

Sluneční záření a atmosféra – jednoduché experimenty

Solar radiation and atmosphere – simple experiments

Tomáš Milář, Petr Sládek

1. Úvod

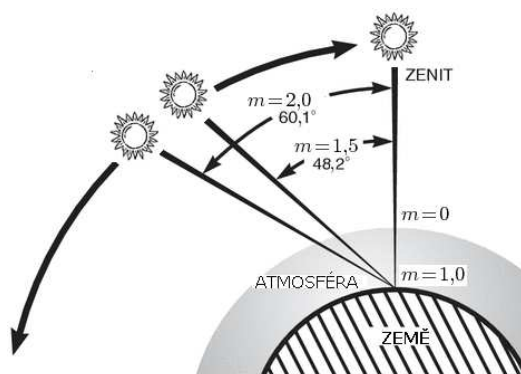
Sluneční záření je průchodem atmosférou velmi ovlivňováno, takže vlastnosti přímého a rozptýleného světla silně závisí na aktuálním znečištění ovzduší aerosoly. Jednoduchými experimenty, při kterých měříme sluneční záření pomocí solárního článku a multimetru, můžeme zjišťovat stav čistoty ovzduší. Pomocí luxmetru a barevných filtrů lze zase ověřit proměnu spektrálního složení slunečního světla během dne. Mnohé o stavu atmosféry se dozvíme také pozorováním soumrakových jevů.

Pro studium interakce slunečního záření a atmosféry je výhodou provádět experimenty za vhodných meteorologických podmínek. Nejlepší podmínky jsou takové, kdy je zcela jasno, tedy obloha je bez sebemenší oblačnosti. Sledovat předpověď počasí nestačí, protože aktuální situace v atmosféře se často dokáže změnit velmi rychle. Třeba obzor, kde očekáváme západ Slunce, se během několika minut zatáhne konvekční oblačností takže Slunce nemůžeme sledovat až k horizontu. Výsledky prezentované v této práci jsou na základě provedených měření a pozorování z léta 2006.

2. Měření změn barevného složení slunečního světla během dne

K výpočtům potřebujeme znát polohu měřicího stanoviště, tj. zeměpisnou šířku, délku a nadmořskou výšku H . Pokud nemáme k dispozici GPS, máme možnost zeměpisné souřadnice zjistit na internetové stránce „<http://www.mapy.cz>“. Abychom nemuseli provádět složité astronomické výpočty, použijeme applet pro výpočet polohy Slunce na obloze ze stránek „<http://aa.usno.navy.mil>“. Získáme zde údaje o výšce Slunce nad obzorem h pro zadaný den, které jsou nutné k výpočtu atmosférické hmoty m .

$$m = \frac{1}{\sin h} \quad (1)$$



Obr. 1: Atmosférická hmota m

Vztah (1) lze s dostatečnou přesností použít pro $h > 20^\circ$, čemuž odpovídá $m = 2,9$. Pokud jsme nuceni měřit v době, kdy je Slunce níže nad obzorem, doporučujeme použít k výpočtu atmosférické hmoty upravený vztah podle Kastena a Younga⁽¹⁾, který zohledňuje zakřivení Země, a umožňuje další korekci pro ohyb slunečních paprsků v atmosféře.

Při měření změn spektra přímého dopadajícího slunečního záření je potřeba zajistit měření v ploše kolmé ke slunečním paprskům. K zjištění kolmosti plochy k slunečním paprskům lze použít jednoduchý „stínoměr“, což je dřevěná deska, k níž je kolmo připevněn dřevěný špalík (viz. obrázek 2). K této desce pak připevníme čidlo luxmetru, fotovoltaický článek nebo jiný fotocitlivý detektor. Při takovém natočení, kdy špalík nevrhá na desku stín, je plocha detektoru nasměrována kolmo ke slunečním paprskům.



Obr. 2: Měřicí souprava: luxmetr, stínoměr, barevné fotografické filtry

V době provádění tohoto měření byla značná oblačnost, zvláště pak v odpoledních hodinách, jak dokládá obrázek 3.



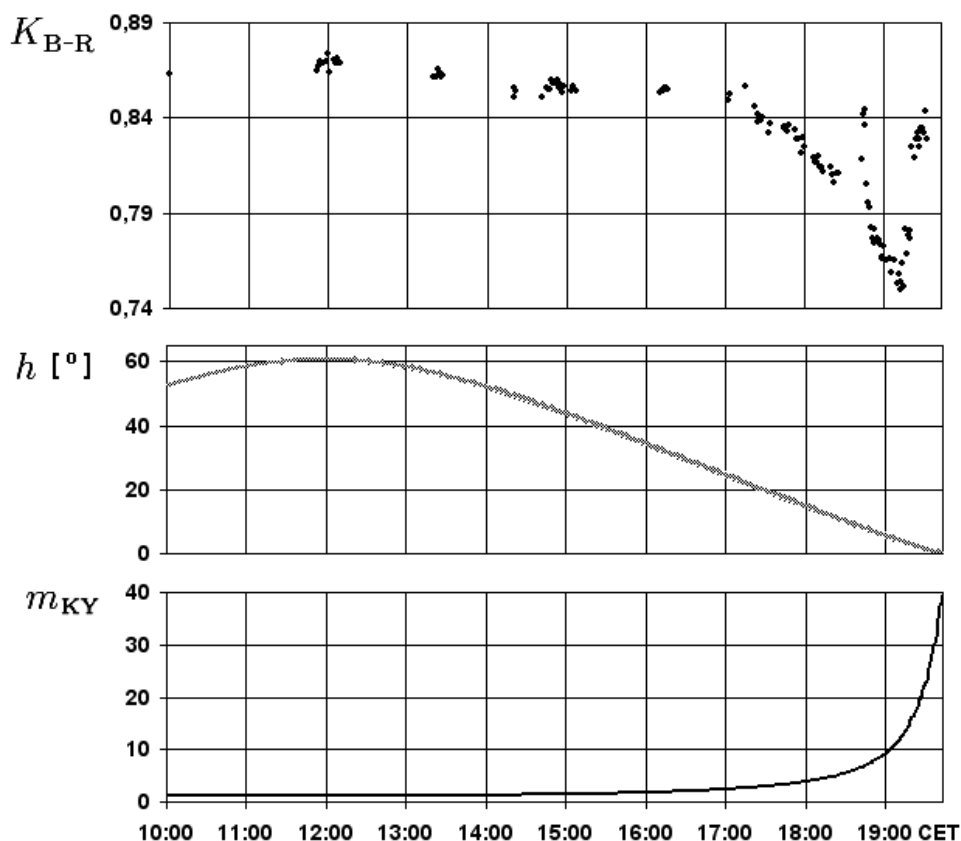
Obr. 3: Obloha na straně západu Slunce v 18:18 CET

K zjištění proměny spektrálního složení světla během dne se ukázalo jako dostačující použití pouze běžných fotografických filtrů – červeného a modrého. Digitálním luxmetrem byla měřena

intenzita osvětlení jak přímo, tak přes barevné fotografické filtry. Na čidlo luxmetru dopadalo sluneční záření přímé, ale i difúzní záření oblohy. V průběhu dne bylo provedeno vždy několik sad měření, při soumraku pak bylo třeba měřit častěji a velmi rychle, jelikož spektrální složení i intenzita osvětlení se prudce měnily. Pro znázornění změn spektra je výhodou zavést relativní poměr K_{B-R} rozdílu intenzity osvětlení (při použití modrého filtru) a E_R (při použití červeného filtru).

$$K_{B-R} = \frac{E_B - E_R}{E_B} \quad (2)$$

Výsledky měření jsou znázorněny třemi časově korespondujícími grafy na obr. 4. Na vodorovné ose je vyneseno středoevropský čas. Poslední měření zaznamenané v horním grafu bylo provedeno v 19:32 CET.



Obr. 4: Měření poměru modré a červené složky ve spektru slunečního záření dne 24.7.2006 ve Šlapanicích u Brna (nahore), výška Slunce nad obzorem (uprostřed) a atmosférická hmota pro stejný den (dole)

Krátce před západem Slunce se sluneční kotouč schoval za mrak (viz. obr. 5, kolem 19:25), což se projevilo na spektrálním složení světla, jak je vidět na grafu 4. Potom se sluneční kotouč ještě na chvíli ukázal, aby předčasně zapadl za oblačnost nad horizontem. Teoreticky mělo v místě měření zapadnout Slunce v 19:44 CET, ale ve skutečnosti zmizel sluneční kotouč za oblačností asi o 10 minut dříve.



Obr. 5: Situace před západem Slunce v 19:22 CET (vlevo) a 19:34 CET (vpravo)

Vliv oblačnosti se sice na výsledcích měření večer projevil, přesto posuv od převládající modré složky v době kolem poledne k červené složce v době před západem Slunce je z výsledného grafu zcela zřejmý.

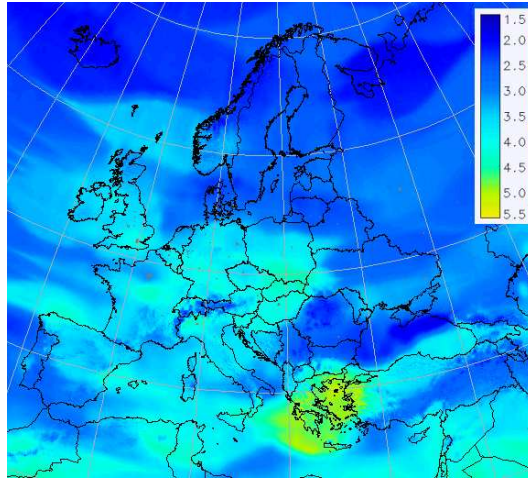
3. Měření čistoty ovzduší fotovoltaickým panelem

Průchodem slunečního záření atmosférou dochází k zeslabování jeho intenzity. Míra zeslabení závisí na atmosférické hmotě m a aktuálním složení atmosféry. Při dokonale čisté a suché atmosféře (tzv. Rayleighova atmosféra) by docházelo k rozptylu pouze na molekulách kyslíku a dusíku. Reálná atmosféra obsahuje další prvky zeslabující světlo, jak jsou především aerosoly, vodní pára a ozón. Jejich účinek na zeslabení přímého záření lze shrnout do jediného koeficientu, tzv. Linkeho koeficientu znečištění atmosféry⁽⁴⁾.

$$T_{LI} = \frac{\delta_R + \delta_a + \delta_v + \delta_{O_3}}{\delta_R} \quad (3)$$

kde δ_R je optická tloušťka atmosféry pro Rayleighův rozptyl na molekulách,
 δ_a je optická tloušťka atmosféry pro rozptyl na aerosolech,
 δ_v je optická tloušťka atmosféry pro absorpci na vodní páře,
 δ_{O_3} je optická tloušťka atmosféry pro absorpci na molekulách ozónu.

Linkeho koeficient plní zásadní funkci v teoretických modelech bezoblačné oblohy, využívá se v atlasech slunečního záření (např. ESRA) a k předpovídání efektivnosti solárních zařízení (např. applet PVGIS⁽⁵⁾). Původní Linkeho vztah trpí značnou závislostí na hodnotě m , což je nežádoucí. Z tohoto důvodu se mnoho autorů pokoušelo a stále pokouší nalézt formuli, která by byla univerzální a na m nezávislá. Za standard se pak považuje hodnota Linkeho koeficientu pro $m = 2$, pro kterou různé modely dávají podobné výsledky. Z našeho ověřování několika různých modelů bezoblačné oblohy na datech pyrhelimetrických měření vychází nejlépe práce Ineichena a Pereze⁽²⁾ z roku 2002, jejichž vztahy jsme použili k výpočtům našich měření. Hodnoty Linkeho koeficientu jsou obvykle $T_{LI} = 2,0$ pro polohy nad 2 000 m n. m., $T_{LI} = 2,5$ pro místa 2 000 m n. m., $T_{LI} = 3,0$ pro venkov bez průmyslových exhalací, $T_{LI} = 4,0$ pro města s průmyslovými exhalacemi a $T_{LI} = 5 - 6$ v průmyslových městech⁽³⁾.



Obr. 6: Průměrné roční hodnoty Linkeho koeficientu T_{LI} , $m = 2$, Evropa⁽⁵⁾

Při vlastním měření natáčíme pomocí stínoměru panel kolmo ke slunečním paprskům, a měříme napětí naprázdno U_{oc} a proud nakrátko I_{sc} . Výkon fotovoltaického panelu vypočítáme pomocí vztahu:

$$P = U_{oc} \cdot I_{sc} \cdot FF \quad (4)$$

kde FF je koeficient plnění (fill factor), pro monokrystalický křemík má obvykle hodnotu $FF = 0,75$.

Intenzita přímého slunečního záření na plochu kolmou ke směru paprsků je pak:

$$I_{Pn} = \frac{P}{\eta \cdot S} \quad (5)$$

kde η je účinnost fotovoltaického panelu (obvykle asi 0,125, resp. 12,5 %) a S je jeho plocha (včetně rámu) v m^2 .

Linkeho koeficient znečištění atmosféry lze podle Ineichena a Pereze⁽²⁾ vypočítat následujícím empirickým vztahem:

$$T_{LI} = \frac{11,1}{m} \cdot \ln \left[\left(0,664 + \frac{0,163}{\exp\left(\frac{H}{8000}\right)} \right) \cdot \frac{I_0}{I_{Pn}} \right] + 1 \quad (6)$$

Linkeho koeficient by měl být nezávislý na tloušťce atmosféry, již sluneční záření prochází. Vztah (6) byl vyvinut pro měření přímého slunečního záření pyrhelioemrem, a pro data získaná tímto profesionálním zařízením skutečně dává stálou hodnotu T_{LI} v průběhu celého dne (s výjimkou doby krátce po východu a těsně před západem Slunce). Protože vztah (6) je modelem bezoblačné oblohy, měli bychom měření provádět jen za ideálních podmínek bez jakékoliv oblačnosti. Na plochu fotovoltaického panelu dopadá kromě přímého záření I_{Pn} také záření difúzní, které ovlivňuje výkon panelu. Křemíkový materiál má také odlišnou spektrální citlivost, a je značně teplotně závislý. Nejobjektivnější měření je vhodné provádět v době, kdy je atmosférická tloušťka $m = 2$. Dne 17.7.2006 tato situace nastala v 16:33 CET, a hodnota Linkeho koeficientu

nám z našich měření vychází $T_{LI} = 3,8$, což se jeví jako hodnota reálná pro oblast Šlapanic u Brna.

Pokud si dopředu zjistíme čas pro $m = 2$ (např. na <http://aa.usno.navy.mil>), a nebude-li v té době žádná oblačnost, můžeme výše popsanou metodou změřit čistotu ovzduší vyjádřenou hodnotou Linkeho koeficientu.

4. Závěr

Príspevek predstavuje jednoduchá měření týkající se kvality ovzduší a vlivu výšky Slunce nad obzorem na barevné složení denního světla. Měření relativního poměru intenzity osvětlení při použití modrého a při použití červeného filtru ukazuje, že se v průběhu dne mění barevné rozložení spektra slunečního světla tak, že se k večeru podíl červené složky zvyšuje. S použitím fotovoltaického článku je možné stanovit hodnotu Linkeho faktoru znečištění ovzduší. Experimenty mohou provádět i žáci středních škol.

Přehled fyzikálních veličin

značka	veličina
h	úhlová výška Slunce nad obzorem
H	nadmořská výška
m	atmosférická hmota
m_{KY}	atmosférická hmota podle Kastena-Younga
U_{oc}	elektrické napětí naprázdno
I_{sc}	elektrický proud nakrátko
P	okamžitý výkon FV panelu
η	účinnost FV panelu
FF	koeficient plnění (fill factor)
T_{LI}	Linkeho koeficient znečištění atmosféry
E_B	intenzita osvětlení při použití modrého filtru
E_R	intenzita osvětlení při použití červeného filtru
K_{B-R}	relativní poměr rozdílů intenzity osvětlení při použití modrého a červeného filtru

Použité zdroje

1. RIGOLLIER, Christelle, BAUER, Olivier, WALD, Lucien. *On the clear sky model of the ESRA — European Solar Radiation Atlas — with respect to the heliosat method. Solar Energy. 1999, is. 1, s. 33-48.*
Dostupný z WWW: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0038092X99000559>>.
2. INEICHEN, Pierre, PEREZ, Richard. *A new airmass independent formulation for the Linke turbidity coefficient. Solar Energy. 2002, no. 3, s. 151-157.*
Dostupný z WWW: <<http://www.asrc.cesm.albany.edu/perez/linke-definitif.pdf>>.
3. CIHELKA, Jaromír. *Solární tepelná technika. 1. vyd. Praha : T. Malina, 1994. 208 s. ISBN 80-900759-5-9.*

4. *SATEL-LIGHT: The European Database of Daylight and Solar Radiation [online]. 2007 [cit. 2007-02-02]. Dostupný z WWW: <<http://www.satel-light.com/guide/glosstoz.htm>>.*
5. *PVGIS: Geographical Assessment of Solar Energy Resource and Photovoltaic Technology [online]. 2007 [cit. 2007-03-04]. Dostupný z WWW: <<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>>.*

Údaje o autorech

Doc. RNDr. Petr Sládek CSc.
Katedra fyziky PedF MU
Poříčí 7, 603 00, Brno, ČR
E-mail: sladek@ped.muni.cz
Telefon: + 420 549 496 841

Tomáš Milář
Katedra fyziky PedF MU
Poříčí 7, 603 00, Brno, ČR
E-mail: indi@mail.muni.cz
Telefon: + 420 724 161 236