ji s prahovou citlivostí čidla nastavenou na 120 Wm^2 . Pokud intenzita záření překročí tuto hodnotu, přístroj vysílá do registrační jednotky signál o existenci slunečního svitu. Výstupem měření je dvoustavová hodnota napětí (proudu). Prahovou citlivost slunoměru je možno elektronicky upravit. Nezávislá úprava citlivosti jednotlivých fotočlánků není možná. Slunoměr má horizontální provozní polohu. Přístroj má vytápění, které zamezuje vzniku rosy, jíní nebo námrazy na krycí polokouli a zajišťuje správnou pracovní teplotu pro elektroniku, je vodotěsný a neobsahuje žádné pohyblivé části. Jeho pouzdro je vyrobeno z hliníkové slitiny. Bližší popis SD4 lze nalézt v [6].

7.2 Způsob testování slunoměru SD4

První testy 3 prototypů SD4 byly prováděny v r. 2000 a 2001. Spolu s testovanými přístroji byly na měřicí plošině umístěny i provozní radiometry pro měření DIR a klasický CSS s lesklou modrošedou páskou – provozní typ, rok výroby

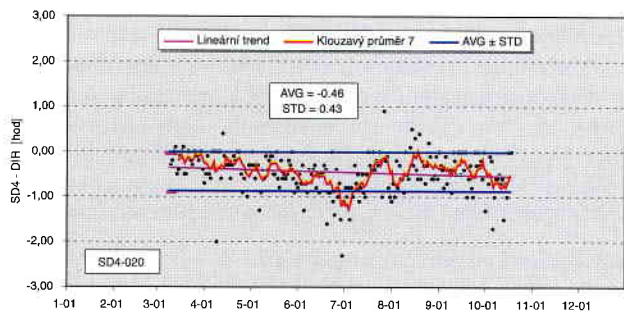


Obr. 6. Slunoměr SD4 se stínícím krytem.
Fig. 6. The sunshine recorder SD4 with the sunshade.



Obr. 7 Průběhy prahové citlivosti elektronických slunoměrů SD4-016 a SD5-002 v závislosti na hodinovém úhlu Slunce (lampy) měřené laboratorní kalibrační jednotkou na SOO Hradec Králové pro jarní a podzimní rovnodennost.

Fig. 7. Courses of threshold sensitivities of the electronic sunshine recorders SD4-016 and SD5-002 depending on the hour angle of the Sun (lamp) measured by the laboratory calibration unit at SOO Hradec Králové for the equinox.



Obr. 8 Odchytky denních sum slunečního svitu naměřených slunoměrem SD4-020 při nastavení výrobní prahové citlivosti vůči referenčním hodnotám DIR na SOO Hradec Králové, březen – říjen 2001.

Fig. 8. Differences between daily totals of sunshine duration measured with the sensor SD4-020 adjusted by the manufacturing threshold sensitivity towards the reference values DIR at SOO Hradec Králové, March–October 2001.

2000. Slunoměry byly nejprve instalovány s výrobním nastavením prahové citlivosti a jejich měření SSV bylo porovnáno s referenčními hodnotami DIR. Pak byla citlivost dvou čidel upravena tak, aby byla dosažena minimální odchylka denních sum měřeného SSV vůči DIR. Pro porovnání změn zůstala výrobní prahová citlivost třetího čidla nezměněna. Výsledky testů, ukázaly, že k dosažení optimální shody vůči DIR bylo třeba změnit detekční úroveň nastavenou výrobcem z původních ca 150 Wm^2 na 65 Wm^2 .

V následující etapě byla čidla SD4 testovaná laboratorní jednotkou – viz kapitolu 5.1. U všech přístrojů byla proměřena závislost jejich prahové citlivosti na hodinovém úhlu ω pro podmínky rovnodennosti na 50° zeměpisné šířky. Cílem tohoto postupu bylo ověření spojitosti denního chodu citlivosti čidla. Výsledky testů ukázaly, že citlivost nebyla při různé orientaci dopadajícího záření konstantní (azimutová a elevační závislost) a výrazně se měnila pro jednotlivé fotoelementy. Tuto skutečnost je možno dokumentovat na obr. 7, který znázorňuje denní chod prahové citlivosti slunoměru SD4-016 mezi $\omega = -90^\circ$ (východ Slunce) až $\omega = +90^\circ$ (západ Slunce). Z testování více přístrojů vyplynulo, že podobně jako SD4-016, i všechny ostatní slunoměry SD4 vykazovaly náhlý pokles citlivosti pro hodinové úhly $|\omega| > 80^\circ$, tj. při malé výšce Slunce nad obzorem ($h < 6.5^\circ$). Laboratorní měření také ukázala, že k velkému poklesu citlivosti některých slunoměrů SD4 dochází mimo tento interval hodinových úhlů,

tj. ztráta citlivosti se projeví pro mnohem větší výšky Slunce nad obzorem. Tuto ztrátu citlivosti nebylo možné kompenzovat ani individuálním nastavením detekční úrovně jednotlivých přístrojů.

7.3 Výsledky testů slunoměrů SD4

Venkovní i laboratorní testy popsané v předchozí kapitole ukázaly, že slunoměry SD4 při správném seřízení poskytují dobré výsledky. U testovaných přístrojů se chyba určití měsíčních sum slunečního svitu pohybovala v intervalu +2 až -7 % ve srovnání s referenční hodnotou DIR a v intervalu +6 až -5 % ve srovnání s údaji provozního slunoměru CSS. Chyba měření vykazovala sezonní závislost. I laboratorní měření prokázala, že k největšímu podhodnocení SSV docházelo při nízké výšce Slunce nad obzorem, kdy citlivost SD4 rychle klesá. Správná elektronická kompenzace tohoto nedostatku optického systému čidla proto byla klíčovým úkolem při výrobě přístroje. Pokud se citlivost jednotlivých fotoelementů výrazně liší, lze sice při kalibraci posunout detekční úroveň částečně minimalizovat chybu úhrnu SSV za delší časové období, ale rozptýlil odchylek denních a tím spíše hodinových sum, se výrazně zhorší. Měření také u všech testovaných slunoměrů SD4 ukázala, že jejich prahová citlivost byla od výrobce nastavena příliš vysoko. Tuto skutečnost dokumentují na obr. 8 odchylky denních sum SSV naměřené na SOO přístrojem SD4-020 s výrobním nastavením jeho prahové citlivosti vůči hodnotám DIR. Slunoměry SD4, které byly instalované přímo výrobcem v síti ČHMÚ bez kalibrace na SOO, proto s největší pravděpodobností i v letních měsících podhodnocovaly SSV přibližně o 5 až 10 %.

Uvedené testy byly prováděny na SOO až do února r.2002. Testovány byly jak prototypové vzorky, tak i několik přístrojů určených pro instalaci na stanicích (výrobní čísla 029 až 045). Průběh testů byl neustále konzultován s výrobcem. I přes dílčí zlepšení se však nepodařilo stabilně dosáhnout požadovaných parametrů. Některé slunoměry SD4 dosáhly plnou srovnatelnost s provozními vlastnostmi CSS. U dalších přístrojů ale byly odchylky stále nad přijatelnou mezí. Proto se výrobce rozhodl provést inovaci slunoměru. Zásadní změnou optické části vznikl nový model s typovým označení SD5.

8. TESTY ELEKTRONICKÉHO SLUNOMĚRU SD5

8.1 Popis slunoměru SD5

Slunoměr SD5 a jeho základní schéma jsou znázorněny na obr. 9 a obr. 10. Podrobný popis slunoměru SD5 je uveden v Příručce pro uživatele [7]. Korpus, krycí kupolka a elektronický systém jsou u SD5 stejné jako u modelu SD4. Zásadní rozdíl ale spočívá v konstrukci optické části. Tu tvoří systém 16 štěrbin ve válcové cloně. Za každou štěrbinou je umístěna fotodioda. Při instalaci slunoměru tak, aby osa clony byla paralelní s osou zemské rotace, procházejí sluneční paprsky v denním chodu postupně jednotlivými štěrbinami. Elektronika přístroje je při opakovaném skenování všech diod schopna nalézt nejvíce osvětlenou fotodiodu a vyhodnotit intenzitu dopadajícího záření. Výše uvedené sklonění slunoměru umožňuje měření SSV pro hodnoty hodinového úhlu v rozmezí $\omega = -180^\circ$ až $+180^\circ$ a neexistuje žádná přímá závislost citlivosti slunoměru na výšce Slunce nad obzorem.

8.2 Optimalizace citlivosti slunoměrů SD5

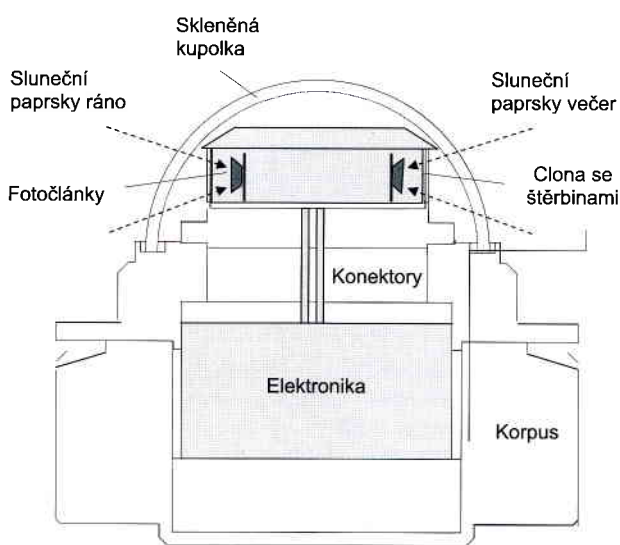
Slunoměry SD5, podobně jako SD4, nemají vyrovnanou spektrální charakteristiku [7]. Při laboratorním nastavování a kontrole jejich citlivosti je třeba vzít v úvahu, že vyzářovací spektrum lampy nevystihuje sluneční spektrum s dostateč-

nou přesností, protože barevná teplota Slunce je asi 6 000 K, zatímco u používané lampy je tato hodnota přibližně 2 800 K. Slunoměr SD5 proto nebude vyhodnocovat intenzitu záření 120 Wm^{-2} ze Slunce shodně jako stejnou intenzitu záření lampy, jejíž radiační tok byl stanoven pomocí pyranometru s rovnou spektrální charakteristikou. V reálných podmínkách navíc existuje složka rozptýleného záření, kterou elektronika slunoměru s větší či menší úspěšností potlačuje. Laboratorní modelování této nestabilní složky je ale problematické. Proto je třeba pro typový vzorek čidla nalézt experimentálně, na slunci, optimální hodnotu jeho prahové citlivosti. Pro nový typ detektoru s neznámými vlastnostmi je k tomu zapotřebí delší časové období, ve kterém je čidlo vystaveno různým typům meteorologických situací s různým podílem difuzní složky záření. K tomu je zapotřebí shromáždit data alespoň za půl roku. Slunoměr s takto optimalizovanou prahovou citlivostí pak může být jako referenční použit v laboratorní kalibrační jednotce pro přenos detekční úrovně (nastavení prahové citlivosti) na další slunoměry stejného typu.



Obr. 9. Slunoměr SD5 umístěný na držáku.

Fig. 9. The sunshine recorder SD5 mounted on the holder.



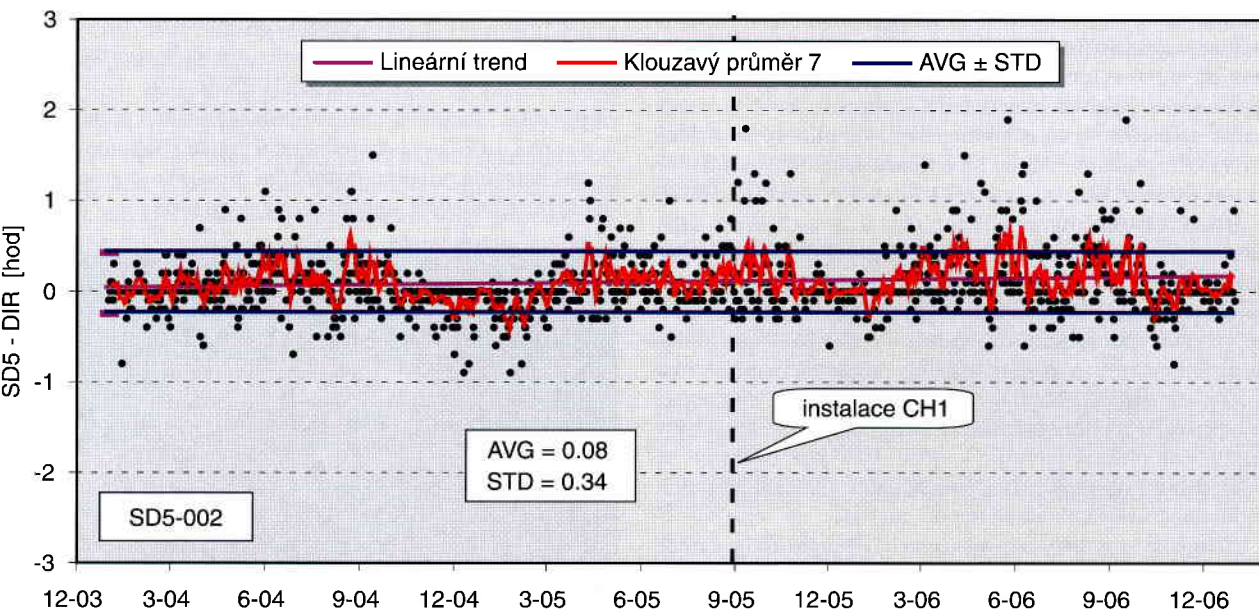
Obr. 10. Schéma slunoměru SD5 (nárys).

Fig. 10. The scheme of the sunshine recorder SD5 (front view).

8.3 Výsledky laboratorních testů slunoměru SD5

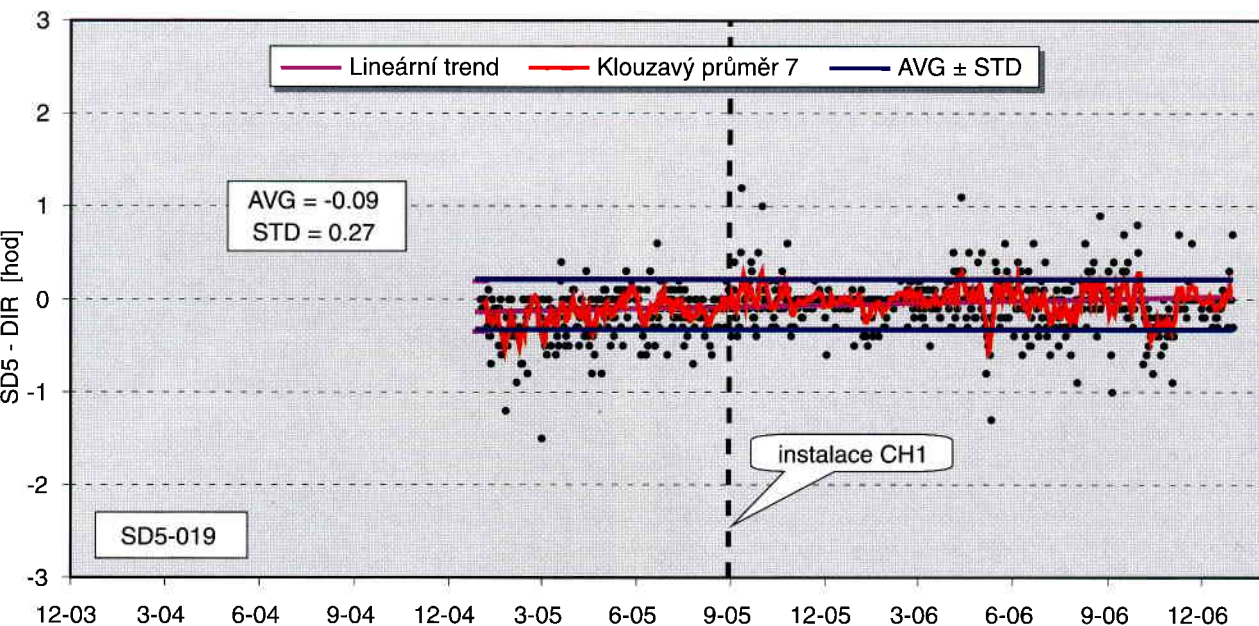
Testy slunoměrů SD5 pomocí laboratorní jednotky probíhaly stejným způsobem jako u přístrojů SD4. Odlišné bylo uchycení čidla v ose otočného stojanu – na rozdíl od SD4 bez klínové podložky (obr. 2). Otáčením stojanu o 360° bylo možno postupně osvětlit všechny štěrbinu a simulovat tak pohyb Slunce v celém rozsahu hodinových úhlů -180° až $+180^\circ$, tedy i pro polohy Slunce v naší zeměpisné šířce pod obzorem. Výsledky testů prokázaly, že i u čidla SD5 dochází k určitému kolísání jeho citlivosti při postupné expozici jednotlivých fotodiód. Tyto odchylky se ale pohybují v rozmezí při-

bližně $\pm 15 \text{ Wm}^2$ od intenzity $H_S = 120 \text{ Wm}^2$ a jsou geometricky (časově) pravidelné pro celý rozsah hodinových úhlů a ročních deklinací včetně poloh těsně při východu i západu Slunce. Tato skutečnost je dokumentovaná na křivce prahové citlivosti slunoměru SD5-002 znázorněné na obr. 7. Téměř stejné křivky byly naměřeny i při simulaci podmínek letního a zimního slunovratu, kdy byl otočný stolek s SD5 v kalibrační jednotce naklápěn pod úhly $+23^\circ$ a -23° . Laboratorní testy prokázaly velmi dobré geometrické i technické řešení čidla SD5. Pro jeho celkové hodnocení však bylo třeba posoudit jeho funkci v reálných podmínkách.



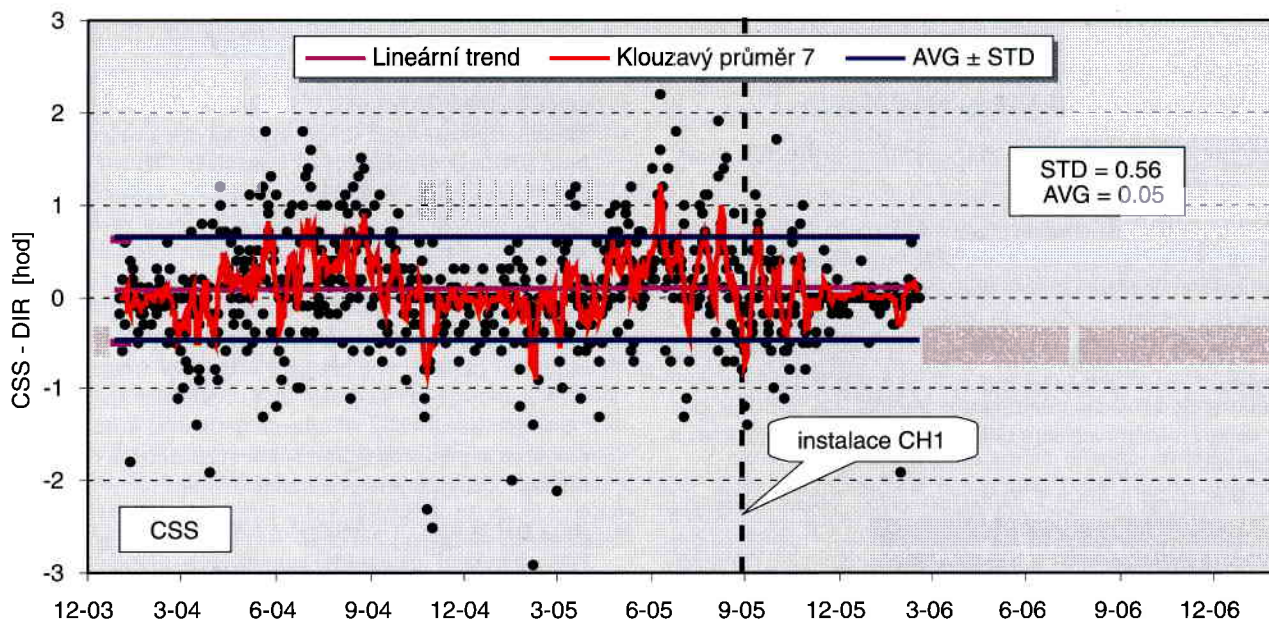
Obr. 11 Odchylky denních sum slunečního svitu naměřených slunoměrem SD5-002 vůči referenčním hodnotám DIR na SOO Hradec Králové, leden 2004 – prosinec 2006.

Fig. 11. Differences between daily totals of sunshine duration measured with the sensor SD5-002 towards the reference values DIR at SOO Hradec Králové, January 2004 – December 2006.



Obr. 12 Odchylky denních sum slunečního svitu naměřených slunoměrem SD5-019 vůči referenčním hodnotám DIR na SOO Hradec Králové, leden 2005 – prosinec 2006.

Fig. 12. Differences between daily totals of sunshine duration measured with the sensor SD5-019 towards the reference values DIR at SOO Hradec Králové, January 2005 – December 2006.



Obr. 13 Odchyly denních sum slunečního svitu naměřených slunoměrem CSS vůči referenčním hodnotám DIR na SOO Hradec Králové, leden 2004 – únor 2006.

Fig. 13. Differences between daily totals of sunshine duration measured with the sensor CSS towards the reference values DIR at SOO Hradec Králové, January 2004 – February 2006.

8.4 Výsledky testů slunoměru SD5 pomocí přímého slunečního záření

8.4.1 Sběr dat

První, vzorkový, slunoměr SD5 s výrobním číslem 002 byl na SOO testován od listopadu 2003. V průběhu 1. pololetí 2004 byla kontrolována a optimalizována jeho prahová citlivost, viz 8.2. Testování dalších slunoměrů SD5 a kalibrace přístrojů určených k nasazení do sítě ČHMÚ v reálných podmínkách probíhalo na SOO od června 2004. Na měřicí plošně byla umístěna skupina čidel, která nejprve prošla laboratorními testy a pak byla instalována spolu s klasickým slunoměrem CSS. Při testování byly použity jako základní registrované údaje minutové sumy SSV. Do 31. 8. 2005 se referenční doba slunečního svitu DIR získávala výpočtem z hodnot globálního a difuzního záření měřených pyranometry CM11. Od 1. 9. 2005 je referenční hodnota DIR získávána již pouze z přímého slunečního záření nepřetržitě měřeného pomocí pyrheliometru CH1. Analýza získaných dat byla provedena na bázi denních a měsíčních sum SSV. Závěry předložené v tomto příspěvku byly získány z datových řad těchto vzorkových slunoměrů:

- SD5-002 testovaný po celé období let 2004–2006, byla použita celá 3letá řada, přístroj je používán jako „referenční“ při kalibracích – viz. 8.2.
- SD5-019 použita řada pouze z let 2005–2006, od února 2006 je používán jako provozní slunoměr na SOO
- SD5-078 použita řada pouze z roku 2005, v roce 2006 byl předán k nasazení do sítě ČHMÚ.

8.4.2 Rozdíly individuálních denních sum SSV

Posouzení přesnosti slunoměrů typové řady SD5 bylo provedeno na základě souběžných měření slunečního svitu v reálných podmínkách pomocí výše uvedených vzorkových slunoměrů SD5, CSS a referenčních měření DIR. Z datových řad z období 2004–2006 byly určeny denní a měsíční sumy SSV a vypočteny jejich průměrné denní a měsíční odchylky vůči DIR. Na obr. 11 a obr. 12 jsou znázorněny rozdíly den-

ních sum shlazené 7denními klouzavými průměry (přibližná doba trvání typické synoptické situace) a s lineární spojnicí trendu pro slunoměry SD5-002 a SD5-019, které měly za sledované období nejdelší řady měření. Měsíční odchylky jsou znázorněny na obr. 15, který bude komentován v 9. kapitole. Z grafů je možno učinit tyto závěry.

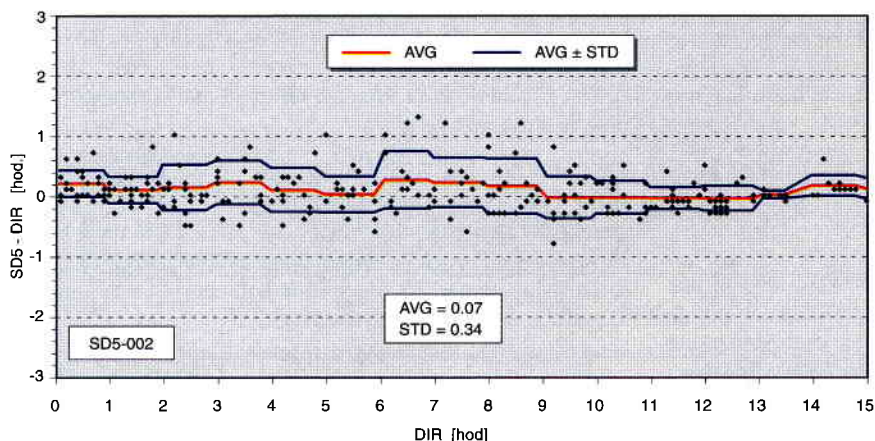
- U čidla SD5-002 se během testů vyskytly dny s výraznými, většinou kladnými odchylkami, které dosahovaly hodnoty až 1–2 hodiny. Bližší analýza ukázala, že se většinou jednalo o ojedinělé dny v letním období s vysokým odrazem slunečního záření na konvekční oblačnosti. Větší četnost kladných odchylek však nenastala u přístroje SD5-019, který má i nižší hodnotu STD odchylek. Zatímco SD5-002 byl jedním z prvních vývojových vzorků nové řady slunoměrů, další čidla SD5 procházela dílčími inovacemi, které snížily jejich citlivost vůči difuznímu záření. Toto zlepšení je zdokumentováno zatím pouze u slunoměrů SD5-019 a SD5-078, u nichž byly ke konci r. 2006 k dispozici dostatečně dlouhé datové řady.
- Chování slunoměrů SD5-019 a SD5-078 je téměř identické, jak ukazuje obr. 15 a jak potvrzují hodnoty STD za období jejich souběžného měření.
- U přístroje SD5-002 je patrný roční chod odchylek, který se v jednotlivých letech opakuje s minimem v zimním období. U čidel SD5-019 i SD5-078 tento sezonní charakter odchylek není zřetelný, parně vlivem již zmíněné inovace.
- Odhadem chyby stanovení referenčních hodnot DIR před 1. 9. 2005 lze vysvětlit i mírný posuv křivky klouzavých průměrů odchylek na obr. 12, který je zřetelnější na měsíčních průměrech na obr. 15. Se zpřesněním DIR po instalaci pyrheliometru CH1 dochází u SD5-019 ke zmenšení do té doby záporných odchylek SSV od referenční hodnoty. Tento závěr potvrzuje dočasné zvýšení záporných odchylek v období 5. 10.–3. 11. 2005, kdy z důvodu poruchy nebyly hodnoty DIR měřeny pomocí CH1, ale byly opět počítány z globálního a difuzního záření.

- Hodnoty trendů denních odchylek SSV získané pomocí lineární regrese se pohybují pod hranicí statistické významnosti (test $F_{0,975}$), což svědčí o stabilitě citlivosti všech popisovaných slunoměrů SD5.

8.4.3 Přesnost měření slunoměru SD5 za odlišných stavů atmosféry

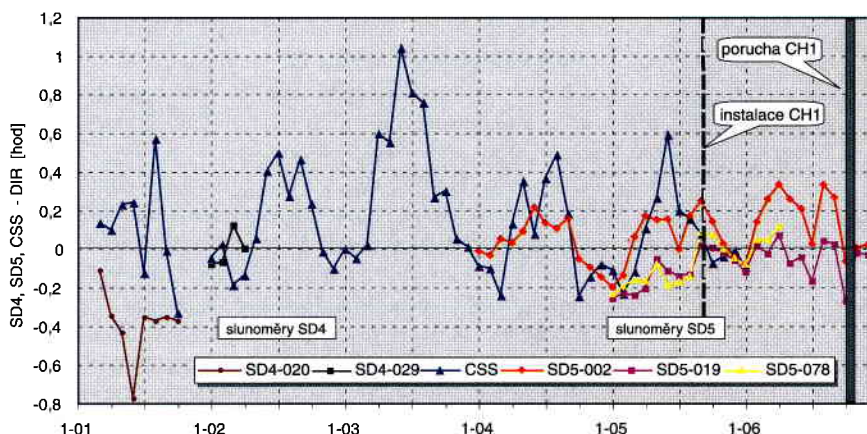
Při posuzování vlastností slunoměru SD5 byla také zkoumaná jeho schopnost měřit sluneční svit za rozdílných stavů atmosféry, tj. především ve dnech s různým množstvím proměnlivé oblačnosti. Za tímto účelem byla vyhodnocena datová řada pro SD5-002 za období r. 2005. Na obr. 16 jsou opět znázorněny odchylky denních sum SSV od referenčních hodnot, ovšem seřazené nikoli chronologicky, ale setříděné podle celkových denních sum DIR. Výsledky lze shrnout do těchto bodů:

- Průměrná odchylka AVG pro celou oblast měřených hodnot DIR, které se mohou na území ČR během roku vyskytnout, je 0.07 h a směrodatná odchylka STD rozdílů je 0.34 hodiny. Téměř stejné statistické výsledky jsou



Obr. 14 Průměry AVG a směrodatné odchylky STD rozdílů mezi denními sumami slunečního svitu naměřenými slunoměrem SD5 a radiometry DIR v závislosti na referenčních hodnotách DIR na SOO Hradec Králové v r. 2005.

Fig. 14. Averages AVG and standard deviations STD of differences between daily totals of sunshine duration measured with the sensor SD5 and with the radiometers DIR depending on reference values of DIR at SOO Hradec Králové in 2005.



Obr. 15 Odchylky měsíčních průměrů denních sum slunečního svitu naměřených různými typy slunoměrů vůči referenčním hodnotám DIR na SOO Hradec Králové, 2001–2006.

Fig. 15. Differences between monthly totals of sunshine duration measured with particular types of sunshine recorders towards the reference values DIR at SOO Hradec Králové, 2001–2006.

dokumentovány na obr. 11, ve kterém jsou použita data za 3leté období a řazení je chronologické.

- Odchylky průměrované pro intervaly s krokem 1 h DIR nepřekračují 0.25 h.
- Nejnižší hodnoty (pod 0.2 h) vykazují dny s velkou oblačností ($DIR < 3$) a polojasné až jasné dny ($DIR > 10$). Tato skutečnost potvrzuje požadovanou citlivost čidla při východech a západech Slunce a jeho nízkou citlivost vůči izotropnímu toku rozptýleného záření ze zatažených částí oblohy.
- Zřetelně větší rozdíly vykazují oblačné dny ($3 < DIR < 10$) s proměnlivou kumulovitou oblačností, na které dochází k silnému bočnímu odrazu přímého slunečního záření. Tento radiační tok přispívá k ozáření fotoelementů SD5 a zvyšuje tak hodnoty SSV a jejich proměnlivost. I v těchto dnech však všeobecné průměrné rozdíly denních sum nepřesahují 0.2 h (2–5 % možného SSV) a směrodatné odchylky jsou pod hranicí 0.4 h.

9. ROZDÍLY MEZI TESTOVANÝMI SLUNOMĚRY

Pro porovnání vlastností jednotlivých slunoměrů byl vytvořen obr. 15, ve kterém je znázorněno několik datových řad a testovacích period v období 2001–2006. Odchylky denních sum SSV od referenčních hodnot, tak jak byly popsány v kapitolách 7 a 8, byly průměrované po jednotlivých měsících, takže vertikální osa na obr. 15 má rozměr průměrné denní odchylky v hodinách.

9.1 Kvalita přístroje a správnost nastavení

Při posuzování výsledků jednotlivých typů slunoměrů je třeba rozlišovat mezi kvalitou samotného přístroje a správností jeho nastavení. Nesprávně nastavený přístroj ještě nemusí být nekvalitní. Zatímco kvalitu přístroje ovlivňuje především výrobce, správnost nastavení může ovlivnit uživatel v procesu kalibrace. Kvalita slunoměru jako typu či jako konkrétního výrobku se v datových řadách projevila jednoznačně v rozptylu odchylek denních sum SSV od referenčních hodnot. V předložených grafech lze proto za míru kvality slunoměru pokládat hodnotu STD odchylek, stanovenou za období alespoň několika měsíců. Projevem správného nastavení je dosažení minimální průměrné odchylky od referenční hodnoty, která je pokládána za hodnotu „skutečnou“.

9.2 Volba testovacího období

Důležitým parametrem pro hodnocení je délka období, za které je AVG stanovena. Na obr. 15, kde jsou denní odchylky průměrované po jednotlivých měsících, je u většiny slunoměrů patrný roční chod. Správná kalibrační metodika by měla zohled-

nit, do jaké míry se na tomto chodu podílí závislost citlivosti slunoměru na deklinaci Slunce, délka dne, roční chod charakteru oblačnosti nebo jiné vlivy (hydrometeory, rosa, jíní, atd.). Nejkratším obdobím pro stanovení reprezentativní hodnoty AVG je tedy 1 rok, což vyplývá ze snahy minimalizovat chybu roční sumy SSV. U slunoměrů, jejichž výsledky vykazují silnou závislost na struktuře oblačnosti, může být i odhad chyby ročních sum zkrácen výběrem roku, ze kterého byly statistické hodnoty vypočteny. Tuto skutečnost lze dobře demonstrovat na slunoměru CSS, pro který jsou k dispozici srovnávací data za období 2001–2005, jejichž „kvalitu“ charakterizuje značně vysoká hodnota $STD = 0.56$ h. Na obr. 15 je u tohoto přístroje patrná výrazně vyšší amplituda odchylek v roce 2003, kdy byla celoroční suma slunečního svitu abnormálně vysoká – zhruba 15 % nad průměrem z let 2001–2005. Průměrná denní odchylka AVG se v roce 2003 zvýšila na 0.36 h, což odpovídá nadhodnocení roční sumy o 6 %. Přitom za období I/2004–II/2006 je na obr. 13 zdokumentována hodnota $AVG = +0.05$ h, tj. nadhodnocení ročních sum o pouhé +1 %.

9.3 Hodnocení testů chronologicky

V chronologickém sledu testovacích období na obr. 15 není zachycena datová řada slunoměru DSU12-325, která používala jiné referenční hodnoty SSV pro stanovení denních odchylek. Jak bylo uvedeno v kapitole 6.2, v roce 1998 byly referenčními údaji denní sumy SSV z provozního slunoměru CSS. V kapitole 6.3 je odhadnuta hodnota STD samotného slunoměru DSU12 na 0.80 h, což vypovídá o nízké kvalitě tohoto přístroje. Obr. 5 dokumentuje výraznou sezonní závislost (roční chod) odchylek DSU12. Ve skutečnosti je tato závislost pravděpodobně ještě větší v důsledku analogického charakteru ročního chodu přístroje CSS.

Následující komentář kromě obr. 15 odkazuje i na dílčí grafy jednotlivých slunoměrů s denními hodnotami uvedené v kapitolách 7 a 8.

- SD4-020 Období III–X /2001, výrobní nastavení detekční úrovně, čidlo výrazně podhodnocovalo SSV. Průměrné denní odchylce za celé období -0.46 h (viz obr. 8) odpovídá chyba roční sumy zhruba -8 %. Kvalitu přístroje charakterizuje hodnota $STD = 0.43$, počítaná z denních odchylek.
- SD4-029 Období I–IV/2002, nastavení detekční úrovně kalibrací na SOO, čidlo bylo ve velmi dobré shodě s DIR, ale testovací období bylo příliš krátké na zobecnění této přesnosti na celý rok. Kvalitu přístroje lze odhadnout podle typově stejného slunoměru SD4-020 na $STD = 0.43$.
- SD5-002 Období I/2004–XII/2006, nastavení detekční úrovně kalibrací na SOO, čidlo má roční chod odchylek s maximem v letních měsících. Průměrné denní odchylce za celé období $+0.08$ h (viz obr. 11) odpovídá chyba roční sumy $+1.5$ %. Kvalita charakterizována hodnotou $STD = 0.34$.
- SD5-019 Období I/2005–XII/2006, nastavení detekční úrovně kalibrací na SOO, čidlo nevykazuje statisticky významný roční chod odchylek. Průměrné denní odchylce za celé období -0.09 h (viz obr. 12) odpovídá chyba roční sumy -1.7 %. Od září 2005 další zmenšení průměrné denní odchylky ($AVG = -0.05$), tj. chyba roční sumy < 1 %. O kvalitě svědčí $STD = 0.27$.

- SD5-078 Období I/2005–IV/2006, nastavení detekční úrovně kalibrací na SOO, stejné výsledky jako SD5-019
- CSS Období III/2001–II/2006, detekční úroveň byla daná kvalitou lesklých modrošedých provozních pásek (rok výroby 2000). Výrazný roční chod odchylek s průměrnou hodnotou za celé období $+0.14$ h, což odpovídá chybě roční sumy $+2.7$ %. V období souběhu se slunoměry SD5, (I/2004–II/2006) činila průměrná odchylka $+0.05$ h, tj. $+1.1$ % (viz obr. 13). Kvalitu přístroje charakterizuje vysoká hodnota $STD = 0.56$.

10. PRŮBĚH AUTOMATIZACE MĚŘENÍ SLUNEČNÍHO SVITU V STANIČNÍ SÍTI – STAV K 31. 12. 2006

Z ekonomických a organizačních důvodů probíhal proces automatizace měření slunečního svitu pomocí elektronických slunoměrů SD4 a SD5 postupně v rozmezí ca 7 let a dosud nebyl zcela dokončen. Již ve druhé polovině 90. let byly na profesionálních a leteckých stanicích ČHMÚ instalovány slunoměry typu DSU12, které měřily SSV na uvede- ných stanicích souběžně s přístroji CSS. Všechna čidla typu DSU12 byla do r. 2006 vyřazena, mimo jiné i proto, že jejich technické řešení neumožňovalo provádět spolehlivé kalibra- ce. V uplynulém desetiletí tak byly v síti ČHMÚ v provozu čtyři různé typy slunoměrů, některé z nich i současně. Pro budoucí analýzy vývoje pole slunečního svitu na území ČR, včetně hodnocení homogenity dlouhodobých řad SSV, je proto důležité znát přesný časový postup instalací elektronick- kých slunoměrů na jednotlivých stanicích. Tyto informace by měly být zaznamenány v sekci metadat klimatické databá- ze CLIDATA.

Celkově lze konstatovat, že k 31. 12. 2006 byl sluneč- ní svit na území ČR měřen celkem na 116 stanicích. Z nich bylo automatizováno pomocí slunoměrů SD5 celkem 90 sta- nic, což je 78 % celé sítě. Zatímco nevyhovující čidla DSU12 již byla vyřazena, na řadě stanic se i nadále používají sluno- měry CSS. Některé stanice, zejména na území jižní Moravy, budou v nejbližší době také automatizované pomocí přístrojů SD5. Na profesionálních stanicích Doksany, Churánov, Kocelovice, Kostelní Myslová a Praha-Karlov nadále pokračují pro kontrolní účely souběžná měření slunoměry SD5 i CSS.

11. PROVOZNÍ KALIBRACE SLUNOMĚRŮ SD5

Testování elektronických slunoměrů, které je popsá- né v předchozích částech tohoto příspěvku, postupně vedlo k definici a zavedení metodiky provozních kalibrací přístrojů SD5. Zatímco jen část čidel SD4 prošla uvedeným kalibrač- ním procesem před instalací na stanicích, všechny slunoměry SD5 již byly k instalaci dodávány až po jejich kontrole a kali- braci na SOO. Metodika kalibrací vychází z metrologických norem ČHMÚ [9] a [10]. Její jednotlivé fáze lze pro informa- ci čtenářů MZ charakterizovat takto:

- kontrola technického stavu a funkčnosti přístrojů po dodání od výrobce
- seřízení základní prahové citlivosti v referenčním bodě ($\delta = 0^\circ$, $\omega = 0^\circ$) pomocí laboratorní jednotky
- kontrola všech 16 segmentů optického systému, tj. porov- nání prahové citlivosti čidla v celém rozsahu hodinových úhlů -180° až $+180^\circ$ s experimentálně určeným toleranč- ním pásmem a vyřazení nevyhovujících slunoměrů
- kontrola vybraných slunoměrů v reálných podmínkách

srovnáním vůči DIR pro upřesnění jejich nastavené prahové citlivosti

- instalace okalibrovaných čidel na stanicích výrobní firmou Meteoservis, v. o. s. nebo specialistou Odboru profesionálních stanic ČHMÚ
 - recalibrace slunoměrů formou rotace záložních přístrojů
- V průběhu r. 2004–2006 bylo na SOO výše uvedeným způsobem kalibrováno celkem 123 slunoměrů SD5. Na základě dosavadních zkušeností s provozem těchto přístrojů je v současné době doporučen jejich kalibrační interval na 2 roky. Je možné, že technické vlastnosti čidel SD5 budou natolik stabilní, že bude možno tento interval ještě prodloužit.

12. ZÁVĚR

V článku jsou předloženy výsledky testování několika typů slunoměrů. I když se počet testovaných vzorků a délka testovacích období mohou zdát omezené pro správné hodnocení, níže uvedené závěry autorů byly podpořeny i výsledky řady dílčích měření, jejichž popis překračuje rámec této práce. Zejména u hodnocení slunoměrů DSU12 a SD4 je nutno zdůraznit, že předložené materiály mají pouze ilustrovat nedostatky tak průkazně, že vedly velmi brzy k doporučení odstoupit od používání těchto typů. Hlavním cílem příspěvku je tedy upozornění na tyto etapy automatizace a předložení předběžných výsledků perspektivního typu slunoměru SD5. Závěry mohou být vodítkem pro budoucí uživatele dat slunečního svitu z klimatické databáze ČHMÚ.

1. Přesnost klasických slunoměrů Campbella-Stokese lze charakterizovat typickou chybou naměřené celoroční sumy v rozmezí +1 % až +2.5 %, na které se nejvíce podílí letní období. V této části roku dosahuje chyba určené měsíčních sum až 7 % a ve výjimečně slunných letech (2003) může činit až 10 % (chyba roční sumy 2003 byla +6 %). Na nadhodnocení způsobeném komplikovaným vyhodnocováním velmi členitého záznamu na slunoměrných páskách se subjektivní faktor podílí jen velmi málo. Je třeba připomenout, že tyto závěry vycházejí pouze z 5leté řady získané jedním typem registrační pásky. Zobecnění odhadu přesnosti pro různé typy pásek a delší období bude předmětem další práce.
2. Správné nastavení (kalibraci) elektronických slunoměrů DSU12 nebylo možné spolehlivě zajistit a kvalitu slunečního svitu naměřeného těmito přístroji lze jen obtížně hodnotit. Pro klimatologické účely je proto vhodnější používat hodnoty naměřené souběžně slunoměry CSS, které jsou kvalitnější.
3. Slunoměry SD4 s výrobními čísly 029 až 045 byly kalibrovány na SOO a jejich přesnost je srovnatelná s přesností CSS.
4. Vzhledem k tomu, že většina slunoměrů SD4 nebyla před jejich instalací kontrolována a kalibrována na SOO, je třeba považovat kvalitu jejich měření z období do výměny za SD5 za neověřenou. Odhad chyby měření roční sumy SSV se pohybuje mezi -5 % až -10 %. V případech existence souběžného provozu CSS na dané stanici je vhodné používat údaje získané tímto klasickým slunoměrem.
5. Slunoměry SD4 byly pro nekonzistentní kvalitu a obtížnou reprodukovatelnost nastavení nahrazeny novým typem SD5. Výměnu na vlastní náklady na stanicích provedl výrobce.
6. Testy slunoměru SD5 prokázaly jeho výrazně lepší technické vlastnosti než u předchozího typu SD4. Proto byl tento přístroj zaveden jako nové provozní měřidlo slunečního svitu v síti ČHMÚ. Prováděné testy SD5 vedly

ke stanovení metodiky kalibrací tohoto přístroje, která je součástí systému metrologického zabezpečení ČHMÚ.

7. Čidlo SD5 měří stabilně v celém rozsahu možných denních sum slunečního svitu i za různých povětrnostních podmínek. Směrodatná odchylka individuálních denních sum SSV vůči referenčnímu měření DIR pro 3 testované slunoměry nepřekračovala hodnotu 0.34 h, což činí necelých 7 % průměrného denního slunečního svitu na území ČR. Pro klasické CSS slunoměry jsou tyto hodnoty odhadovány na 0.56, tj. více než 11 %.
8. V průběhu tříletého testování slunoměru SD5-002 neprokázaly laboratorní testy změnu citlivosti přístroje. Ani výsledky měření v reálných podmínkách dosud nesignalizují změnu dlouhodobé stability, což platí o všech zkoumaných vzorcích typu SD5. Proto lze uvažovat o prodloužení intervalu recalibrací čidel SD5 na 3 roky.
9. Zavedení slunoměrů SD5 patrně způsobí sezonní nehomogenitu dlouhodobých řad, ve kterých je zdrojem rozdílu nižší kvalita a roční chod přesnosti měření přístrojem CSS, viz bod 1. Vzhledem k tomu, že přístroj CSS spíše nadhodnocuje celoroční sumy SSV, lze po nasazení přesnějších slunoměrů SD5 očekávat nevýrazný pokles těchto sum, zhruba o 2 %.
10. Dosavadní poznatky umožňují předpokládat, že po zavedení slunoměrů SD5 dojde k celkovému zvýšení kvality měření slunečního svitu v síti ČHMÚ. K ověření tohoto předpokladu budou použita souběžná měření SSV pomocí SD5 a CSS, která pokračují na několika vybraných stanicích ČHMÚ.

Poděkování:

Autoři děkují pracovníkům Odboru profesionální staniční sítě, Odboru letecké meteorologie a poboček ČHMÚ, kteří spolupracovali při aktualizaci současného stavu měření slunečního svitu na území ČR a pracovníkům firmy Meteoservis, v. o. s. za cenné připomínky a podklady poskytnuté k tomuto příspěvku.

Literatura

- [1] Meteorologický slovník výkladový a teminologický., 1993. Praha: Academia, Ministerstvo životního prostředí. 594 s. ISBN: 80-85368-45-5.
- [2] Commission for Instruments and Methods for Observations (CIMO) - VIII, Recommendation 10., 1981. WMO.
- [3] Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observations – V, Chapter 21., 1983. WMO.
- [4] VANÍČEK, K., 1988. Kvalita slunoměrných pásek používaných v československé měřicí síti. *Meteorologické Zprávy*, roč. 41, č.1, s. 26–28.
- [5] VANÍČEK, K., 1988. Trendy slunečního svitu na území ČR v období 1956-1985. [Výzkumná zpráva úkolu A-12-331-810-04, Etapa 05, Antropogenní vlivy na vývoj pole slunečního svitu v ČSSR.] Praha: ČHMÚ. 67 s..
- [6] Detektor přímého slunečního záření SD-4. – Návod k použití., 2001. METEOSERVIS v.o.s.
- [7] Detektor přímého slunečního záření SD-5. – Příručka uživatele., 2004. METEOSERVIS v.o.s.
- [8] Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observations, Preliminary 7-th Edition, Chapter 8., 2006. WMO.
- [9] Metrologické zabezpečení Úseku meteorologie a klimatologie. Metodický pokyn NMK., 2006. Praha: ČHMÚ.
- [10] Měření složek radiační bilance a slunečního svitu. Metodický návod SOO č.j.: SOO – 1/06, 2006. Praha: ČHMÚ.

Lektor (Reviewer) RNDr. Vladimír Vozobule.