

Slovenská technická univerzita v Bratislave  
Stavebná fakulta

**Ing. Filip Pružinec**

**Autoreferát dizertačnej práce**

**Modelovanie solárnej radiácie na mračne  
bodov s využitím voxelovej reprezentácie  
priestoru**

na získanie akademického titulu philosophiae doctor, PhD.  
v doktorandskom študijnom programe 3636 Geodézia a kartografia  
v dennej forme štúdia.

**Bratislava, 31.5.2022**

Dizertačná práca bola vypracovaná na Katedre globálnej geodézie a geoinformatiky, Stavebnej fakulty, Slovenskej technickej univerzity v Bratislave.

**Predkladateľ:** Ing. Filip Pružinec  
Katedra globálnej geodézie a geoinformatiky  
Stavebná fakulta, Slovenská technická univerzita v Bratislave  
Radlinského 11, 810 05 Bratislava, Slovenská republika

**Školiteľ:** doc. Ing. Renata Ďuračiová, PhD.  
Katedra globálnej geodézie a geoinformatiky  
Stavebná fakulta, Slovenská technická univerzita v Bratislave  
Radlinského 11, 810 05 Bratislava, Slovenská republika

**Oponenti:** prof. Mgr. Jaroslav Hofierka, PhD.  
Ústav geografie  
Prírodovedecká fakulta, Univerzita P. J. Šafárika v Košiciach  
Šrobárova 2, 041 54 Košice, Slovenská republika

doc. Mgr. Milan Koreň, PhD.  
Katedra plánovania lesných zdrojov a informatiky  
Lesnícka fakulta, Technická univerzita vo Zvolene  
Ul. T. G. Masaryka, 24 960 01 Zvolen, Slovenská republika

doc. Ing. Marián Marčiš, PhD.  
Katedra geodézie  
Stavebná fakulta, Slovenská technická univerzita v Bratislave  
Radlinského 11, 810 05 Bratislava, Slovenská republika

**Autoreferát bol rozoslaný:** .....

**Obhajoba dizertačnej práce sa bude konať dňa:** .....

.....  
.....  
.....

.....  
prof. Ing. Stanislav Unčík, PhD.  
dekan Stavebnej fakulty, STU v Bratislave  
Radlinského 11, 810 05 Bratislava

## **Abstrakt**

Slnečné žiarenie má výrazný vplyv na život na Zemi. Modelovaniu slnečného žiarenia (solárnej radiácie) as venuje množstvo prác s cieľom využívať jeho potenciál ako obnoviteľného zdroja energie, jeho vplyv na poľnohospodárstvo, lesné hospodárstvo, či monitorovať a regulovať jeho účinky na klímu a životné prostredie. V súčasnosti je modelovanie solárnej radiácie realizované pomocou dostupných softvérových riešení v podobe interaktívnych solárnych máp, analytických aplikácií a nástrojov v prostredí geografických informačných systémov, ktoré sú zamerané na rozsiahle až globálne modelovanie. Táto práca sa venuje detailnému modelovaniu solárnej radiácie na mračnách bodov s využitím voxelovej reprezentácie priestoru. V rámci práce je vyvinutá efektívna metóda modelovania prakticky použiteľná v akomkoľvek priestore, a to vrátane vegetácie, ktorá predstavuje komplexné, náročne modelovateľné objekty. Metóda je implementovaná v rámci novovyvinutého nástroja PCSRT, ktorý je verejne dostupný a má otvorený zdrojový kód. Nástroj je zameraný na efektivitu výpočtu a praktické použitie z hľadiska bežne dostupných dát a hardvéru. Jeho použitie je demonštrované na prípadových štúdiách v rámci tejto práce.

## **Abstract**

Solar irradiance has a significant impact on life on Earth. A number of studies are dedicated to the modeling of solar radiation in order to use its potential as a renewable energy source, study its impact on agriculture and forestry or to monitor and regulate its impact on the climate and the environment. The modeling of solar radiation is currently put in practice in form of software tools including interactive solar maps, analytical applications and software and also tools implemented within geographic information systems. These tools are, however, focused on large scale or global modeling often resulting in lower detailed irradiance models. This thesis is focused on detailed modeling of solar radiation using voxel representation of space based on point cloud data. The aim of this work is the development of effective modeling method applicable in virtually any space including areas with complex objects such as vegetation. This method is implemented within a newly developed software tool PCSRT that is publicly available under an open source license. The tool aims to be effective and easy to use in terms of data and hardware availability. The usage of the tool is demonstrated in a number of case studies included in this work.

# **Obsah**

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Súčasný stav problematiky modelovania solárnej radiácie</b>	<b>1</b>
<b>3</b>	<b>Ciele dizertačnej práce</b>	<b>2</b>
<b>4</b>	<b>Vývoj metódy a nástroja na modelovanie solárnej radiácie na mračne bodov</b>	<b>2</b>
4.1	Metódy . . . . .	3
4.1.1	Tvorba voxelového gridu z mračna bodov . . . . .	3
4.1.2	Osvetlenie voxelového gridu . . . . .	3
4.1.3	Modelovanie solárnej radiácie na osvetlenom voxelovom gride . . . . .	4
4.2	Implementácia . . . . .	7
4.2.1	Algoritmus výpočtu . . . . .	7
4.2.2	Vstupy a výstupy . . . . .	8
4.2.3	Veľkosť voxelu . . . . .	9
4.2.4	Voxelový grid a blokové spracovanie . . . . .	11
4.2.5	Výpočet normálových vektorov . . . . .	11
4.2.6	Osvetlenie a komponenty solárnej radiácie . . . . .	11
<b>5</b>	<b>Prípadové štúdie a porovnanie novovyvinutého nástroja s aktuálne používanými nástrojmi</b>	<b>14</b>
5.1	Modelovanie ročnej solárnej radiácie v zalesnenom horskom teréne . . . . .	14
5.2	Aplikácia nástroja v zastavanej oblasti s mestskou zeleňou . . . . .	17
5.3	Detailné modelovanie solárnej radiácie na budove . . . . .	17
5.4	Detailné modelovanie osvetlenia vegetácie . . . . .	20
5.5	Blokové spracovanie mračna bodov . . . . .	23
5.6	Porovnanie výkonu nástroja na rôznom hardvéri . . . . .	24
5.7	Porovnanie nástroja s existujúcimi riešeniami . . . . .	26
<b>6</b>	<b>Prínosy dizertačnej práce</b>	<b>28</b>
<b>7</b>	<b>Zhodnotenie výsledkov, diskusia a záver</b>	<b>28</b>
<b>Zoznam publikácií</b>		<b>30</b>
<b>Literatúra</b>		<b>32</b>

# 1 Úvod

Slnečné žiarenie je dôležitým zdrojom energie na Zemi. Modelovanie solárnej radiácie je podkladom na jeho využitie ako obnoviteľného zdroja elektrickej energie, tepla, ako vplyvu na poľnohospodársku výrobu a na lesné hospodárstvo, alebo na reguláciu viacerých negatívnych dopadov klimatických problémov akými sú vysychanie vodných zdrojov, lesov, zosuvy lavín, prehrievanie miest a mnohé ďalšie. Za týmto účelom vznikajú matematicko-fyzikálne modely solárnej radiácie a metódy jej modelovania závislé od dostupných dát.

V rámci autoreferátu dizertačnej práce je zhrnutý súčasný stav problematiky modelovania solárnej radiácie (časť 2), definované ciele práce (časť 3) popísaný vývoj metódy a nástroja na modelovanie solárnej radiácie na mračne bodov (časť 4) a demonštrované použitie nástroja v prípadových štúdiách (časť 5). Porovnanie nástroja s existujúcimi riešeniami sa nachádza v časti 5.7.

## 2 Súčasný stav problematiky modelovania solárnej radiácie

Modelovanie solárnej radiácie na zemskom povrchu pozostáva z modelov solárnej radiácie za predpokladu jasnej oblohy, ktoré kombinuje s modelmi oblačnosti prevažne vychádzajúcimi z dát meteorologických družíc a satelitných snímok [1]. Modely jasnej oblohy z praktického hľadiska reprezentujú hornú hranicu povrchovej radiácie. Slnečné žiarenie je pozdĺž svojej dráhy k povrchu Zeme oslabované. Množstvo dostupnej energie na povrchu Zeme je ovplyvnené mnohými faktormi, z ktorých väčšina je variabilná v čase. Podľa Garga a Dattu [2] ide najmä o:

- vzdialenosť Zeme od Slnka,
- sklon zemskej osi voči jej obežnej dráhe,
- polohu a orientáciu pozorovanej plochy na Zemi,
- absorpciu a rozptyl žiarenia v atmosfére.

Tieto faktory sú zahrnuté v matematicko-fyzikálnych modeloch solárnej radiácie.

Modely solárnej radiácie môžeme vo všeobecnosti rozdeliť na empirické a fyzikálne [3]. Empirické modely využívajú parametrizáciu utlmujúcich vplyvov atmosféry a vyjadrujú ich pomocou analytických vzťahov. Tie uvažujú niektoré vybrané parametre atmosféry ako vstupy [1]. Príkladom takýchto modelov je model ESRA (European Solar Radiation Atlas) alebo model REST2 [4]. Model ESRA je využívaný pri Heliosat metóde určovania solárnej radiácie z geostacionárnych meteorologických družíc [5]. REST2 modeluje solárnu radiáciu v dvoch pásmach, ktoré sú rozdelené vlnovou dĺžkou  $0,7 \mu\text{m}$  a pre každé pásmo modeluje relevantné vplyvy atmosféry zvlášť [1]. Bol vytvorený s cieľom dosiahnutia presnosti fyzikálnych modelov, avšak vyžaduje mnoho atmosferických vstupov [4], ktoré nie sú vždy jednoducho dostupné.

Fyzikálne modely simulujú priepustnosť jednotlivých vrstiev atmosféry pomocou modelov radiačného prenosu elektromagnetického žiarenia. Vplyv atmosféry modelujú presnejšie, avšak vyžadujú viac vstupných dát a sú výpočtovo náročnejšie [1]. Patria medzi ne napríklad modely McClear [6] alebo SOLIS [7]. Niektoré modely (napr. McClear) využívajú hybridný prístup a kombinujú empirický prístup s fyzikálnym. Model radiačného prenosu je počítaný pre limitovaný počet atmosferických podmienok a výsledná solárna radiácia je určená pomocou interpolácie z týchto hodnôt [1]. V niektorých zdrojoch literatúry sa tieto modely označujú aj ako semiempirické [8].

V prácach venujúcich sa porovaniu modelov jasnej oblohy sa najčastejšie spomínajú modely REST2, SOLIS (predovšetkým jeho modifikovaná verzia podľa [9]), model McClear a model ESRA. Tieto modely najčastejšie dosahovali najvyššiu presnosť v porovnaní s meranými dátami [1], [10], [3], [11].

V súčasnosti je modelovanie solárnej radiácie pretavované do podoby analytických softvérov, ktorých cieľom je praktické využitie matematicko-fyzikálnych modelov žiarenia a metód modelovania solárnej radiácie na rýchle a presné určovanie solárneho potenciálu.

Aktuálne riešenia predstavujú interaktívne solárne mapy a databázy (napr. Global Solar Atlas<sup>1</sup>, PVGIS<sup>2</sup>, SODA<sup>3</sup>) alebo analytické nástroje v GIS (r.sun, Area Solar Radiation), ktoré sa využívajú na analýzu potenciálneho solárneho žiarenia v záujmových lokalitách, monitorovanie množstva dopadnutého žiarenia [12], alebo na jeho predikciu [13]. Tieto riešenia sa zameriavajú na modelovanie žiarenia na rozsiahlych oblastiach a s nižším detailom, pričom prevažne modelujú žiarenie na plochách reprezentovaných digitálnymi výškovými modelmi (DEM, z angl. digital elevation model).

Podrobnejšiemu modelovaniu v 3D sú venované práce zamerané na mestské oblasti [14], [15], [16], [17], ktoré dopadovú plochu žiarenia reprezentujú polygónovými sieťovými modelmi. Praktický problém v týchto metódach predstavuje vegetácia, ktorú je pomocou výškových alebo polygónových modelov obtiažne presne reprezentovať. Medzi voľne dostupný softvér zameraný na podrobné 3D modelovanie solárnej radiácie patrí napr. SORAM [17], SURFSUN3D [16] alebo Solar3D [18]. Z týchto nástrojov je aktuálne verejne publikovaný jedine nástroj Solar3D (<https://github.com/jian9695/Solar3D>), nástroj SURFSUN3D má neaktuálnu adresu a nástroj SORAM je poskytovaný iba na základe požiadavky na autorov. Žiadny z týchto nástrojov však nie je zameraný na modelovanie solárnej radiácie na vegetácií a väčšina z nich modeluje žiarenie iba v používateľom zadanom bode.

### 3 Ciele dizertačnej práce

Modelovanie zemského povrchu pomocou dát z laserového skenovania je dnes bežnou praxou. Produkty leteckého laserového skenovania aktuálne vykonávaného na území Slovenska sú už dostupné pre väčšinu územia prostredníctvom webového portálu ÚGKK SR a v blízkej dobe budú dostupné pre celé Slovensko. Pomocou terestrického laserového skenovanie (TLS) je možné detailne skenovať konkrétné objekty s vysokou presnosťou. Tieto dáta je možné využiť na modelovanie slnečného žiarenia v priestore a s oveľa vyššou podrobnosťou s akou ju bolo možné modelovať pomocou voľne dostupného softvéru doteraz.

Cieľom tejto dizertačnej práce je:

- vývoj metódy a nástroja na modelovanie solárnej radiácie na mračne bodov, ktorý bude jednoducho použiteľný, efektívny a umožní modelovať slnečné žiarenie aj na komplexných objektoch akými je vegetácia,
- implementácia vhodného modelu slnečného žiarenia z pohľadu dostupnosti dát,
- využitie aktuálne používaných formátov vstupných a výstupných dát a možnosť jednoduchej integrácie tohto nástroja do aktuálne používaných softvérov,
- sprístupnenie zdrojového kódu,
- porovnanie nástroja s aktuálnymi riešeniami na modelovanie solárnej radiácie.

### 4 Vývoj metódy a nástroja na modelovanie solárnej radiácie na mračne bodov

V rámci tejto práce bola vyvinutá metóda a nástroj na modelovanie solárnej radiácie na mračne bodov (PCSRT, z angl. Point Cloud Solar Radiation Tool). PCSRT implementuje vyvinutú metódu modelovania osvetlenia a solárnej radiácie v priestore reprezentovanom voxelovým gridom. Zameriava sa na všeobecnú aplikáciu na objektoch skenovaných laserovým skenerom alebo inou metódou ktorej produktom je mračno bodov, pričom zohľadňuje potrebu modelovania slnečného žiarenia aj vo vysoko členitých územiach, akými sú územia porastené vegetáciou. PCSRT modeluje priamu a difúznu zložku solárnej radiácie, ako aj globálnu solárnu radiáciu, na ktorej výpočet využíva vzťahy modelu ESRA, ktorý používa

<sup>1</sup>Global Solar Atlas - <https://globalsolaratlas.info>

<sup>2</sup>PVGIS - [https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_tools/en/](https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/)

<sup>3</sup>SODA - <https://www.soda-pro.com/>

Linkeho súčiniteľ zákalu atmosféry na modelovanie jej utlmujúcich a rozptylujúcich vplyvov. Solárna radiácia spolu s množstvom osvetlenia za modelovaný časový úsek sú určované pre každý bod vstupného mračna.

## 4.1 Metódy

Metóda PCSRT vytvára na základe vstupného mračna bodov voxelový grid, pomocou ktorého modeluje osvetlenie priestoru v danom časovom momente. Pre každý voxel gridu je určená normálka k ploche dopadu žiarenia, ktorú reprezentuje regresná rovina tvorená bodmi mračna nachádzajúcimi sa v priestore voxelu alebo v jeho blízkom okolí. Na základe sférických horizontálnych súradníc Slnka vztiahnutých k ďažisku mračna bodov je určené osvetlenie voxelov a následne aplikovaný model ESRA, pomocou ktorého sú vypočítané jednotlivé zložky solárnej radiácie v danom časovom momente. Metódy implementované PCSRT sa zameriavajú na efektivitu výpočtu a zohľadňujú výpočtové možnosti bežne používaných strojov aj pri aplikácii na objemných mračnách bodov.

### 4.1.1 Tvorba voxelového gridu z mračna bodov

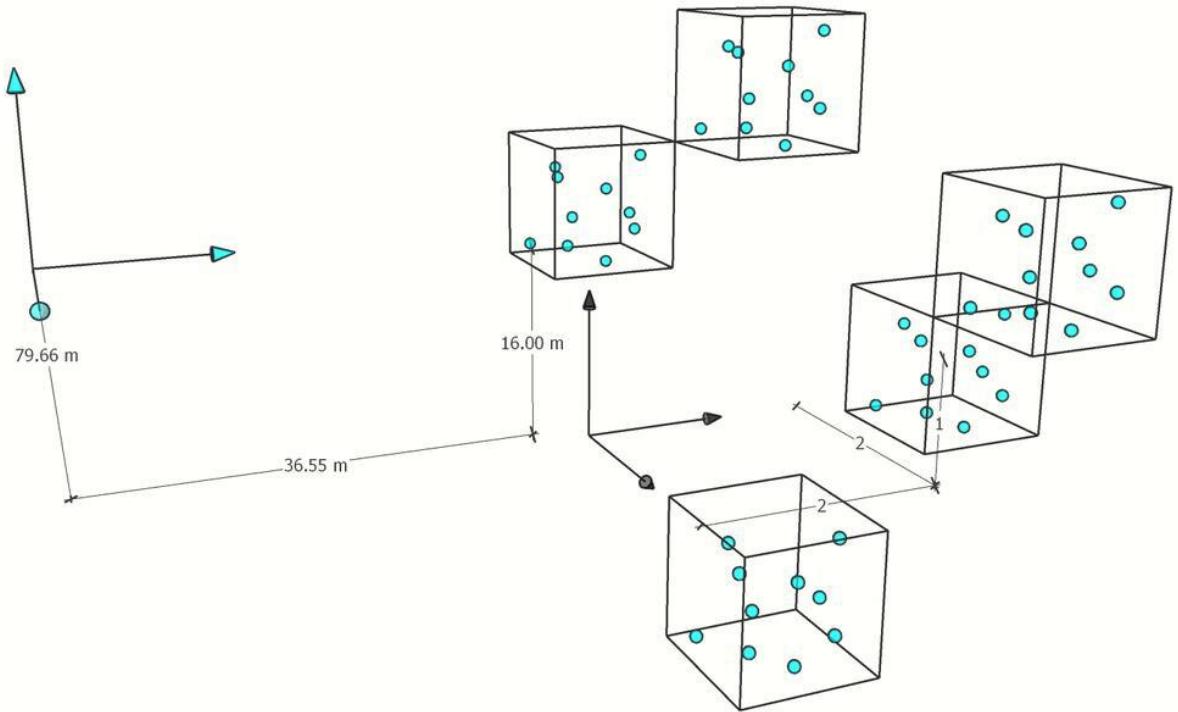
Priestorový model výpočtu predstavuje voxelový grid. Vytvorením voxelového gridu sa z mračna bodov stáva priestor, v ktorom objekty doposiaľ reprezentované bodmi nachádzajúcimi sa na ich povrchu reprezentujú volumetrické pixely - voxely, ktoré majú svoju veľkosť, tvar a objem. Grid vytvorený PCSRT pozostáva z kubických voxelov s jednotnou veľkosťou hrany. Metóda predpokladá pravouhlý horizontálny metrický súradnicový systém mračna bodov. Grid vzniká jeho konverziou do celočíselného horizontálneho súradnicového systému, kde jednotkou je veľkosť hrany voxelu (Obr. 1). Začiatok súradnicového systému gridu je posunutý tak, aby odsadenie voxelov (resp. bodov) bolo od neho minimálne. Voxel, ako základná jednotka gridu, pozostáva z jeho súradníck v gride a bodov mračna, ktoré do neho priestorovo spadajú.

### 4.1.2 Osvetlenie voxelového gridu

Výpočet osvetlenia voxelov gridu sa viaže na určitý časový moment, na základe ktorého je určená poloha Slnka v uhlových horizontálnych súradničiach - azimut Slnka a jeho výškový uhol. Tieto uhly tiež definujú smerový vektor dopadajúcich lúčov a sú určené vzhládom na ďažisko gridu (resp. vstupného mračna) s definovanou geografickou polohou na Zemi.

Definujme pravouhlý súradnicový systém, ktorého vertikálna os je rovnobežná so smerom dopadajúcich lúčov, a ktorý vznikne rotáciou súradnicového systému gridu o azimut a výškový uhol Slnka. V takomto súradnicovom systéme sa body prekrývajúce sa vo vertikálnom smere, resp. v smere dopadajúcich lúčov, premietnu do spoločných priemetov v ktorejkoľvek rovine kolmej na tento smer (Obr. 2 a 3).

Metóda výpočtu osvetlenia voxelov je postavená na tomto princípe. Voxely však predstavujú telesá, ktoré si pri všeobecnom smere osvetlenia tienia aj čiastočne. Vtedy sa ich stredy nepremietnu presne do tých istých bodov v takejto rovine a teda je potrebné stanoviť mieru prekrytu. Za vzájomne tieniaci si voxel môžeme považovať tie, ktorých priemety sú od seba vzdialené o maximálne polovicu veľkosti hrany voxelu. Takéto zjednodušenie môžeme vykonať z dôvodu, že pri modelovaní solárnej radiácie je primárne podstatná plocha dopadu slnečných lúčov. Tá je reprezentovaná regresnými rovinami vypočítanými z bodov voxelu a z bodov v jeho okolí. Metóda ich určenia je bližšie popísaná v častiach 4.1.3 a 4.2.6. Presný výpočet pomeru zatienenej a osvetlenej plochy regresnej roviny by bol kontraproduktívny, nakoľko samotný voxel predstavuje základnú jednotku priestorového modelu a už voľbou veľkosti jeho hrany môžeme ovplyvňovať presnosť výpočtu. Voxelu bude teda na základe tejto podmienky priradený stav osvetlený alebo zatienený. Určenie stavu voxelu realizujeme zavedením rozdelenia premietacej roviny do štvorcovej mriežky s polovičnou veľkosťou strany



**Obr. 1:** Konverzia súradnicového systému mračna (tyrkysová) bodov do systému voxelového gridu (čierna). Bezrozmerné celočíselné hodnoty predstavujú súradnice príkladného voxela v súradnicovom systéme gridu. Hodnoty v metroch sú súradnice bodu nachádzajúceho sa vo voxelu v horizontálnom metrickom súradnicovom systéme mračna.

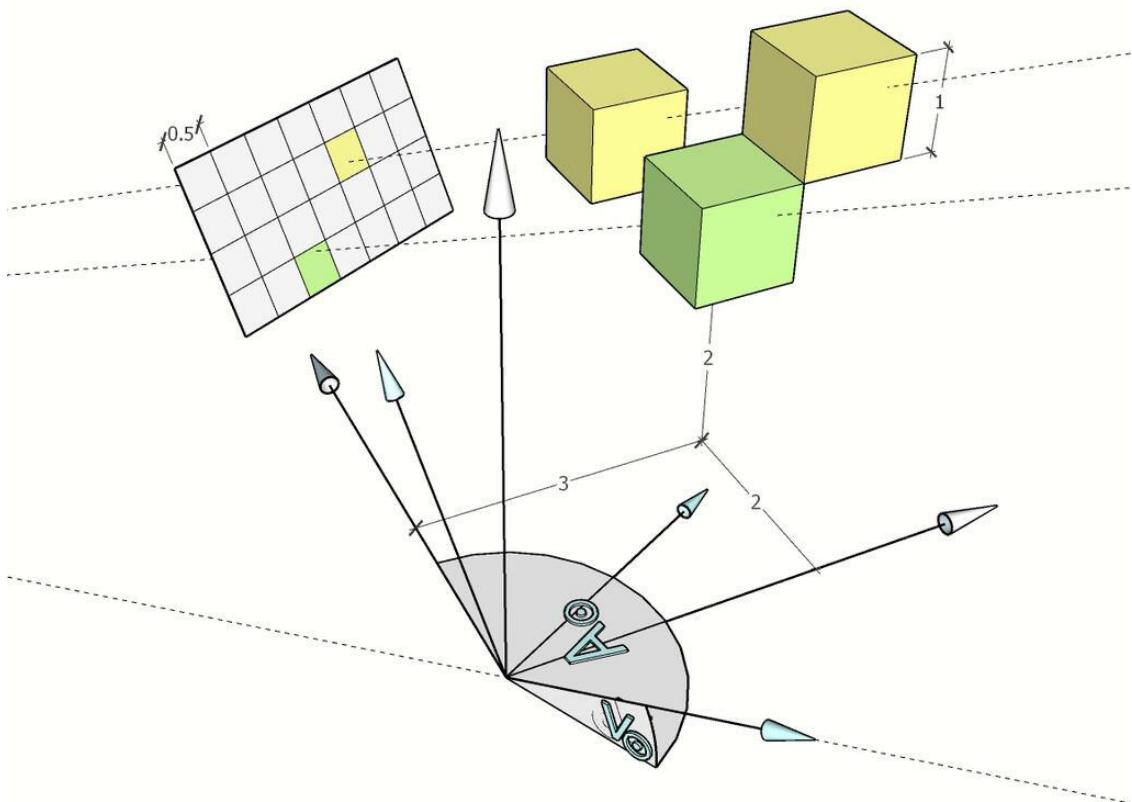
štvorcov ako je veľkosť hrany voxelov (Obr. 3). Body spadajúce do spoločných štvorcov sú považované za vzájomne si tieniace.

#### 4.1.3 Modelovanie solárnej radiácie na osvetlenom voxelovom gride

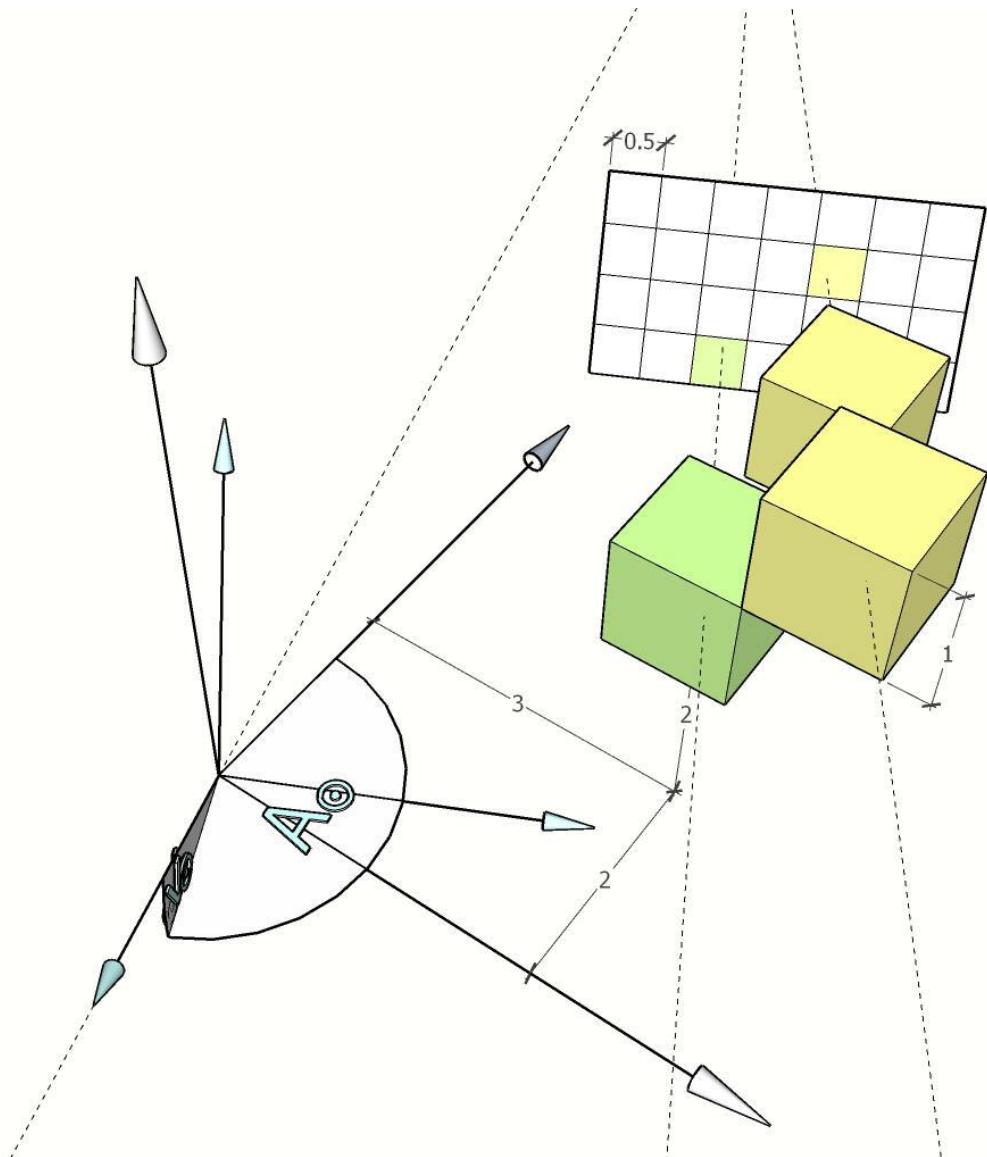
Pri známom osvetlení voxelového gridu v určitom časovom momente PCSRT modeluje solárnu radiáciu pomocou vzťahov modelu ESRA. Pri týchto vzťahoch je potrebné poznať parametre roviny, na ktorú žiarenie dopadá. Plochy dopadu pri voxelovej metóde PCSRT nahrádzajú regresné roviny, vypočítané na základe pôvodných bodov mračna obsiahnutých vo voxeloch alebo vo voxeloch v ich blízkom okolí (Obr. 4). Na určenie sklonu a incidenčného uhla postačuje normálový vektor k tejto rovine.

Pri známom osvetlení priestoru a normálových vektoroch rovín dopadu je pre aplikáciu uvedených vzťahov ešte potrebné poznať polohu a nadmorskú výšku lokality, a tiež hodnotu Linkeho súčiniteľa zákalu atmosféry v danom čase. Poloha a nadmorská výška lokality sa vzťahuje k ľažisku vstupného mračna a spolu s Linkeho koeficientom sú vstupnými parametrami metódy výpočtu.

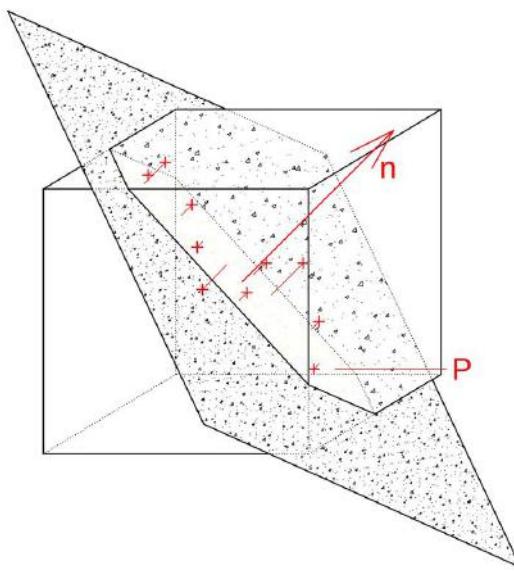
Pri aplikácii metódy na rozsiahle územie je dôležité brať do úvahy zmenu horizontálnych súradníc Slnka vzhľadom na polohu na Zemi. Výškový uhol Slnka je citlivejší na zmenu zemepisnej šírky a jeho azimut zase na zmenu zemepisnej dĺžky. Rozdiely okrem polohy na Zemi závisia aj od časti roka, resp. od sklonu ekliptiky voči rotačnej osi Zeme. Pri rozsiahlejších územiach sa prejavuje aj zakrivenie Zeme ktoré nie je zohľadnené horizontálnym súradnicovým systémom mračna (resp. voxelového gridu). Je teda potrebné vzhľadom na modelovanú lokalitu a územie zvážiť rozdelenie tohto územia na viacero častí a vzťažný bod výpočtu (ľažisko) definovať pre každú časť zvlášť.



**Obr. 2:** Určenie osvetlenia voxelov pre daný časový moment a polohu na Zemi - Pohľad A. Pôvodný súradnicový systém (biela) voxelového gridu s jednotkovou velkosťou hrany voxelu a súradnicový systém (tyrkysová) zrotovaný o azimut  $A_{\odot}$  a výškový uhol  $v_{\odot}$  Slnka. Číselné hodnoty odsadenia voxelu od začiatku predstavujú príklad súradníc voxelu v gride. Hodnota 0,5 strany štvorcovej mriežky reprezentuje dvojnásobnú hustotu dopadovej plochy modelovaného tieňa (resp. osvetlenia), ktorá je kolmá na smer dopadajúcich slnečných lúčov. Voxely s rovnakou farbou sú v zákryte v smere dopadajúcich lúčov a ich tieň je premietnutý na dopadovú plochu.



**Obr. 3:** Určenie osvetlenia voxelov pre daný časový moment  
a polohu na Zemi - Pohľad B



**Obr. 4:** Regresná rovina tvorená bodmi mračna vo voxel alebo jeho blízkom okolí reprezentujúca plochu dopadu slnečného žiarenia pre každý voxel ( $n$  - normálkový vektor,  $P$  - bod mračna)

## 4.2 Implementácia

PCSRT je implementovaný v jazyku Rust, ktorý sa vyznačuje efektivitou a bezpečnosťou pri práci s pamäťou počítača a viacvláknovými procesmi. Ide o relatívne mladý programovací jazyk, ktorý nevyužíva automatické uvoľňovanie použitej pamäte (angl. garbage collection) počas behu programu, ale namiesto toho vynucuje bezpečnú prácu s pamäťou už pri komplikácii (resp. písaní) zdrojového kódu. Z týchto dôvodov bol zvolený za implementačný nástroj metódy PCSRT.

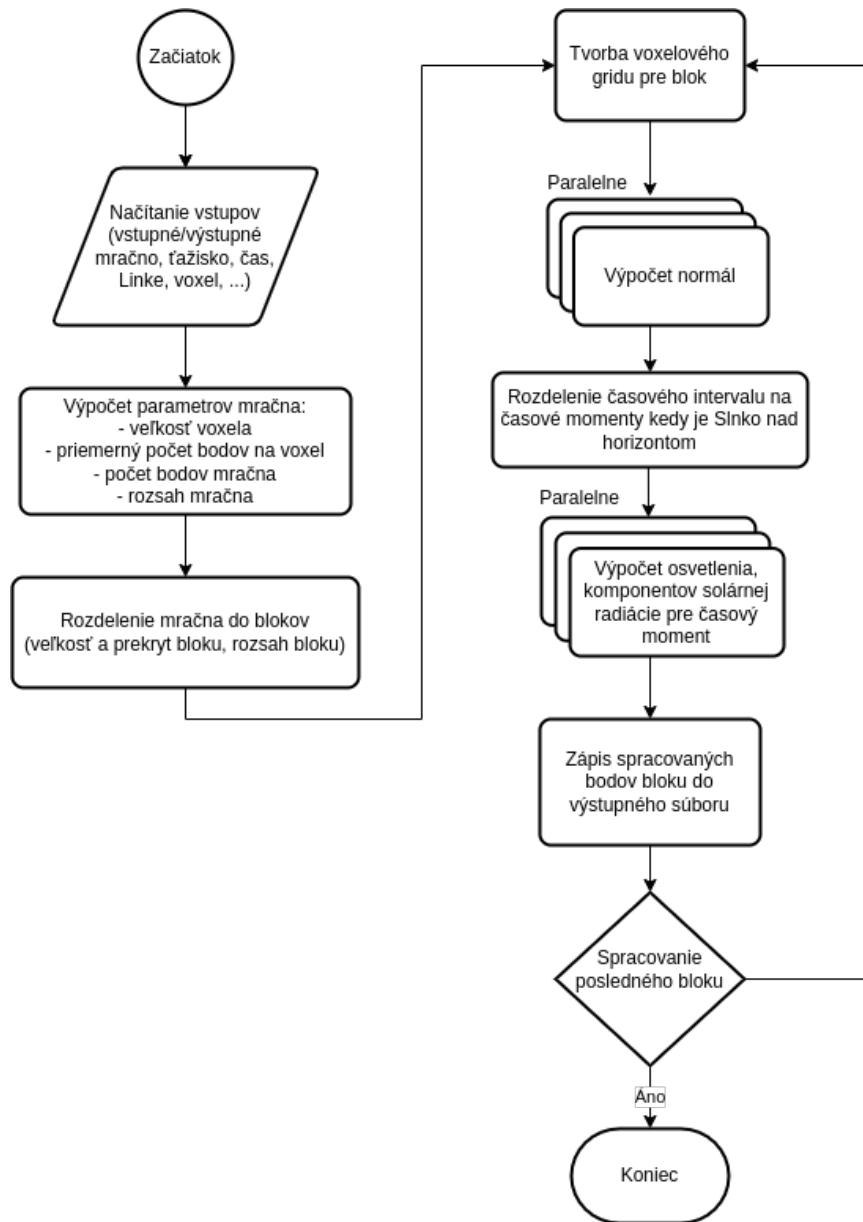
Nástroj PCSRT je možné spúšťať pomocou rozhrania príkazového riadka, ktoré umožňuje špecifikovať vstupné a výstupné parametre výpočtu a konkrétnie metódy výpočtu. Jednotlivé parametre výpočtu sú popísané v časti 4.2.2. Výpočet osvetlenia a solárnej radiácie prebieha paralelne. Mračno bodov je možné spracovať po blokoch za účelom zníženia nárokov na množstvo pamäte. Nástroj je možné skompilovať a spustiť na všetkých bežne používaných operačných systémoch (Linux, MacOS, Windows).

### 4.2.1 Algoritmus výpočtu

Schematický postup výpočtu zobrazený na Obr. 5 znázorňuje jednotlivé kroky implementovaného algoritmu. Čítanie vstupov je realizované rozhraním príkazového riadka. Vstupné parametre sú zadávané v textovej forme v rámci príkazu spustenia nástroja. Povinné a voliteľné parametre a ich význam sú popísané v časti 4.2.2.

Prvou fázou výpočtu je predspracovanie (angl. preprocessing), v rámci ktorého sú dopočítané niektoré parametre mračna a výpočtu (veľkosť voxela, priemerný počet bodov na voxel a ďal.), pokial neboli zadané pri vstupe. Už po tomto úkone je vstupné mračno rozdelené do blokov s definovanou veľkosťou a prekrytom z dôvodu obmedzenia využívania pamäte pri ďalších výpočtoch. Pri vynechaní vstupných parametrov pre výpočet v blokoch je celé mračno spracovávané naraz. Následne je daný blok pretvorený do voxelového gridu a v ňom sú pre každý voxel vypočítané normálkové vektory. Výpočet prebieha paralelne. V poslednom kroku prípravnej fázy je zadaný časový interval rozdelený po krodoch na časové momenty, v ktorých je počítaný výškový uhol a azimut Slnka a k nim prislúchajúce rotačné matice. Časové momenty, pri ktorých sa Slnko nenachádza nad horizontom, sú odfiltrované.

Výpočet osvetlenia a komponentov solárnej radiácie prebieha paralelne. Výpočtová náročnosť závisí od veľkosti voxelového gridu a množstva spracovávaných časových momentov. Popis implementácie metódy výpočtu osvetlenia a solárnej radiácie je popísaný v časti 4.2.6. Vypočítané hodnoty sú zapisované, resp. sčítavané za každý časový moment a pre každý



Obr. 5: Schematický postup výpočtu

voxel. Po spracovaní celého bloku sú do výstupného súboru zapísané body bloku, ktoré sa nenachádzajú v priestore prekrytu a nástroj pokračuje so spracovávaním nasledujúceho bloku. Výpočet je ukončený spracovaním všetkých blokov.

#### 4.2.2 Vstupy a výstupy

Zadávanie vstupov je realizované v štandardnej forme parametrov nástroja príkazového riadka. Základný príkaz má formu:

```

pcsrt [OPTIONS] --centroid <CENTROID> --time-range <TIME_RANGE>
--step-mins <STEP_MIN> --linke-turbidity-factor
<LINKE_TURBIDITY_FACTOR> <INPUT_FILE> <OUTPUT_FILE>

```

kde [OPTIONS] predstavuje možnosť zadať nepovinné parametre <INPUT\_FILE> a <OUTPUT\_FILE> sú cesty k vstupným a výstupným súborom. Parametre výpočtu (uvedené v Tab. 1) sú rozdelené na povinné a voliteľné. Povinné parametre zahŕňajú informácie o polohe ľažiska vstupného mračna, časových parametroch a hodnote Linkeho koeficientu. Je to minimálny počet parametrov potrebný na spustenie nástroja. Metódy výpočtu je možné modulovať voliteľnými parametrami.

**Tab. 1:** Parametre výpočtu PCSRT

Parameter	Typ/Formát	Povinný	Dodatočný popis formátu
-c, --centroid	desatinné čísla oddelené čiarkou	áno	Zemepisná šírka, dĺžka a nadmorská výška
-t, --time-range	dátumy a čas od/do oddelené čiarkou	áno	Textový retazec formátu RFC3339
-s, --step-mins	celé číslo	áno	V minútach
-l, --linke-turbidity-factor	desatinné číslo alebo 12 desatiných čísel oddelených čiarkou	áno	Fixná hodnota pre celý časový úsek alebo hodnoty pre každý mesiac
-h, --horizon	celé číslo a desatinné čísla oddelené čiarkou	nie	Uhlový krok a výšky horizontu v stupňoch (začiatok na sever)
-v, --voxel-size	desatinné číslo	nie	V metroch
-p, --average-points-in-voxel	desatinné číslo	nie	Predvolená hodnota je 4
-b, --block-process-params	dve celé čísla oddelené čiarkou	nie	Veľkosť blokov a ich prekryt v metrichoch
--output-ply-ascii	-	nie	Špecifikácia textového typu výstupného PLY súboru

Niektoré parametre je možné zadávať vo viacerých formátoch. Linkeho koeficient je možné zadať jedným číslom pre celý časový úsek modelovania alebo pre každý mesiac zvlášť. Veľkosť voxela je možné vynechať a zadať namiesto neho požadovaný priemerný počet bodov na voxel. Pokiaľ ani tento parameter nie je zadaný, PCSRT odhadne vhodnú veľkosť voxela pre priemerne štyri požadované body na voxel. Dôvodom je výpočet normálových vektorov vo voxeloch, v ktorom je potrebné skonštruovať regresnú rovinu z bodov. Na konštrukciu roviny postačujú tri body, avšak keďže ide o priemerný počet, podmienka štyroch bodov v priemere zvýší počet voxelov, v ktorých je možné vypočítať normály bez použitia bodov v ich okolí. Podrobne je metóda výpočtu normálových vektorov popísaná v časti 4.2.5.

Výška horizontu je zadávaná vo formáte veľkosti uhlového kroku začínajúceho od severu a z neho vyplývajúceho počtu výškových uhlov reprezentujúcich tienenie okolitého terénu. Na jej výpočet je možné použiť napríklad nástroj *r.horizon*<sup>4</sup> v GRASS GIS, ktorý je tiež integrovaný do softvéru QGIS. Tento parameter je možné zadať aj vo forme jednotnej výšky horizontu s nulovou veľkosťou kroku. Pri určovaní časových momentov, v ktorých je Slnko nad horizontom je použitá lineárna interpolácia výšky horizontu pre momentálny azimut Slnka.

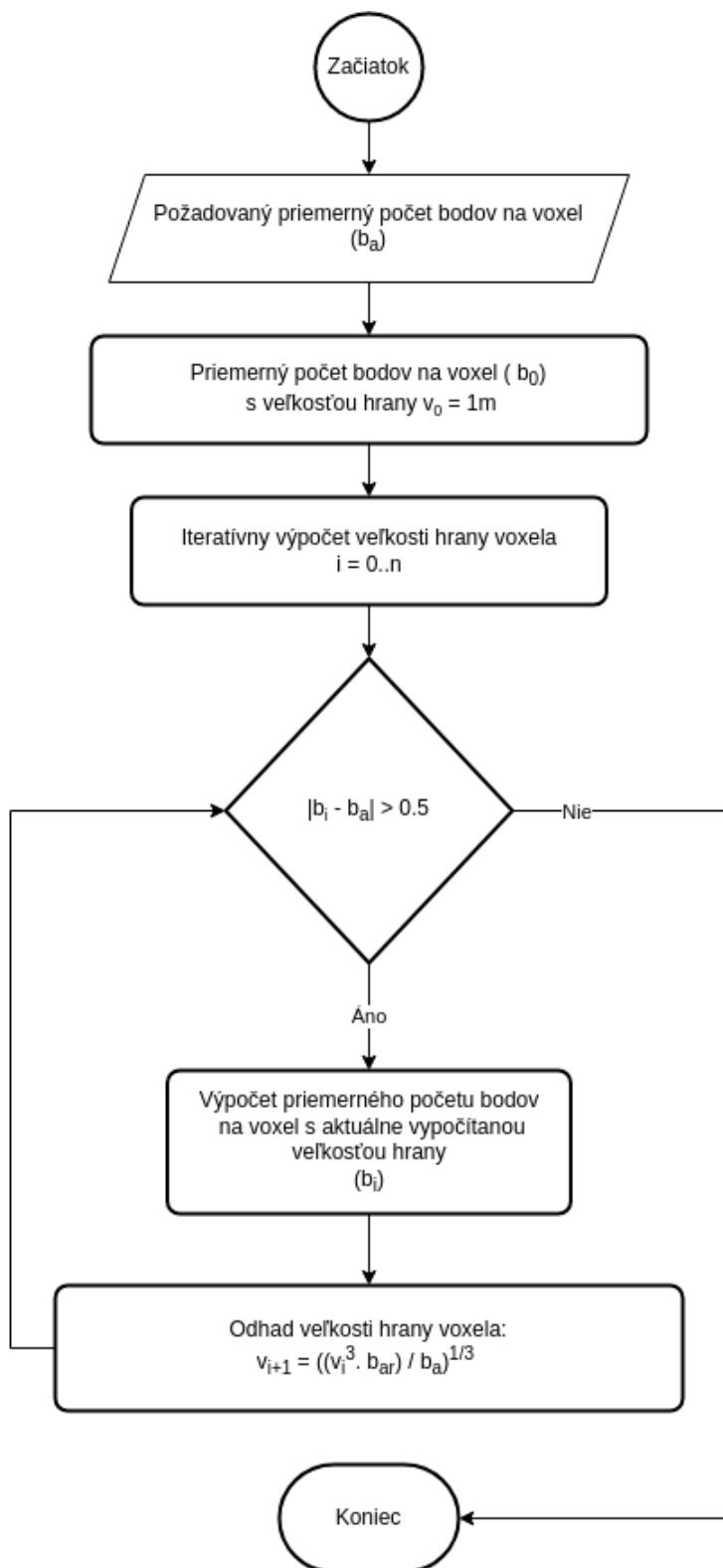
PCSRT umožňuje čítať vstupné mračno bodov vo formáte LAS alebo jeho komprimovanej verzii LAZ. Tieto formáty spolu s binárnym alebo textovým typom formátu PLY je možné použiť aj na zápis výstupného mračna. Typ formátu je definovaný príponou súboru. Formát PLY má rovnakú príponu pri oboch typoch. Na špecifikáciu textového typu je možné použiť voliteľný parameter `--output-ply-ascii`.

#### 4.2.3 Veľkosť voxela

Vhodnú veľkosť hrany voxela je niekedy obtiažne odhadnúť, pokiaľ nepoznáme priestorovú hustotu vstupného mračna. Z tohto dôvodu patrí medzi voliteľné parametre v rámci PCSRT. Vieme ju odhadnúť na základe používateľom zadefinovaného priemerného počtu bodov vo voxelmi. Metóda odhadu veľkosti voxela je schematicky znázornená na Obr. 6.

Výpočet vychádza z predpokladu, že objem voxela a počet bodov je lineárne závislý. Toto však neplatí pre nerovnomernú hustotu bodov vo voxeloch a preto je veľkosť hrany odhadovaná iteratívne na základe pomeru objemu voxela odhadovanej veľkosti a jemu prislúchajúcemu priemernému počtu bodov. V prvom kroku je odhadovaná veľkosť hrany jeden

<sup>4</sup><https://grass.osgeo.org/grass80/manuals/r.horizon.html>



**Obr. 6:** Schematický postup odhadu vhodnej veľkosti voxela z požadovaného priemerného počtu bodov na voxel

meter a podmienkou pre zastavenie iteratívneho výpočtu je rozdiel v priemerných počtoch bodov o maximálne 0,5 boda.

Aplikácia tejto metódy predlžuje fázu preprocesingu, no pri opakovanej výpočtoch je už so známou vhodnotou veľkosťou hrany možné zadať príslušný voliteľný vstupný parameter. Odhadovanú veľkosť je tiež možné na základe vlastného odhadu upraviť.

#### 4.2.4 Voxelový grid a blokové spracovanie

Spracovanie jednotlivých blokov mračna prebieha sekvenčne a je aplikované iba po zadaní veľkosti bloku a veľkosti prekrytov blokov. Prekryty rozširujú spracované územie o definovanú vzdialenosť, aby nevznikal efekt hranice dát na hranici každého bloku. Prekryt je možné zadať v metroch. Na základe neho je vypočítaný priestorový rozsah jednotlivých blokov s uvážením ich prekrytov a tiež bez prekrytov. Tie sú aplikované ako filtre pri čítaní mračna bodov zo vstupného súboru a pri zápisе bodov do výstupného súboru. Pre každý blok je vytvorený voxelový grid z bodov nachádzajúcich sa v bloku s uvážením prekrytu a po výpočte osvetlenia a solárnej radiácie sú tieto body filtrované na základe priestorového rozhrania bloku bez prekrytu. Mračno bodov je čítané zo súboru pri tvorbe každého gridu bloku, aby nemuselo byť uložené v pamäti počas celého výpočtu.

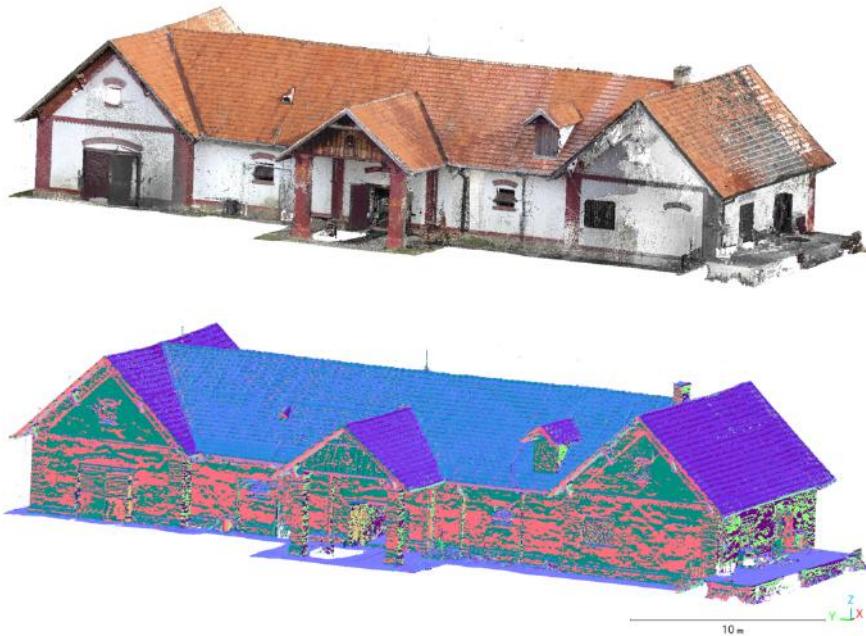
Voxelový grid je implementovaný v podobe hašovacej mapy (z angl. hash map), ktorej kľúčom sú súradnice voxela a hodnotou samotné voxely. Štruktúra voxelu obsahuje body, normálový vektor a hodnoty solárnej radiácie a osvetlenia. Grid reprezentovaný hašovacou mapou umožňuje jednoduché prístupovanie k okoliu voxelov, ich zorad'ovanie a iteračné spracovanie. Jednoduchý prístup ku konkrétnym voxelom na základe ich súradníc je obvykľať užitočný pri výpočte normálových vektorov, kedy je potrebné prehľadávať okolie voxela, ale využíva sa aj na vyhodnocovanie osvetlenia resp. zatienenia voxelov pri výpočte solárnej radiácie.

#### 4.2.5 Výpočet normálových vektorov

Výpočet normálových vektorov prebieha paralelne. Na poradí spracovávaných voxelov nezáleží. Normálové vektory sú vypočítané k regresnej rovine tvorenej bodmi príslušného voxelu alebo tiež voxelov v jeho blízkom okolí. Normálový vektor je počítaný z minimálne takého počtu bodov, akým je požadovaný priemerný počet bodov, nie však menšieho ako je predvolený počet (4). Pokiaľ daný voxel neobsahuje minimálny počet bodov, vstúpia do výpočtu body z celej prvej okolitej vrstvy voxelov. Pri nepostačujúcom počte sú body vyhľadávané do maximálne piatich okolitých vrstiev a pokiaľ ani s ich uvážením nie je splnená podmienka minimálneho počtu bodov na výpočet normály, voxelu je priradený jednotkový normálový vektor smerujúci k zenithu. Každý normálový vektor je otočený smerom k zenithu, napokolko z nespojítých bodov mračna nie je možné presne určiť vonkajšiu stranu plochy, ktorú reprezentujú. Príklad vizualizácie normálových vektorov na budove prevodom do RGB škály je na Obr. 7. Dve farby na horizontálnych stenách predstavujú vektory s opačným smerom.

#### 4.2.6 Osvetlenie a komponenty solárnej radiácie

Výpočet osvetlenia je realizovaný metódou popísanou v časti 4.1.3 a schematicky znázornený na Obr. 8. Zadaný časový interval je rozdelený po časových krokoch na časové momenty, ktorým je určená dĺžka trvania. Pokiaľ je zadaný začiatok modelovania pred východom Slnka, začiatok je posunutý k najblížšiemu východu (berie sa do úvahy polárna noc). Výpočet je ohrianičený konečným časom a v rámci dňa, ktorý celý spadá do výpočtového času, aj západom Slnka. Pokiaľ je nasledujúci časový moment (posunutý o časový krok) po západe Slnka alebo po konečnej časovej hranici výpočtu, časovému momentu je priradená dĺžka trvania rovná zlomku časového kroku ostávajúceho do západu (resp. konca výpočtu). Jeden časový moment je definovaný štruktúrou obsahujúcou čas, dĺžku trvania, azimut a zenitový uhol Slnka a príslušné rotačné matice. Jednotlivé časové momenty sú spracovávané paralelne.

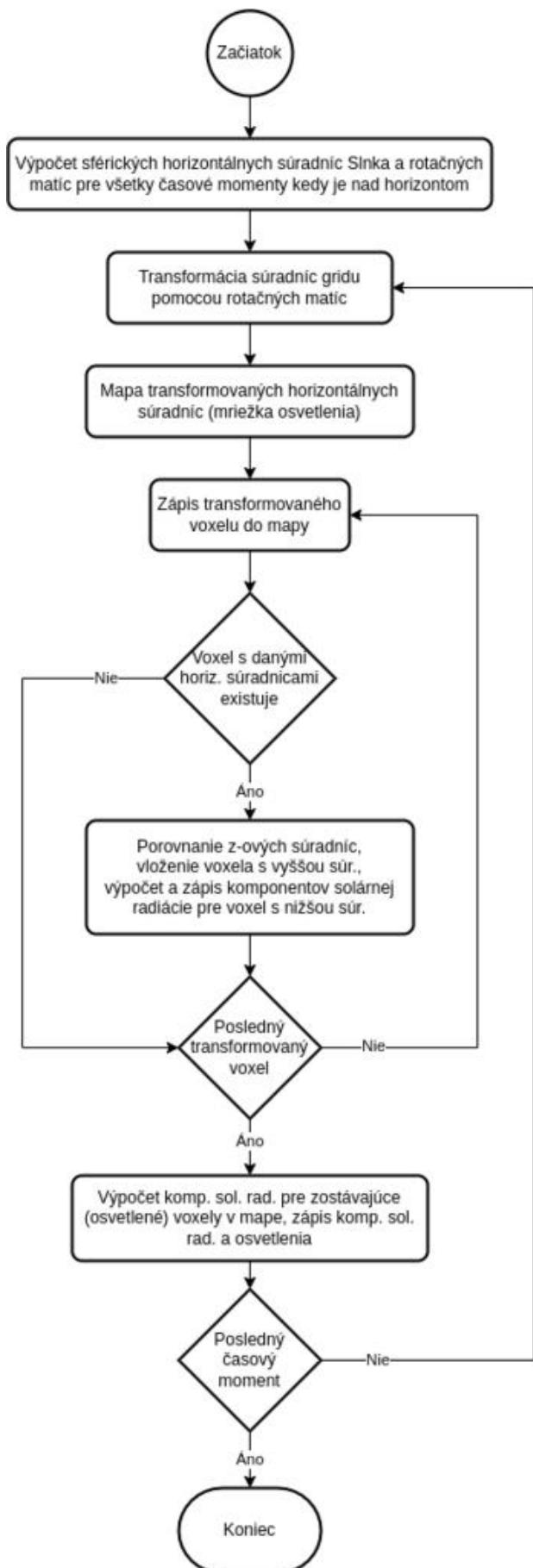


**Obr. 7:** Vizualizácia normálových vektorov voxelov. Zber dát v rámci diplomovej práce [19].

V časových momentoch je modelované osvetlenie a komponenty solárnej radiácie pre každý voxel. Tie sú kumulatívne pričítavané jednotlivým voxel počas všetkých časových momentov a so zohľadnením dĺžky ich trvania.

V prvom kroku je súradnicový systém gridu zrotovaný okolo osi  $V$  o výškový uhol Slnka a okolo osi  $Z$  o azimut Slnka použitím rotačných matíc časového momentu. Transformované horizontálne súradnice sú zaokrúhlené na polovičnú veľkosť voxela. Následne je na vyhodnocovanie osvetlenia voxelov použitá štruktúra hašovacej mapy, ktorá reprezentuje mriežku dopadu tieňu zobrazenú na Obr. 2 a Obr. 3. Do mapy je pristupované pomocou klíča tvoreného z horizontálnych súradníc zrotovaných voxelov a zapisované sú do nej klíča voxelového gridu referencujúce originálne nezrotované voxely. Existujúci zápis v mape po prístupe s rovnakým klíčom nasledujúceho zrotovaného voxelu je voči nemu porovnávaný na základe výškových súradníc. Tie reprezentujú vzdialenosť od Slnka. Voxel s nižšou hodnotou výškovej súradnice je vyhodnotený ako zatienený a v mape ostáva voxel s vyššou výškovou súradnicou. Pre zatienený voxel sú vypočítané komponenty solárnej radiácie a tie sú pričítané originálnemu voxelu gridu. Po spracovaní všetkých zrotovaných voxelov ostávajú v mape len osvetlené voxel, pre ktoré sú obdobne určené a pričítané hodnoty komponentov solárnej radiácie a tiež je im pričítaná hodnota osvetlenia.

Pri paralelnom spracovaní jednotlivých časových momentov dochádza k zápisu hodnôt komponentov solárnej radiácie a osvetlenia do tej istej dátovej štruktúry v pamäti. Prirodzene preto vznikajú situácie, v ktorých viaceré vlákna procesu potrebujú pričítať hodnoty tomu istému voxelu naraz. Avšak vzhľadom na to, že pre každý časový moment sa uhly dopadu žiarenia líšia, hodnoty sú zapisované ihneď po vyhodnotení zatienených voxelov a zároveň voxel vyhodnotené ako osvetlené sa tiež čiastočne v každom momente líšia, v praxi k vzájomnému blokovaniu jednotlivých vlákin procesu pri zápisе hodnôt dochádza minimálne. Výpočet osvetlenia solárnej radiácie je ukončený spracovaním posledného časového momentu.



Obr. 8: Schematický postup výpočtu osvetlenia a komponentov solárnej radiácie

## 5 Prípadové štúdie a porovnanie novovyvinutého nástroja s aktuálne používanými nástrojmi

Praktické použitie nástroja je demonštrované na viacerých prípadových štúdiách, ktoré sa venujú aplikácii vyvinutej metódy na rôznych typoch mračien bodov a lokalít. Nástroj PCSRT je aplikovaný na mračnách bodov zo zalesnených lokalít, zastavaných oblastí s mestskou zeleňou, detailne skenovanej budove či samostatne stojacich stromoch. Osvetlenie je vizualizované v konkrétnych hodinách počas dňa a tiež s rôznym časovým krokom. Aplikáciu blokového spracovania mračna sa venuje prípadová štúdia z rovinatého husto zalesneného územia. Aplikácia nástroja na rôznych typoch mračien bodov v rôznych lokalitách je porovnaná z hľadiska výkonu na viacerých procesoroch.

Výpočty realizované v rámci prípadových štúdií sú vykonávané primárne na počítači s 16-jadrovým procesorom AMD Ryzen 9 5950X s 48 GB pamäte a 1 TB SSD diskom s maximálnou rýchlosťou čítania a zápisu 3000 MB/s. Výkonnejší počítač je zvolený kvôli rýchlosťi výpočtov. Na porovnanie výkonu nástroja sú použité aj menej výkonné počítače.

Vizualizácia modelovaných hodnôt je realizovaná v softvéri CloudCompare, ktorý je tiež vhodným nástrojom na prípravu dát aj následné spracovanie pre ďalšie aplikácie. Vizualizácie obsahujú znázornenie smerov súradnicových osí, pričom na všetkých zobrazeniach reprezentuje os  $X$  východ, os  $Y$  sever a os  $Z$  zenitový smer.

### 5.1 Modelovanie ročnej solárnej radiácie v zalesnenom horskom teréne

Modelovanie slnečného žiarenia v zalesnenom teréne je jedným z hlavných dôvodov vývoja metódy a nástroja PCSRT, nakoľko aktuálne existujúce nástroje nie sú vhodné na takúto aplikáciu.

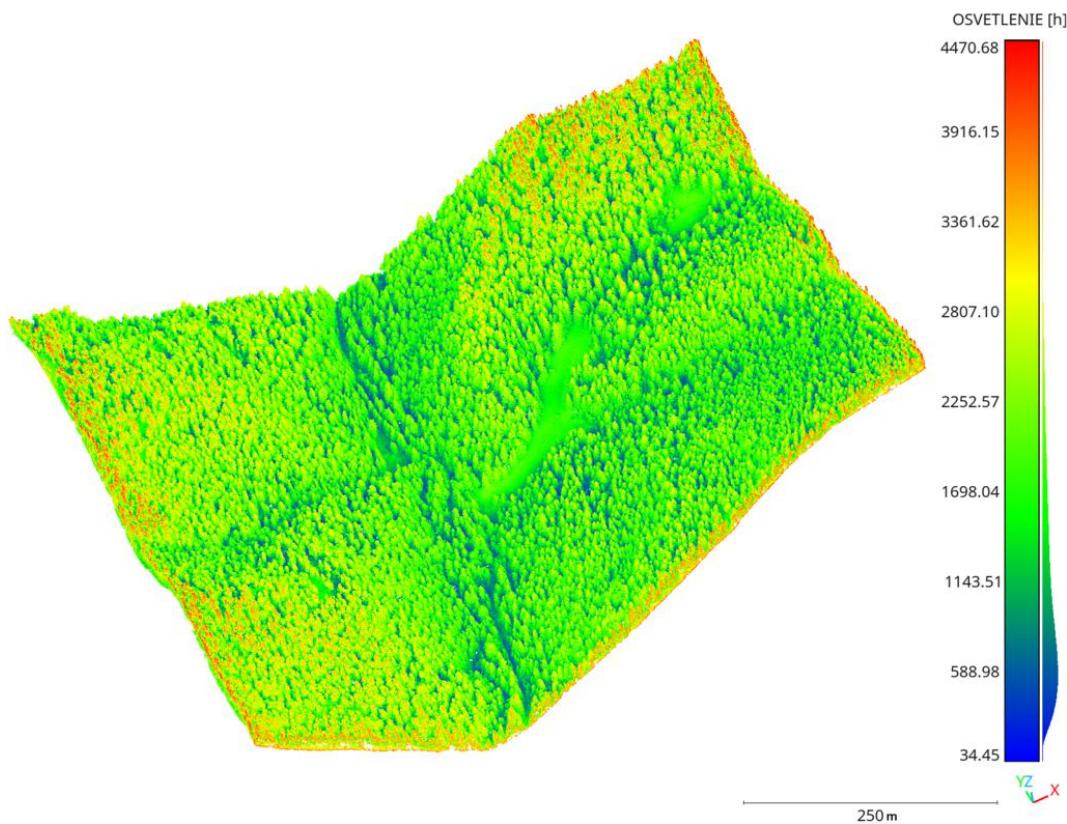
Na demonštráciu takéhoto použitia nástroja je vybraná oblasť Suchej doliny blízko obce Kvačany v okrese Liptovský Mikuláš. Mračno bodov reprezentuje časť doliny obsahujúcu rôzne sklonený terén, ktorý je husto porastený smrekovým lesom. Dolina je orientovaná približne v smere sever-juh a nachádzajú sa v nej aj trávnaté lesom nezarastené úseky. Mračno bodov pochádza z leteckého laserového skenovania (LLS) a je poskytované Úradom geodézie kartografie a katastra Slovenskej republiky (ÚGKK SR).

Solárna radiácia je na tomto mračne modelovaná za obdobie jedného roka (2022) s hodinovým časovým krokom a s vypočítanou vhodnou veľkosťou voxela 0,7 m pre 4 priemerné body na voxel. Hodnoty Linkeho súčiniteľa zákalu atmosféry sú zadávané pre každý mesiac a sú prebrané z databázy SODA<sup>5</sup>. Nadobúdajú hodnoty 2,2; 2,5; 3,0; 3,1; 2,9; 2,9; 3,0; 2,8; 2,6; 2,5; 2,4; 2,2 od januára po december. Výpočet prebehol naraz na celom mračne s 28 231 107 bodmi a trval 25 minút a 54 sekúnd aj so zápisom výstupného mračna. Vizualizácia hodnôt osvetlenia a solárnej radiácie je na Obr. 9, 10, 11 a 12.

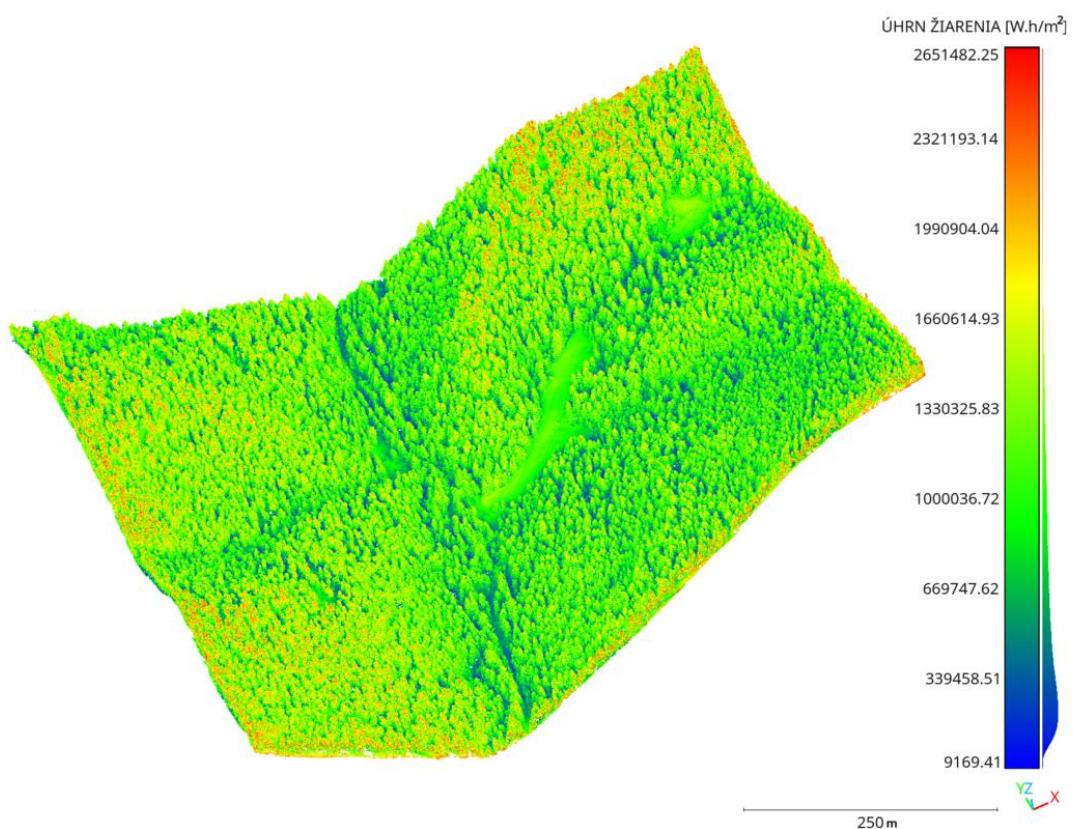
Množstvo modelovanej globálnej solárnej radiácie v tejto oblasti za jeden rok sa pohybuje približne od 2,5 kW.h/m<sup>2</sup> po 3 MW.h/m<sup>2</sup>, pričom z histogramu na pravej strane škály vyplýva, že prevažné množstvo voxelov sa v rámci tejto škály nachádza skôr v časti s nižšími (< 1 MW.h/m<sup>2</sup>) hodnotami (Obr. 12). Na vizualizovanom mračne však vidieť prevažne zeleno až žlto sfarbené body, ktoré reprezentujú hodnoty približne od 1 MW.h/m<sup>2</sup> do 2 MW.h/m<sup>2</sup>. Na mračne tiež vidieť červené body nachádzajúce sa na vrcholoch stromov na juhovýchodných a juhozápadných svahoch, ako aj na hranici dát prevažne z južnej strany. Tie reprezentujú vysoké množstvo solárnej radiácie (> 2,5 MW.h/m<sup>2</sup>). Lesný porast vizuálne pôsobí byť viac osvetlený ako v skutočnosti je, pretože je zobrazený z južnej strany. Množstvo menej ožiarenených bodov sa nachádza aj vo vnútri porastu.

Priamy komponent solárnej radiácie (Obr. 10) je vizuálne a aj rozložením hodnôt veľmi podobný s osvetlením (Obr. 9), keďže tieto hodnoty sú počítané iba pre osvetlené plochy. Rozdiely sú napríklad na lúke uprostred mračna, na ktorej sa v jej niektorých častiach

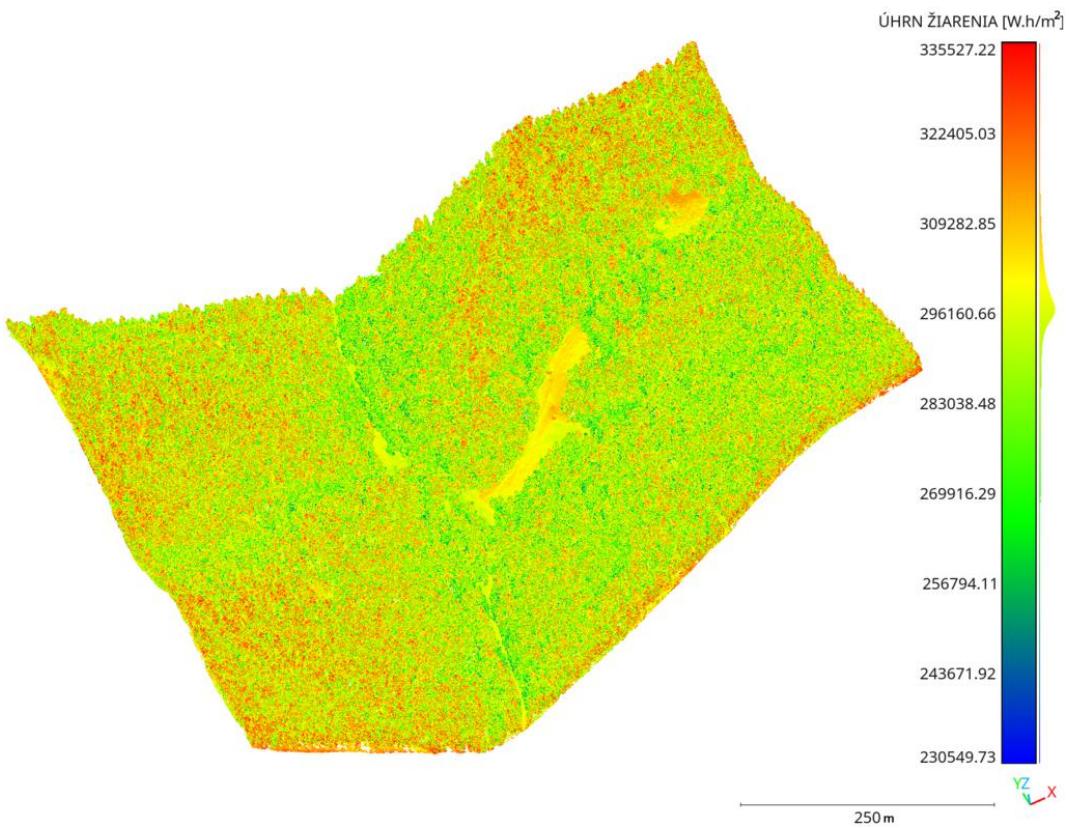
<sup>5</sup><https://www.soda-pro.com/help/general-knowledge/linke-turbidity-factor>



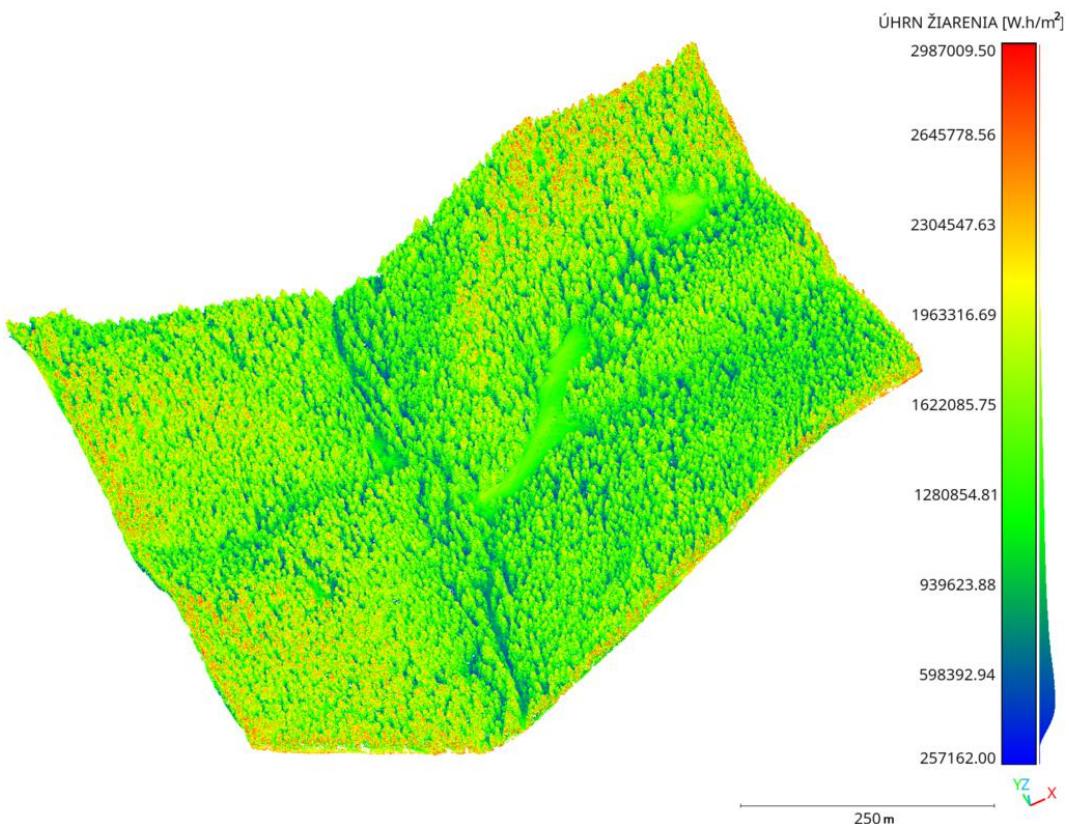
**Obr. 9:** Suchá dolina - ročné osvetlenie 2022. Zdroj produktov LLS: ÚGKK SR.



**Obr. 10:** Suchá dolina - úhrn priameho slnečného žiarenia za rok 2022. Zdroj produktov LLS: ÚGKK SR.



**Obr. 11:** Suchá dolina - úhrn difúzneho slnečného žiarenia za rok 2022. Zdroj produktov LLS: ÚGKK SR.



**Obr. 12:** Suchá dolina - úhrn globálnej solárnej radiácie za rok 2022. Zdroj produktov LLS: ÚGKK SR.

prejavuje orientácia plochy bližšia ku kolmému smeru dopadajúcich lúčov počas roka. Tieto oblasti vystupujú pri priamej radiácii viac do žlta ako pri obyčajnom osvetlení.

Hodnoty úhrnu difúzneho komponentu žiarenia (Obr. 11) sú výrazne nižšie, no prevaha bodov sa v rámci škály difúzneho žiarenia nachádza skôr vo vyšších hodnotách, nakoľko difúzna solárna radiácia je modelovaná aj v bodoch, ktoré sú v tieni. Reflektuje tiež orientáciu jednotlivých svahov, resp. prevažne osvetlené plochy a tiež hladké, relatívne horizontálne plochy pozdĺž dna údolia alebo na lúkach, ktoré spadajú do oblastí s vyššími hodnotami difúzneho žiarenia.

Solárna radiácia vypočítaná v lesných porastoch sa dá využiť ako jeden z podkladov na modelovanie poškodenia lesov, predovšetkým ihličnatých. Jej 3D modelovanie umožňuje aj modelovanie slnečného žiarenia na vertikálnych porastových stenách, čo je veľmi dôležité pri plánovaní ochrany lesných porastov.

## 5.2 Aplikácia nástroja v zastavanej oblasti s mestskou zeleňou

Mestské prostredie obsahuje okrem stavieb, ktoré pozostávajú z prevažne veľkých rovinatých plôch, aj mestskú zeleň, ktorú je snaha využiť práve na tienenie a regulovanie klímy v zastavaných oblastiach. Tým, že metóda PCSRT nevyužíva konkrétny typ modelu mesta, ale mračno bodov, je aplikovateľná prakticky na akýkoľvek priestor. Ako príklad modelovania solárnej radiácie na budovách postavených na členitom teréne s množstvom mestskej zeleni je použité mračno bodov (Zdroj: ÚGKK SR) z oblasti bratislavského hradného kopca (Obr. 13).

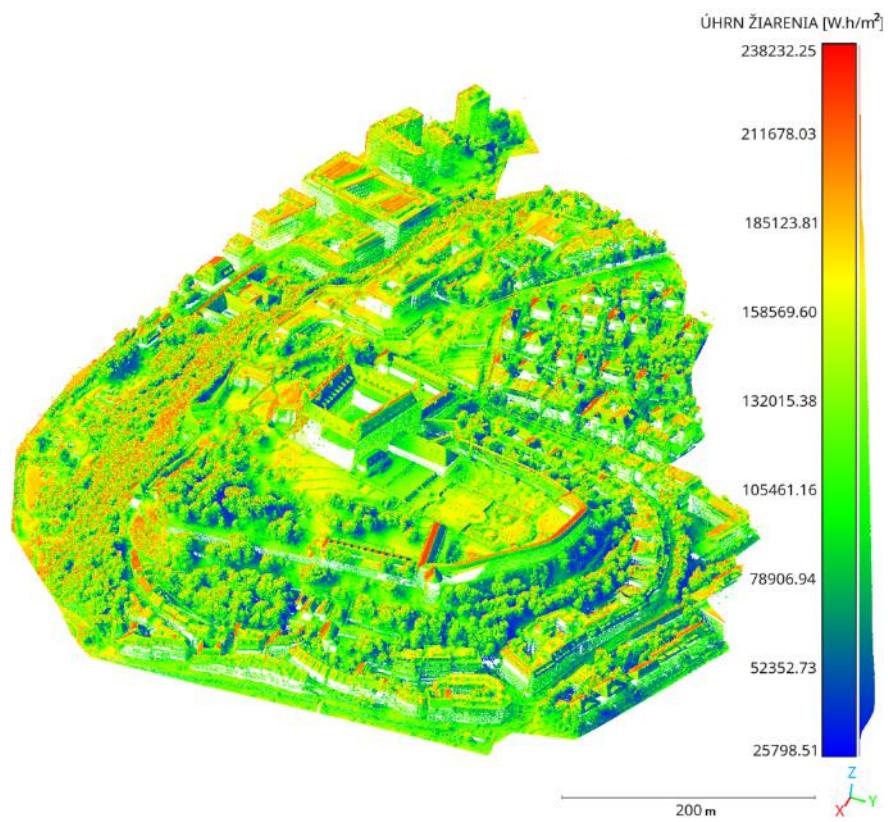
Na zvolenom mračne bodov je modelovaná solárna radiácia v mesiacoch marec (Obr. 13), jún (Obr. 14), september (Obr. 15) a december (Obr. 16), čiže v mesiacoch, v ktorých dochádza k slnovratu a k rovnodennosti, s cieľom porovnať množstvo dopadnutého žiarenia v rôznych častiach roka a tiež demonštrovať možnosti aplikácie metódy v takomto prostredí. Výpočet je robený v hodinovom kroku počas príslušného mesiaca, s veľkosťou voxela 0,7 m a Linkeho koeficientom prebraným z databázy SODA s hodnotami 3,6 pre marec, 4,1 pre jún, 3,5 pre september a 3,0 pre december. Výpočet trval približne 80 sekúnd pre každý mesiac na 14 049 451 bodoch mračna.

Na uvedených obrázkoch vidno výrazné rozdiely v množstve žiarenia medzi zimou a letom a podobné hodnoty počas jari a jesene a to aj na zobrazenom mračne aj na histograme na ľavej strane škály. V jednotlivých častiach roka je vidno relatívne očakávateľné množstvá žiarenia - v zime ho dopadá menej ako v lete. Z vizualizácií tiež vidno vplyv nízkych výškových uhlov Slnka v zime. Na južný svah a južne orientované steny budov dopadá výrazne viac žiarenia ako na severne orientované plochy. Nadirový uhol skenovania povrchu z lietadla má za dôsledok riedko skenované vertikálne steny budov, avšak na šikmých strechách, ktoré sú v mračne zachytené relatívne dobre, je rozdiel v orientácii sever-juh zrejmý. Dáta z LLS, ktoré nereprezentujú vertikálne plochy dostatočne, je vhodné kombinovať napr. s dátami z TLS.

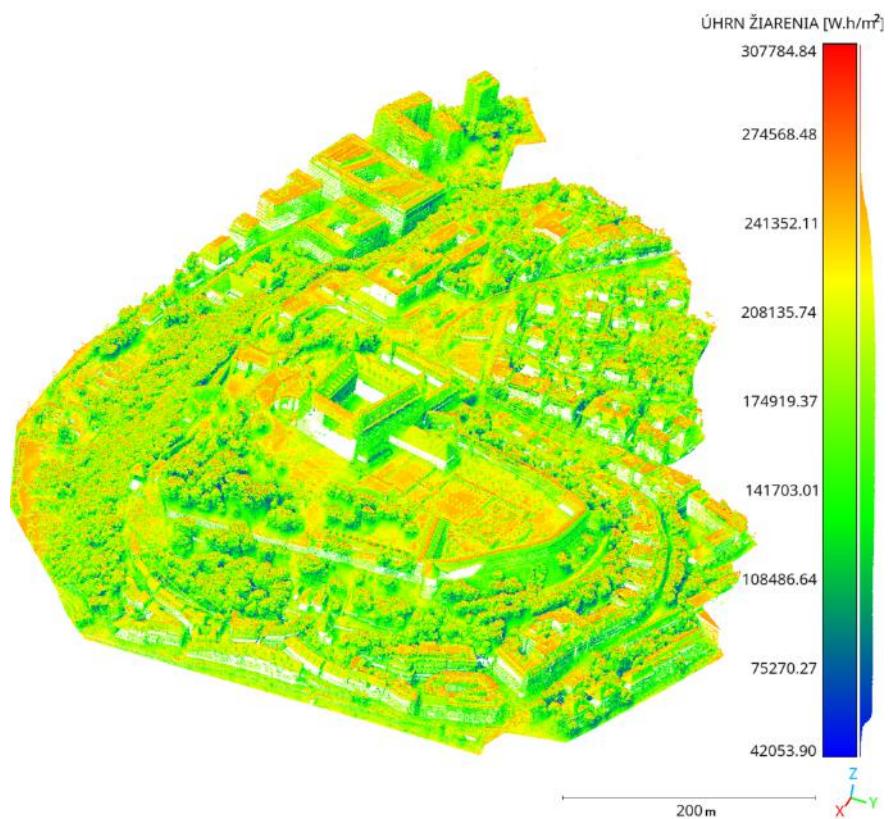
Na mračne bodov sú dobre zachytené horizontálne povrhy, a to budov aj terénu v oblastiach s vysadenou vegetáciou. Z vizualizácií je možné hodnotiť vplyv zelene v parku vo vnútri hradieb. Jej vplyv je tiež vidno pozdĺž ulíc, kde spôsobuje výrazné zníženie množstva dopadnutého žiarenia na terén pod vegetáciou a v jej blízkom okolí. Nástroj je možné využiť na výpočet podkladových dát pre analýzy vplyvu vegetácie napríklad simulovaním vegetácie v záujmových oblastiach a tiež na interpoláciu máp žiarenia dopadnutého na terén po odstránení objektov.

## 5.3 Detailné modelovanie solárnej radiácie na budove

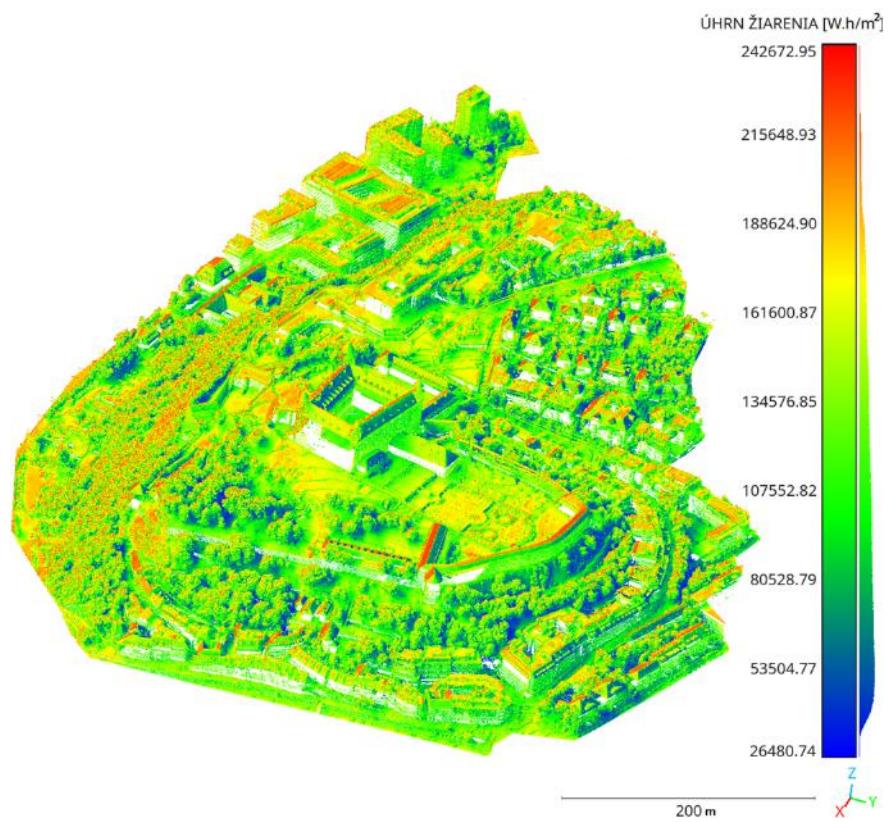
Mračná bodov z LLS majú kvôli metóde zberu dát riedko zachytené vertikálne steny budov. Hustota týchto mračien zodpovedá cielu skenovania, ktorým je vo väčšine prípadov



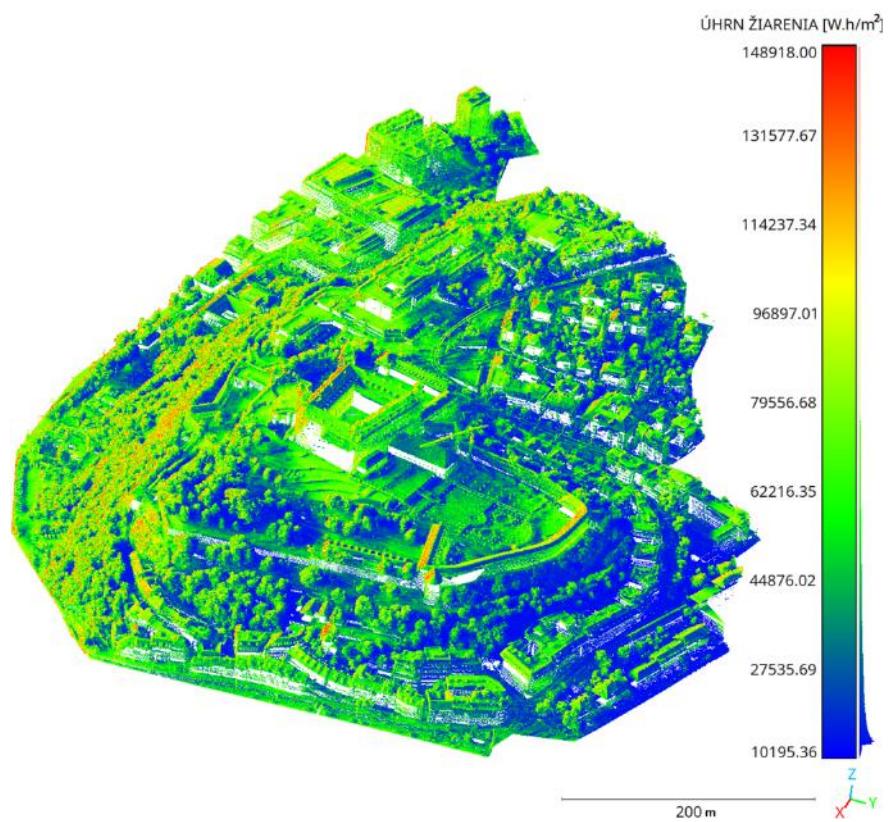
**Obr. 13:** Bratislavský hradný kopec - globálna solárna radiácia marec 2022. Zdroj produktov LLS: ÚGKK SR.



**Obr. 14:** Bratislavský hradný kopec - globálna solárna radiácia júl 2022. Zdroj produktov LLS: ÚGKK SR.



**Obr. 15:** Bratislavský hradný kopec - globálna solárna radiácia september 2022. Zdroj produktov LLS: ÚGKK SR.

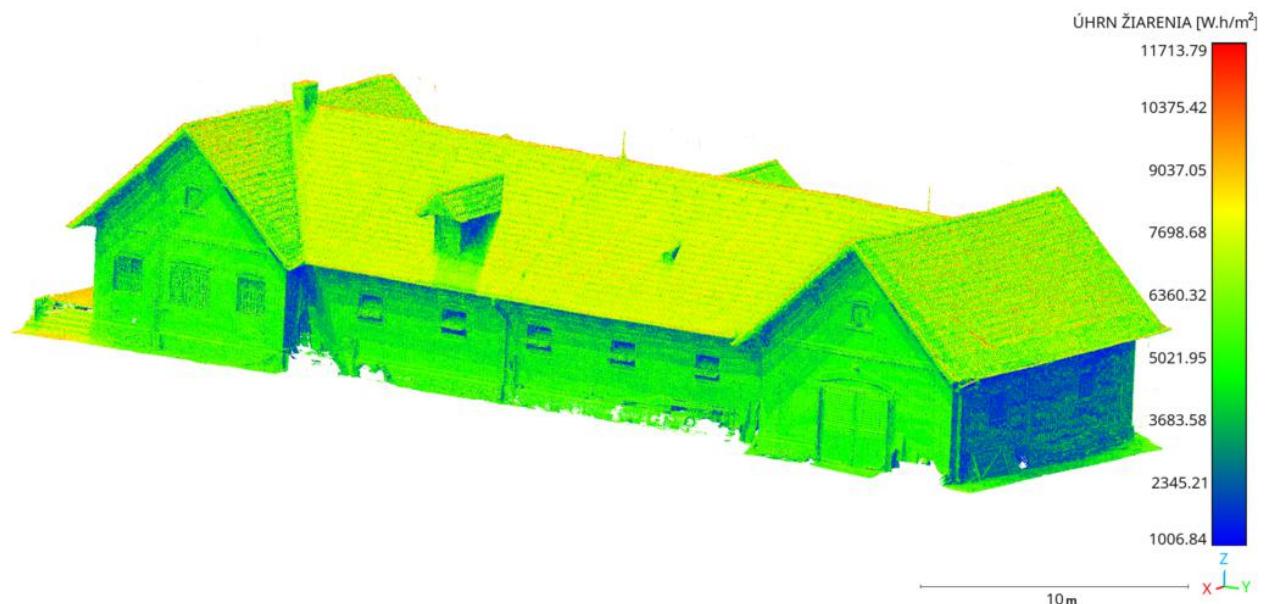


**Obr. 16:** Bratislavský hradný kopec - globálna solárna radiácia december 2022. Zdroj produktov LLS: ÚGKK SR.

tvorba digitálnych výškových modelov terénu. Z týchto dôvodov je na modelovanie solárnej radiácie na budove pomocou PCSRT zvolené husté mračno bodov získané pomocou TLS a fotogrametrických metód, ktoré vertikálne steny zachytáva dobre.

Mračno reprezentuje stajňu v areáli kaštieľa v Kočovciach a obsahuje 113 108 244 bodov. Solárna radiácia je na ňom modelovaná za deň letného slnovratu 21.6.2022 s priemerným počtom 6 bodov na voxel s veľkosťou hrany 2 cm. S hodinovým krokom modelovania výpočet trval 4 minúty a 45 sekúnd pričom prevažnú dobu výpočtu tvorilo čítanie a zápis dát spolu s preprocesingom. Čistý čas výpočtu osvetlenia a komponentov solárnej radiácie trval 15 sekúnd.

Z vizualizácie globálnej solárnej radiácie zobrazenej na Obr. 17 je možné zhodnotiť možnosti modelovania žiarenia na budove, pokiaľ je dostatočne husto reprezentovaná mračnom bodov. Je možné detailne vidieť tieň prekrytov škridiel na streche a tiež osvetlenie jednotlivých trámov drevenej brány a okeníc.

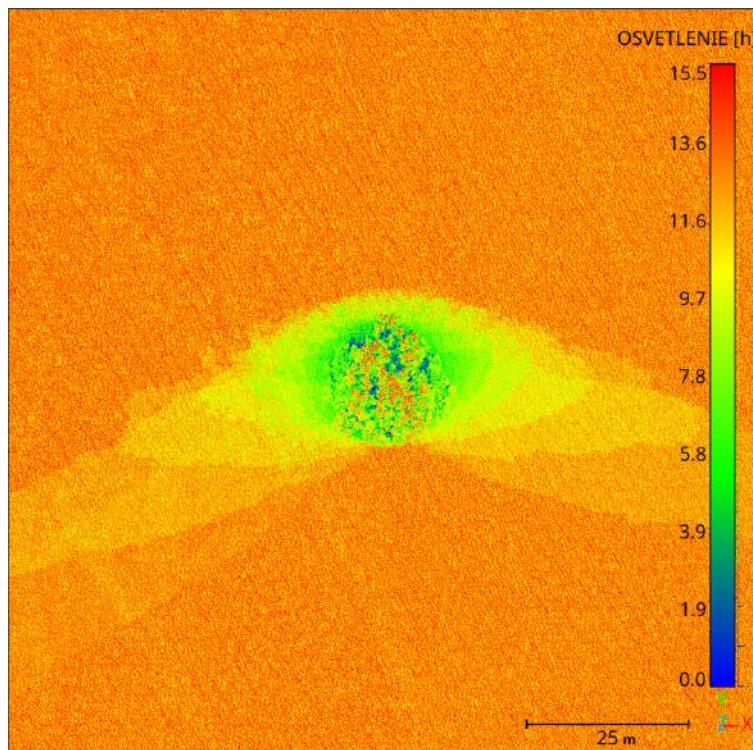


**Obr. 17:** Stajne v areáli kaštieľa Kočovce - globálna solárna radiácia na detailne skenovanej budove 21.6.2022. Zber dát v rámci diplomovej práce [19].

Na takto husto skenovanej budove však vidno aj efekt voxelovej reprezentácie objektu, ktorá neberie do úvahy rovinu ako celok, ale ako čiastkové roviny riešené samostatne, a preto vizualizované žiarenie pôsobí zašumene. Na druhej strane je možné takéto mračno použiť do ďalšieho spracovania a hodnoty vyhladiť pomocou filtrov alebo extrahovať jednotlivé záujmové roviny zvlášť a po interpolácii do rastra prevzorkovať na požadovanú veľkosť.

#### 5.4 Detailné modelovanie osvetlenia vegetácie

Na detailné modelovanie osvetlenia vegetácie, resp. zatienenia terénu, je možné pozorovať na samostatne stojacom strome č. 1 v lokalite Dobrá Niva v blízkosti mesta Zvolen (Obr. 18). Ide o mračno bodov vytvorené kombináciou skenu stromu terestrickým laserovým skenerom s veľkou hustotou a digitálneho modelu terénu s veľkosťou pixela 5 cm skonvertovaného do mračna bodov, ktoré tvorí dopadovú plochu žiarenia (resp. tieňa) v okolí stromu. Osvetlenie je modelované v deň letného slnovratu 21.6.2022 od východu Slnka o 4:41 po západ o 20:49 s hodinovým krokom výpočtu a veľkosťou voxela 7 cm. Zber dát v rámci projektu STRAKA. Na Obr. 18 sa nachádza súčet času osvetlenia bodov v hodinách počas dňa a je možné z neho odčítať prevažne zatienenú plochu pod korunou stromu (zelená) a tiež čiastočne zatienené plochy počas ranných a večerných hodín. Výrazne zatienené body (modrá) sa nachádzajú prevažne vo vnútri koruny stromu. Červená plocha, na ktorú tieň stromu nedopadá, obsahuje aj čiastočne zatienené (oranžové) body, ktoré sú zatienené okolitým terénom vplyvom



**Obr. 18:** Samostatne stojaci strom č. 1 (lokalita Dobrá Niva) - osvetlenie počas letného slnovratu 21.6.2022. Zdroj dát: projekt APVV-20-0257.

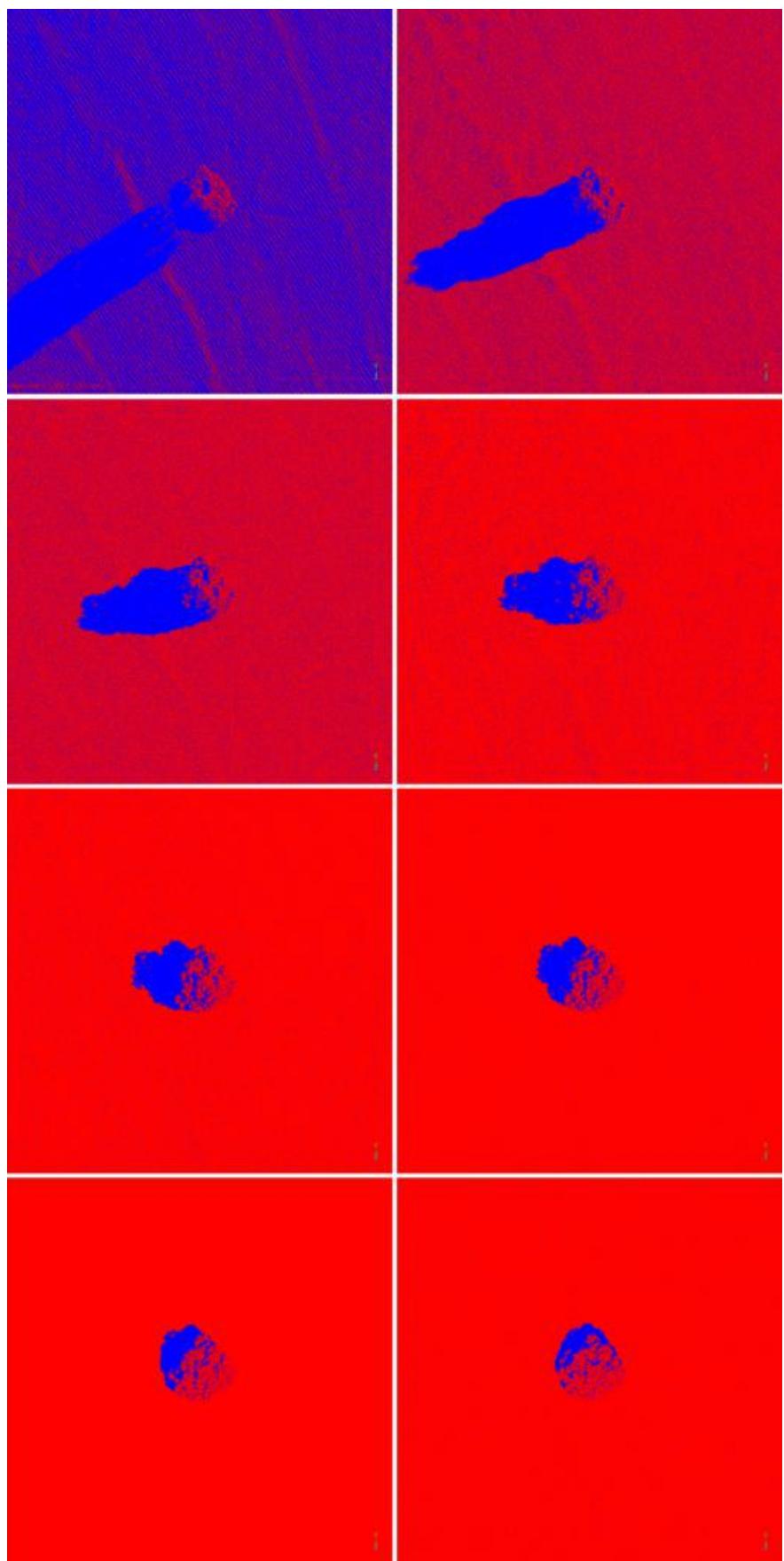
metódy výpočtu. Pôvod tohto efektu dobre viditeľného na prevažne osvetlených (resp. zatielených) plochách je možné pozorovať na jednotlivých momentoch osvetlenia počas dňa od 5:00 ráno do 20:00 večer znázornených na Obr. 19 a 20, ktorým prislúchajú azimuty a výškové uhly uvedené v Tab. 2. Počas ranných a večerných hodín (5:00 - 6:00 a 18:00 - 20:00), kedy je výškový uhol Slnka malý a strom vrhá najdlhšie tieňe, vzniká na dopadovej ploche vrstevnicový efekt, pri ktorom aj na relatívne vodorovnom a hladkom povrchu reprezentovanom voxelami vzniká tieň.

Nástroj PCSRT je možné použiť aj na aplikácie vyžadujúcej si iba slnečné osvetlenie mračna a je možné ho modelovať s vysokým detailom. Ten je možné dosiahnuť okrem hustoty mračna a presného intervalu výpočtu aj hustotou časových momentov nastavením menšieho časového kroku.

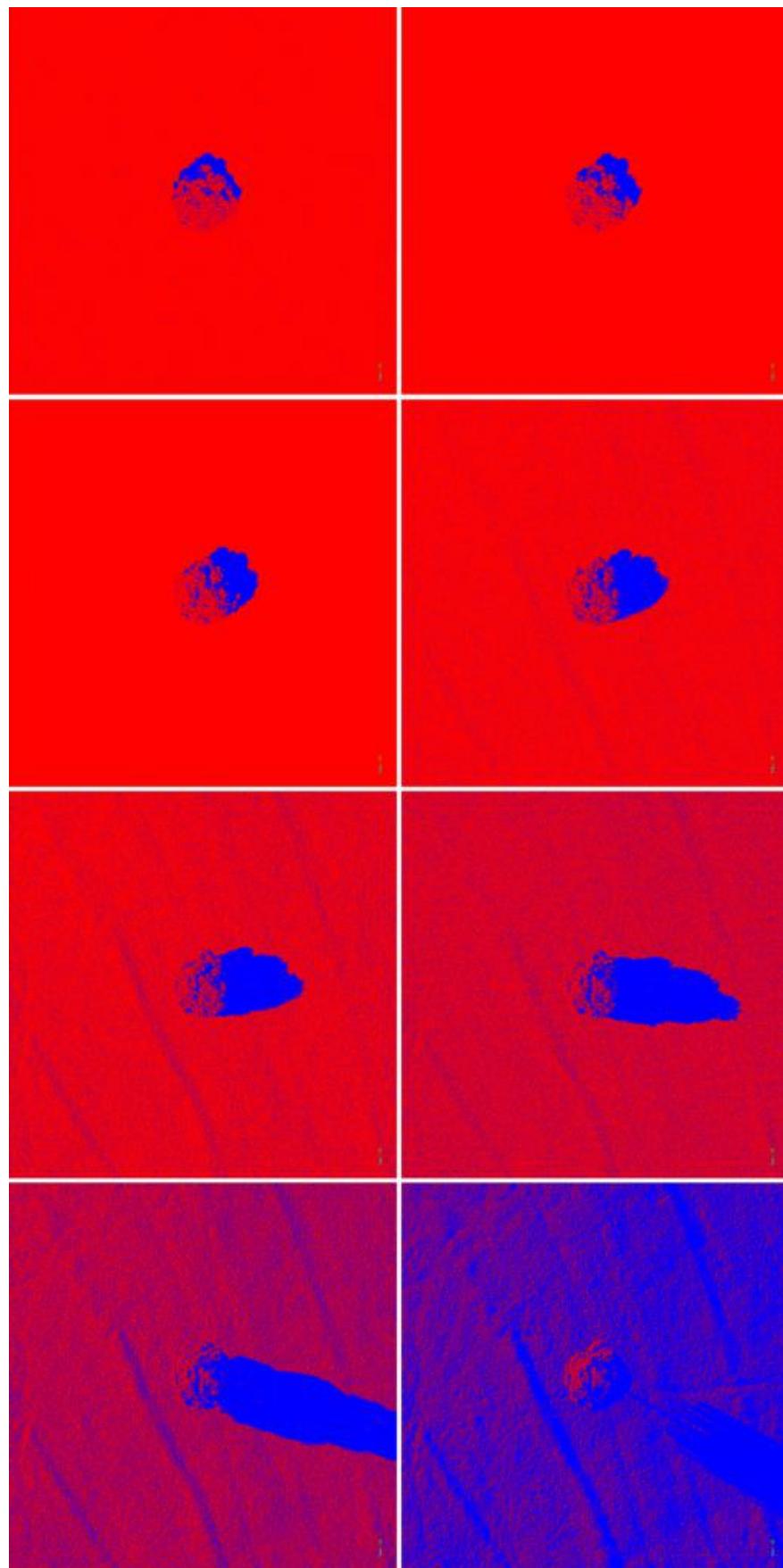
**Tab. 2:** Azimuty a výškové uhly Slnka v hodinách počas dňa 21.6.2022 prislúchajúce polohe samostatne stojaceho stromu č. 1 v lokalite Dobrá Niva

Čas	Azimut [°]	Výškový uhol [°]
<b>5:00</b>	55.3	1.6
<b>6:00</b>	66.1	10.2
<b>7:00</b>	76.5	19.7
<b>8:00</b>	87.1	29.5
<b>9:00</b>	98.7	39.4
<b>10:00</b>	112.5	49.0
<b>11:00</b>	130.8	57.4
<b>12:00</b>	156.2	63.4

Čas	Azimut [°]	Výškový uhol [°]
<b>13:00</b>	187.8	64.8
<b>14:00</b>	217.1	61.0
<b>15:00</b>	238.8	53.5
<b>16:00</b>	254.5	44.4
<b>17:00</b>	267.1	34.6
<b>18:00</b>	278.1	24.7
<b>19:00</b>	288.5	15.0
<b>20:00</b>	299.0	5.9



**Obr. 19:** Samostatne stojaci strom č. 1 (lokalita Dobrá Niva) - osvetlenie v hodinách (5:00 - 12:00) počas letného slnovratu 21.6.2022. Zdroj dát: projekt APVV-20-0257.

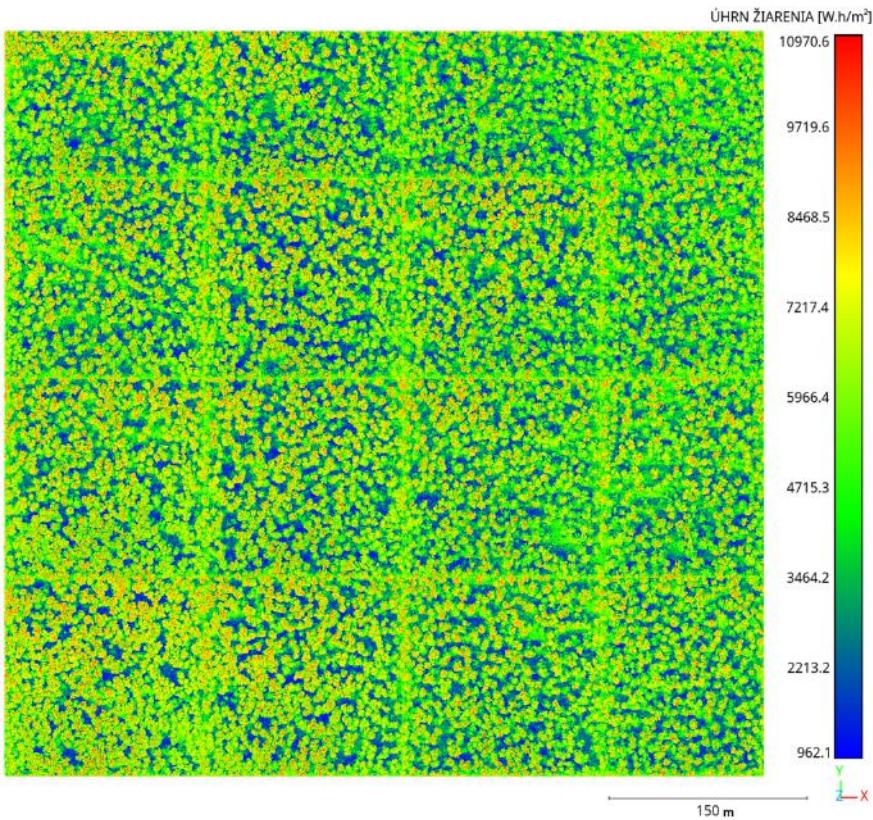


**Obr. 20:** Samostatne stojaci strom č. 1 (lokalita Dobrá Niva) - osvetlenie v hodinách (13:00 - 20:00) počas letného slnovratu 21.6.2022. Zdroj dát: projekt APVV-20-0257.

## 5.5 Blokové spracovanie mračna bodov

Blokové spracovanie rieši problematiku modelovania žiarenia na veľkých mračnách bodov pri nepostačujúcej pamäti počítača. Mračno bodov je spracovávané blokovo, pokiaľ je zadaný

vstupný parameter veľkosti a prekrytu bloku. Ako príklad blokového spracovania je použitý výpočet v oblasti Šúr pri obci Čierna Voda, v ktorej sa nachádza hustý lesný porast v rovinatom teréne. Mračná bodov zobrazené na Obr. 21 a 22 boli obe spracovávané blokovo, pričom v prípade 21 bol použitý nulový prekryt mračien a pri 22 30 m prekryt. Obe mračná boli spracovávané s veľkosťou bloku 150 m. Na mračne bez použitia prekrytu je vidieť rozdelenie



**Obr. 21:** Rovinatý lesný porast Šúr pri Čiernej Vode - globálna solárna radiácia počas letného slnovratu 21.6.2022 vypočítaná blokovo s veľkosťou bloku 150 m a prekrytom 0 m. Zdroj produktov LLS: ÚGKK SR.

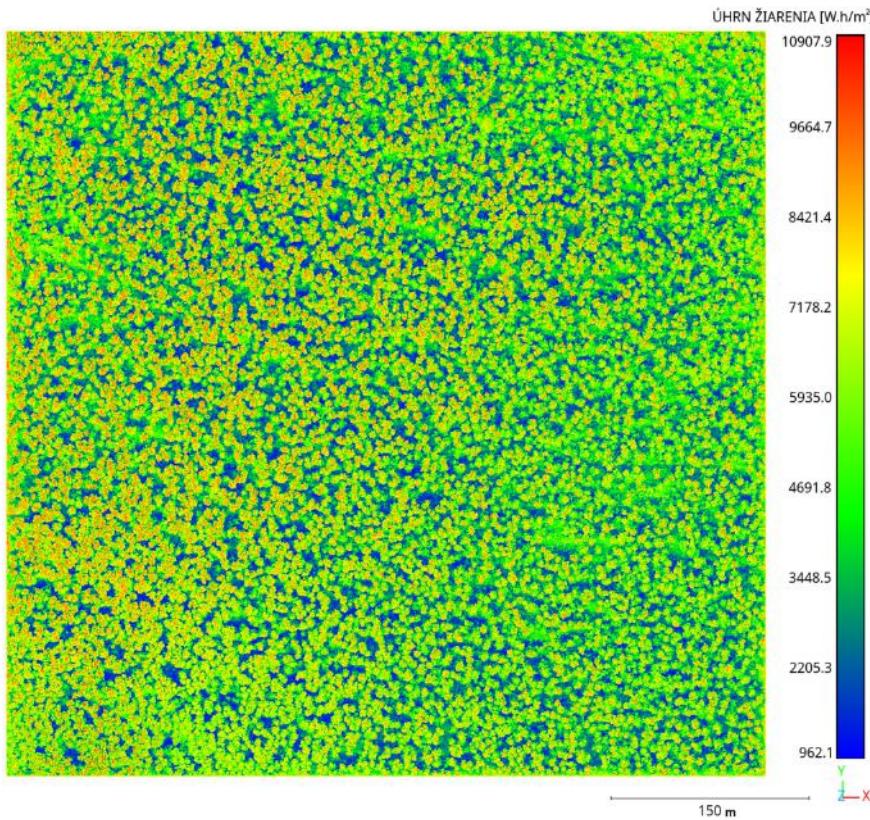
bodov do blokov vďaka neprirodzenému efektu osvetlenia hranice dát, ktorý je eliminovaný použitím prekrytov v druhom mračne bodov. V prípade rovinatého husto zarasteného terénu nie je už pri 30 m prekryte rozdiel oproti spracovaniu mračna v jednom bloku takmer žiadny, no z hľadiska výpočtu bolo pri blokovom spracovaní použitých 1.2 GB pamäte a pri spracovaní naraz 7 GB pamäte. Blokové spracovanie však trvalo 6-násobne dlhšie (11 min 25 s) ako spracovanie naraz (1 min 49 s). Veľký časový rozdiel vzniká hlavne kvôli opäťovnému čítaniu dát pri každom bloku a tvorbe voxelového gridu pre každý blok zvlášť.

## 5.6 Porovnanie výkonu nástroja na rôznom hardvéri

Modelovanie solárnej radiácie v rámci prípadových štúdií bolo vykonávané na procesore AMD Ryzen 9 5950X so 16 fyzickými jadrami a 32 virtuálnymi jadrami, ktorý aktuálne spadá do kategórie nadštandardne výkonných procesorov bežne používaných počítačov. Za účelom zhodnotenia efektivity nástroja PCSRT bol okrem uvedeného procesora použitý procesor Intel i7-10750H so 6 fyzickými a 12 virtuálnymi jadrami a procesor Interl i5-6700 so 4 fyzickými a 8 virtuálnymi jadrami. Testovacími dátami sú mračná bodov z viacerých zdrojov a rôznych typov oblastí:

- Hradný kopec (Bratislava) - LLS, zdroj dát ÚGKK SR, zastavaná oblasť,
- Suchá dolina (Kvačany) - LLS, zdroj dát ÚGKK SR, zalesnená horská oblasť,
- Stajňa (Kočovce) - TLS, zdroj dát STU, budova.

Modelovanie prebiehalo za obdobie 1.-31.8.2022 s hodinovým krokom. Výpočtové časy a vyu-



**Obr. 22:** Rovinatý lesný porast Šúr pri Čiernej Vode - globálna solárna radiácia počas letného slnovratu 21.6.2022 vypočítaná blokovo s veľkosťou bloku 150 m a prekrytom 30 m. Zdroj produktov LLS: ÚGKK SR.

žitie pamäte pri spracovaní jednotlivých mračien spolu s ďalšími údajmi sú uvedené v Tab. 3. Dĺžka výpočtu je udávaná za fázu preprocessingu, výpočtu radiácie a spolu. Do výpočtových časov nie je zahrnutý čas zápisu výstupného mračna. Do fázy preprocessingu je zarátaná aj dĺžka tvorby voxelového gridu, nakoľko všetky mračná boli spracovávané naraz v jednom bloku.

**Tab. 3:** Porovnanie výpočtových časov a využitia pamäte pri rôznych typoch a veľkostach mračien bodov a rôznych procesoroch (Modelovanie za obdobie 1.-31.8.2022 s 1 h krokom)

Procesor	Fyz. jadra	Dáta	Počet bodov	Veľkosť LZ	Veľkosť voxelu	Priem. poč. bodov na voxel	Výpočtový čas (preprocessing)	Výpočtový čas (solárna radiácia)	Výpočtový čas (spolu)	Využitie pamäte
AMD Ryzen 9 5950X	16	Hradný kopec (Bratislava)	14 049 451	68.4 MB	1 m	10.6	22 s	22 s	44 s	2.7 GB
Intel i7-10750H	6						33 s	55 s	1 min 28 s	1.5 GB
Intel i7-6700	4						39 s	1 min 13 s	1 min 52 s	1.4 GB
AMD Ryzen 9 5950X	16	Suchá dolina (Kvačany)	28 231 107	129.8 MB	0.7 m	4.2	43 s	2 min 2 s	2 min 45 s	7.5 GB
Intel i7-10750H	6						1 min 4 s	5 min 2 s	6 min 6 s	4.6 GB
Intel i7-6700	4						1 min 13 s	6 min 32 s	7 min 45 s	4.0 GB
AMD Ryzen 9 5950X	16	Stajňa (Kočovce)	113 108 244	615.7 MB	0.05 m	39.9	2 min 18 s	45 s	3 min 3 s	8.4 GB
Intel i7-10750H	6						3 min 31 s	1 min 57 s	5 min 28 s	6.6 GB
Intel i7-6700	4						4 min 0 s	2 min 36 s	6 min 36 s	6.5 GB

Na všetkých výpočtových časoch je vidieť závislosť rýchlosťi výpočtu od počtu jadier, resp. vláken, v ktorých boli mračná spracovávané. Od počtu vláken tiež závisí množstvo využitej pamäte, ktorú tvoria aj dáta, ku ktorým musia mať jednotlivé vlákna exkluzívny prístup a preto je potrebné ich uložiť pre každé vlákno zvlášť. Veľkú časť využitej pamäte však zabera voxelový grid, ktorý je potrebné vytvoriť bez ohľadu na počet vláken procesu a z tohto dôvodu je práve metódou blokového spracovania (časť 4.2.4) redukované množstvo

využitej pamäte. Voxelový grid obsahuje všetky pôvodné body mračna v nekomprimovanej podobe spolu s ďalšími dátami (normálový vektor, množstvá žiarenia a osvetlenia, a pod.). Objem dát využitých na uloženie mračna bodov na disku v komprimovanom formáte LAZ je niekoľkonásobne menší v pomere ku objemu dát potrebnom na uloženie voxelového gridu a ďalších menej objemných dátových štruktúr do pamäte. Počas spracovávania mračna bodov stajne v Kočovciach (Obr. 17) je pri 8 vláknach využitých 6,5 GB pamäte a pri 12 vláknach, čiže pri 1,5 násobku dát využitých pri viacvláknovom procese navyše, iba 6,6 GB. Rozdiel v čase výpočtu solárnej radiácie však zodpovedá rozdielu počtu vlákien.

Všetky výpočty realizované v rámci porovnania prebehli do niekoľkých minút. Množstvo využitej pamäte pri priemerných procesoroch spadá pod 7 GB aj pri hustom mračne stajne alebo rozsiahlejšom lesnom poraste Suchej doliny (Obr. 12). Rýchlosť výpočtu závisí primárne od výkonnosti procesora a od množstva pamäte. Väčšie množstvo jadier procesora umožňuje paralelne spracovávať väčšie množstvo časových momentov. Zvyšovaním množstva pamäte je možné naraz spracovávať väčšie množstvo bodov, resp. rozdeľovať spracovanie mračna do menšieho počtu blokov.

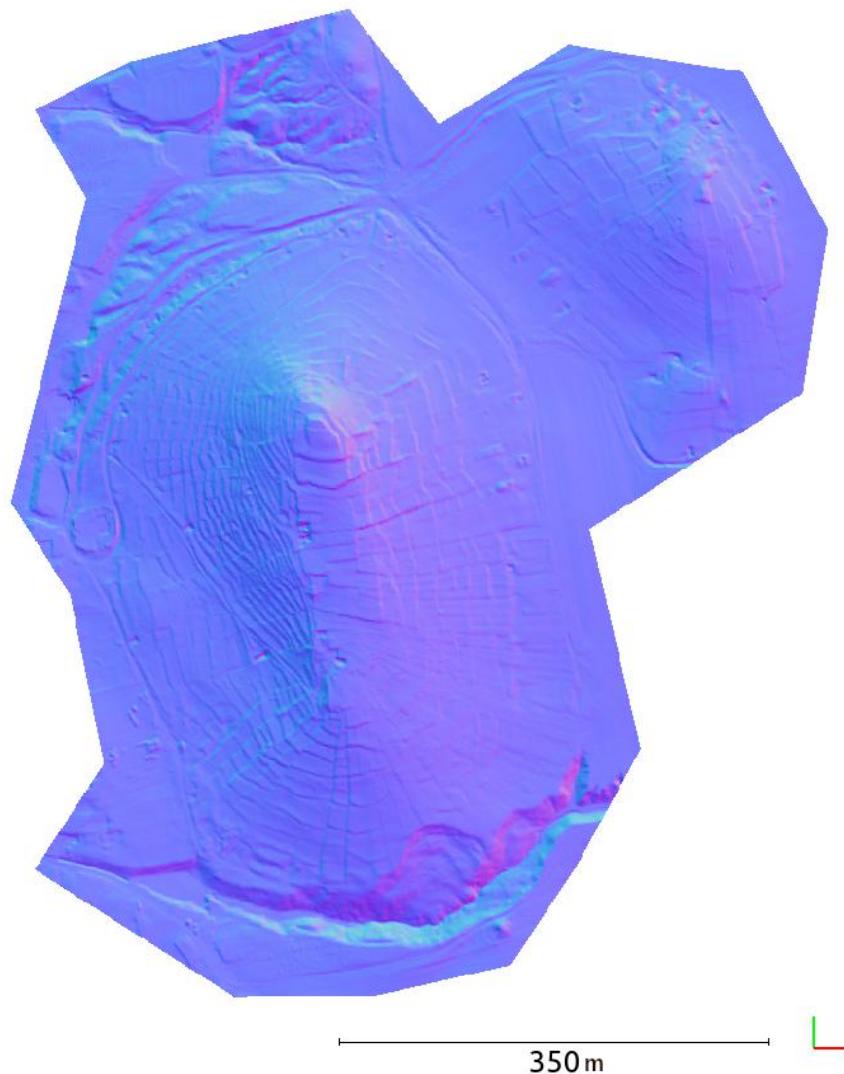
## 5.7 Porovnanie nástroja s existujúcimi riešeniami

Porovnať novovyvinutý nástroj PCSRT s aktuálne používanými nástrojmi na modelovanie solárnej radiácie je obtiažne. Porovnanie nástroja s interaktívnymi solárnymi mapami (napr. Global Solar Atlas alebo PVGIS) stráca zmysel kvôli veľkému rozdielu v rozlíšení, v ktorom tieto nástroje v porovnaní s PCSRT žiarenie modelujú. Okrem rozlíšenia je rozdiel aj v modelovanej ploche dopadu, ktorou sú 2,5D výškové modely. Z voľne dostupných softvérov na modelovanie solárnej radiácie v 3D je aktuálne možné získať iba softvér Solar3D, ktorý solárnu radiáciu modeluje iba v bode na definovanej ploche. To je na porovnanie s PCSRT ktorý modeluje solárnu radiáciu v celom priestore nepostačujúce. Z týchto dôvodov boli na porovnanie zvolené GIS nástroje Area Solar Radiation a r.sun.

Nástroje Area Solar Radiation a r.sun modelujú slnečné žiarenie na 2,5D výškových modeloch, ktoré je možné získať aj vo vysokom rozlíšení. Nástroj PCSRT modeluje žiarenie v 3D na mračne bodov, čím sa od 2,5D nástrojov výrazne lísi a lísi sa teda aj v metóde výpočtu osvetlenia. Do určitej miery je ho však možné porovnať s 2,5D nástrojmi na vhodne zvolených dátach. Metóda porovnania týchto nástrojov je založená na konverzii výškového modelu do mračna bodov, výpočtu solárnej radiácie na tomto mračne pomocou PCSRT a následnej interpoláции modelovaných hodnôt do 2D rastra. Príklad takéhoto mračna bodov sa nachádza na Obr. 23, kde sú vizualizované normálové vektory vypočítané PCSRT. Plynulý priebeh terénu je možno vidieť na plynulej zmene farieb.

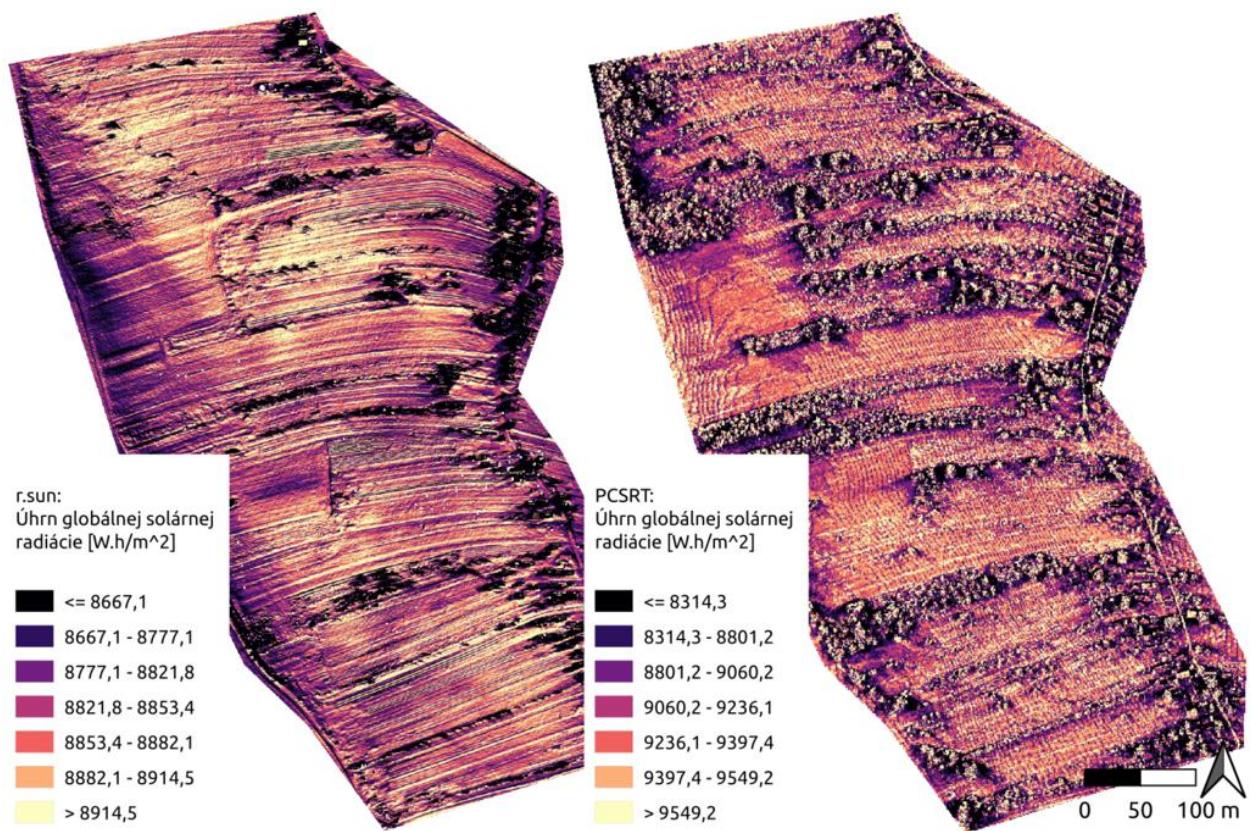
Na porovnanie interpolovaného rastra modelovanej globálnej solárnej radiácie sú zvolené lokality Slovenský kras (Príloha č. 1-3), terasovitý kopec pri obci Bohunice (Príloha č. 4-6), vinice pri obci Vráble (Príloha č. 7-9) a Kamenistá dolina vo Vysokých Tatrách (Príloha č. 10-11). Ide o lokality reprezentujúce rôzne typy terénov od vysokohorských až po rovinaté. Terasovitý kopec pri Bohuniciach a Slovenský kras, známy svojimi krasovými jamami, sú príkladmi nevšedného tvaru terénu. Mapy úhrnu globálnej solárnej radiácie v týchto lokalitách (Príloha č. 1-12) zobrazujú množstvo žiarenia za deň 21.6.2022 vizualizované pomocou kvantilov. Výpočet bol pri všetkých nástrojoch realizovaný s krokom 1 h. Hodnota Linkeho súčiniteľa zákalu atmosféry je pre r.sun predvolená na 3 a s rovnakou hodnotou bol realizovaný aj výpočet pomocou PCSRT. Nástroj Area Solar Radiation používa na modelovanie útlmu žiarenia koeficienty difúzny pomer a pripustnosť [20], ktorým boli ponechané predvolené hodnoty (0,3 pre difúzny pomer a 0,5 pre pripustnosť). Predvolené hodnoty vstupných parametrov majú pri všetkých nástrojoch reprezentovať ich priemerné hodnoty za rok.

Rozsah hodnôt modelovaného žiarenia je vo všetkých prípadoch podobný pri nástrojoch PCSRT a r.sun z dôvodu rovnakých vstupných parametrov a rovnakého modelu solárnej radiácie ESRA. Vizuálne podobnejšie po rozdelení výstupných hodnôt do kvantilov sú však výstupy nástrojov r.sun a Area Solar Radiation. Dôvodom je prevažne to, že oba nástroj mo-



**Obr. 23:** Výškový model z lokality Bohunice prevedený do mračna bodov. Vizualizácia normálových vektorov v škále RGB. Zdroj produktov LLS: ÚGKK SR.

delujú žiarenie priamo na výškových modeloch na rozdiel od PCSRT, ktorý využíva voxelový 3D prístup. Výhodu tohto prístupu je možné pozorovať na lokalitách Slovenský kras, Bohunice a Kamenistá dolina, kde pri ich vertikálnej členitosti vidno vyššiu detailnosť výstupov 3D nástroja PCSRT v porovnaní s 2,5D nástrojmi. Na prevažne rovinatej oblasti viníc pri Vrábľoch (Príloha č. 7) je možné pozorovať vrstevnicový efekt spôsobený metódou výpočtu osvetlenia PCSRT a detail sa kvôli nemu stráca. Avšak pokial porovnáme jednotlivé nástroje na modeloch časti tejto lokality so zahrnutím objektov nachádzajúcich jej povrchu (Obr. 24), môžeme vidieť, že novovyvinutý nástroj PCSRT modeluje žiarenie v priestore detailnejšie.



**Obr. 24:** Globálna solárna radiácia za deň 21.7.2022 modelovaná na digitálnom modeli povrchu pomocou r.sun (vľavo) a v 3D pomocou PCSRT (vpravo). Zdroj produktov LLS: ÚGKK SR.

## 6 Prínosy dizertačnej práce

Prínos dizertačnej práce pre vedu:

- vývoj novej metódy modelovania solárnej radiácie na mračne bodov s využitím voxelovej reprezentácie priestoru,
- demonštrácia metódy pomocou novovyvinutého nástroja PCSRT na rôznych typoch mračien bodov v rámci prípadových štúdií,
- možnosť aplikovať nástroj na modelovanie solárnej radiácie pri analýzach vplyvu slnečného žiarenia v lesníctve, biológii, poľnohospodárskych vedách a ďalších vedných odboroch,
- možnosť aplikovať nástroj na modelovanie solárnej radiácie pri analýzach vplyvu slnečného žiarenia na životné prostredie v zastavaných oblastiach s mestskou zeleňou pomocou GIS, v architektúre a urbanizme, vo fotovoltaike a ďalších vedných odboroch.

Prínos dizertačnej práce pre prax:

- nástroj na modelovanie solárnej radiácie na mračne bodov, ktorý je jednoducho použiteľný vďaka nízkemu počtu povinných vstupných parametrov a ktorý je voľne dostupný, má otvorený zdrojový kód a je použiteľný na počítačoch so všetkými bežne používanými operačnými systémami a s bežne dostupným hardvérom,
- možnosť jednoduchej integrácie nástroja do GIS a ďalších softvérov v podobe zásuvného modulu.

## 7 Zhodnotenie výsledkov, diskusia a záver

Vyvinutá metóda modelovania solárnej radiácie na mračne bodov v 3D priestore pomocou voxelovej reprezentácie zemského povrchu a objektov na ňom je zameraná na univerzálnosť použitia, efektivitu výpočtu a minimalizovanie počtu potrebných vstupných parametrov modelovania. Metóda využíva voxelovú reprezentáciu priestoru za účelom efektívneho výpočtu

slnečného osvetlenia pomocou rotácie objektov do smeru dopadajúceho žiarenia, ktorá je prakticky použiteľná aj na komplexných objektoch ako je napr. aj vegetácia. Na modelovanie množstva žiarenia využíva model solárnej radiácie jasnej oblohy ESRA. Metóda určuje priamu a difúznu zložku slnečného žiarenia, ako aj hodnoty globálnej solárnej radiácie a času osvetlenia pre každý voxel.

Najdôležitejším výsledkom práce je nástroj PCSRT vyvinutý v programovacom jazyku Rust, ktorý uvedenú metódu implementuje a je publikovaný a voľne dostupný na <https://github.com/hblyp/pcsrt>. Nástroj umožňuje praktické modelovanie solárnej radiácie na mračnách bodov formátu LAS/LAZ za zadané časové obdobie a so zadaným časovým krokom. Voľba čiastkových metód výpočtu je modifikateľná vstupnými parametrami. Nástroj umožňuje spracovať objemné mračná bodov pomocou blokového spracovania a využíva paraleлизáciu výpočtov s cieľom maximálnej efektivity výpočtu. Výstupom spracovania je pôvodné mračno bodov vo formátoch LAS/LAZ alebo PLY s hodnotami priameho a difúzneho komponentu solárnej radiácie, globálnej solárnej radiácie a časmi osvetlenia prislúchajúcimi každému bodu mračna. Výstupný formát dát je kompatibilný s voľne dostupnými softvérmi na vizualizáciu a ďalšie spracovanie, ako napr. CloudCompare alebo QGIS. Nástroj je použiteľný na všetkých bežne používaných operačných systémoch (Windows, MacOS, Linux).

Nástroj (resp. metóda) PCSRT je v rámci prípadových štúdií použitý na modelovanie slnečného žiarenia na mračnách bodov s rôznou hustotou a z rôznych oblastí. Sú to zalesnené vysokohorské aj rovinaté oblasti, mestské oblasti obsahujúce budovy a mestskú zeleň a detailne skenované stromy a budovy. V rámci prípadových štúdií je pozornosť venovaná aj detailnému modelovaniu osvetlenia, určovaniu vhodného časového kroku výpočtu a blokovému spracovaniu mračna. Efektivita výpočtu je porovnaná na viacerých typoch procesorov z hľadiska času výpočtu a využitia pamäte.

Porovnanie nástroja PCSRT s 2,5D nástrojmi r.sun [21] a Area Solar Radiation [20] (časť 5.7) ukazuje výhodu modelovania solárnej radiácie v 3D na vysokej detailnosti výstupov. Treba však poznamenať, že zvolená metóda porovnania nástrojov nereflektuje ich účel. PCSRT je nástroj určený na modelovanie v 3D a preto jeho aplikácia na rovinatý hladký terén výškového modelu viníc pri obci Vráble (Príloha č. 7) pôsobí z vizuálneho hľadiska menej vhodne ako 2,5D nástroje. V modeli obsahujúcim objekty na teréne však vidno výhodu modelovania v 3D (Obr. 24). Porovnanie nástroja s aktuálne voľne dostupnými nástrojmi je vo všeobecnosti obtiažne. Interaktívne solárne mapy (Global Solar Atlas, PVGIS a pod.) obsahujú žiarenie modelované v omnoho nižšom rozlíšení a sú zamerané na oveľa väčšie oblasti v porovnaní s PCSRT. 3D nástroje (Solar3D, SURFSUN3D, SORAM a pod.) nemajú vo väčšine prípadov voľne dostupný zdrojový kód ani nie sú priamo dostupné v spustiteľnej forme. Výnimkou je nástroj Solar3D, ktorý však modeluje žiarenie iba v bode na definovanej ploche, čo je pre celkové porovnanie s PCSRT, ktorý žiarenie modeluje v celom priestore, nepostačujúce.

Vývoj nástroja PCSRT otvára mnohé možnosti aplikácie modelovania solárnej radiácie aj vďaka tomu, že má otvorený zdrojový kód a je verejne dostupný. V rámci budúceho výskumu je cieľom rozšíriť jeho implementáciu o využitie štandardných knižníc na prácu so súradnicovými systémami a projekciami. Aktuálne nástroj vyžaduje vstupné mračno v pravouhlom horizontálnom metrickom súradnicovom systéme a výpočet smeru dopadajúcich lúčov vzťahuje k ľažisku mračna v zemepisných súradničiach, avšak aktuálne formáty používané pri mračnách bodov (LAS/LAZ) umožňujú definovať súradnicový systém, v ktorom je mračno uložené a tým pádom je pri jeho použití možné ľažisko určiť automaticky. Implementácia možnosti práce so súradnicovými systémami tiež umožní kombinovať mračná bodov s terénom vo forme výškového modelu napríklad v bežne používanom formáte GeoTIFF. Okrem toho umožní rozšíriť veľkosť korektné spracovateľnej oblasti pri výpočte ľažiska pre každý blok. Rozdelenie do blokov je tiež možné robiť na základe obmedzenia pamäte, čo je tiež používateľsky prívetivejší prístup. PCSRT aktuálne modeluje žiarenie po časových krokoch. Algoritmus určovania vhodného časového momentu by umožnil opomenúť ďalší

parameter výpočtu, ktorý je aktuálne od používateľa vyžadovaný. Nasledujúci čas výpočtu by bol volený na základe uhlovej zmeny smeru na Slnko a algoritmus by zohľadnil rýchlosť tejto zmeny. Tá je vyššia v ranných a večerných hodinách a v nich by mohli byť časové kroky menšie. Vďaka rozhraniu príkazové riadka je možné PCSRT jednoducho integrovať do GIS v podobe príkazového riadka, čo je tiež predmetom ďalšieho vývoja.

Vegetácia predstavuje pri modelovaní 3D priestoru jeden z najkomplexnejších typov objektov práve vďaka svojej členitosti, zmenám počas roka a na mnohých miestach hustote jej usporiadania v priestore. V rámci tejto práce je vyvinutá metóda a nástroj na modelovanie solárnej radiácie na mračne bodov PCSRT, ktorá je zameraná na efektivitu výpočtu a univerzálnosť použitia. Nástroj PCSRT umožňuje modelovať solárnu radiáciu za zadané časové obdobie s časovým krokom aj na objemných mračnách bodov pomocou blokového spracovania mračna s uvážením vplyvu okolia bloku pomocou prekrytov. Umožňuje tiež modifikovať parciálne metódy výpočtu pomocou parametrov zadávaných cez rozhranie príkazového riadka a je spustiteľný na všetkých bežne používaných operačných systémoch. Možnostiam porovnania vyvinutého nástroja PCSRT s aktuálne dostupnými nástrojmi používanými na modelovanie solárnej radiácie na výškových modeloch sa venuje časť tejto práce, v ktorej sú porovnávané výstupy jednotlivých softvérov, pričom výstup 3D nástroja PCSRT je v nej prevádzaný do 2,5D rastra. Porovnanie týchto nástrojov ukazuje výhody modelovania solárnej radiácie v 3D pomocou PCSRT, ktorého výstupom sú detailnejnejsie modely slnečného žiarenia v priestore.

## Zoznam publikácií

**ĎURAČIOVÁ, Renata; PRUŽINEC, Filip.** *Effects of terrain parameters and spatial resolution of a digital elevation model on the calculation of potential solar radiation in the mountain environment: A case study of the Tatra Mountains.* 2022. In: ISPRS International Journal of Geo-Information (v recenznom konaní)

**PRUŽINEC, Filip;** MEGO, Peter; ĎURAČIOVÁ, Renata [Galgonová, Renata]. *A low-cost web-based smart street lighting geographical information system for smaller towns and villages.* In Open Computer Science [elektronický zdroj]. Vol. 10, iss. 1 (2020), online, s. 450-458. ISSN 2299-1093 (2020: 0.147 - SJR, Q4 - SJR Best Q). V databáze: WOS: 000599508100001 ; DOI: 10.1515/comp-2020-0205.

**PRUŽINEC, Filip.** *Voxel-based solar illumination computation of forest represented by point cloud data.* In Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering [elektronický zdroj] : 29th Annual PhD Student Conference on Applied Mathematics, Applied Mechanics, Building Technology, Geodesy and Cartography, Landscaping, Theory and Environmental Technology of Buildings, Theory and Structures of Buildings, Theory and Structures of Civil Engineering Works, Water Resources Engineering. October 16th 2019, Bratislava. 1. vyd. Bratislava : Spektrum STU, 2019, CD-ROM, s. 146-151. ISBN 978-80-227-4972-5.

**PRUŽINEC, Filip.** *Možnosti spracovania ľubovoľne veľkých mračien bodov pri výpočte solárnej radiácie.* In Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering [elektronický zdroj] : 30th Annual PhD Student Conference on Applied Mathematics, Applied Mechanics, Building Technology, Geodesy and Cartography, Landscaping, Theory and Environmental Technology of Buildings, Theory and Structures of Buildings, Theory and Structures of Civil Engineering Works, Water Resources Engineering. October 14th 2020, Bratislava, Slovakia. 1. vyd. Bratislava : Spektrum STU, 2020, CD-ROM, s. 214-218. ISBN 978-80-227-5052-3.

**PRUŽINEC, Filip.** *Modelovanie zatienenia reliéfu vegetáciou vo voxelovom priestore.* In Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering [elektronický zdroj] : 31st

Annual PhD Student Conference on Applied Mathematics, Building Technology, Geodesy and Cartography, Landscaping, Theory and Environmental Technology of Buildings, Theory and Structures of Buildings, Theory and Structures of Civil Engineering Works, Water Resources Engineering. October 13th 2021, Bratislava, Slovakia. 1. vyd. Bratislava : Spektrum STU, 2021, CD-ROM, s. 193-198. ISBN 978-80-227-5150-6.

ĎURAČIOVÁ, Renata [Galgonová, Renata]; **PRUŽINEC, Filip**. *Influence of the digital elevation model resolution on the determination of the potential solar radiation*. In Geodesy, cartography and geoinformatics 2021 [elektronický zdroj] : abstracts from XII. international scientific conference. Štrba - Štrbské pleso, SR, September 22 - 24, 2021. 1. vyd. Košice : Technická univerzita v Košiciach, 2021, CD-ROM, s. 3. ISBN 978-80-553-4020-3.

SZABÓ JAKÓCS, Veronika [Jakócsová, Veronika]; **PRUŽINEC, Filip** - ĎURAČIOVÁ, Renata [Galgonová, Renata]. *Výpočet potenciálnej solárnej radiácie v oblasti Vysokých Tatier na základe dát z leteckého laserového skenovania*. In GeoKARTO 2020 : zborník abstraktov z konferencie konanej 10. - 11. 9. 2020 v Košiciach. 1. vyd. Košice : Univerzita Pavla Jozefa Šafárika v Košiciach, 2020, S. 52. ISBN 978-80-8152-887-3.

NOVÁK, David, **PRUŽINEC, Filip**. *Potential and implications of automated pre-processing of LiDAR-based digital elevation models for large-scale archaeological landscape analysis* (v príprave)

NOVÁK, David - **PRUŽINEC, Filip**. *Tvorba předindustriálních DEM: potenciál a dopady automatizovaného předzpracování LiDARových modelů krajiny pro archeologickou analýzu v GIS*. In PPA XX/21 : in memoriam Evžen Neustupný. Abstract book. 1. vyd. Praha : Archeologický ústav AV ČR, 2021, S. 26.

## Literatúra

1. ANTONANZAS-TORRES, F.; URRACA, R.; POLO, J.; PERPIÑÁN-LAMIGUEIRO, O. a ESCOBAR, R. Clear sky solar irradiance models: A review of seventy models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019, roč. 107, č. March 2018, s. 374–387. ISSN 18790690. Dostupné z DOI: 10.1016/j.rser.2019.02.032.
2. GARG, H. P. a DATTA, Gouri. Fundamentals and characteristics of solar radiation. *Renewable Energy*. 1993, roč. 3, č. 4-5, s. 305–319. ISSN 09601481. Dostupné z DOI: 10.1016/0960-1481(93)90098-2.
3. GUEYMARD, Christian A. Clear-sky irradiance predictions for solar resource mapping and large-scale applications: Improved validation methodology and detailed performance analysis of 18 broadband radiative models. *Solar Energy*. 2012, roč. 86, č. 8, s. 2145–2169. ISSN 0038-092X. Dostupné z DOI: 10.1016/j.solener.2011.11.011.
4. GUEYMARD, Ch. A. REST2: High-performance solar radiation model for cloudless-sky irradiance, illuminance, and photosynthetically active radiation - Validation with a benchmark dataset. *Solar Energy*. 2008, roč. 82, č. 3, s. 272–285. ISSN 0038092X. Dostupné z DOI: 10.1016/j.solener.2007.04.008.
5. RIGOLIER, C.; LEFÈVRE, M. a WALD, L. The method Heliosat-2 for deriving shortwave solar radiation from satellite images. *Solar Energy*. 2004, roč. 77, č. 2, s. 159–169. ISSN 0038092X. Dostupné z DOI: 10.1016/j.solener.2004.04.017.
6. LEFÈVRE, M.; OUMBE, A.; BLANC, P.; ESPINAR, B.; GSCHWIND, B.; QU, Z.; WALD, L.; SCHROEDTER-HOMSCHEIDT, M.; HOYER-KLICK, C.; AROLA, A.; BENEDETTI, A.; KAISER, J. W. a MORCRETTE, J.-J. McClear: a new model estimating downwelling solar radiation at ground level in clear-sky conditions. *Atmospheric Measurement Techniques*. 2013, roč. 6, č. 9, s. 2403–2418. ISSN 1867-8548. Dostupné z DOI: 10.5194/amt-6-2403-2013.

7. MUELLER, R. W.; DAGESTAD, K. F.; INEICHEN, P.; SCHROEDTER-HOMSCHEIDT, M.; CROS, S.; DUMORTIER, D.; KUHLEMANN, R.; OLSETH, J. A.; PIERNAVIEJA, G.; REISE, C.; WALD, L. a HEINEMANN, D. Rethinking satellite-based solar irradiance modelling: The SOLIS clear-sky module. *Remote Sensing of Environment*. 2004, roč. 91, č. 2, s. 160–174. ISSN 00344257. Dostupné z DOI: 10.1016/j.rse.2004.02.009.
8. SENGUPTA, M.; HABTE, A; KURTZ, S; DOBOS, A; WILBERT, S.; LORENZ, E; STOFFEL, T; RENNÉ, D; MYERS, D; WILCOX, S; BLANC, P. a PEREZ, R. *Best Practices Handbook for the Collection and Use of Solar Resource Data for Solar Energy Applications*. 2015. Tech. spr., NREL/TP-5D00-63112.
9. INEICHEN, P. A broadband simplified version of the Solis clear sky model. *Solar Energy*. 2008, roč. 82, č. 8, s. 758–762. ISSN 0038092X. Dostupné z DOI: 10.1016/j.solener.2008.02.009.
10. BADESCU, Viorel; GUEYMARD, Christian A.; CHEVAL, Sorin; OPREA, Cristian; BACIU, Madalina; DUMITRESCU, Alexandru; IACOBESCU, Flavius; MILOS, Ioan a RADA, Costel. Accuracy analysis for fifty-four clear-sky solar radiation models using routine hourly global irradiance measurements in Romania. *Renewable Energy*. 2013, roč. 55, s. 85–103. ISSN 0960-1481. Dostupné z DOI: 10.1016/J.RENENE.2012.11.037.
11. INEICHEN, Pierre. Comparison of eight clear sky broadband models against 16 independent data banks. *Solar Energy*. 2006, roč. 80, č. 4, s. 468–478. ISSN 0038-092X. Dostupné z DOI: 10.1016/J.SOLENER.2005.04.018.
12. POLO, Jesús a PEREZ, Richard. Solar Radiation Modeling from Satellite Imagery. *Green Energy and Technology*. 2019, s. 183–197. ISSN 18653537. Dostupné z DOI: 10.1007/978-3-319-97484-2\_6.
13. CHOI, Yosoon; SUH, Jangwon a KIM, Sung Min. GIS-based solar radiation mapping, site evaluation, and potential assessment: A review. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2019, roč. 9, č. 9. ISSN 20763417. Dostupné z DOI: 10.3390/APP9091960.
14. HOFIERKA, J.; GALLAY, M.; KANUK, J.; ŠUPINSKÝ, J. a ŠAŠAK, J. High-resolution urban greenery mapping for micro-climate modelling based on 3D city models. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*. 2017, roč. 42, č. 4W7, s. 7–12. ISSN 16821750. Dostupné z DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-4-W7-7-2017.
15. BREMER, M.; MAYR, A.; WICHMANN, V.; SCHMIDTNER, K. a RUTZINGER, M. A new multi-scale 3D-GIS-approach for the assessment and dissemination of solar income of digital city models. *Computers, Environment and Urban Systems*. 2016, roč. 57, s. 144–154. ISSN 01989715. Dostupné z DOI: 10.1016/j.compenvurbsys.2016.02.007.
16. LIANG, J.; GONG, J.; ZHOU, J.; IBRAHIM, A. N. a LI, M. An open-source 3D solar radiation model integrated with a 3D Geographic Information System. *Environmental Modelling and Software*. 2015, roč. 64, s. 94–101. ISSN 13648152. Dostupné z DOI: 10.1016/j.envsoft.2014.11.019.
17. ERDÉLYI, Róbert; WANG, Yimin; GUO, Weisi; HANNA, Edward a COLANTUONO, Giuseppe. Three-dimensional SOlar RAdiation Model (SORAM) and its application to 3-D urban planning. *Solar Energy*. 2014, roč. 101, s. 63–73. ISSN 0038-092X. Dostupné z DOI: 10.1016/J.SOLENER.2013.12.023.
18. LIANG, Jianming; GONG, Jianhua; XIE, Xiuping a SUN, Jun. Solar3D: An open-source tool for estimating solar radiation in urban environments. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2020, roč. 9, č. 9. ISSN 22209964. Dostupné z DOI: 10.3390/IJGI9090524.
19. FAŠANG, Jakub. *Využitie RPAS technológie na dokumentáciu pamiatkového objektu Diplomová práca*. *Využitie RPAS technológie na dokumentáciu pamiatkového objektu Diplomová práca*. 2020. Diz. pr. Stavebná fakulta Slovenskej technickej univerzity v Bratislave.
20. FU, Pinde a RICH, Paul M. Design and Implementation of the Solar Analyst: an ArcView Extension for Modeling Solar Radiation at Landscape Scales. In: *Proceedings of the 19th Annual ESRI User Conference*. 1999. Dostupné tiež z: <https://proceedings.esri.com/library/userconf/proc99/proceed/papers/pap867/p867.htm>.
21. HOFIERKA, J.; ŠÚRI, M. a MAREČKA, M. The solar radiation model for Open source GIS: implementation and applications. In: *Proceedings of the Open source GIS - GRASS users conference 2002*. Trento, 2002.