

Ing. Vladimír JIRKA, CSc.
RNDr. Petra HESSLEROVÁ, Ph.D.
Hanna HURYNA, Ph.D.
doc. RNDr. Jan POKORNÝ, CSc.

ENKI, o.p.s. Třeboň

Energetická výměna mezi zemským povrchem a atmosférou v závislosti na meteorologických podmínkách bez ohledu na obsah CO₂

Energy Exchange between the Earth's Surface and the Atmosphere Depending on Meteorological Conditions Regardless of CO₂ Concentration

Recenzent
Ing. Bořivoj Šourek, Ph.D.

Oxidu uhličitému je přisuzována hlavní role ve vysychání krajiny tím, že zvyšuje teplotu atmosféry a tato zvýšená teplota potom způsobuje rychlejší výpar. V médiích i vědeckých publikacích je zmiňováno, jak atmosféra z důvodu zvýšeného skleníkového efektu sálá vůči Zemi. Letní extrémní teploty jsou přičítány zvýšenému skleníkovému efektu atmosféry. Věda se zaměřuje na sledování zdrojů skleníkových plynů a způsobů jejich sekvence, tedy vázání a snižování jejich koncentrací v atmosféře. Energetické toky, přicházející a odražené sluneční (krátkovlnné) záření a tok tepla (dlouhovlnné záření) mezi povrchem Země, atmosférou a radiometrem, jsou měřítkem skleníkového efektu. Data byla zaznamenána v rámci kontinuálního měření na lokalitě Domanín u Třeboně, za jasných a oblačných dnů okolo letního a zimního slunovratu a několika dalších dnů vegetačního období. Na příkladech zhodnocení měření základních složek sluneční energie standardním net-radiometrem Kipp&Zonen CNR1 je ukázána zásadní role vodní páry a oblačnosti v energetické bilanci zemského povrchu, tj. příkonu slunečního záření a vyzařování tepla směrem do oblohy při stálé koncentraci CO₂ v atmosféře.

Klíčová slova: radiační toky, teplota, net-radiometr, skleníkový efekt

Carbon dioxide is attributed a major role in drying the landscape by raising the temperature of the atmosphere; this increased temperature then causes faster evaporation. It has been mentioned in the media as well as scientific publications how the atmosphere radiates towards the Earth due to the increased greenhouse effect. Summer temperature extremes are related to the increased greenhouse effect of the atmosphere. Science is focused on tracking the sources of greenhouse gases and how they are sequestered, i.e. bound and reduced within the atmosphere. Energy fluxes, incident and reflected solar (shortwave) radiation and heat flux (longwave radiation) between the Earth's surface, atmosphere and radiometer, are a measure of the greenhouse effect. The data were recorded as a part of continuous measurement at the Domanín site near Třeboň, on clear and cloudy days around the summer and winter solstice and on several other days during the growing season. The fundamental role of water vapour and clouds in the energy balance of the Earth's surface is demonstrated on the examples of the basic components of solar energy measured with the standard net-radiometer Kipp&Zonen CNR1; i.e. incident solar radiation and heat radiation towards the sky at the constant CO₂ concentration in the atmosphere.

Keywords: radiation fluxes, temperature, net radiometer, greenhouse effect

ÚVOD

Města a firmy vyhodnocují svoji uhlíkovou stopu, hodnotí se energetická náročnost budov, probíhají demonstrace za co nejrychlejší přechod ke klimatické neutralitě, která je definována jako uhlíková neutralita, což v praxi znamená nulové emise oxidu uhličitého. Strategie rozvoje podniků, daňový systém, energetické koncepce států, úvěry od bank procházejí dramatickou přeměnou s cílem snížit emise uhlíku a tím snížit skleníkový efekt. Podle dokumentů Mezivládního panelu klimatické změny (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) je právě zvýšená koncentrace oxidu uhličitého a dalších skleníkových plynů (metan, oxidy dusíku) příčinou vzestupu průměrné globální teploty i extrémů klimatu. Podle zprávy IPCC se od roku 1750 zvýšila koncentrace CO₂ z 280 ppm na 410 ppm (<https://www.co2levels.org/>) a kvůli zvýšení koncentrace dalších skleníkových plynů (green house gases, GHG) je radiační zesílení (radiative forcing) skleníkového efektu na úrovni 1 až 3 W·m⁻². Na základě modelů předpovídají autoři další vývoj klimatu a rychlost vzestupu globální teploty. Oxidu uhličitému je přitom přisuzována hlavní role ve vysychání krajiny tím, že zvyšuje teplotu atmosféry a tato zvýšená teplota následně způsobuje rych-

lejší odpar. V médiích i vědeckých publikacích je uváděno, jak atmosféra kvůli zvýšenému skleníkovému efektu sálá vůči Zemi. Letní extrémní teploty jsou přičítány zvýšenému skleníkovému efektu atmosféry. Věda se zaměřuje na sledování zdrojů skleníkových plynů a způsobů jejich sekvence, tedy vázání a snižování jejich koncentrací v atmosféře. Zvýšená koncentrace oxidu uhličitého v probíhající klimatické změně je klíčovou otázkou při strategickém rozhodování a je přejímána v zásadních dokumentech, jako je Zelená dohoda pro Evropu (European Green Deal).

IPCC pracuje s globální průměrnou energetickou bilancí Země, jak ji na základě satelitních dat navrhli Kiehl a Trenberth (1997). Ze solární konstanty 1367 W·m⁻² počítají průměrné množství přicházející sluneční energie na 1 m² celkové plochy povrchu Země: 1367 : 4 = 342 W·m⁻². Koeficient 4 je získán jako podíl plochy povrchu Země = 4πr² a plochy průmětu Země, na kterou dopadá sluneční záření – plochy kruhu o poloměru Země = πr². Globální oteplení a klimatická změna potom nastává kvůli zvýšenému skleníkovému efektu způsobenému vyšší koncentrací CO₂. Ustává se nová teplotní rovnováha, protože tepelná rovnováha Země je navýšena o 1 až 3 W·m⁻² (radiative forcing).

Zásadním problémem této koncepce ovšem je, že v atmosféře je mnohokrát více vodní páry a její obsah se rychle mění, změny koncentrace vodní páry jsou vyšší než celková koncentrace ostatních skleníkových plynů. Globální průměry nemohou odrážet dynamiku energetických jevů v konkrétních místech a konkrétním čase.

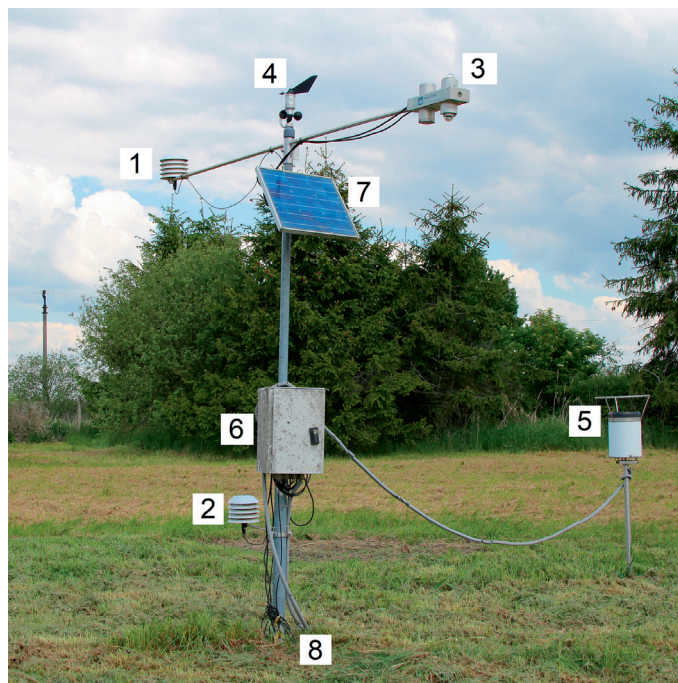
V článku je zhodnoceno měření základních složek sluneční energie standardním net-radiometrem Kipp&Zonen CNR1, jak byly zaznamenány v rámci kontinuálního měření na lokalitě Domanín u Třeboně a nezávisle s podobnou instrumentací též v Třeboni. Těmito složkami jsou přicházející a odražené sluneční (krátkovlnné) záření a tok tepla (dlouhovlnné záření) mezi povrchem Země, atmosférou a radiometrem. Právě tyto energetické toky jsou měřítkem skleníkového efektu.

Na příkladech jasných a oblačných dnů okolo letního a zimního slunovratu je prezentována zásadní role vodní páry a oblačnosti v energetické bilanci zemského povrchu – příkonu slunečního záření a vyzařování tepla směrem do oblohy.

Koncentrace oxidu uhličitého a dalších skleníkových plynů, které údajně způsobují klimatickou změnu, lze vzhledem ke krátké době měření považovat za konstantní. Jde o vyhodnocení naměřených dat z radiometru, jichž jsou ve světě v provozu stovky, spíše tisíce. Prezentované výsledky ukazují rozsah toků sluneční energie a tepla mezi povrchem Země a atmosférou a zásadní význam obsahu vodní páry. Člověk svojí činností ovlivňuje množství vodní páry v atmosféře a tím množství přicházející sluneční energie a následně skleníkový efekt, tedy množství tepla vyzařovaného do oblohy.

INSTRUMENTACE

Meteorologická stanice s automatickým záznamem dat v desetiminutovém intervalu je instalována na pokosené louce v lokalitě Domanín u Třeboně. Stanice je osazena net-radiometrem Kipp&Zonen CNR1,



Obr. 1a Meteorologická stanice v Domaníně: 1 – čidlo teploty a RH 2 m (RH = relativní vlhkost); 2 – čidlo teploty a RH 30 cm; 3 – net-radiometr; 4 – anemometr; 5 – člunkový srážkoměr; 6 – stanice s přenosem dat; 7 – fotovoltaický panel; 8 – půdní teploměr –

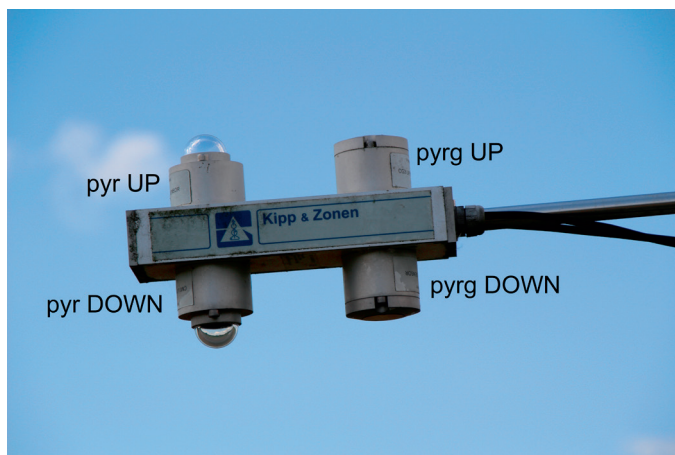
Fig. 1a Meteorological station in Domanín: 1 – temperature and RH sensor 2 m (RH = relative humidity); 2 – temperature and RH sensor 30 cm; 3 – net radiometer; 4 – anemometer; 5 – float rain gauge; 6 – station with data transmission; 7 – photovoltaic panel; 8 – soil thermometer

který měří dopadající i odražené sluneční záření v krátkovlnné (pyranometr Kipp&Zonen CPM3 305-2800 nm) i dlouhovlnné (pyrgeometr Kipp&Zonen CGR3 4500 až 42 000 nm) oblasti spektra. Radiační tok je vyjádřen ve watttech na metr čtvereční ($W \cdot m^{-2}$). Měřena byla také teplota tělesa radiometru jako důležitá vztažná hodnota pro výpočet toku dlouhovlnného záření vůči Zemi a vůči obloze. Dále byla měřena teplota a vlhkost vzduchu v 2 metrech nad porostem kapacitním čidlem s vestavěným odporovým Pt 100 teploměrem, umístěným v radiačním krytu, a teplota půdy odporovým Pt 100 teploměrem v hloubce 5 cm. Stanice ještě zaznamenává teplotu a vlhkost v 0,3 m, směr a rychlost větru a srážky – veličiny nezbytné pro pochopení širších souvislostí meteorologických podmínek.

Měřené veličiny

Byly měřeny čtyři následující radiační toky ($W \cdot m^{-2}$).

- ❑ **Dopadající krátkovlnná globální radiace** (pyrUP, $R_{s\downarrow}$) na vodorovnou plochu, měřená pyranometrem (305 až 2800 nm, viditelné a krátké infračervené záření), orientovaným horizontálně do nadhlavníku ve výšce 2 m nad travnatým posekaným povrchem. Měřenou hodnotu globální radiace ovlivňuje roční období, tj. úhel dopadu a délka dráhy paprsku atmosférou, a také oblačnost a jiné znečištění atmosféry, které pohlcuje sluneční záření.
- ❑ **Odražená krátkovlnná radiace** (pyrDOWN, $R_{s\uparrow}$) měřená totožným čidlem, umístěným ve výšce 2 m nad porostem a orientovaným směrem k zemskému povrchu. Rozdíl hodnot dopadající a odražené radiace udává, kolik energie dopadající ze Slunce na zemský povrch vstupuje do fyzikálních a biologických pochodů na rozhraní porost (nebo půda) – atmosféra. Nejčastěji je tato hodnota vyjádřena podílem A – albedo, což je poměr mezi radiací odraženou a radiací dopadající. Albedo běžně v porostech dosahuje hodnot okolo 0,2 – odráží se tedy okolo 20 % dopadající krátkovlnné sluneční radiace.
- ❑ **Teplný radiační tok mezi čidlem a oblohou** (pyrgUP, $R_{l\downarrow}$) je měřen ve spektrální oblasti 4500 až 42 000 nm (dlouhovlnné, resp. tepelné záření). Tato hodnota mimo jiné slouží spolu s teplotou čidla (radiometru) k výpočtu zdánlivé (efektivní) radiační teploty oblohy s využitím Stefan-Boltzmannova zákona. Měřená hodnota toku tepla (dlouhovlnného záření) vůči obloze bývá většinou záporná, protože obloha bývá chladnější než čidlo, a nabývá hodnot do $-200 W \cdot m^{-2}$. Jasná obloha má efektivní teplotu hluboko pod $0^\circ C$.
- ❑ **Teplný radiační tok mezi čidlem a povrchem porostu** (pyrgDOWN, $R_{l\uparrow}$) je energetická výměna měřená ve spektrální oblasti (4500 až 42 000 nm, tepelné záření). Tato hodnota spolu s teplotou



Obr. 1b Detail net-radiometru s označenými čidly pyrUP, pyrDOWN pro měření slunečního (krátkovlnného záření) a čidly pyrgUP, pyrgDOWN pro měření dlouhovlnného záření (tepla)

Fig. 1b Detail of the net radiometer with indication of sensors pyrUP, pyrDOWN for measurement of solar (shortwave radiation) and pyrgUP, pyrgDOWN for measurement of longwave radiation (heat)

čidla (radiometru) při využití Stefan-Boltzmannova zákona slouží k výpočtu radiační teploty povrchu, v tomto případě pokoseného trávníku. Vzhledem k tomu, že čidlo je umístěno ve výšce 2 m nad povrchem, kde je teplota vzduchu blízká teplotě povrchu, nabývá měřené tepelné záření mezi čidlem a povrchem jak kladných, tak záporných hodnot v rozmezí několika desítek $W \cdot m^{-2}$.

Integrovanou součástí net-radiometru je také odporový teploměr, udávající teplotu čidel **Trad**. Pokud radiometr není vyhříván, je nezbytné pro interpretaci výsledků hlídat teplotu rosného bodu (T_d), aby byla eliminována ta měření, kdy na čidle zkondenzuje voda, která je pro tepelné záření nepropustná a zkresluje výsledek měření. Podobným jevem, který ovlivňuje měření a lze jej čidly teploty a vlhkosti identifikovat, je námraza nebo jinovatka.

Dalšími měřenými veličinami, které jsou důležité pro pochopení mechanismu energetických toků na rozhraní porost/atmosféra, jsou teploty měřené na meteorologické stanici: **Ta2m**, teplota vzduchu ve 2 m (měřena odporovým teploměrem Pt 100), a teplota půdy **Tsoil**, která je měřena v hloubce 5 cm pod povrchem odporovým teploměrem Pt 100.

Vypočítané veličiny

Zdánlivá radiační teplota oblohy Trsky je vypočítána z teploty radiometru a energetické výměny, tedy naměřeným tokem dlouhovlnného záření (pyrgUP, $RI_{\downarrow}$) mezi radiometrem a oblohou. Počítá se podle Stefan-Boltzmannova zákona:

$$I = \varepsilon \sigma T^4$$

kde je:

ε emisivita,

σ Stefan-Boltzmannova konstanta $5,670400 \cdot 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$,

I celková intenzita záření (podíl výkonu a plochy) $[W \cdot m^{-2}]$, v našem případě naměřená hodnota dlouhovlnného záření,

T termodynamická teplota [K], v našem případě teplota radiometru/čidla (**Trad**).

Z dopadajícího záření se vypočítá rozdíl teploty mezi zářičem (oblohou) a radiometrem:

$$\Delta T = \sqrt[4]{\frac{I}{\varepsilon \sigma}}$$

Vzhledem k tomu, že je známa teplota radiometru **Trad** a hodnota radiační I (pyrgUP, $RI_{\downarrow}$), lze vypočítat radiační teplotu oblohy **Trsky**. Pro zjednodušení je emisivita brána $\varepsilon = 1$, což je blízko skutečnosti. Obdobně je počítána **zdánlivá radiační teplota povrchu Trs**, kde místo (pyrgUP, $RI_{\downarrow}$) vstupuje do výpočtu (pyrgDOWN, $RI_{\uparrow}$).

Dalšími vypočítanými veličinami jsou tzv. čisté radiační – energetický tok mezi povrchem Země a oblohou. Po sečtení obou vektorů spektrálních složek je uveden odděleně výsledný radiační tok v obou spektrálních oblastech: čistá krátkovlnná radiační **RnS** a čistá dlouhovlnná radiační **RnL**. Následně je vypočítána čistá radiační **Rn** (net-radiation), energie, která po odrazu slunečního záření a vyzáření dlouhovlnného záření „zbývá“ a podílí se na všech procesech, které zabezpečují život na Zemi (výpar, zjevné teplo, ohřev půdy, fotosyntéza). Čistá radiační se porovnává pro jednotlivé předkládané příklady meteorologických podmínek. V následujících grafech jsou uvedeny časové průběhy tučným písmem veličin jak měřených, tak i vypočítaných.

Namodelované veličiny

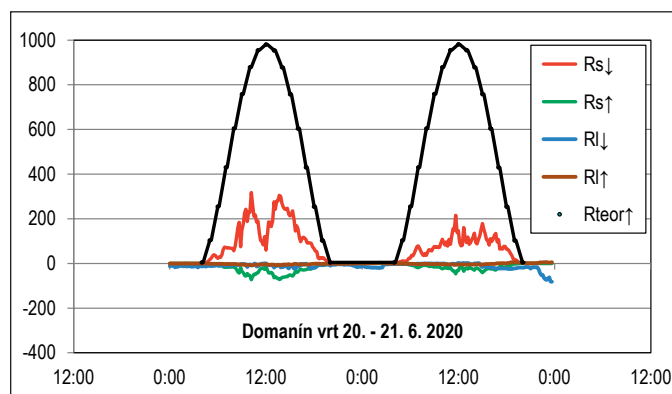
Pro srovnání byly v programu, vyvinutém pro dimenzování solárních soustav na ČVUT [10] v Praze, namodelovány teoretické hodnoty dopadajícího slunečního záření (ozářenosti) **RsTeor $\downarrow$** , vycházejí z prací Čihelky

(1997) a Matušky (2009). Program umožňuje vypočítat pro každou hodinu zvoleného dne teoretickou hodnotu přicházejícího slunečního záření **RsTeor $\downarrow$** , která v sobě zahrnuje jak přímou, tak difúzní složku slunečního záření včetně korekcí na nadmořskou výšku a čistotu ovzduší. Pro výpočet byla zvolena lokalita Jindřichův Hradec, nadmořská výška 520 m a korekce čistoty ovzduší na venkovské prostředí. Následně byly vypočítány celkové denní úhrny $\Sigma RsTeor_{\downarrow}$.

Ze zaznamenaných desetiminutových hodnot byly vypočítány denní úhrny přicházejícího ($\Sigma Rs_{\downarrow}$) a odraženého slunečního záření ($\Sigma Rs_{\uparrow}$) a také dlouhovlnného záření mezi povrchem Země a oblohou ($\Sigma RI_{\downarrow}$). V tabulkách jsou uvedeny vypočítané úhrny jednotlivých energetických složek a pro porovnání také poměry úhrnů jednotlivých složek k maximální možné hodnotě dopadajícího záření ($\Sigma RsTeor_{\downarrow}$) a konkrétní hodnotě, změřené v tento den ($\Sigma Rs_{\downarrow}$). Podíly jsou uvedeny v % bez ohledu na znaménko (směr vyzařování).

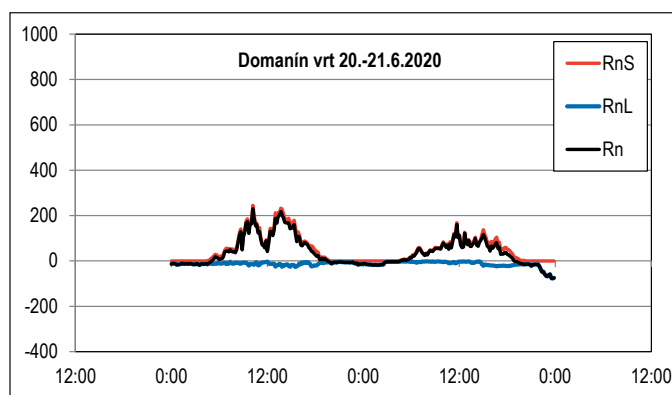
Porovnání denních bilancí sluneční energie na sečeném travnatém porostu v Domaníně v období letního slunovratu za jasného (2017) a oblačného (2020) počasí

Období letního slunovratu 20. – 21. 6. 2020 – zataženo



Obr. 2 Denní chod přicházejícího ($Rs_{\downarrow}$, PyrUP) a odraženého ($Rs_{\uparrow}$, PyrDOWN) slunečního záření $[W \cdot m^{-2}]$, dlouhovlnného/tepelného záření mezi čidlem a oblohou ($RI_{\downarrow}$, PyrUP) a mezi čidlem a povrchem země ($RI_{\uparrow}$, PyrDOWN), v letním slunovratu při zatažené obloze 20. – 21. 6. 2020; $RsTeor_{\downarrow}$ znázorňuje průběh teoretické hodnoty dopadajícího slunečního záření při jasné obloze

Fig. 2 Daily course of incoming ($Rs_{\downarrow}$, PyrUP) and reflected ($Rs_{\uparrow}$, PyrDOWN) solar radiation $[W \cdot m^{-2}]$, longwave/thermal radiation between the sensor and the sky ($RI_{\downarrow}$, PyrUP) and between the sensor and the ground surface ($RI_{\uparrow}$, PyrDOWN); at summer solstice under overcast sky 20. – 21. 6. 2020; $RsTeor_{\downarrow}$ shows the course of the theoretical value of incident solar radiation under clear skies



Obr. 3 Denní chod složek čisté radiační v období 20. – 21. 6. 2020: RnS – krátkovlnné přicházející sluneční záření po odečtení odraženého slunečního záření; RnL – dlouhovlnné záření země vůči obloze; Rn – čistá radiační

Fig. 3 Daily course of the net radiation components in the period of 20. – 21. 6. 2020: RnS – shortwave incoming solar radiation after deduction of the reflected solar radiation; RnL – longwave radiation of the Earth to the sky; Rn – net radiation

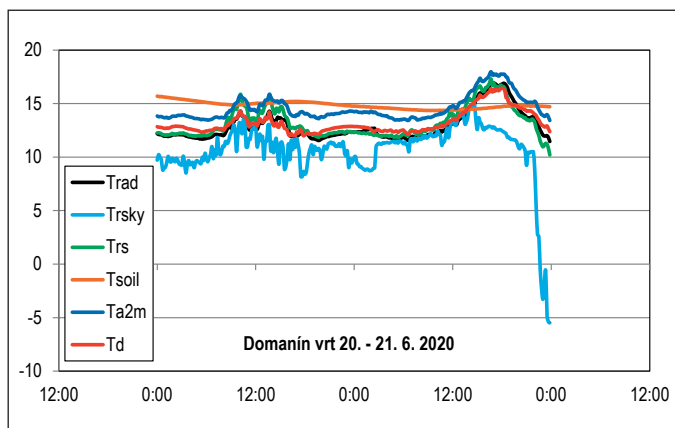
Tab. 1 Úhrny radiačních toků a podíly složek vůči teoretické (ΣRs_{Teor}) a dopadající ($\Sigma Rs_{\downarrow}$) radiaci 21. 6. 2020

Tab. 1 Daily radiation fluxes and fractions of components relative to theoretical (ΣRs_{Teor}) and incident ($\Sigma Rs_{\downarrow}$) radiation on 21. 6. 2020

21. 6. 2020 – zataženo									
Radiační toky	24 hod [Wh·m ⁻²]	% z teor.	% z dop.	Den [Wh·m ⁻²]	% z teor.	% z dop.	Noc [Wh·m ⁻²]	% z teor.	% z dop.
ΣRs_{Teor}	8962	100	-	8962	100	-	0	0	-
$\Sigma Rs_{\downarrow}$	1190	13,3	100	1190	13,3	100	0	0	0
$\Sigma Rs_{\uparrow}$	-265	3,0	22,2	-265	3,0	22,2	0	0	0
$\Sigma RI_{\downarrow}$	-330	3,7	27,7	-123	1,4	10,3	-207	2,3	17,4
$\Sigma RI_{\uparrow}$	-25	0,3	2,3	-12	0,1	1,0	-13	0,1	1,3
ΣRnS	925	10,3	77,7	925	10,3	77,7	0	0	0
ΣRnI	-342	3,8	28,7	-149	1,6	12,5	-193	2,2	16,2
ΣRn	583	6,5	49,0	776	8,3	65,5	-193	2,2	16,2

21. 6. 2020 – shrnutí

Za 24 hodin dopadlo na zemský povrch 1190 Wh·m⁻² sluneční energie, což je 13,3 % z teoreticky vypočítané hodnoty 8962 Wh·m⁻² pro tento den v roce. Odrazilo se v krátkovlnné oblasti 265 Wh·m⁻² (22,3 %) dopadajícího slunečního záření. Dlouhovlnného záření se ve formě tepla do atmosféry/oblohy za 24 hodin vyzářilo 342 Wh·m⁻² (28,7 %), z toho ve dne 149 Wh·m⁻² (12,5 %) a v noci Wh·m⁻² (16,2 %). Hodnota čisté radiace za 24 hodin byla 583 Wh·m⁻² tj. 28,7 % z energie, která dopadla na zemský povrch, což představuje 6,5 % z teoretické hodnoty dopadajícího záření.



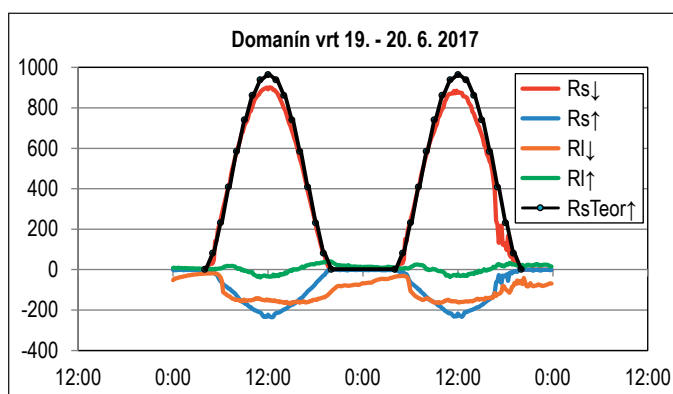
Obr. 4 Denní průběh teploty povrchu porostu v období 20. – 21. 6. 2020: Trs – radiační teplota vypočítaná z toku dlouhovlnného záření mezi radiometrem a porostem; Ta2m – teplota vzduchu ve 2 m (měřená Pt teploměrem); Trad – teplota čidla (tělesa radiometru); Trsky – radiační (efektivní, zdánlivá) teplota oblohy vypočítaná z toku dlouhovlnného záření mezi radiometrem a oblohou; teplota půdy (Tsoil) je měřena v hloubce 5 cm Pt teploměrem; Td – teplota rosného bodu

Fig. 4 Daily course of the vegetation surface temperature in the period 20. – 21. 6. 2020: Trs – radiation temperature calculated from the longwave radiation flux between the radiometer and the vegetation; Ta2m – air temperature at 2 m (measured by Pt thermometer); Trad – sensor temperature (body of the radiometer); Trsky – the radiation (effective, apparent) temperature of the sky calculated from the flow of longwave radiation between the radiometer and the sky; soil temperature (Tsoil) is measured at the depth of 5 cm by Pt thermometer; Td – Dew Point Temperature

Komentář k zataženému letnímu slunovratu 20. – 21. 6. 2020

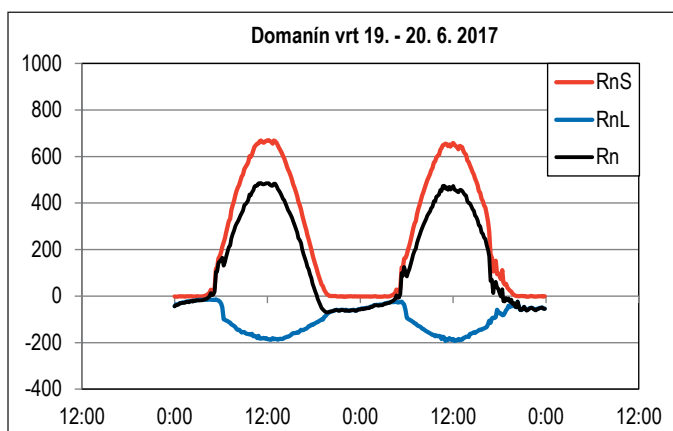
Bylo zataženo, místy dešť, relativní vlhkost nad 80 %. Maximální hodnoty přicházejícího slunečního záření se pohybovaly v rozsahu hodnot 200 až 300 W·m⁻². Úměrně nízké okolo 20 % byly hodnoty odraženého slunečního záření. Toky dlouhovlnného záření od čidla do oblohy se pohybovaly v rozsahu desítek W·m⁻², tok dlouhovlnného záření mezi čidlem a povrchem Země v jednotkách W·m⁻², protože teploty byly vyrovnané. 21. 6. večer se obloha vyjasňovala, tok tepla do oblohy se zvýšil a zřetelně se snížila radiační teplota oblohy. Oblačnost pohlcuje dlouhovlnné záření vysílané povrchem Země i odražené krátkovlnné záření, takže rozdíl teplot mezi zemským povrchem a oblohou je pouze několik stupňů. Hodnoty čisté radiace jsou vesměs pod 200 W·m⁻². Vzhledem k tomu, že teplota rosného bodu Td byla po celou dobu měření vyšší než teplota čidel, nedocházelo ke kondenzaci vodní páry na čidle, vedoucí ke zkreslení měření.

Období letního slunovratu 19. – 20. 6. 2017 – jasno



Obr. 5 Denní chod přicházejícího ($R_{s\downarrow}$, PyrUP) a odraženého ($R_{s\uparrow}$, PyrDOWN) slunečního záření (W·m⁻²), dlouhovlnného/tepelného záření mezi čidlem a oblohou ($RI_{\downarrow}$, PyrgUP) a mezi čidlem a povrchem země ($RI_{\uparrow}$, PyrgDOWN), v letním slunovratu při jasné obloze 19. – 20. 6. 2017; $R_{sTeor\downarrow}$ znázorňuje průběh teoretické hodnoty dopadajícího slunečního záření při jasné obloze

Fig. 5 Daily course of incoming ($R_{s\downarrow}$, PyrUP) and reflected ($R_{s\uparrow}$, PyrDOWN) solar radiation [W·m⁻²], longwave/thermal radiation between the sensor and the sky ($RI_{\downarrow}$, PyrgUP) and between the sensor and the ground surface ($RI_{\uparrow}$, PyrgDOWN); at summer solstice under overcast sky 19. – 20. 6. 2017; $R_{sTeor\downarrow}$ shows the course of the theoretical value of incident solar radiation under clear



Obr. 6 Denní chod složek čisté radiace v období 19. – 20. 6. 2017: RnS – krátkovlnné přicházející sluneční záření po odečtení odraženého slunečního záření; RnL – dlouhovlnné záření země vůči obloze; Rn – čistá radiace

Fig. 6 Daily course of the net radiation components in the period of 19. – 20. 6. 2017: RnS – shortwave incoming solar radiation after deduction of the reflected solar radiation; RnL – longwave radiation of the Earth to the sky; Rn – net radiation

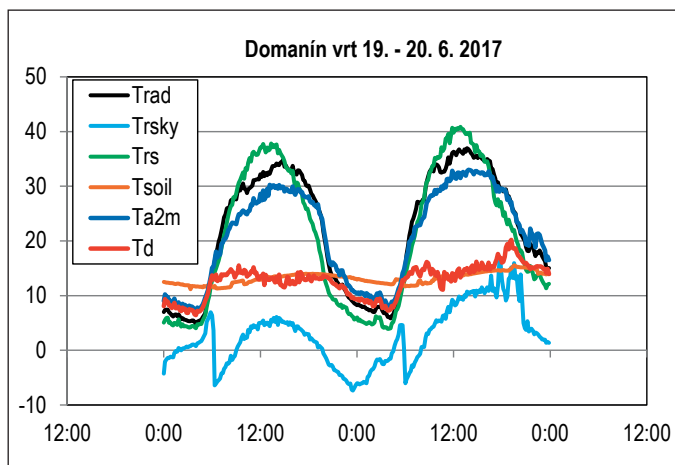
Tab. 2 Úhrny radiačních toků a podíly složek vůči teoretické (ΣRs_{Teor}) a dopadající ($\Sigma Rs_{\downarrow}$) radiaci 19. 6. 2017

Tab. 2 Daily radiation fluxes and fractions of components relative to theoretical (ΣRs_{Teor}) and incident ($\Sigma Rs_{\downarrow}$) radiation on 19. 6. 2017

19. 6. 2017									
Radiační toky	24 hod [Wh·m ⁻²]	% z teor.	% z dop.	Den [Wh·m ⁻²]	% z teor.	% z dop.	Noc [Wh·m ⁻²]	% z teor.	% z dop.
ΣRs_{Teor}	8960	100	-	8960	100	-	0	0	-
$\Sigma Rs_{\downarrow}$	8217	91,7	100	8217	91,7	100	0	0	0
$\Sigma Rs_{\uparrow}$	-2053	22,9	25,0	-2053	22,9	25,0	0	0	0
$\Sigma RI_{\downarrow}$	-2547	28,4	31,0	-2119	23,6	25,8	-428	4,8	5,2
$\Sigma RI_{\uparrow}$	118	1,3	1,4	17	0,2	0,2	101	1,1	1,2
ΣRnS	6164	68,8	75,0	6174	68,9	75,1	-10	0,1	0,2
ΣRnI	-2429	27,1	29,6	-2102	23,5	25,6	-327	3,6	4,0
ΣRn	3735	41,7	45,5	4072	45,4	50,0	-337	3,8	4,1

19. 6. 2017 – shrnutí

Za 24 hodin dopadlo na zemský povrch 8217 Wh·m⁻² sluneční energie, což je **91,7 %** z teoretické vypočítané hodnoty 8960 Wh·m⁻² pro tento den v roce. V krátkovlnné oblasti se odrazilo 2053 Wh·m⁻² (25,0 %) slunečního záření. V dlouhovlnné (tepelné) oblasti se do atmosféry/oblohy za 24 hodin vyzářilo 2429 Wh·m⁻² (29,6 %), z toho ve dne 2102 Wh·m⁻² a 527 Wh·m⁻² v noci. Hodnota čisté radiace za 24 hodin byla 3735 Wh·m⁻² tj. **45,5 %** z energie, která dopadla na zemský povrch, nebo **41,7 %** z teoretické hodnoty dopadajícího záření.



Obr. 7 Denní průběh teploty povrchu porostu v období 19. – 20. 06. 2017: Trs – radiační teplota vypočítaná z toku dlouhovlnného záření mezi radiometrem a porostem; Ta2m – teplota vzduchu ve 2 m (měřená Pt teploměrem); Trad – teplota čidla (tělesa radiometru); Trsky – radiační (efektivní, zdánlivá) teplota oblohy vypočítaná z toku dlouhovlnného záření mezi radiometrem a oblohou; teplota půdy (Tsoil) je měřena v hloubce 5 cm Pt teploměrem; Td – teplota rosného bodu

Fig. 7 Daily course of the vegetation surface temperature in the period 19. – 20. 6. 2017: Trs – radiation temperature calculated from the longwave radiation flux between the radiometer and the vegetation; Ta2m – air temperature at 2 m (measured by Pt thermometer); Trad – sensor temperature (body of the radiometer); Trsky – the radiation (effective, apparent) temperature of the sky calculated from the flow of longwave radiation between the radiometer and the sky; soil temperature (Tsoil) is measured at the depth of 5 cm by Pt thermometer; Td – Dew Point Temperature

Komentář k jasnému letnímu slunovratu 19. – 20. 2017

Na rozdíl od letního slunovratu v roce 2020, kdy bylo zataženo, za jasného dne letního slunovratu roku 2017 dosahovala sluneční radiace hodnot přes 900 W·m⁻² a maximální hodnoty odraženého slunečního záření 230 W·m⁻². Dlouhovlnné záření do jasné oblohy dosahuje až k hodnotě 200 W·m⁻² a maximální rozdíl povrchové teploty sekaného trávníku a oblohy je více než 30 °C. Hodnota čisté radiace je maximálně okolo 400 W·m⁻², je zřejmé, že se projevuje vysoký tok tepla do jasné oblohy za dne, kdy se krátce sekaný trávník ohřívá na povrchovou teplotu 30 až 40 °C. Vzhledem k tomu, že od cca 23 do 5 hodiny byla teplota čidel Trad nižší než teplota rosného bodu Td a na čidle se vytvářela rosa, která je pro IR záření neprostupná, bylo měření krátkovlnné radiace RI_↓, a tedy i výpočet radiační teploty oblohy Trsky, zatíženo chybou. Tím došlo ke zkreslení IR balance v nočním období o cca 30 %. (Současná stanice je již vybavena vyhřívanými radiometry, aby byl tento vliv vyloučen.) Na průběhu radiační teploty oblohy Trsky je zřetelně vidět, jak poté, co Trad klesne pod Td, začne Trsky stoupat a okolo 6 hodiny, kdy se rosa odpaří, prudce poklesne na svou očekávanou hodnotu.

DISKUZE

Hlavním cílem uvedené studie bylo zhodnotit rozsah toků dlouhovlnného záření mezi zemským povrchem (sekaný trávník) a oblohou v závislosti na oblačnosti a vlhkosti vzduchu. Za jasného dne přichází na vodorovnou plochu až 900 W·m⁻² sluneční energie a při částečné oblačnosti byly naměřeny maximální hodnoty výrazně nad 1200 W·m⁻², kdy mrak působí jako matnice a na čidlo přichází současně jak přímé sluneční záření, tak difuzní záření. Vyhodnocené denní úhrny radiační balance ukazují velký vliv oblačnosti na celkové množství přicházející sluneční energie. To je patrné zejména ze srovnání sumárních hodnot dvou dnů v letním slunovratu v roce 2020, kdy bylo **oblačno (21,8 % a 13,3 %** z vypočítané maximální hodnoty), a v roce 2017, kdy bylo **jasno (86,6 % a 91,7 %** z vypočítané maximální teoretické hodnoty).

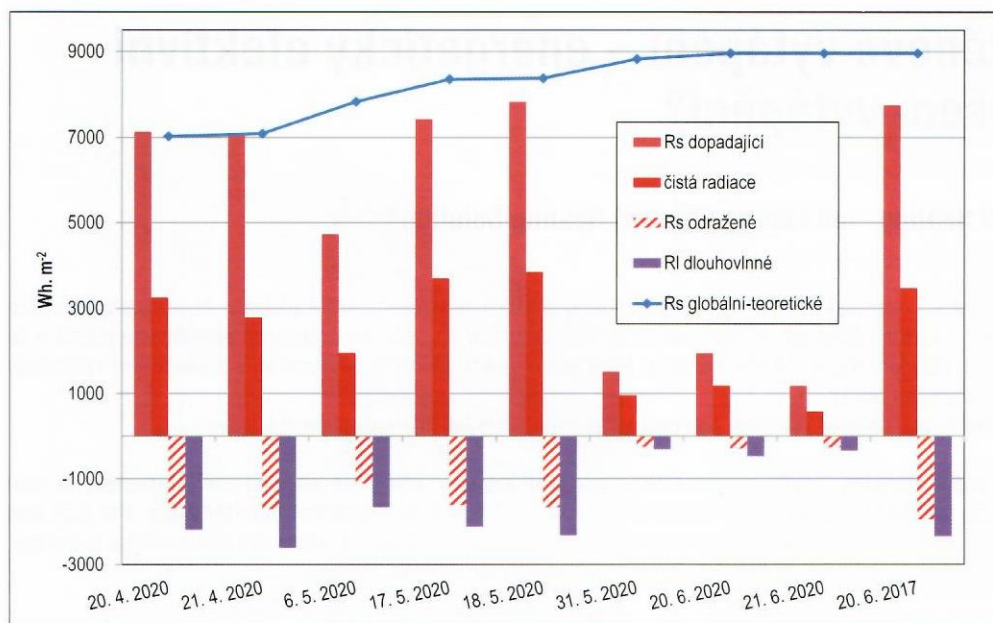
Naměřené hodnoty toku tepla do atmosféry při jasné obloze dosahovaly hodnot až 180 W·m⁻², 190 W·m⁻² (2017). Těmto tokům tepla odpovídá podle Stefan-Boltzmannova zákona rozdíl mezi efektivní teplotou oblohy a povrchovou (radiační) teplotou trávníku 30 až 40 °C. Naopak při zatažené obloze je tok tepla do atmosféry nízký v rozsahu nejvýše desítek W·m⁻², protože teplo vyzařované zemským povrchem je absorbováno vodní párou v mracích a teploty se vyrovnávají na rozdíl několika stupňů.

Pozoruhodný je velký rozptyl hodnot podílu vyzářeného tepla do atmosféry z celkového úhrnu dopadající sluneční energie (ozáření). Hodnoty se pohybují se v rozsahu 3,8 % až 27,1 %. Tok dlouhovlnného záření (tepla) od zemského povrchu do atmosféry je měřítkem skleníkového efektu.

Na několika uvedených příkladech vybraných z více než desetileté databáze kontinuálního záznamu je patrné, že obsah vody a oblačnost ovlivňují skleníkový efekt v rozsahu zhruba 200 W·m⁻². Je zřejmé, že v průběhu roku, resp. tří let, byla stejná koncentrace skleníkového plynu CO₂ i metanu a oxidů dusíku v atmosféře.

Pokud jde o skleníkový efekt, stojí vedle sebe následující dva přístupy:

- Zvýšená koncentrace CO₂, metanu a dalších skleníkových plynů způsobila navýšení skleníkového efektu v průměru pro celou Zemi o 1 až 3 W·m⁻². Díky této energii se ustavuje nová tepelná rovnováha na Zemi, dochází ke globálnímu oteplení a extrémům počasí, protože je více energie v atmosféře. Obsah hlavního skleníkového plynu – vodní páry – je řízen hlavně navýšeným skleníkovým efektem, způsobeným zvýšenou koncentrací CO₂. Tento přístup vychází z průměrného toku sluneční energie na celý povrch Země 342 W·m⁻².



Obr. 8 Celodenní úhrny dopadající sluneční energie (R_s) a odražené sluneční energie, toku dlouhovlnného záření (tepla) do atmosféry a čisté radiace vyjádřené ve $\text{Wh}\cdot\text{m}^{-2}$ pro vybrané dny (data na ose x)

Fig. 8 Daily incident solar energy (R_s) and reflected solar energy, longwave radiation (heat) flux to the atmosphere and net radiation expressed in $\text{Wh}\cdot\text{m}^{-2}$ for selected days (data on the x axis)

Nerozlišuje tedy dynamiku příkonu sluneční energie v rytmu noc a den, ani roční období. Neuvažuje se aktivní úloha krajinného pokryvu v dynamice obsahu vodní páry a oblačnosti (Myhre 2013). Zejména se neuvažuje efekt změny krajinného pokryvu (odlesnění, odvodnění, urbanizace) na zvýšené uvolňování zjevného tepla na úkor tepla latentního v rozsahu stovek $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$. Jinými slovy, neuvažuje se ohřev odvodněných ploch následkem sníženého chladicího efektu evapotranspirace za slunných dnů (Pokorný 2019, Hesslerová et al. 2019).

- Měření aktuálních průběhů složek radiační bilance na určitém místě poskytuje zcela jiný obraz. Skleníkový efekt se mění v rozsahu desítek až stovek $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ podle teplotního gradientu mezi povrchem Země a oblohou. Na několika příkladech byl ukázán rozsah toku tepla do atmosféry 0 až $200 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. Obsah vodní páry v atmosféře je totiž násobně až řádově vyšší než obsah oxidu uhličitého, metanu a oxidů dusíku. V tab. 3 jsou uvedeny koncentrace vodní páry v ppm při 100% vlhkosti vzduchu pro různé teploty. Je zřejmé, že změny obsahu vodní páry mnohonásobně převyšují současnou hodnotu obsahu oxidu uhličitého (400 ppm).

Tab. 3 Maximální hodnoty absolutní vlhkosti vzduchu (100% vlhkost, rosný bod) při dané teplotě a za normálního tlaku vzduchu, vyjádřené v gramech na m^3 a v objemových jednotkách ppm [$\text{ml}\cdot\text{m}^{-3}$] H_2O

Tab. 3 Maximum values of absolute humidity of air (100% humidity, dew point) at a given temperature and normal air pressure, expressed in grams per m^3 and in volume units of ppm [$\text{ml}\cdot\text{m}^{-3}$] H_2O

Teplota vzduchu [°C]	Max. abs. vlhkost [$\text{gH}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-3}$]	ppm vodní páry [$\text{ml}\cdot\text{m}^{-3}$]	Teplota vzduchu [°C]	Max. abs. vlhkost [$\text{gH}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-3}$]	ppm vodní páry [$\text{ml}\cdot\text{m}^{-3}$]
			20	17,3	21500
0	4,8	5970	25	23,0	28600
5	6,8	8400	30	30,4	37800
10	9,4	11600	35	39,6	49200
15	12,8	15900	40	51,1	63500

Závěrem je uveden souhrnný graf radiačních toků pro vybrané modelové jasné, oblačné a zatažené dny v roce 2017 a 2020 (obr. 7). Modrá čára znázorňuje teoretické denní úhrny přicházející sluneční energie. Z grafu je patrné, jak oblačnost současně ovlivňuje množství přicházející sluneční energie a tok tepla do atmosféry. Obsah oxidu uhličitého v atmosféře byl stálý okolo 400 ppm.

ZÁVĚR

Při studiu klimatické změny je nutné se soustředit nejen na vliv CO_2 a ostatních skleníkových plynů, ale zejména na dynamiku změn obsahu vodní páry a oblačnosti a na faktory, především lidskou činnost, které ji ovlivňují, tj. na efekty změny krajinného pokryvu: úlohu vegetace a vodních ploch, zastavění zemědělské plochy, odlesnění, tepelné ostrovy. Extrémy klimatu, náhlé změny teplot, silný vítr, přívalové srážky vznikají následkem tepelných a tlakových gradientů.

Kontakt na autora: jirka@enki.cz

Použité zdroje:

- [1] CIHELKA, J. *Solární tepelná technika*. Praha: Nakladatelství T. Malina, 1997.
- [2] LIGHTFOOT, D. H., MAMER, O. A. Calculation of atmospheric radiative forcing (warming effect) of carbon dioxide at any concentration. *Energy & Environment*. 2014, Vol. 25, No. 8, 1438–1454.
- [3] MATUŠKA, T. *Solární tepelné soustavy 1*. Společnost pro techniku prostředí, odborná sekce alternativní zdroje energie. 2009.
- [4] HESSLEROVÁ, P., POKORNÝ, J., HURYNA, H., HARPER, D. Wetlands and Forests Regulate Climate via Evapotranspiration. In: S.An, J. T. A. Verhoeven (eds.), *Wetlands: Ecosystem Services, Restoration and Wise Use, Ecological Studies*. 238, pp. 63–93. 2019.
- [5] MYHRE, G., SHINDELL, D., BRÉON, F.-M., COLLINS, W., FUGLESTVEDT, J., HUANG, J., KOCH, D., LAMARQUE, J.-F., LEE, D., MENDOZA, B., NAKAJIMA, T., ROBOCK, A., STEPHENS, G., TAKEMURA, T., ZHANG, H. Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment*.
- [6] POKORNÝ, J. Evapotranspiration. In: Fath, B. D. (editor in chief) *Encyclopedia of Ecology*, 2nd edition. 2019, vol. 2, pp. 292–303. Oxford: Elsevier B.V. 2019.
- [7] POKORNÝ, J., HESSLEROVÁ, P., HURYNA, H., HARPER, D. Indirect and direct thermodynamics effects of wetland ecosystems on climate. In: Vymazal, J. (ed.): *Natural and Constructed Wetlands. Nutrients, heavy metals and energy cycling, and flow*. Springer. 91–108. 2016.
- [8] POKORNÝ, J., HESSLEROVÁ, P., HURYNA, H., HARPER, D. Nepřímý a přímý termodynamický vliv mokřadů na klima – část 1. *Vodní hospodářství*. 2017, 67, 2–5.
- [9] POKORNÝ, J., HESSLEROVÁ, P., HURYNA, H., HARPER, D. Nepřímý a přímý termodynamický vliv mokřadů na klima – část 2. *Vodní hospodářství*. 2017, 67, 21–24.
- [10] MATUŠKA, T., ŠOUREK, B. Zjednodušená měsíční metoda pro bilancování solárních tepelných soustav [software]. 2014.