

Energetická bilance sněhu v lesním prostředí: časová a prostorová variabilita krátkovlnné a dlouhovlnné radiace

Ondřej Hotový

Anotace

Energetická bilance sněhu v lesním prostředí: časová a prostorová variabilita krátkovlnné a dlouhovlnné radiace

Příspěvek k diplomové práci se zaměřuje na analýzu časové a prostorové variability krátkovlnné a dlouhovlnné radiace v závislosti na typu vegetačního pokryvu. Jeho vlivem dochází k přeměně toků energetické bilance sněhu, čímž se mění i rychlost jeho tání. Analýza byla provedena v horském prostředí na základě rozboru dat z radiometrů, hemisférickým snímkováním i opakovaným manuálním měřením výšky sněhu a vodní hodnoty sněhu v zimních měsících.

Klíčová slova: Energetická bilance sněhu, les, krátkovlnná radiace, dlouhovlnná radiace

Annotation

Snowpack energy balance in forest environment: spatial and temporal variability of shortwave and longwave radiation

Master thesis paper focuses on temporal and spatial variability of shortwave and longwave radiation depending on the structures of vegetation cover. It influences energy fluxes and the time of snowmelt is affected as well. An analysis was performed in mountain area during winter seasons, based on the data from radiometres, hemispheric images of vegetation and repeated manual measurements of the snow depth and snow water equivalent.

Keywords: Snowpack energy balance, forest, shortwave radiation, longwave radiation

Abstract

Assessment of the role of forest on snowmelt processes and snowpack attributes contributes to the accuracy of spring floods forecasting, due to the fact, that the most of the mountain and foothill basins is entirely or partly forested in the Czech Republic. An importance of the coniferous forest consists in change of the snowpack energy balance and its components. Forest reduces the total amount of solar radiation, however trees cause emitting of longwave radiation, both factors are fundamentally reflected in time of snowmelt in forest environment, respectively time of water outflow from basin is affected.

This paper provides some basic results of master thesis which was focused on temporal and spatial variability of shortwave and longwave radiation depending on the structures of vegetation cover. Individual sampling site types were defined as an open area with no influence of trees and bushes, a forest environment significantly affected by the bark beetle (*Ips typographus*) and windstorms and a healthy coniferous forest, where Norway spruce (*Picea abies*) is the dominant tree species. This division was based on the hemispheric images of vegetation and its Leaf Area Index (LAI). Moreover, repeated manual measurements of the snow depth and snow water equivalent (SWE) were done in plots during winter period 2016/2017 in the Ptačí Brook catchment. This catchment is an experimental catchment of the Charles University (Department of Physical Geography and Geoecology) and it is located in the Šumava Mountains (Bavarian Forest) in the southwest part of the Czech Republic. We used three net radiometers in plots (open area, disturbed forest and healthy coniferous forest) to perform an analysis of shortwave and longwave radiation data about an incoming and outgoing radiation each 10 minutes. Also thermal images were taken by a special device to gain more detailed informations about longwave radiation. Radiation fluxes in different plots were described in daily and seasonal scale, including the calculation of total heat from shortwave and longwave radiation sources, which participate in snowmelt process.

This study showed that shortwave solar radiation is a major source of the energy, while longwave radiation often constitutes a negative component of the snowpack energy balance in a open area, especially during radiation weather conditions, there is a significant energy consumption. On the contrary, the relative decrease in incoming solar radiation in the forest compared to the open area was much bigger compared to the relative decrease in snowmelt rates. It means that longwave radiation is the primary source of energy in forest during snowmelt, besides the vegetation structure, meteorological conditions play an important role as well. A total of shortwave radiation in forest environment is only 6 % of the amount observed in a open area due to shading effect of the trees, in a affected forest it is reduced to 30.5 % compared to an open area.

1 Úvod

Sněhová pokrývka je významnou složkou hydrologického cyklu, neboť je v ní v průběhu zimních měsíců kumulováno podstatné množství dopadajících srážek, tedy vody v různém skupenství, která se účastní celkového odtoku z povodí. V zalesněných horských povodích má formování sněhové pokrývky, její variabilita, načasování fáze akumulace a tání i další procesy v ní, speciální význam, neboť sníh zde většinou pokrývá zemský povrch i po dobu několika měsíců, přičemž akumulovaná voda ve sněhové pokrývce tvoří i více než třetinu z celkových zásob vody, která je pro tento biotop dostupná (Davis et al., 1997). Zejména v průběhu jarních měsíců může vlivem rostoucích teplot a dalších meteorologických a topografických podmínek docházet k urychlenému uvolňování vody zadržené ve sněhu. To vede následně k náhlému zvýšení hladin vodních toků, potažmo k potenciálnímu ohrožení obyvatel či narušení přírodního prostředí.

I z toho důvodu je třeba detailně analyzovat veškeré související podmínky a procesy, ať už formou hledání interakcí mezi jednotlivými proměnnými, nebo sestavováním modelů na základě takto zjištěných vztahů. Pokud má být predikce odtoku ze sněhu v povodích efektivní, například pro účely krajinného plánování, povodňové předpovědi či provozu vodních nádrží, je kromě jiného vyžadován přesný odhad přenosu krátkovlnné radiace (Ellis et Pomeroy, 2007).

V tomto ohledu jsou dále neméně významné parametry přenosu radiace dlouhovlnné, turbulentního tepla a dalších komponent energetické bilance sněhové pokrývky, z nichž lze odvodit celkové množství tepla dostupného pro tání sněhu. Se změnami energetické bilance se velmi podstatně pojí stav, struktura a vývoj vegetace. V lokálním měřítku je charakter vegetace, společně s místní topografií, hlavním činitelem při procesu akumulace a tání sněhové pokrývky (Jost et al., 2007). Lesní porost pak vytváří specifické prostředí, v němž je období a intenzita jarního povrchového odtoku řízena mimo jiné lokálními radiačními přenosy, které mohou tvořit až 80 % z celkové energie dostupné pro tání sněhu (Link et Marks, 1999; Marks et Dozier, 1992). Rozdíly v průběhu akumulace a tání sněhové pokrývky v lese a na otevřených plochách jsou dány 1) zvýšenou mírou intercepce lesního porostu za působení sublimace a evaporace sněhu mimo zemský povrch (Essery et al., 2003), 2) poklesem dopadajícího slunečního záření v souvislosti s rostoucí hustotou lesa (Hribik et al., 2012).

Ačkoli je v posledních letech vliv lesa na akumulaci a tání sněhu předmětem řady výzkumů, na úrovni menších, specificky horských povodí stále neexistuje dostatečný počet podrobných studií zaměřených na to, do jaké míry je odtok vody ze sněhu citlivý ke změnám struktury lesa (Pomeroy et al., 2012). Ještě menší počet pak tvoří výzkumy, věnující se této problematice konkrétně v souvislosti s radiačními charakteristikami a energetickou bilancí.

Aktuálnost tématu potvrzuje mimo jiné fakt, že se v současnosti stále častěji setkáváme s poměrně náhlými změnami ve struktuře lesních porostů v různých formách, ať už se jedná o disturbance přirozené (polomy, požáry, kůrovcové kalamity) či odlesnění antropogenní (kácení, mýcení apod.), které se podílí na proměně řady faktorů souvisejících s energetickými toky, potažmo ovlivňující charakter tání a odtok vody z povodí.

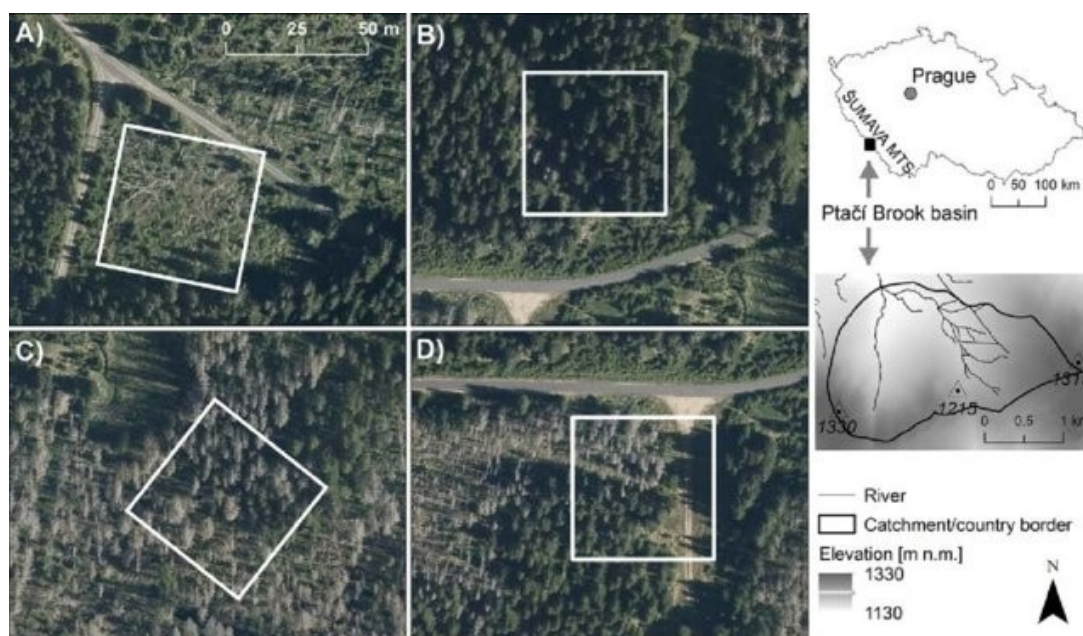
Nejen v České republice patří sledování a analýza radiačních toků k proměnným s nejkratšími řadami měření (Vaníček et al., 2015), ačkoli s postupem času je patrný vzrůstající zájem o zmíněnou problematiku, čemuž přispívá jak rozvoj techniky, tak i postupný nárůst v dostupnosti stále se prodlužujících datových řad.

Cílem uvedené studie je pomocí metody energetické bilance podrobněji kvantifikovat vliv různých struktur lesního porostu na časové a prostorové rozložení sněhové pokrývky, zejména v souvislosti s proměnou krátkovlnných a dlouhovlnných radiačních toků, a to na základě detailní analýzy dat z terénních průzkumů i dat z automaticky měřících přístrojů, které jsou v rámci experimentálního povodí k dispozici.

2 Materiál a metody

2.1 Zájmová lokalita

Výzkum byl prováděn v experimentálním povodí Katedry fyzické geografie a geoekologie Přírodovědecké fakulty Univerzity Karlovy. Jedná se o povodí Ptačího potoka, které se nachází v centrální části Šumavy při hranicích s Bavorskem, přibližně 5 km jižně od obce Modrava (Obr. 1). Povodí zaujímá rozlohu 4 km², nachází se v nadmořských výškách od 1130 do 1330 m n. m. s převažujícími severními a východními svahy o průměrném sklonu kolem 6° (maximální sklon povodí přesahuje i 30°). Povodí Ptačího potoka je charakterizováno sněhovo-dešťovým režimem odtoku s maximy vyskytujícími se v souvislosti s táním sněhové pokrývky, tedy zpravidla mezi pozdním březnem a začátkem května (Jeníček et al., 2017). Vegetační struktura je v rámci zájmového povodí zastoupena převážně ve formě jehličnatých lesů, v nichž dominantním druhem je smrk ztepilý (*Picea abies*). Jedná se o vzrostlé lesní porosty s různou hustotou zápoje, jejichž celistvost je však v současnosti významně narušována lýkožroutem smrkovým (*Ips typographus*), který napadá oslabené stromy. V součinnosti s působením větru dochází k poměrně dynamické proměně zdejší vegetační skladby, což se významně odráží v procesech intercepce, evaporace, oslunění, potažmo na celkových odtokových charakteristikách povodí (Langhammer et al., 2015).



Obrázek 1: Vymezení lokality Ptačího potoka. Letecké snímky jednotlivých zájmových ploch dle struktury vegetace; otevřená plocha (A), zdravý jehličnatý les (B), poškozený les (C) a smíšená vegetace (D) (data: ČÚZK).

2.2 Sběr a zpracování dat

Experimentální povodí je vybaveno přístroji na měření teplot vzduchu, sněhu a půdy, vlhkosti vzduchu, krátkovlnné a dlouhovlnné radiace, vodní hodnoty sněhu (SWE – snow water equivalent) a jeho výšky. Srážky jsou měřeny pouze v teplé části roku, neboť zde umístěné srážkoměry nejsou vyhřívány. Pro sledování srážek v zimním období jsou k dispozici data z vyhříváných měřidel nedaleké meteorologické stanice Modrava. Pro potřeby výzkumu byly v rámci povodí vymezeny výseky o velikosti přibližně 50 x 50 metrů, přičemž primární snahou bylo definovat tyto plochy na základě odlišné struktury vegetace. Uvnitř těchto ploch byly následně podrobněji analyzovány parametry sněhové pokrývky (výška, vodní hodnota a hustota), jejichž hodnoty a vývoj však nebudou v rámci příspěvku blíže popisovány. Primárně byly totiž sledovány parametry vegetace a radiačních toků, a to

na základě dat z opakovaně prováděných terénních měření, zároveň s využitím dat z přístrojů, které jsou v experimentálním povodí nainstalovány.

Stěžejním cílem studie byla analýza radiačních toků, zejména pak krátkovlnné a dlouhovlnné radiace, která byla prováděna na základě bodové informace z přístrojů umístěných v daných výsecích. V rámci povodí jsou pod různými typy vegetace, tj. na otevřené ploše, ve zdravém jehličnatém lese a v poškozeném lese, rozmístěny tři senzory. Jedná se o radiometry *CNR4* (výrobce Kipp and Zonen), poskytující data o globální i odražené krátkovlnné a dlouhovlnné radiaci. Zařízení se skládá ze dvou pyranometrů a pyrgeometrů, z nichž vždy jeden je orientován směrem k obloze, druhý pak směrem k zemskému povrchu. Jako spíše doplňková informace o původu dlouhovlnného záření a o tepelných vlastnostech vegetace posloužily snímky pořízené pomocí termokamery *Fluke Ti25*. K popsání časové a prostorové variability krátkovlnné a dlouhovlnné radiace byla pro jednotlivé plochy hodnocena zimní sezóna 2016/2017 (od začátku prosince do konce dubna), v níž se několikrát vyskytla období, kdy svrchní část senzoru byla zasněžena či Sluncem podsvícena. Tyto časové úseky byly vyřazeny z analýz globální a celkové krátkovlnné i dlouhovlnné radiace, data o radiaci odražené nebyla těmito epizodami postihnuta.

Za účelem vymezení a popisu sledovaných lokalit na základě odlišné struktury vegetace byly v průběhu letních měsíců pořizovány hemisférické fotografie. Vegetace je při tom snímána zesponu objektivem naměřeným směrem k obloze, pomocí speciálního tělesa (*SIGMA 4,5 mm, f/2,8 EX HSM DC Fisheye circular*), které je opatřeno objektivem s úhlem záběru zpravidla 180° (Frazer et al., 1999; Matějka, 2015). Všechny pořízené hemisférické snímky byly následně analyzovány v softwaru *Gap Light Analyzer* (GLA), verze 2.0.

Plošná měření vlastností sněhové pokrývky byla prováděna po vzoru předešlých studií v daném povodí za účelem sledování rozdílů v průběhu akumulace a tání sněhu během zimních měsíců, v závislosti na vegetačním krytu, respektive při působení krátkovlnné a dlouhovlnné radiace na průběh akumulace a tání. Takto zaměřených terénních kampaní, při kterých byly zjišťovány údaje o výšce, hustotě a vodní hodnotě sněhu, bylo v zimní sezóně 2016/2017 uskutečněno celkem šest – dvě v období akumulace sněhové pokrývky (11. a 19. ledna), zbytek pak v průběhu tání sněhu (3., 17., 24. a 31. března).

2.3 Metoda energetické bilance

Pro výpočet tepla dostupného pro tání sněhu byla použita metoda energetické bilance. Tato metoda zahrnuje kvantifikaci jednotlivých energetických toků uvnitř sněhové pokrývky a na rozhraních atmosféra-sníh-půda, s níž je přímo spojena i intenzita tání sněhu. Vychází ze základní rovnice (Rovnice 1) (Singh et Singh, 2001; DeWalle et Rango, 2008).

$$Q_m = Q_{nr} + Q_h + Q_e + Q_p + Q_g + Q_q \quad (1)$$

kde Q_m je saldo energie dostupné pro tání sněhu, přičemž při kladných hodnotách je teplo přijímáno a dochází k tání sněhové pokrývky, při záporných hodnotách je teplo pokrývkou vydáváno a dochází k promrzání sněhové pokrývky. Q_{nr} je radiační tok energie a zahrnuje přenos krátkovlnné radiace (Q_{sn}) a přenos dlouhovlnné radiace (Q_{ln}), což jsou komponenty, jejichž hodnoty jsou přímo naměřené na přístrojích umístěných v experimentálním povodí. Q_h označuje přenos zjevného tepla, Q_e je přenos latentního tepla, Q_p je teplo dodané dopadem dešťových srážek na sněhovou pokrývku, Q_g popisuje tepelný tok z/do podloží a Q_q je změna vnitřní energie sněhové pokrývky.

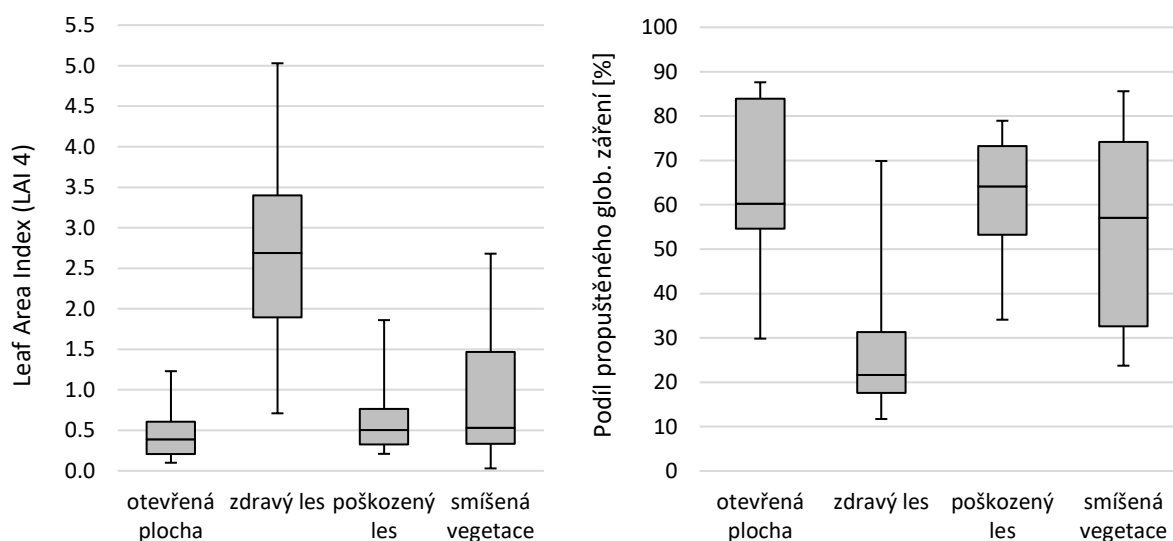
3 Výsledky

3.1 Analýza struktury vegetace

Analýza struktury vegetace byla provedena na základě výpočtu několika proměnných s užitím softwaru GLA. Výsledným indexem LAI 4 byly definovány vymezené plochy dle stavu a struktury vegetace. Na Obr. 2 je graficky znázorněn vypočtený *LAI 4 Ring*, který udává konkrétní index listové plochy pro kulovou výseč v rozsahu 0° až 60° zenitového úhlu nad zvoleným bodem, a hodnota *Total Solar*

Transmissivity of the Canopy, jež určuje podíl propuštěného globálního záření (přímého i rozptýleného) skrz vegetační pokryv.

Na základě výsledných hodnot indexu listové plochy (LAI) lze kategorizovat vymezené lokality jako otevřenou plochu s nejnižšími hodnotami LAI, poškozený les s nepatrně vyššími hodnotami LAI a zdravý jehličnatý les s mediánovou hodnotou kolem 2,7, v němž je zároveň patrná i nejvyšší variabilita zápoje vegetace. Disturbance lesa působením lýkožrouta smrkového (*Ips typographus*) je příčinou velmi nízkých hodnot LAI v poškozeném lese, což se velmi významně projevuje i na množství propuštěného globálního záření, jehož podíly jsou dokonce srovnatelné s hodnotami na otevřené ploše. Ve zdravém jehličnatém lese je směrem k zemskému povrchu (sněhové pokrývce) propouštěna přibližně čtvrtina z celkového úhrnu přímého a rozptýleného záření, ačkoli i zde se vyskytují místa s menším počtem stromů, kde dochází k významnějšímu pronikání slunečních paprsků.

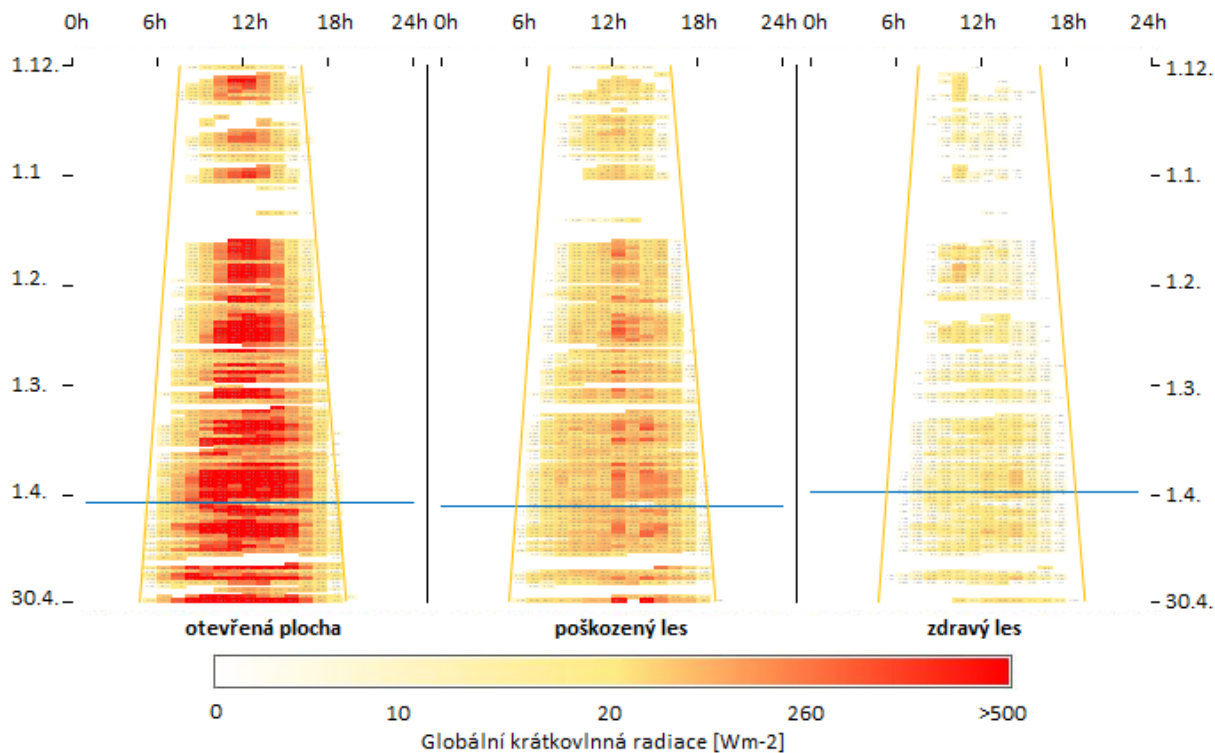


Obrázek 2: Vypočtené hodnoty LAI 4 (levý graf) a celkový podíl záření (přímé i rozptýlené) procházející skrz vegetační kryt (pravý graf) u jednotlivých typů lokalit. Krabicový diagram (boxplot) udává minimum a maximum (okrajové hodnoty), 25% (spodní hranice boxu), 75% (horní hranice boxu) percentil a medián (předělová linie uvnitř boxu).

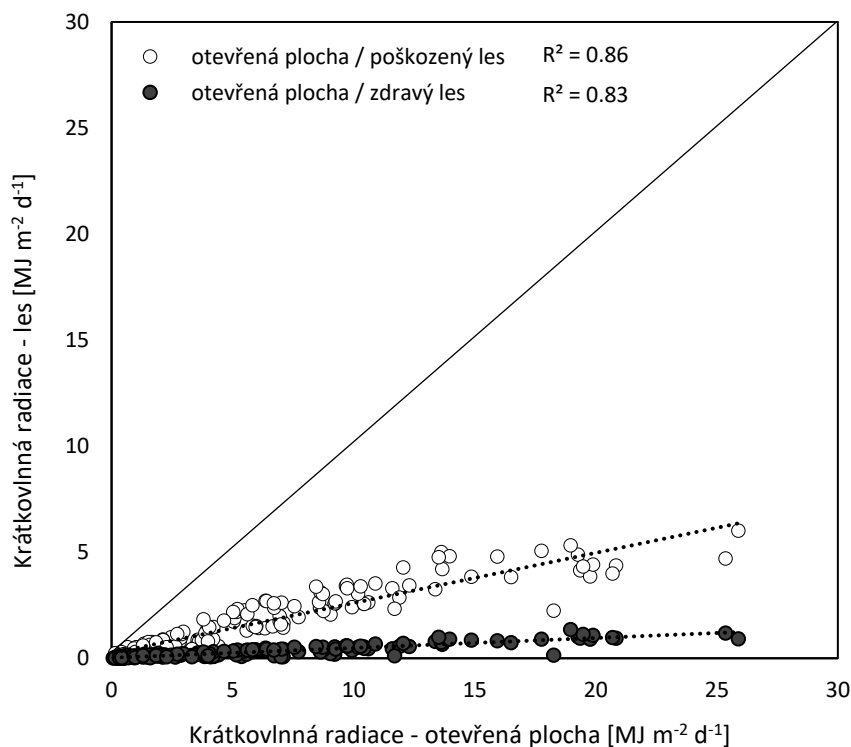
3.2 Analýza krátkovlnné radiace

Úhrny a intenzita krátkovlnné radiace se odvíjí primárně od přítomnosti přímého slunečního záření, které je jejím hlavním zdrojem. V závislosti na slunečním svitu jsou tak pozorovány značné rozdíly v úhrnech krátkovlnné radiace jak v průběhu celé zimní sezóny, tak během dne. Na Obr. 3 je znázorněna intenzita i denní a sezónní chod globálního krátkovlnného záření zachycovaného bodově horním pyranometrem na vymezených lokalitách.

Při pohledu na denní chod krátkovlnného záření je zcela zřejmá spojitost intenzity radiace s časem východu a západu Slunce. Ten s postupující sezónou navyšuje celkový úhrn krátkovlnné radiace, navíc v průběhu sezóny postupně narůstá zenitový úhel Slunce. Nejvyšší hodnoty globální radiace se vyskytují krátce po poledni, kdy je Slunce nejvýše nad obzorem, naopak při setmění (mezi západem a východem Slunce) je intenzita nulová. Zároveň je možné pozorovat kratší či delší epizody v průběhu sledovaného období, kdy i během dne se vyskytují nulové hodnoty (nejvýznamněji v první polovině ledna na všech stanicích). Jedná se o situace, kdy dochází k pokrytí senzorů sněhem, případně je Sluncem podsvícen radiační kryt přístroje. Tehdy přístroje nesprávně vykazují vyšší hodnoty odražené krátkovlnné radiace (spodní pyranometr), než hodnoty globální krátkovlnné radiace (horní pyranometr) a údaje nelze považovat za relevantní.



Obrázek 3: Hodinové průměry globální krátkovlnné radiace (pyranometr orientovaný k obloze) na lokalitách v období prosinec 2016 až duben 2017. Žluté linie vymezují čas východu a západu Slunce (7:39 - 16:10 SEČ dne 1. prosince, 4:46 - 19:20 SEČ dne 30. dubna). Modré linie znázorňují dobu roztátí sněhu. Bílá místa značí chybějící hodnoty.

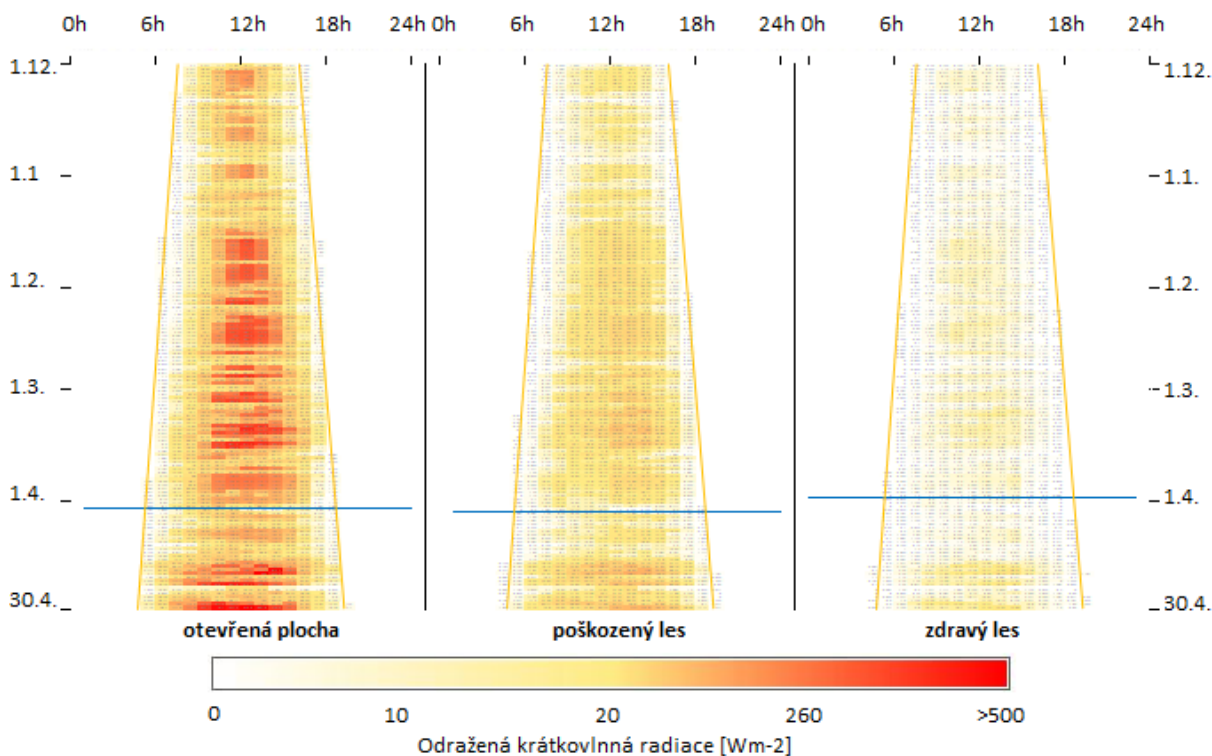


Obrázek 4: Srovnání denních úhrnů globální krátkovlnné radiace na otevřené ploše a v poškozeném lese (bílé body) a ve zdravém lesním porostu (černé body) v průběhu zimní sezóny 2016/2017.

Maximální hodnoty globální krátkovlnné radiace lze zaznamenat v poledních hodinách v pozdních fázích sledovaného období (duben) na otevřené ploše. Průměrná hodinová intenzita zde dosahuje hodnot blízkých se $1000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. Oproti tomu se ve stejnou dobu pohybuje maximální intenzita globální krátkovlnné radiace v poškozeném lese okolo $300 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, ve zdravém lese je to v maximech pouze do $100 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.

Zde se projevuje právě vliv vegetačního krytu, který v tomto případě stíní sluneční paprsky. Ve zdravém lese, kde byl popsán výrazně vyšší LAI, pak přímé sluneční záření prostupuje skrz koruny stromů pouze omezeně. Tento úbytek krátkovlnné radiace lze kvantifikovat jako průměr podílů globálního záření v poškozeném a zdravém lese vzhledem k úhrnům na otevřené ploše. Výsledně je celková globální krátkovlnná radiace vegetací redukována na 30,5 % v lese poškozeném kůrovcem a pouze na 6 % ve zdravém lese oproti úhrnům na otevřené ploše (100 %). Graficky je tento pokles v intenzitě záření znázorněn na Obr. 4, jednotky $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ jsou zde převedeny na $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$.

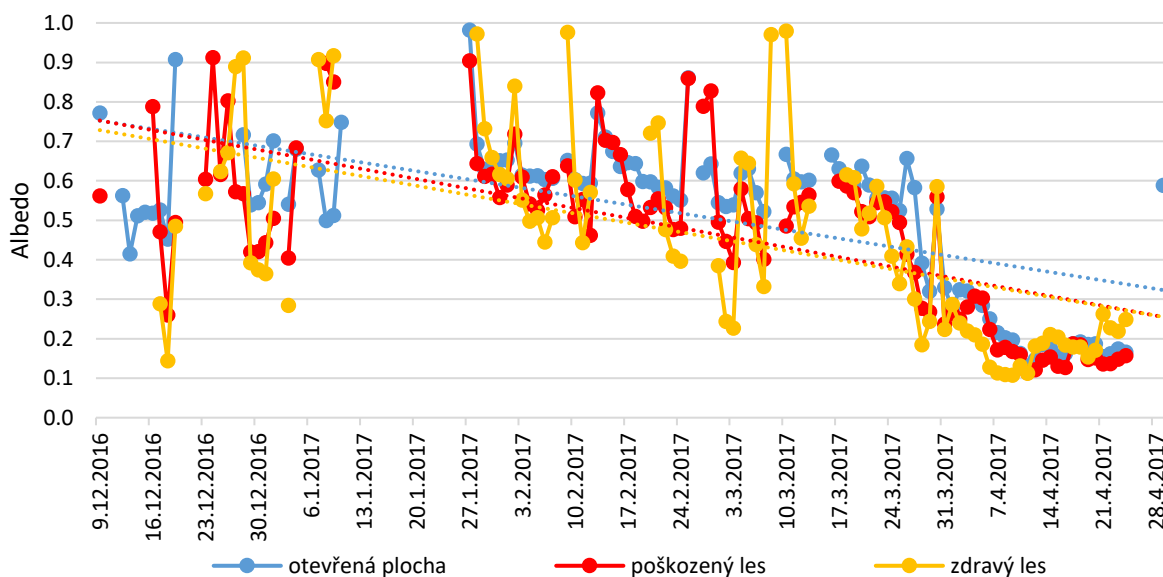
Průběh odražené krátkovlnné radiace (Obr. 5) do jisté míry kopíruje chod globální krátkovlnné radiace, avšak v nižších intenzitách. Nicméně, zatímco intenzita globální krátkovlnné radiace obecně narůstá směrem k pozdní fázi zimy, u odražené radiace nelze tento trend pozorovat, nevyskytují se významné rozdíly v maximálních úhrnech mezi jednotlivými měsíci zimního období, a to zejména v důsledku klesajícího albeda zemského povrchu (sněhové pokrývky) (Obr. 6). To se projevuje i v celkovém energetickém toku krátkovlnné radiace Q_{sn} , který vstupuje do výpočtu energetické bilance.



Obrázek 5: Hodinové průměry odražené krátkovlnné radiace (pyranometr orientovaný k zemi) na lokalitách v období prosinec 2016 až duben 2017.

Albedo je vypočteno jako rozdíl průměrné denní globální a odražené krátkovlnné radiace, přičemž kontinuita vývoje je zde opětovně narušena nutností vyřazení některých hodnot z analýzy (viz výše). I přesto je patrný setrvalý pokles albeda směrem ke konci zimy. Na konci zimního období (přelom března a dubna) dochází k výraznějšímu poklesu albeda, což je způsobeno jednak tím, že se na povrchu sněhové pokrývky shromažďuje větší množství nečistot (opad ze stromů, prach aj.) a odrazivost záření tím klesá, jednak také tím, že dochází k postupnému roztání sněhu, a albedo sněhem nepokrytého povrchu je nápadně nižší. Po roztání sněhu nastává výraznější pokles úhrnů odraženého záření (Obr. 5,

modrá linie). Výrazné krátkodobé nárůsty albeda jsou způsobeny novou neznečištěnou sněhovou pokrývkou v průběhu celé zimní sezóny na všech lokalitách.



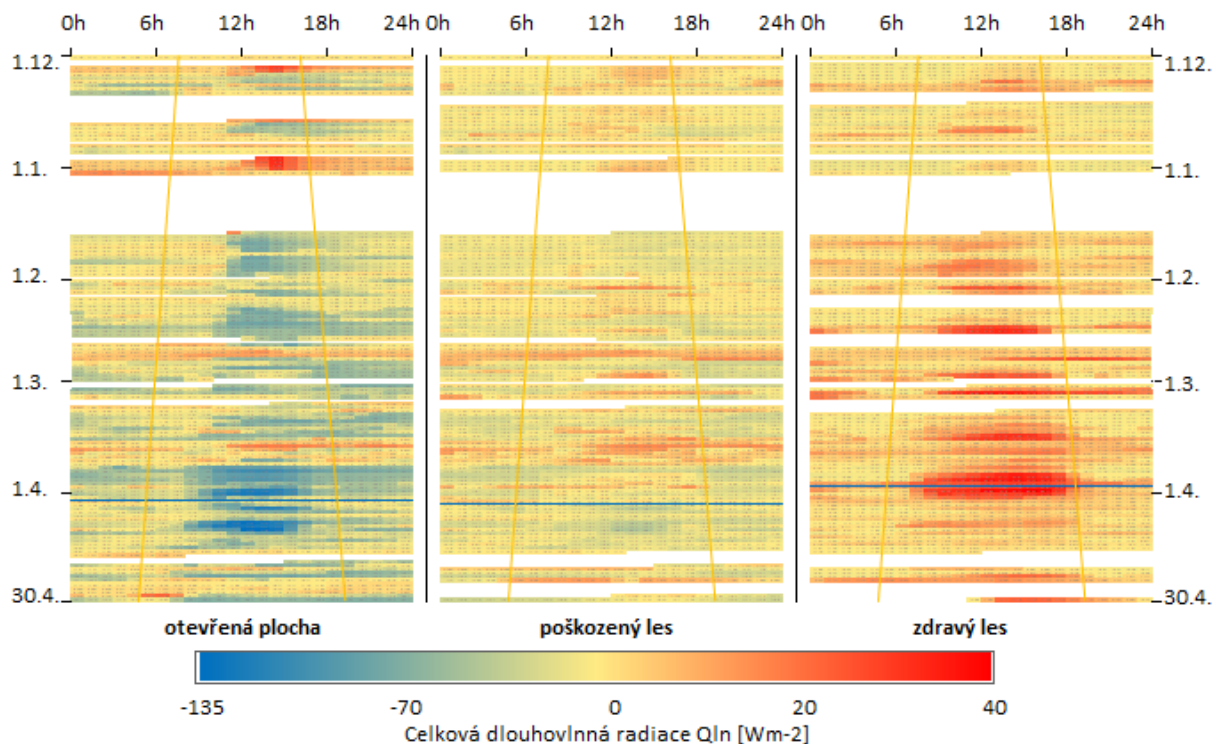
Obrázek 6: Vývoj albeda zemského povrchu (sněhové pokrývky) pro různé typy vegetačního pokryvu. Přerušované čáry znázorňují lineární spojnice trendu pro plochy.

3.3 Analýza dlouhovlnné radiace

V rámci studie byla analyzována jak intenzita globální dlouhovlnné radiace, tak průběh a intenzity radiace odražené, za účelem kvantifikace celkové dlouhovlnné radiace Q_{ln} vstupující do výpočtu energetické bilance sněhové pokrývky. Sezónní i denní průběh Q_{ln} je znázorněn na Obr. 7, jako rozdíl naměřené globální (horní pyrgeometr) a odražené (spodní pyrgeometr) dlouhovlnné radiace.

Zároveň bylo provedeno termální snímkování se snahou postihnout, jaký podíl dlouhovlnného záření pochází přímo z atmosféry a jaká část je emitována z okolní vegetace.

Při hodnocení celkové dlouhovlnné radiace se na první pohled objevují značné rozdíly mezi otevřenou a zalesněnou plochou. Na otevřené ploše v průběhu celé zimy jasně převládá stav, kdy je energie spotřebována, a netvoří tak kladnou složku v energetické bilanci sněhové pokrývky, výjimku tvoří spíše kratší epizody dnů s oblačností, kdy se celkové úhrny Q_{ln} sporadicky dostávají do kladných hodnot. Naopak v jehličnatém lese je situace opačná, převládají situace (zejména ve druhé polovině zimy), kdy je tepelná energie do prostředí dodávána a dlouhovlnná radiace se stává výhradně kladnou složkou energetické bilance sněhu. Z výsledných hodnot je zřejmé, že dlouhovlnná radiace je v lesním prostředí často hlavním zdrojem tání sněhové pokrývky. Dle analýzy termálních snímků pochází minimálně 82 % takového tepla z vyzařující vegetace, oproti zbylému dlouhovlnnému záření s původem z atmosféry.



Obrázek 7: Hodinové průměry celkového úhrnu dlouhovlnné radiace (oba pyrgeometry) na lokalitách v období prosinec 2016 až duben 2017.

Vedle výrazného působení vegetace se na charakteru a intenzitě dlouhovlnného záření podílí také převládající typ počasí. Při zatažené obloze (advekční typ počasí) jsou rozdíly v úhrnech globální i odražené dlouhovlnné radiace minimální, a to jak v denním chodu (v průběhu dne a noci), tak v závislosti na vegetačním pokryvu. Přítomná vegetace neabsorbuje krátkovlnné záření, které by mohla posléze vyzařovat ve formě záření dlouhovlnného, tehdy je tok dlouhovlnného záření pod lesním porostem kvantitativně srovnatelný s tokem na otevřené ploše. Vlivem oblačnosti, která způsobuje intenzivnější rozptýlení záření krátkovlnného, dochází k výskytu celkově vyšších úhrnů globální dlouhovlnné radiace.

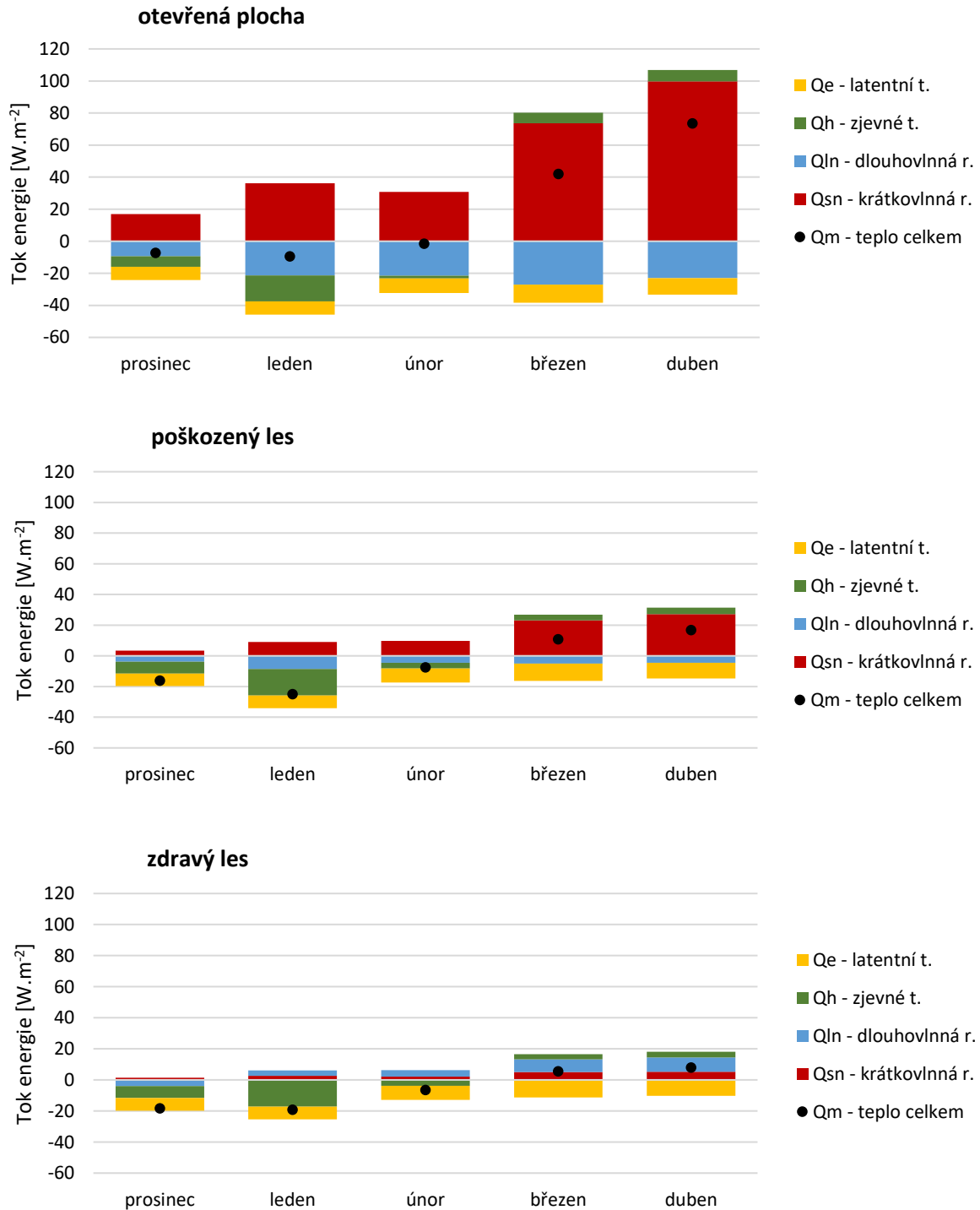
Při slunečném počasí (radiční typ počasí) dochází k rozkolísání sledovaných hodnot. Na otevřené ploše a v rozpadlém lese klesají úhrny globální dlouhovlnné radiace, neboť neexistuje oblačnost, která by zvyšovala množství dopadajícího dlouhovlnného záření. Naopak v lese dochází zejména v poledních hodinách k absorpci slunečního záření vzrostlými stromy, a tím ke zvýšeným úhrnům radiace dlouhovlnné. Při bezoblačném počasí hraje významnou roli mnohdy velmi výrazný kontrast v teplotách vzduchu a částech vegetace, který způsobuje tepelnou výměnu mezi jednotlivými prostředními.

3.4 Teplo dostupné pro tání

Za účelem výpočtu celkového tepla Q_m byly kvantifikovány jednotlivé složky metodou energetické bilance na základě Rovnice 1 a výsledky jsou graficky znázorněny na Obr. 8.

V první polovině zimy (prosinec až únor) je výsledné teplo Q_m (v grafu znázorněno černým bodem) vyjádřeno zápornými hodnotami, energie je v průběhu těchto měsíců spotřebována, zatímco směrem k jarním měsícům způsobuje dodaná energie významnější tání sněhu. Na otevřené ploše a zpravidla i v lese poškozeném tvoří hlavní zdroj energie krátkovlnná radiace ze slunečního záření, jejíž význam narůstá směrem k pozdní fázi zimy. Na těchto plochách je dlouhovlnná radiace výhradně zápornou složkou energetické bilance sněhové pokrývky. Ve zdravém jehličnatém lese je intenzita radiačních toků výrazně utlumena. To se týká především úhrnů krátkovlnné radiace vlivem stínění stromů, i z toho

důvodu se v takovém prostředí mnohem významněji uplatňuje působení dlouhovlnné radiace, která je po větší část zimy kladnou složkou energetické bilance sněhové pokrývky, a stává se tak hlavním zdrojem pro tání sněhu, zejména ke konci zimního období.



Obrázek 8: Vývoj hlavních komponent energetické bilance sněhové pokrývky v průběhu zimní sezóny 2016/2017 v experimentálním povodí Ptačího potoka na lokalitách.

4 Diskuze

Při posuzování zjištěných skutečností je třeba uvažovat rozdílnou míru působení fyzicko-geografických činitelů a dalších okolností, které vedou k utváření konkrétních podmínek v dané zájmové lokalitě v průběhu provádění výzkumu. V tomto ohledu je charakter sněhové pokrývky výsledkem mnoha faktorů, které se podílejí na zvýšené prostorové variabilitě sněhu na daném místě. Vybrané lokality jsou homogenní co do nadmořské výšky a topografických charakteristik (sklon a orientace svahů), bez výrazného ovlivnění větrem. Rozdíl ve struktuře vegetace ovlivňuje míru intercepce a množství krátkovlnného a dlouhovlnného záření, avšak neobjevuje se pouze mezi plochami jako celky, nýbrž i v rámci jednotlivých lokalit se variabilita zápoje vegetace různí, čímž je obtížněji popsatelná na základě jediného indexu. Na ploše poškozeného lesa může vlivem jeho rychlého rozpadu docházet ke změně hodnot LAI i v rámci jediné sezóny. Určité nepřesnosti mohou pramenit i ze zpracování hemisférických snímků v softwaru GLA. Patrně vyšší mírou nepřesnosti je zatížen úkon, kdy dochází k nastavení prahové hodnoty (*threshold*) v prostředí GLA. Zde se výrazně projevuje subjektivní vizuální vnímání uživatele programu. Nicméně výsledné LAI se pro vymezené plochy experimentálního povodí výrazně neliší od hodnot udávaných v odborné literatuře, a může tak sloužit jako poměrně vhodný ukazatel pro popis struktury a hustoty vegetace v zájmovém území. Plocha popsána jako oblast se smíšeným typem vegetace posloužila spíše jako orientační a doplňková, neboť v ní nelze zcela jasně definovat převládající typ vegetace, navíc v této části lesa, ani v její blízkosti není instalován žádný radiometr.

Hlavním předmětem výzkumu byla analýza krátkovlnné a dlouhovlnné radiace, pocházející z dat radiometrů umístěných na různých typech ploch. Předpokladem je vhodné umístění přístrojů v rámci vymezených ploch. Tato podmínka je bez výhrad splněna v lokalitách zdravý a poškozený les, nicméně na otevřené ploše lze spatřovat určité zdroje možného zkreslení údajů z pyranometrů. Okolí radiometru splňuje svými indexy LAI definici otevřené plochy bez vegetace, avšak ze západní strany se může projevat vliv sousedního lesního porostu, a může tak docházet k podhodnocení úhrnů globální radiace.

Významnější komplikaci při analýze prostorové a časové variability záření představují již několikrát zmíněná období, kdy jsou povrchy radiometrů pokryty sněhem nebo ledem, a nedochází tak ke spolehlivému a přesnému měření radiace až do té doby, než dojde k přirozenému odstranění pokrývky, neboť nainstalované přístroje nejsou pravidelně obsluhovány. K takovým situacím docházelo většinou současně na všech lokalitách. V tomto případě se vyskytovalo výrazné zkreslení dat o globální krátkovlnné radiaci, tudíž takto poznamenané časové úseky bylo nutno vyřadit z analýz globální i celkové krátkovlnné radiace a vývoje albeda v průběhu sezóny. Při hodnocení intenzity dlouhovlnné radiace z horních pyrgeometrů nebyla odchylka výrazná. Filtrováním relevantních dat dle poměru globální a odražené krátkovlnné radiace by z analýzy dlouhovlnné radiace byla vyřazena taktéž data z tmavé části dne.

Určení a kvantifikace přesného podílu dlouhovlnné radiace z různých zdrojů (vegetace, atmosféra) nebyla primárním cílem studie. Přesto byla vynaložena snaha pokusit se původ dlouhovlnné radiace alespoň okrajově vysvětlit. Je zřejmé, že přesné určení podílu dlouhovlnné radiace z vegetace by vyžadovalo systematictější výzkum a podrobnější sběr dat. V rámci zde uvedené metody byly nasnímané hodnoty o teplotě spodních částí kmenů vztaženy k informaci o globální radiaci z radiometrů, přičemž bylo předpokládáno, že se teplota spodní části stromů výrazně neliší od teploty, potažmo míry vyzařování, které produkuje horní část kmene. Už tehdy může vznikat poměrně značná chybovost, která řadí tuto část výsledků spíše do kategorie přibližných. I z toho důvodu nebyla tato data v rámci příspěvku podrobněji popisována.

Z ostatních uvedených hlavních výsledků studie lze vyvozovat obecná tvrzení pouze s vědomím toho, že se jedná o popis stavu za jedinou zimní sezónu při daných meteorologických podmínkách, které významně ovlivňují charakter záření. Cílem plánovaných navazujících výzkumů, věnujících se této problematice, je postihnout analýzou sledovaných proměnných delší časová období tak, aby mohly být popsány obecně platné zákonitosti a souvislosti parametrů vegetace, krátkovlnné a dlouhovlnné radiace i sněhové pokrývky.

5 Závěr

V rámci provedené studie byl zhodnocen a popsán současný stav výzkumu na téma energetická bilance sněhu, se zaměřením na radiační toky krátkovlnného a dlouhovlnného záření. Ukázalo se, že uváděné poznatky jsou často podloženy nepřímo měřenými daty o krátkovlnném a dlouhovlnném záření, při hlubším zkoumání této problematiky hrají mnohdy významnou roli modelem simulované hodnoty.

Uvedená zjištění byla konfrontována s výzkumem, prováděným v rámci diplomové práce. Jeho výsledky jsou založeny na přímo přístrojově měřených údajích o krátkovlnné a dlouhovlnné radiaci, mohly by přitom posloužit ke kalibraci stávajících modelů. Studie byla prováděna v povodí Ptačího potoka na Šumavě, kde jsou radiometry i další přístrojové vybavení spravovány Katedrou fyzické geografie a geoekologie PřF UK. Na základě takto dostupných dat byla pro zimní sezónu 2016/2017 provedena analýza časové a prostorové variability krátkovlnné i dlouhovlnné radiace a jejich význam při kvantifikaci celkové energetické bilance sněhové pokrývky. Ten se projevuje například v rozdílné rychlosti tání sněhu v závislosti na typu vegetačního pokryvu. Charakter lokality dle struktury vegetace, tedy zda se jedná o otevřenou plochu, les poškozený kůrovcem nebo zdravý jehličnatý les, byl určen indexem listové plochy (LAI) po provedení analýzy hemisférických fotografií. Zvláštní pozornost přitom byla věnována lesnímu prostředí a jeho vlivu na charakter radiačních toků. Data o radiaci byla dále doplněna termálními snímky ze zimní sezóny 2017/18, popisujícími teplotu, potažmo intenzitu tepelného vyzařování vegetace v lese.

Na základě uskutečněných měření a dostupných údajů byly vyvozeny následující závěry:

- Otevřená plocha vykazuje hodnoty LAI v intervalu 0,2-0,6 (1. až 3. kvartil), plocha se smíšeným typem vegetace 0,3-1,5, poškozený les má hodnoty 0,3-0,8 a je zde oproti zdravému lesu výrazně zvýšen podíl propouštěného globálního záření, hustota vegetace v lese je definována intervalem 1,9-3,4 a vykazuje nejvyšší míru variability LAI.
- Průměrný úhrn globální krátkovlnné radiace tvoří v lesním prostředí vlivem stínění pouze 6 % toho, co je pozorováno na otevřené ploše, v poškozeném lese je tato redukce 30,5 % oproti úhrnům na otevřené ploše.
- Intenzita odražené krátkovlnné radiace se odvíjí od albeda, přičemž po roztátí sněhové pokrývky se její intenzita výrazně snižuje v důsledku nižší odrazivosti zemského povrchu.
- Na charakteru dlouhovlnné radiace se významně podílí struktura vegetace a panující meteorologické podmínky. Na otevřené ploše převládá, zvláště za radiačního typu počasí, energetická spotřeba ve formě dlouhovlnného vyzařování, zatímco v lesním prostředí tvoří dlouhovlnná radiace hlavní zdroj energetického zisku. Při advekčním typu počasí oscilují dlouhovlnné toky na všech lokalitách kolem nuly.
- V lesním prostředí je hlavním zdrojem dlouhovlnné radiace tepelné vyzařování z vegetace, dlouhovlnné záření z atmosféry zde tvoří maximálně 18 % z celkového úhrnu. Navzdory omezenému množství dat získaných termokamerou, výsledky poukazují na významnost dlouhovlnného vyzařování z vegetace. Kvantifikace přesného podílu tohoto zdroje tepla na celkové dlouhovlnné radiaci by vyžadovala sofistikovanější a důkladnější analýzu a sběr dat.
- Působení radiačních toků se odráží na rychlosti tání sněhové pokrývky.

6 Literatura

- Davis, R. E., Hardy, J. P., Ni, W., Woodcock, C., McKenzie, J. C., Jordan, R., Li, X., 1997: *Variation of snow cover ablation in the boreal forest: A sensitivity study on the effects of conifer canopy*. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 102(D24), 29389-29395.
- Dewalle, D. R., Rango, A., 2008: *Principles of snow hydrology*. Cambridge University Press, Cambridge, 410 s.
- Ellis, C. R., Pomeroy, J. W., 2007: *Estimating sub-canopy shortwave irradiance to melting snow on forested slopes*. Hydrological Processes, 21, 2581-2593.
- Essery, R., Pomeroy, J., Parviainen, J., Storck, P., 2003: *Sublimation of Snow from Coniferous Forests in a Climate Model*. Journal of Climate, 16, 1855-1864.
- Frazer, G. W., Canham, C. D., Lertzman, K. P., 1999: *Gap Light Analyzer (GLA), Version 2.0: Imaging software to extract canopy structure and gap light transmission indices from true-colour fisheye photographs, users manual and program documentation* [online]. Institute of Ecosystem Studies, Millbrook, New York, 36 s.
- Hribik, M., Vida, T., Škvarenina, J., Škvareninová, J., Ivan, L., 2012: *Hydrological effects of norway spruce and european beech on snow cover in a mid-mountain region of the Polana Mts., Slovakia*. Journal of Hydrology and Hydromechanics, 60(4), 319–332.
- Jeníček, M., Hotový, O., Matějka, O., 2017: *Snow accumulation and ablation in different canopy structures at a plot scale: using degree-day approach and measured shortwave radiation*. AUC Geographica, 52(1), 51-62.
- Jost, G., Weiler, M., Gluns, D. R., Alila, Y., 2007: *The influence of forest and topography on snow accumulation and melt at the watershed-scale*. Journal of Hydrology, 347, 101-115.
- Langhammer, J., Hartvich, F., Kliment, Z., Jeníček, M., Bernsteinová, J., Vlček, L., Su, Y., Štych, P., Miřijovský, J., 2015: *The impact of disturbance on the dynamics of fluvial processes in mountain landscapes*. Silva Gabreta, 21(1), 105-116.
- Link, T., Marks, D., 1999: *Distributed simulation of snowcover mass-and energy-balance in the boreal forest*. Hydrological Processes, 13, 2439-2452.
- Marks, D., Dozier, J., 1992: *Climate and energy exchange at the snow surface in the Alpine Region of the Sierra Nevada: 2. Snow cover energy balance*. Water Resources Research, 28(11), 3043-3054.
- Matějka, O., 2015: *Energeticky založený model akumulace a tání sněhu v jehličnatém lese a na otevřené ploše*. Diplomová práce. Katedra fyzické geografie a geoekologie PřF UK, Praha, 75 s.
- Pomeroy, J., Fang, X., Ellis, C., 2012: *Sensitivity of snowmelt hydrology in Marmot Creek, Alberta, to forest cover disturbance*. Hydrological Processes, 26(12), 1891-1904.
- Singh, P., Singh, V. P., 2001: *Snow and Glacier Hydrology*. Kluwer Academic Publisher, Londýn, 742 s.
- Vaniček, K., Dubrovská, I., Metelka, L., Pokorný, J., 2015: *Měření složek radiační bilance a dlouhodobé změny globálního záření v České republice*. Český hydrometeorologický ústav, Praha, 64 s.