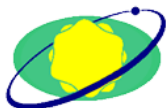


# Výpočet potenciálnej solárnej radiácie v oblasti Vysokých Tatier na základe dát z leteckého laserového skenovania

**Veronika Szabó Jakócs, Filip Pružinec, Renata Ďuračiová**

**Katedra geodetických základov  
Stavebná fakulta**

**Slovenská technická univerzita v Bratislave**



**STU  
S v F**

# Solárna radiácia

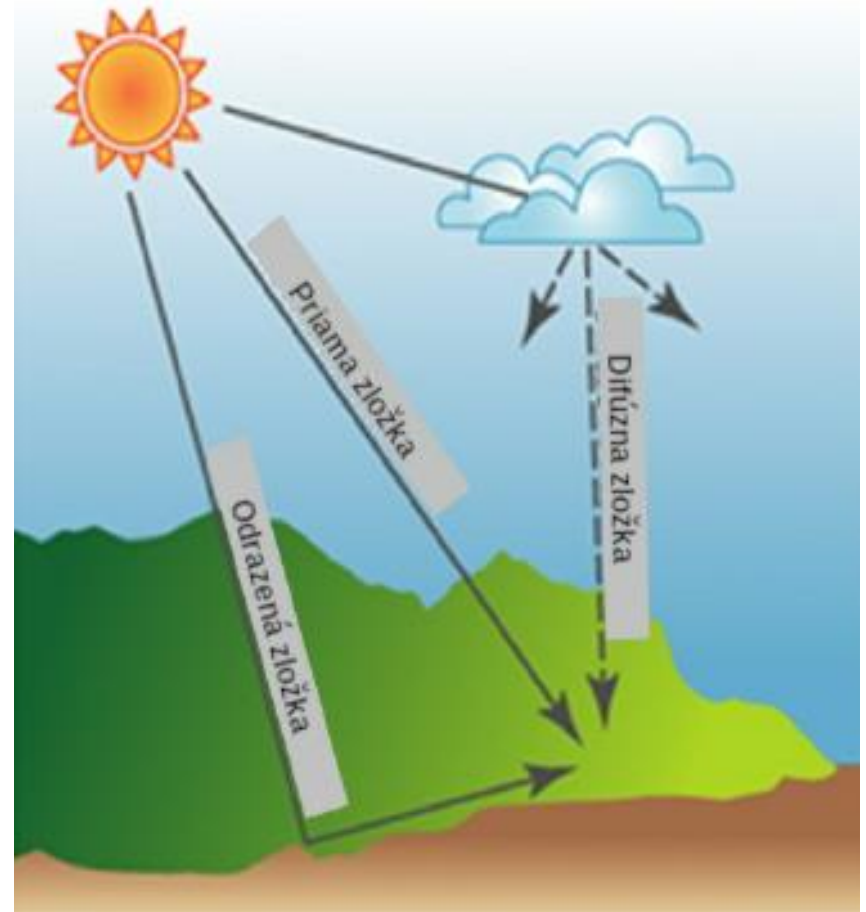
- množstvo slnečnej energie dopadajúcej na jednotkovú plochu
  - v určitom časovom momente (**oslnenie**,  $\text{W}/\text{m}^2$ ),
  - alebo za určitý časový úsek (**úhrn žiarenia**,  $\text{Wh}/\text{m}^2$ )
- **Slnečná konštanta ( $I_0$ )** predstavuje priemerné množstvo slnečnej energie dopadajúcej na plochu kolmú na smer dopadajúcich lúčov a nachádzajúcu sa v strednej vzdialenosti Zeme od Slnka.

# Zložky solárnej radiácie

$$G_{ic} = B_{ic} + D_{ic} + R_{ic}$$

Globálna radiácia  
na všeobecnej rovine  $G_{ic}$  :

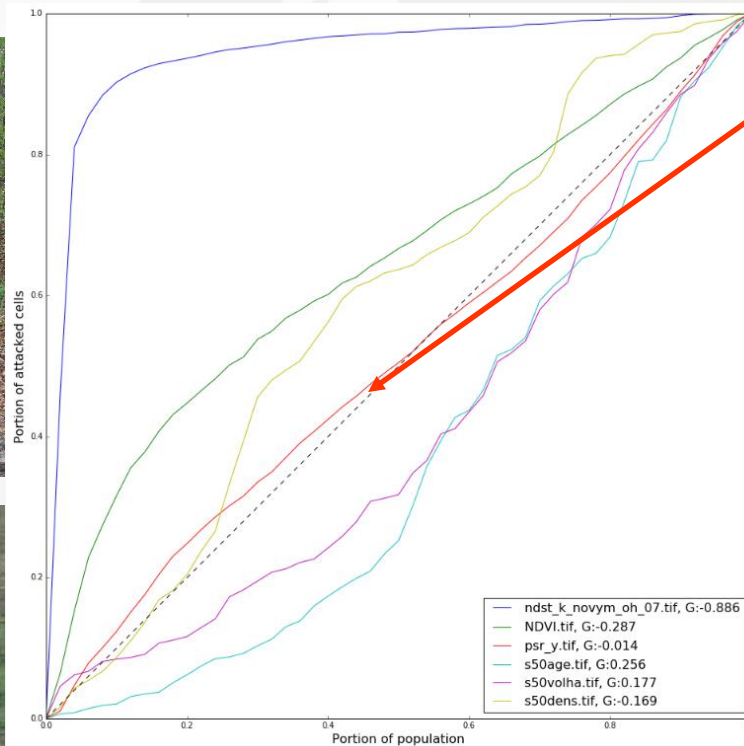
- priama zložka  $B_{ic}$
- difúzna zložka  $D_{ic}$
- odrazená zložka  $R_{ic}$



# Motivácia

modelovanie  
poškodenia lesa

vstupné faktory  
(vzdialenosť, sklon  
svahu, aspekt, vek,  
**solárna radiácia, ...**)



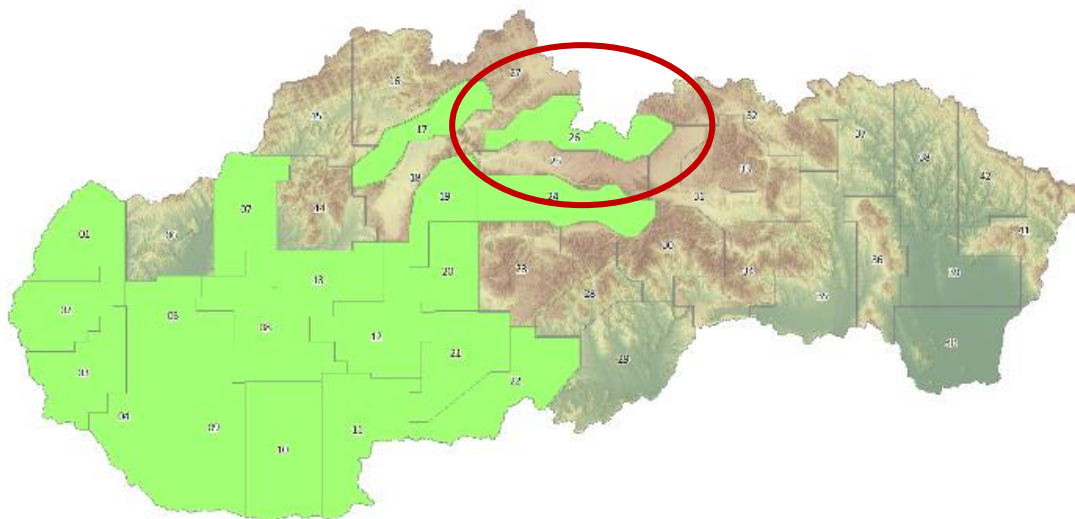
Žuračiová et al. A bark beetle infestation predictive model based on satellite data in the frame of decision support system TANABBO, iForest Biogeosciences and Forestry, 2020, vol. 13, pp. 215–223.

# Motivácia

**ÚGKK SR:**

**LLS - mračná bodov – DMR 5.0 – DMP 1.0**

- hustota min. **5 bodov /1 m<sup>2</sup>**
- výšková presnosť: **mh ≤ 0,15 m**
- polohová presnosť: **mP ≤ 0,30 m**



*Zdroj produktov LLS:*

**ÚGKK SR**

**GeoKARTO 2020, Košice 10.9.2020 – 11.9.2020**

# Motivácia ↔ Súčasný stav

1. Webové služby, poskytovanie výstupných dát
  - [Global Solar Atlas](#); [SolarGIS](#); [Meteonorm](#); [PVGIS](#)
2. Stand-alone aplikácie
  - otvorené - [SURFSUN3D](#), ďalej sa nevyvíja
  - proprietárne - postup opísaný v [Bremer et al. \(2016\)](#) (vlastný kód nepublikovaný),
  - ...
3. Nástroje integrované do existujúcich GIS softvérov
  - a. proprietárne - [Solar Radiation toolset](#) (ArcGIS, ESRI), rastrové výškové modely
  - b. otvorené - [r.sun](#) (GRASS GIS); v.sun, V3.sun (cieľ - integrácia do GRASS GIS)

# Metódy a princípy

## 1. Výpočet pomocou dostupných nástrojov a dát

- **r.sun** – GRASS GIS / QGIS
- **Solar Radiation toolset** – ArcGIS







Dáta: SRTM, lidarové dáta ÚGKK SR

# Metódy a princípy

## ArcGIS / **Solar Radiation toolset**

-  Point Solar Radiation (PSR): v zadanej bunke rastra
  -  Area Solar Radiation (ASR): na vymedzenej oblasti
  -  vstupné parametre: DMR zemepisná šírka
  -  výstupy: mapa priameho a difúzneho žiarenia, mapa globálnej solárnej radiácie
- **výpočet vzťahnutý k ťažisku nezverejnený model výpočtu sol. rad.**

## GRASS GIS / **r.sun**

-  2 režimy
    -  pre zadaný časový okamih
    -  pre zadaný deň
  -  jasná obloha, aj oblačnosť (raster, 0-1)
  -  vstupné parametre: DMR, poradové číslo dňa v roku, časový okamih
  -  výstupy: všetky 3 komponenty solárnej radiácie, dĺžka osvetlenia
- + **známy model ESRA**  
+ **open source**



# Metódy a princípy

## 2. Analýza dát a výsledkov

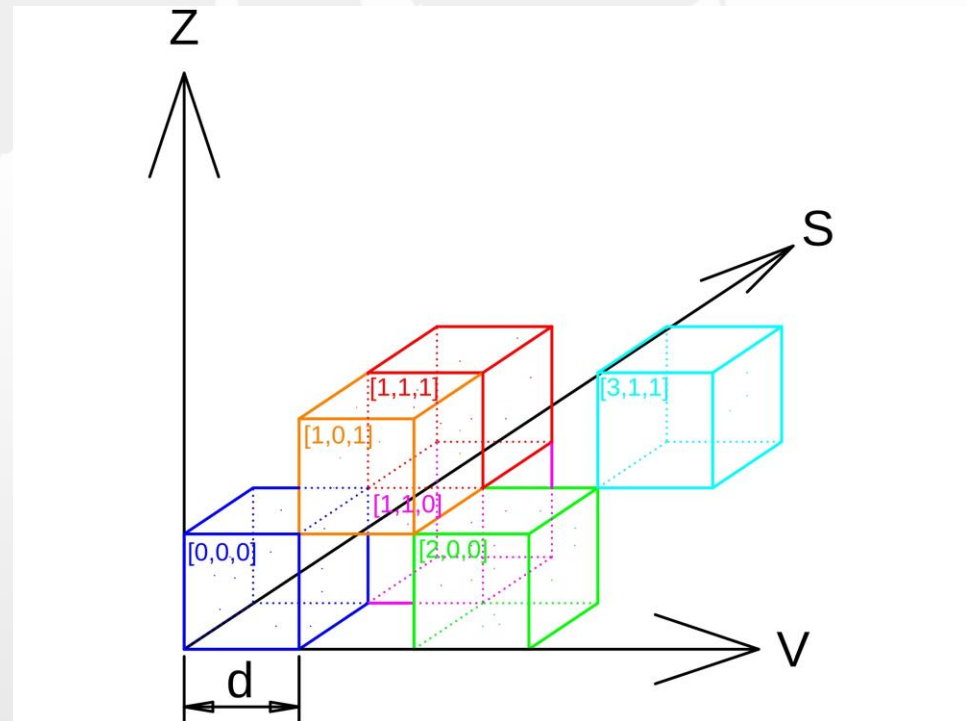
- validácia (Studentov t-test, bivariačná analýza, ROC krivka / AUC)
- modely s rôznym rozlíšením rastra (2 m, 5 m, 10 m, 30 m)
- súbor náhodne vygenerovaných bodov
- porovnanie a štatistická analýza

# Metódy a princípy

## 3. Vývoj a implementácia nového nástroja

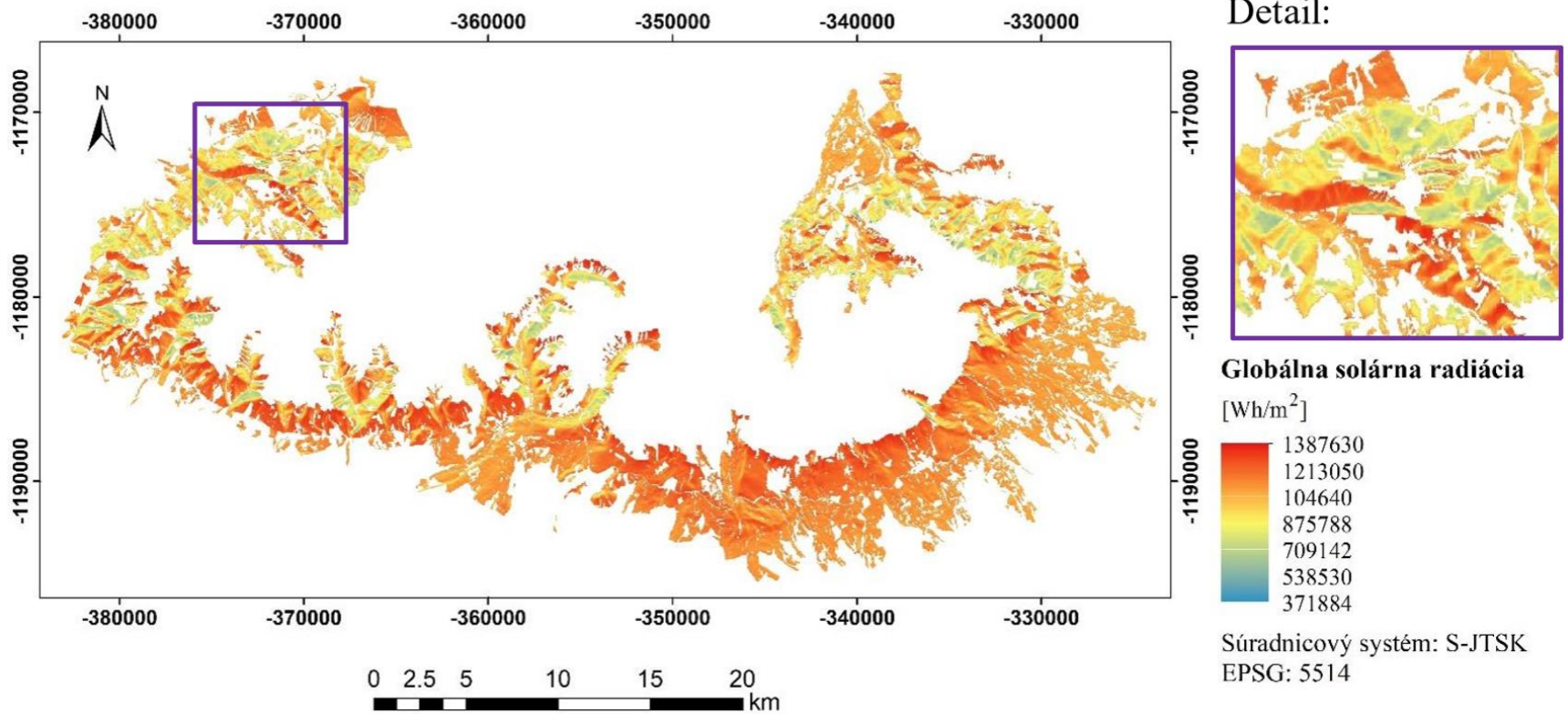
- na výpočet solárnej radiácie v 3D

- realizácia výpočtu vo voxelovom gride
- horizontálny systém
- mračno bodov a veľkosť voxela



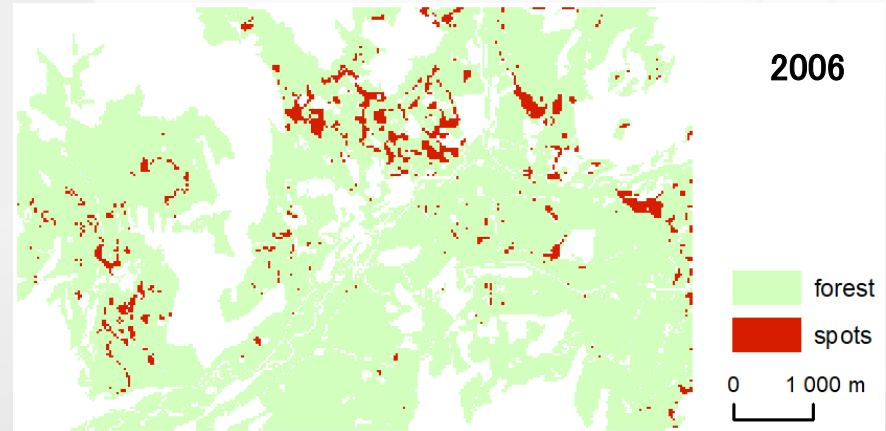
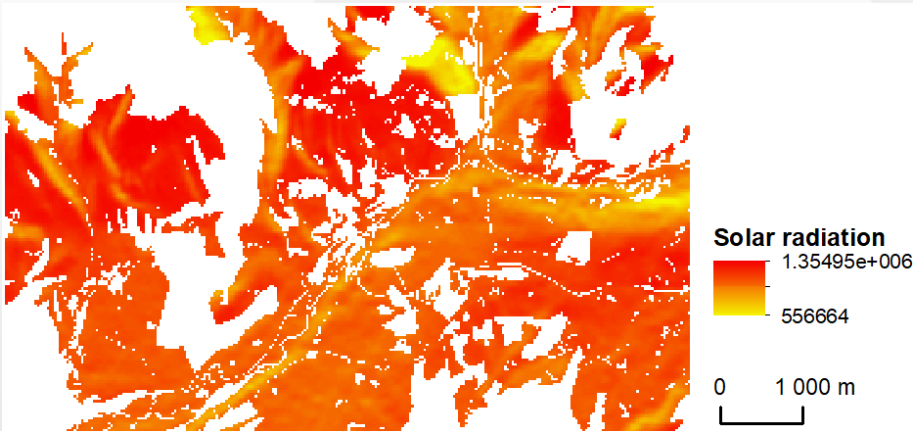
# Výpočet solárnej radiácie

- SRTM - oblasť Vysokých Tatier
- rozlíšenie rastra 30 m
- ArcGIS 10.5 – Area Solar Radiation → ročná globálna solárna radiácia



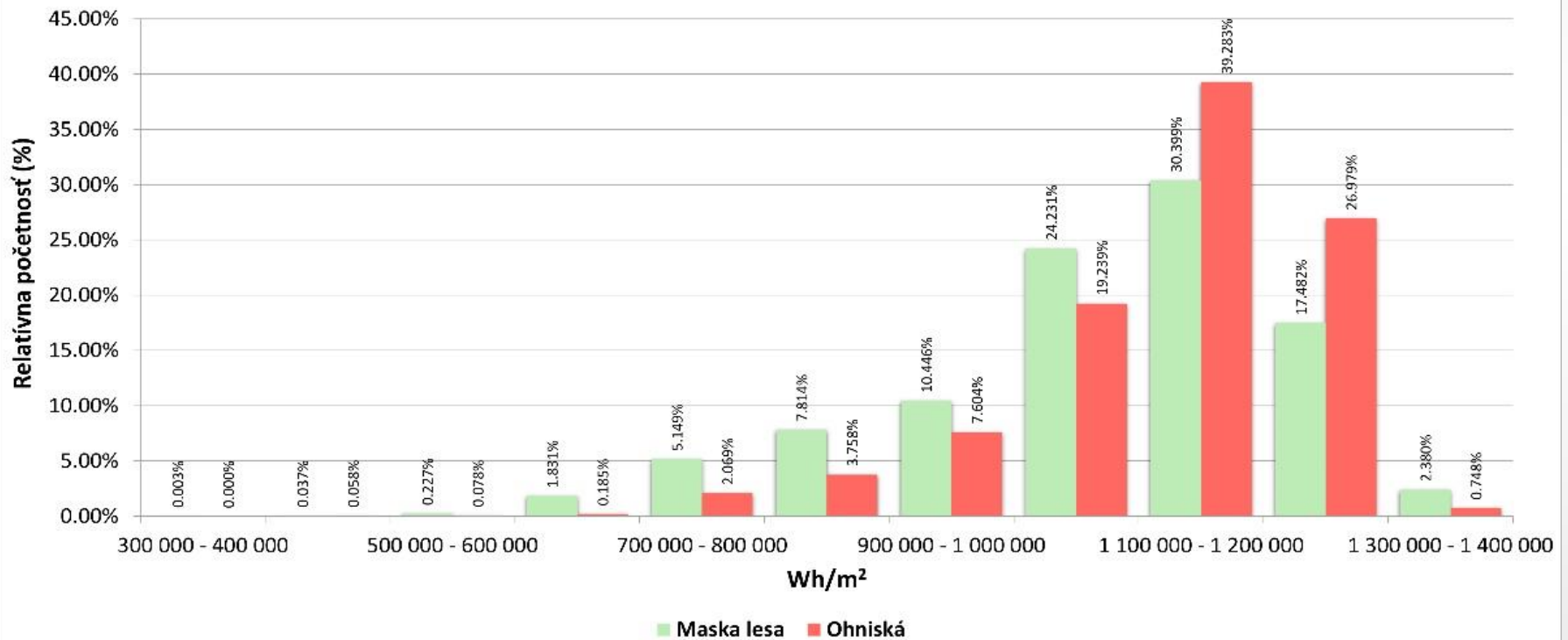
# Analýza a validácia

- Štatistická analýza – posúdenie vplyvu solárnej radiácie na šírenie lykožrúta smrekového
  - ~ 420 000 buniek reprezentujúcich les
  - ~ 4000 buniek reprezentujúcich ohniská lykožrúta smrekového
  - obdobie rokov 2004 - 2014



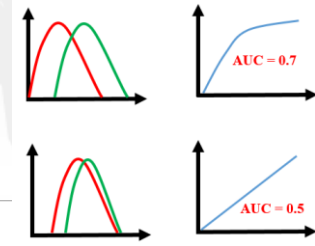
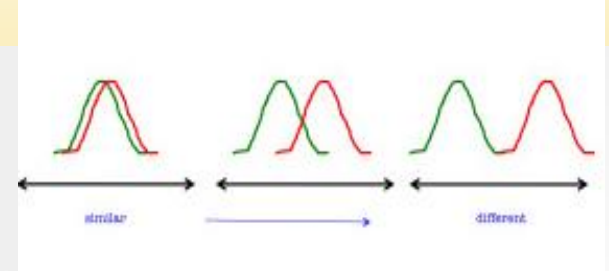
# Analýza a validácia

## Globálna solárna radiácia z roku 2006

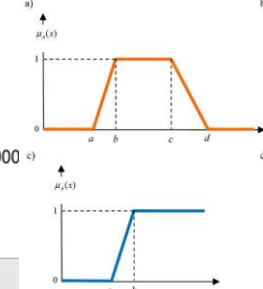
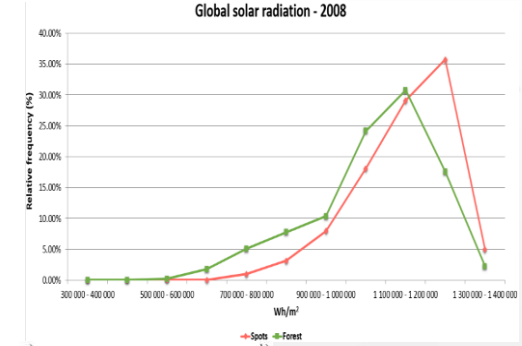
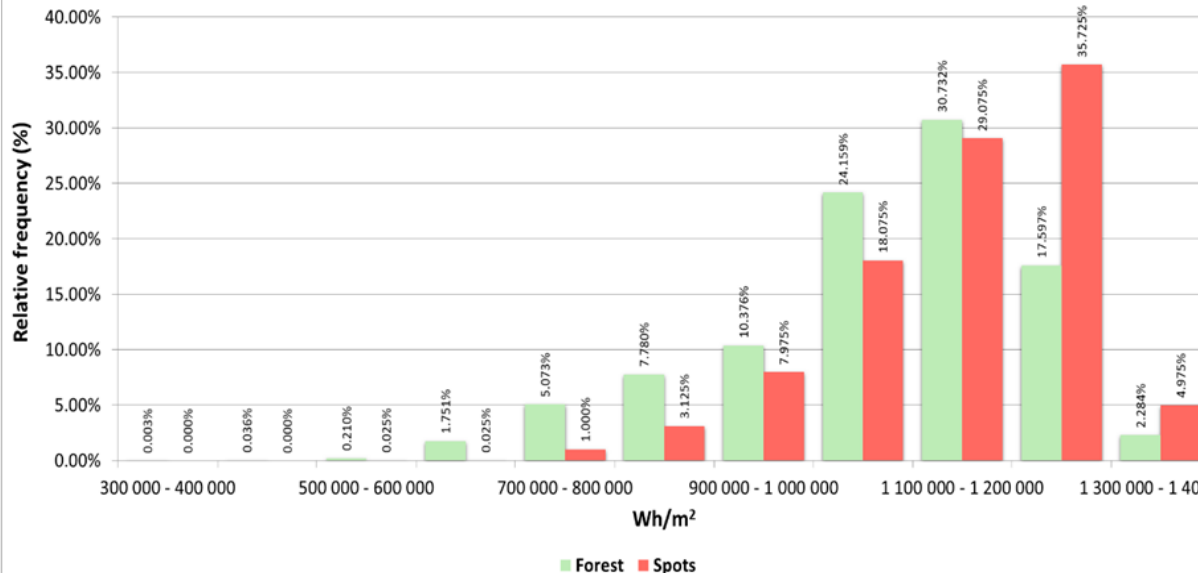


# Analýza a validácia

- Studentov t-test,  $p$ -value
- Bivariačná analýza
- ROC krivka / AUC
- Fuzzy množiny



Global solar radiation - 2008



# Analýza a validácia

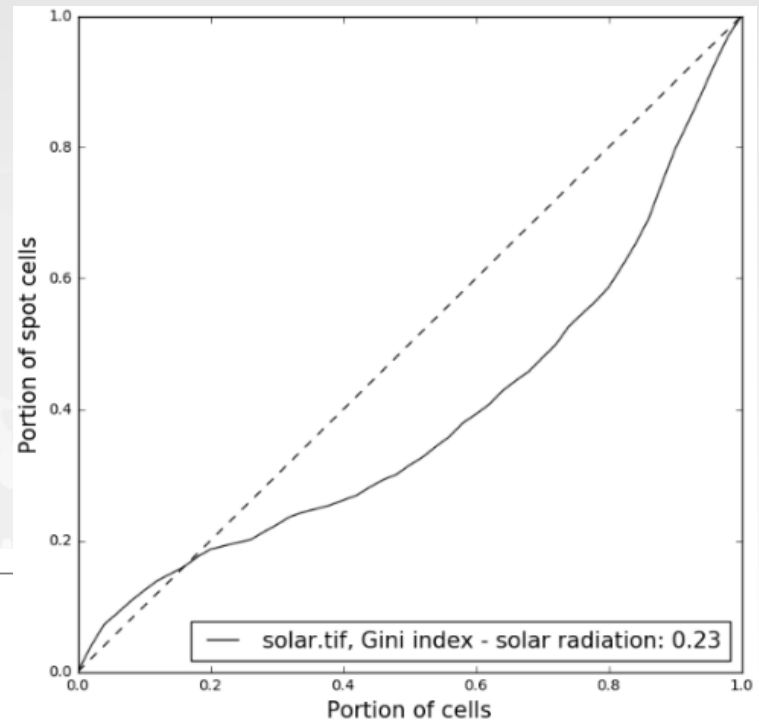
- kvantifikácia vplyvu solárnej radiácie na šírenie lykožrúta smrekového

## Methods

t-test  
Bivariate analysis  
Logistic regression  
Gini index  
Fuzzy set theory

## Results

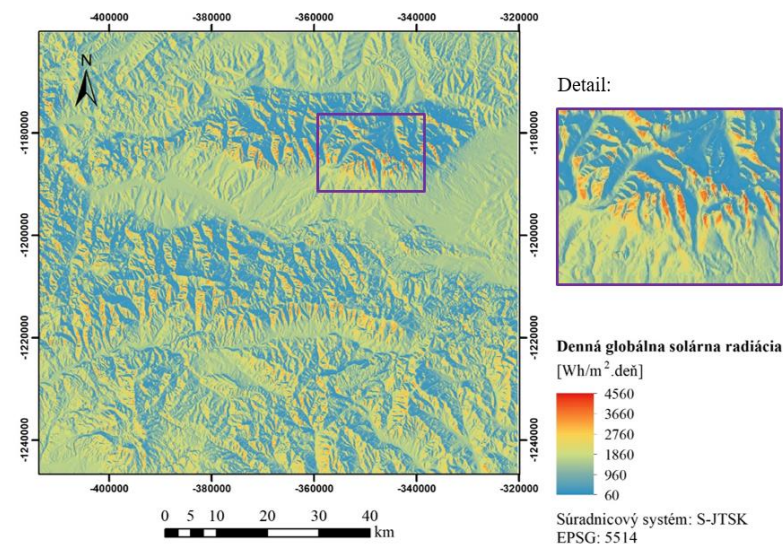
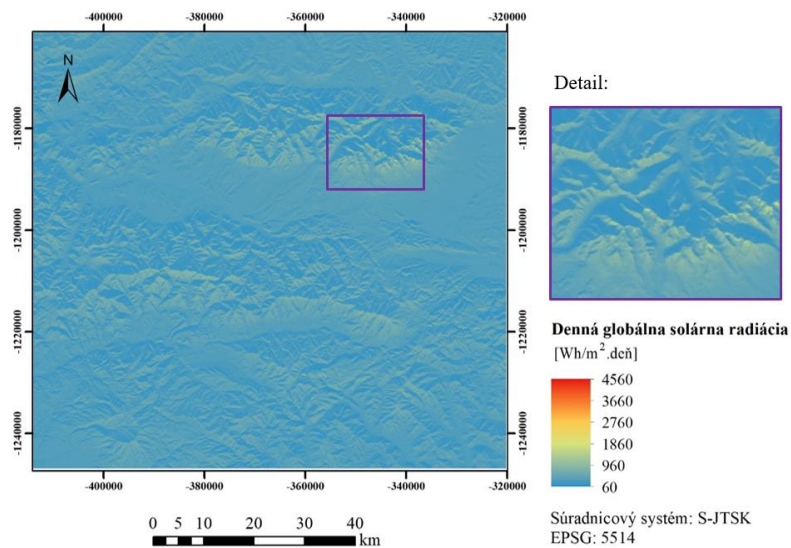
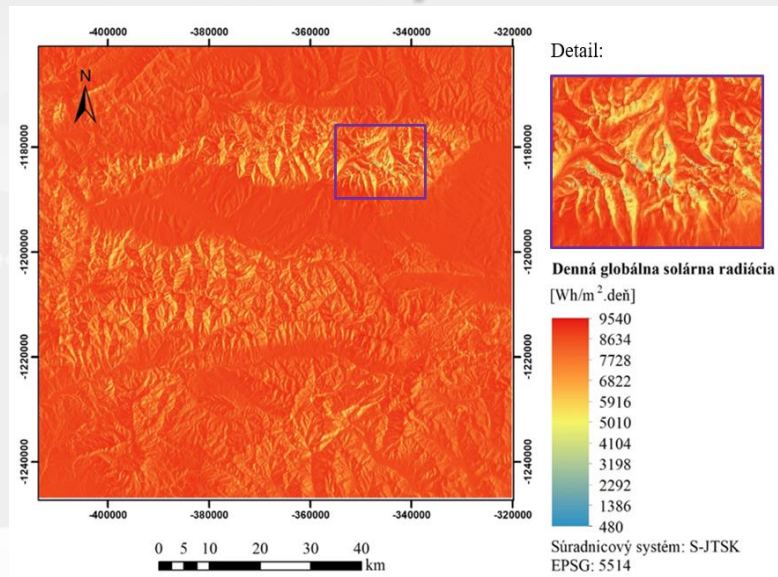
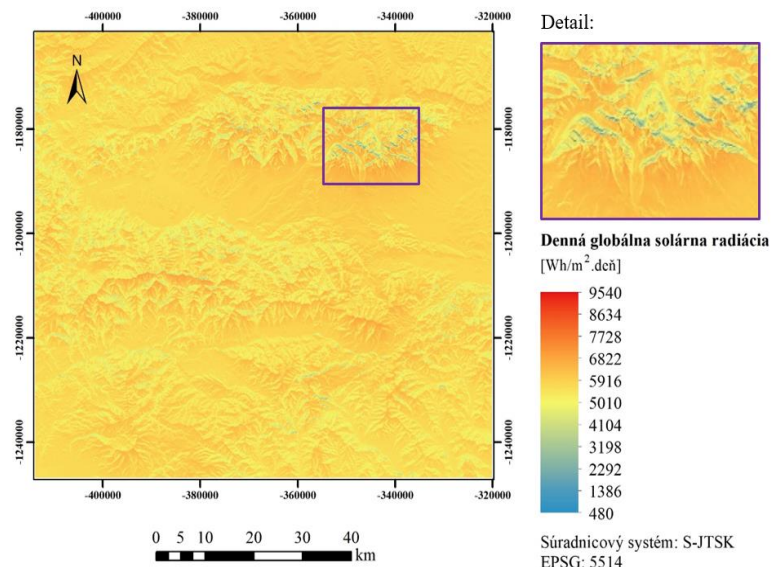
$p = 0$   
 $w_{BS} = 0.11$   
 $w_{RS} = 0.20$   
 $w_{GS} = 0.13, G = 0.23$   
*Large: fl = 5, fl = 1 150 000*



Ďuračiová, R. – Jakóbcsová, V. Determination of the effect of solar radiation in spatial predictive modelling of the bark beetle occurrence using several mathematical methods. **Advances and Trends in Geodesy, Cartography and Geoinformatics II, 2020, pp. 177-183.**

# Solar Radiation Tool vs. r.sun (30 m, SRTM)

2. jún

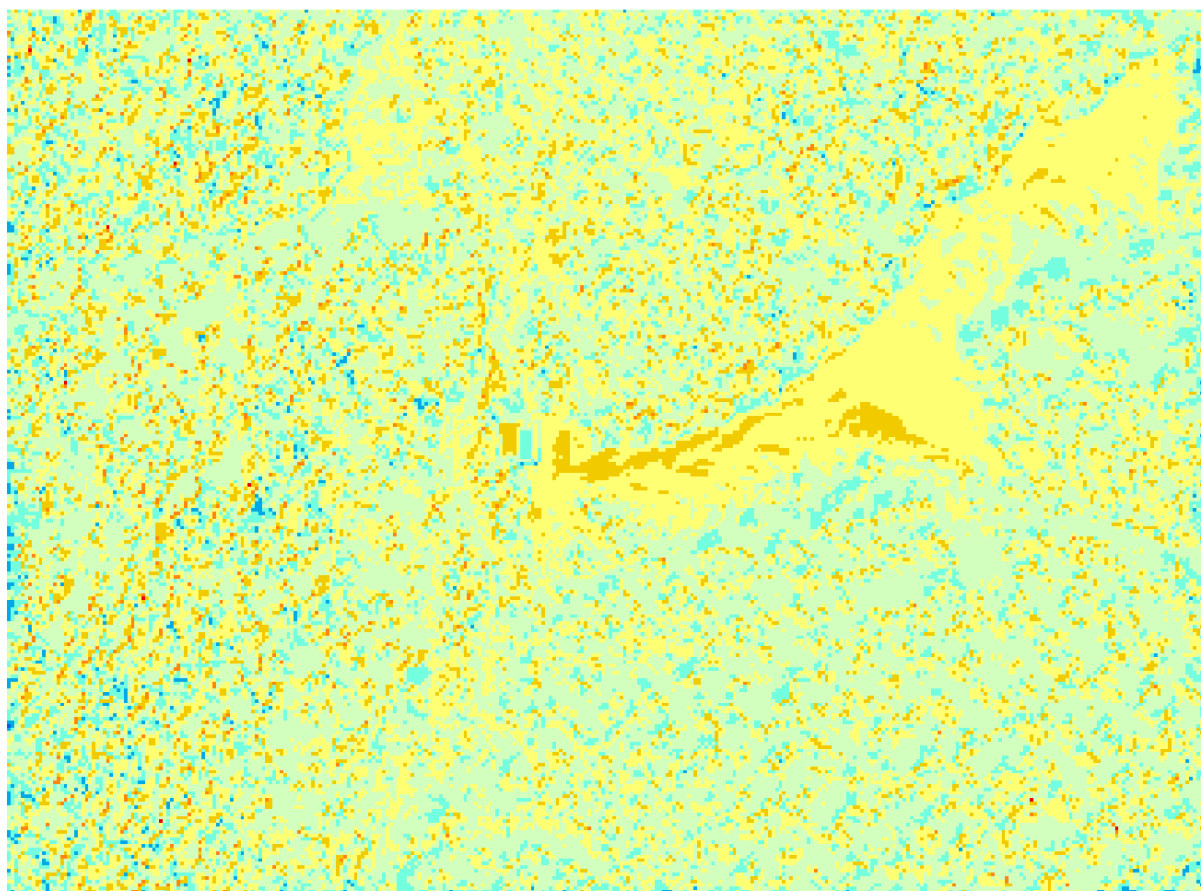


2. december

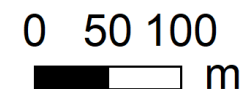
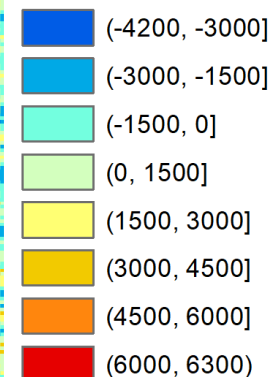


# r.sun vs SolarRadiation Tool

- Suchá dolina, Západné Tatry,
- DMP 1.0



**RS-AS (Wh/m<sup>2</sup>)**



# Solárna radiácia

dáta ÚGKK SR – rozlíšenie rastra 2 m, 5 m, 10 m vs 30 m

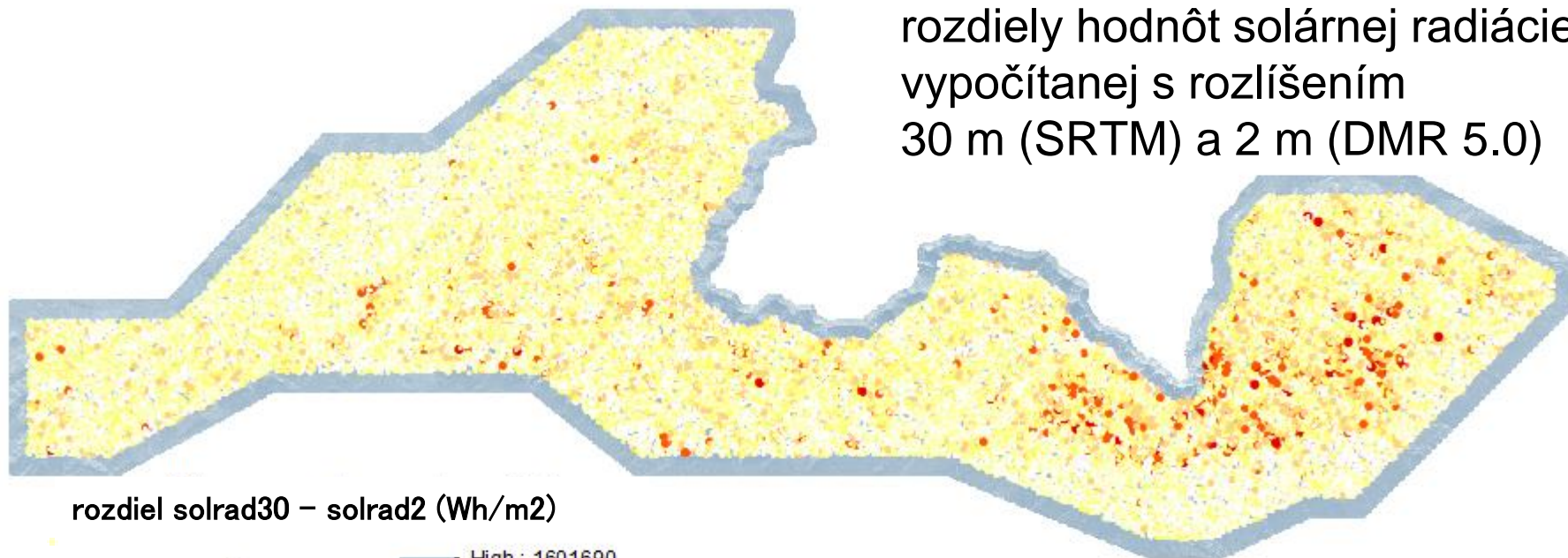
Rozdiel - rozlíšenie (m)	Maximum (m)	Stredná hodnota (m)	Štandardná odchýlka (m)
30 - 2	1271177	88910	101997
10 - 2	1097623	51169	58402
5 - 2	961113	43240	45243

- 75 071 náhodne vygenerovaných bodov (1 bod na 100 m x 100 m, max. 1 bod v bunke rastra 30 m x 30 m - obmedzenie 43 m)
- vylúčená oblasť do 1 km od okraja

# Solárna radiácia

## – rozlíšenie rastra 2 m vs 30 m

rozdiely hodnôt solárnej radiácie  
vypočítanej s rozlíšením  
30 m (SRTM) a 2 m (DMR 5.0)



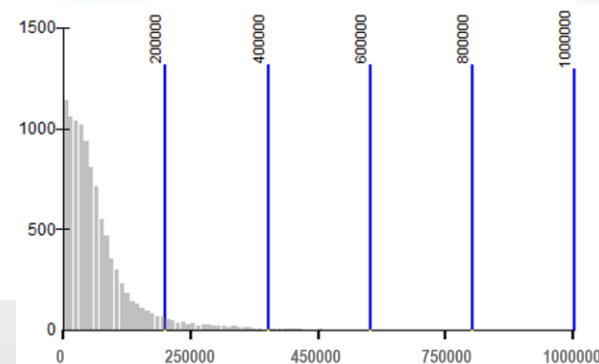
rozdiel solrad30 – solrad2 (Wh/m2)

- < 250 000
- < 500 000
- < 750 000
- < 1 000 000
- > 1 000 000

High: 1601690  
Low: 120

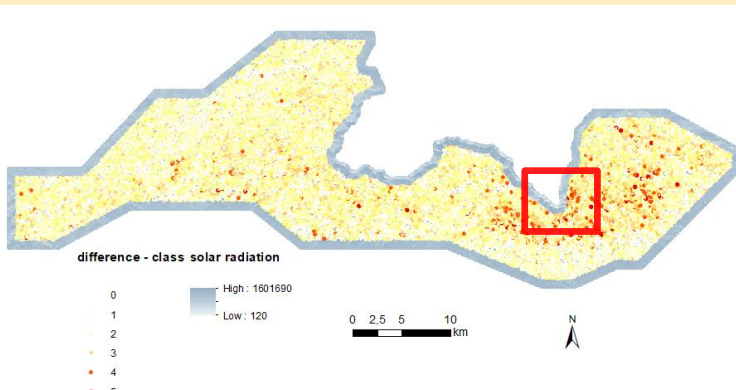
0 2,5 5 10 km

→ najvýraznejšie rozdiely na terénnych hranách a vyšších nadmorských výškach



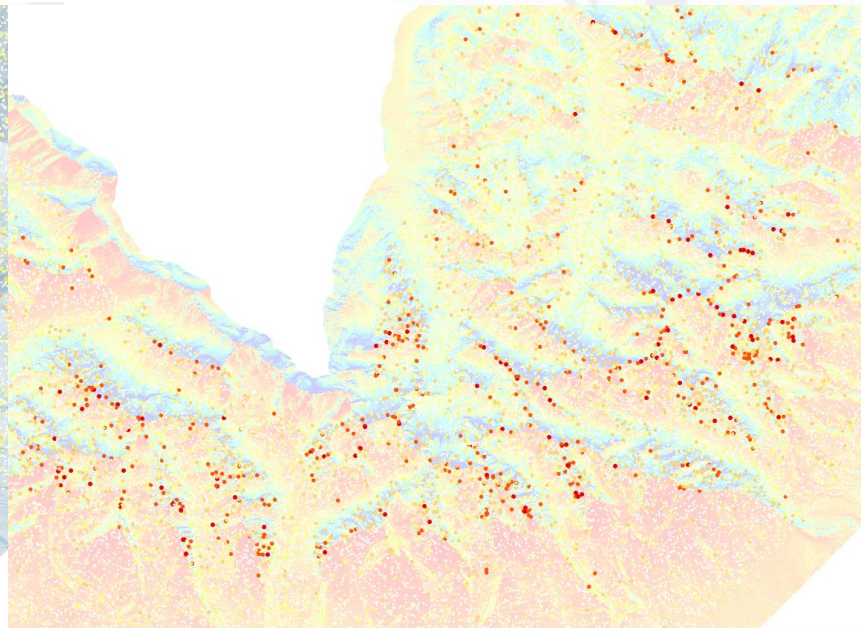
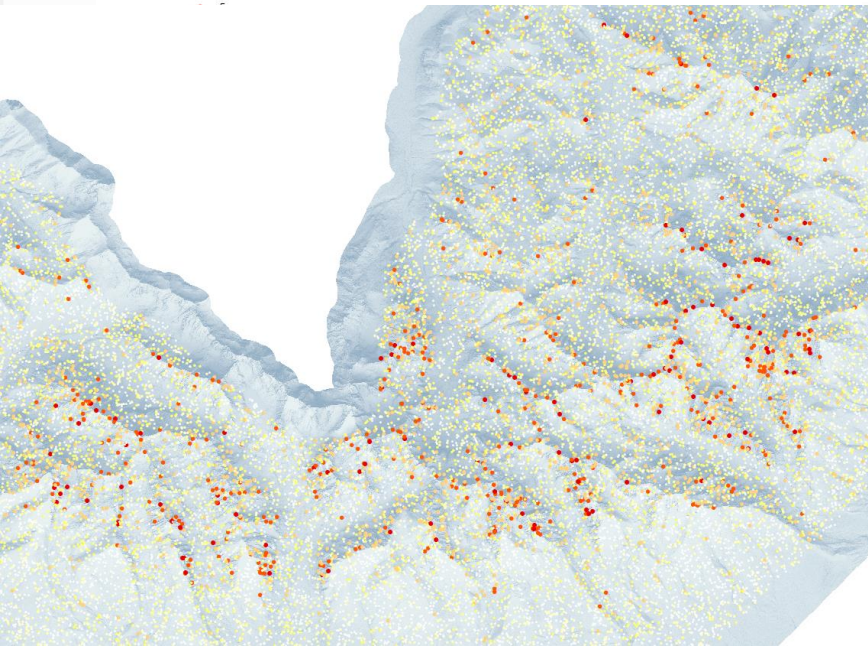
# Solárna radiácia

## – rozlíšenie rastra 2 m vs 30 m



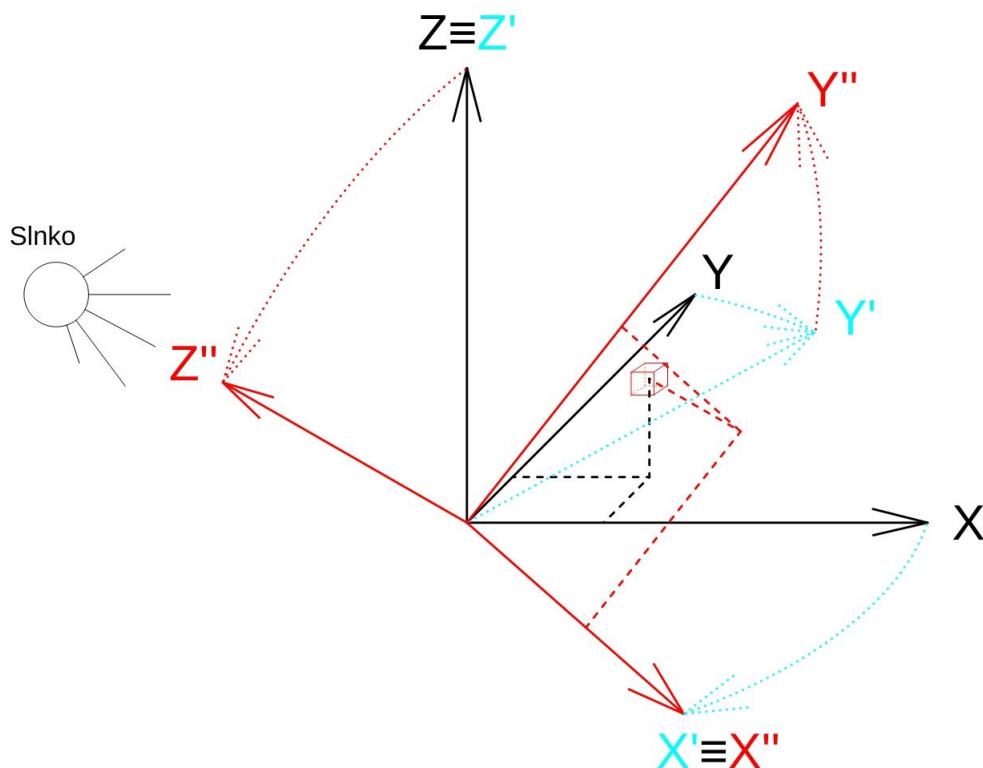
- < 250 000
- < 500 000
- < 750 000
- < 1 000 000
- < 1 250 000

rozdiely hodnôt solárnej radiácie vypočítanej s rozlíšením 30 m (SRTM) a 2 m (DMR 5.0)



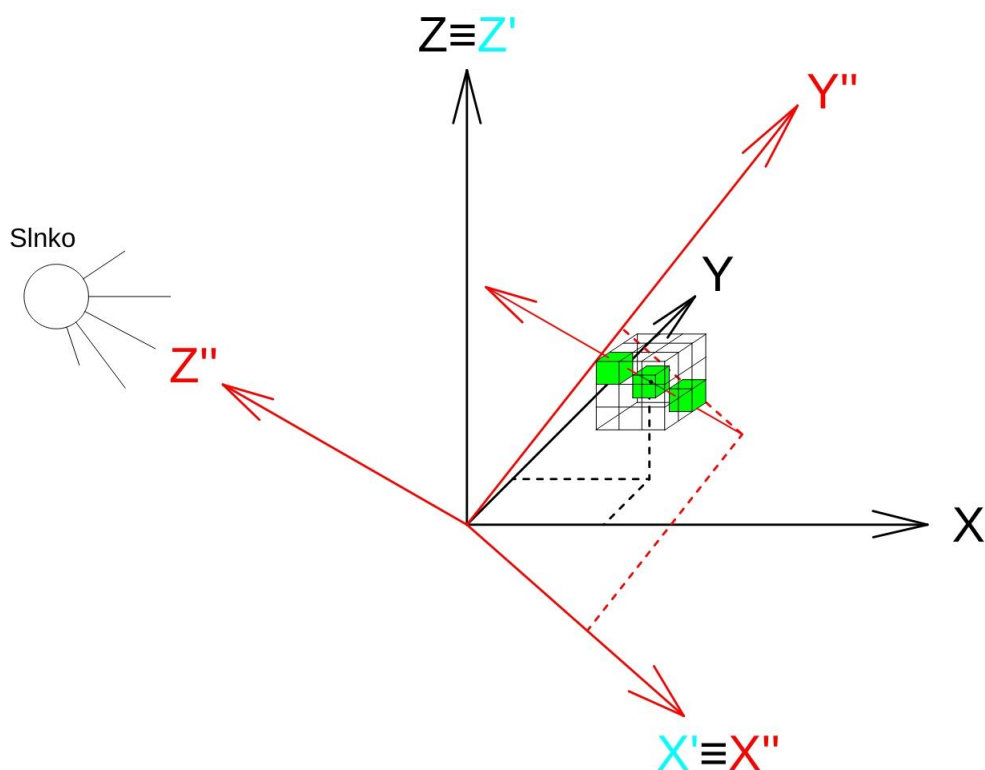
# 3D voxelový prístup - princíp

- na modelovanie objektov so zložitou štruktúrou, napr. vegetácia - stromy



- rotácie okolo dvoch osí o azimut a výškový uhol Slnka
- zaokrúhlenie a zoradenie voxelov podľa Z

# 3D voxelový prístup - princíp



- rotácie okolo dvoch osí o azimut a výškový uhol Slnka
- zaokrúhlenie a zoradenie voxelov podľa Z

# Výpočet solárnej radiácie (priamy komponent)

$$B_c = I_0 \varepsilon \sin v_{\odot} \exp(-0.8662 T_L(AM2) m \delta_R(m))$$

$I_0$  - solárna konštanta

$\varepsilon$  - korekcia zo vzdialenosti Zeme od Slnka

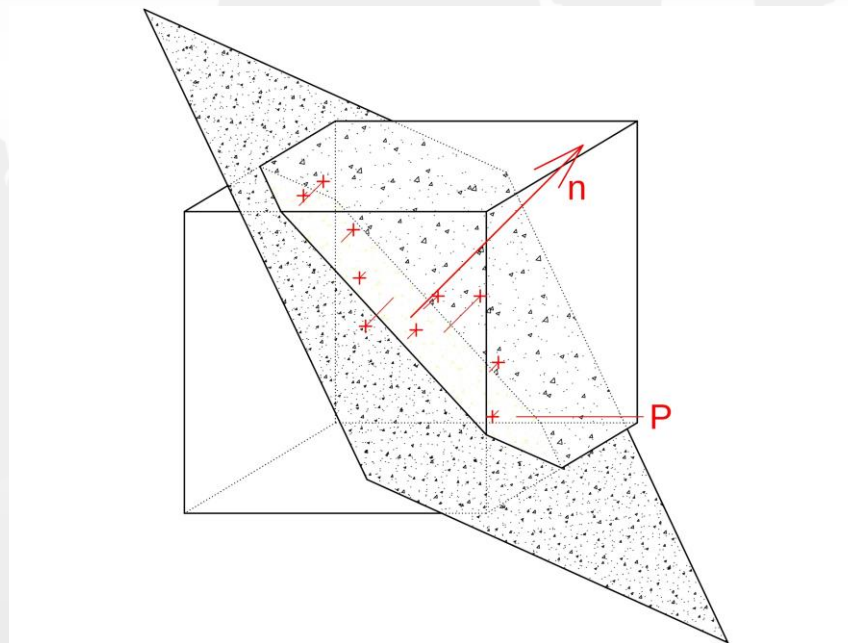
$v$  - výškový uhol Slnka

$\exp(\dots)$  - priepustnosť atmosféry pri jasnej oblohe (závisí od Linkeho súčiniteľa zákalu atmosféry a Rayleighovho rozptylu)

- aplikácia na všeobecnú rovinu pri použití incidenčného uhla

# Incidenčný uhol

- uhol dopadu žiarenia na rovinu
- výpočet regresnej roviny z lokálnych bodov mračna





# Výpočet solárnej radiácie (difúzny komponent)

$$D_c = I_0 \varepsilon T_{rd}(T_L(AM2)) F_d(v_{\odot}, T_L(AM2))$$

$T_{rd}$  - prenosová difúzna funkcia (závisí od Linke)

$F_d$  - uhlová difúzna funkcia (závisí od výškového uhla Slnka a Linke)

$$D_{ic} = D_c \cdot \left[ F(\alpha)(1 - K_b) + \frac{K_b \sin \gamma_{inc}}{\sin v_{\odot}} \right]$$

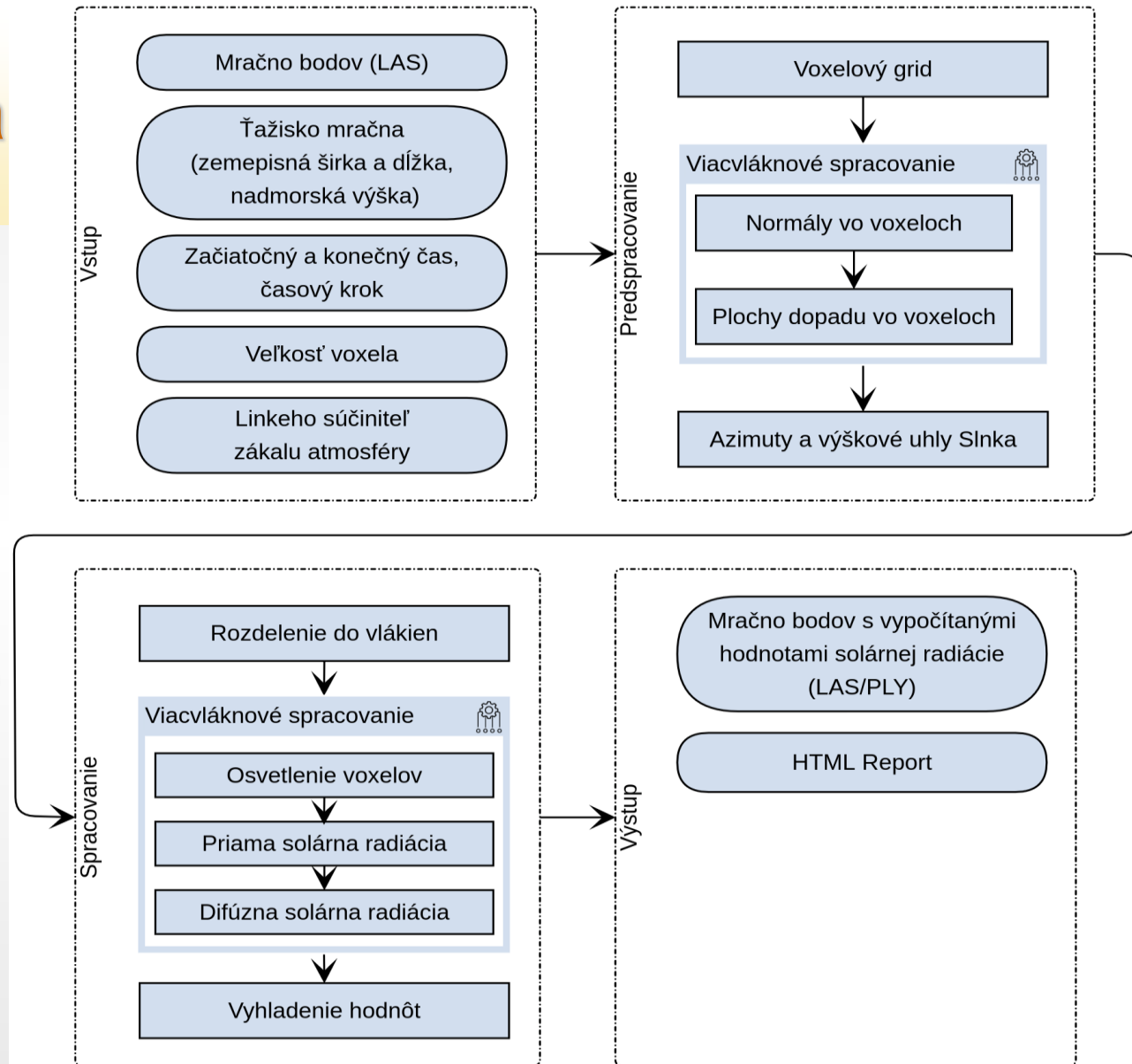
$F(\alpha)$  - distribúcia difúznej radiácie v závislosti od sklonu

$K_b$  - pomer medzi dopadnutou priamou radiáciou a radiáciou pred vstupom do zemskej atmosféry

# Implementácia

- nástroj implementovaný v jazyku Rust
- priama a difúzna zložka
- formáty LAS/PLY

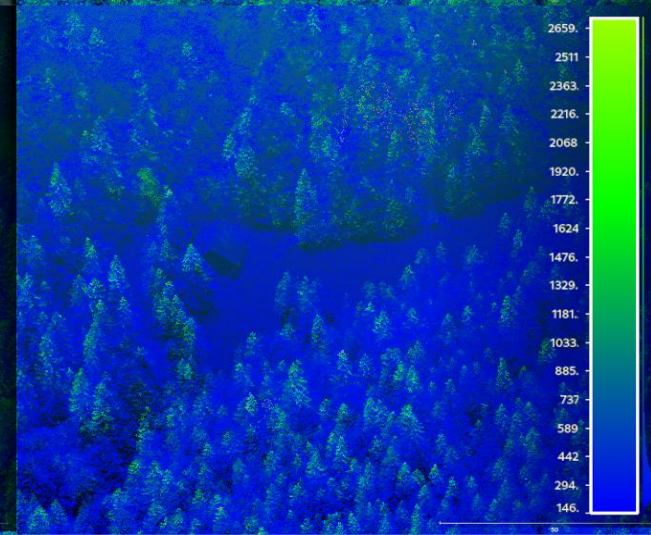
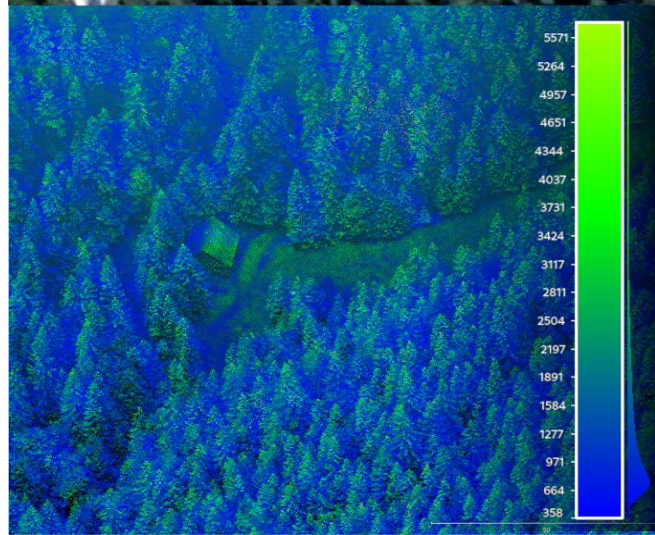
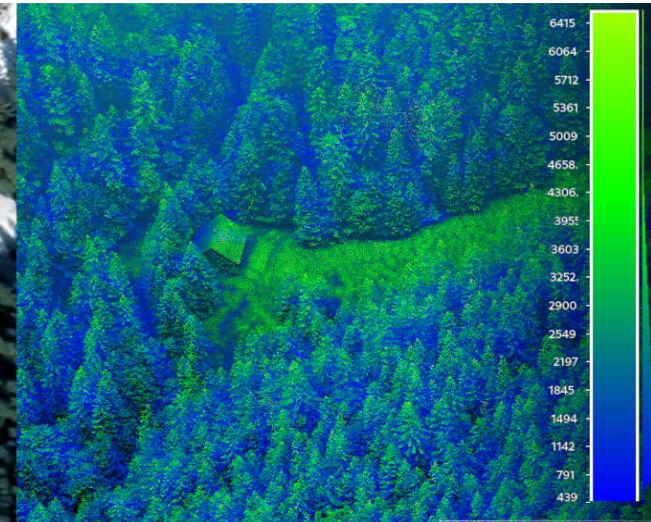
→ dizertačná práca  
Ing. Filipa Pružinca



# Výsledky



- 4-jadrovým procesorom Intel® Core™ i5-4690 a 16 GB RAM
- mračno - LLS GKÚ, 5-18 bodov/m<sup>3</sup>, 750x550m, cca 28 mil. bodov
- denná solárna radiácia 31.7.2019 (vpravo hore), 1.4.2019 (vľavo dole) 1.1.2019 (vpravo dole)
- veľkosť voxela 40cm, Linkeho súčiniteľ' zákalu atmosféry 3
- cca 14 mil. voxelov
- dĺžka výpočtu cca 4 min

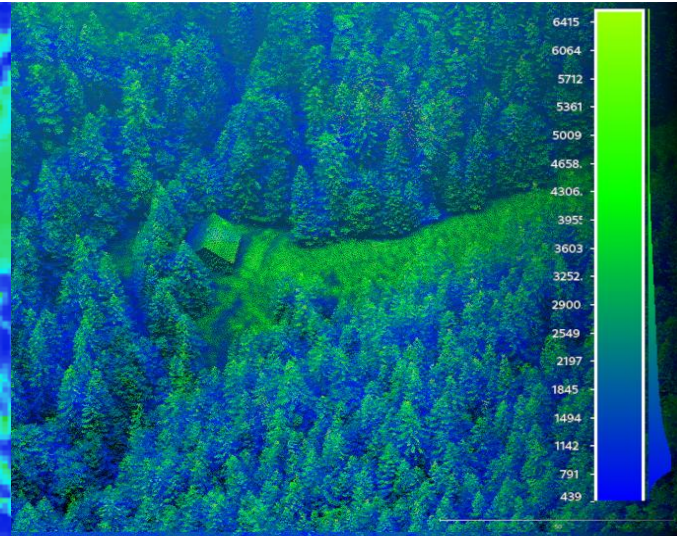
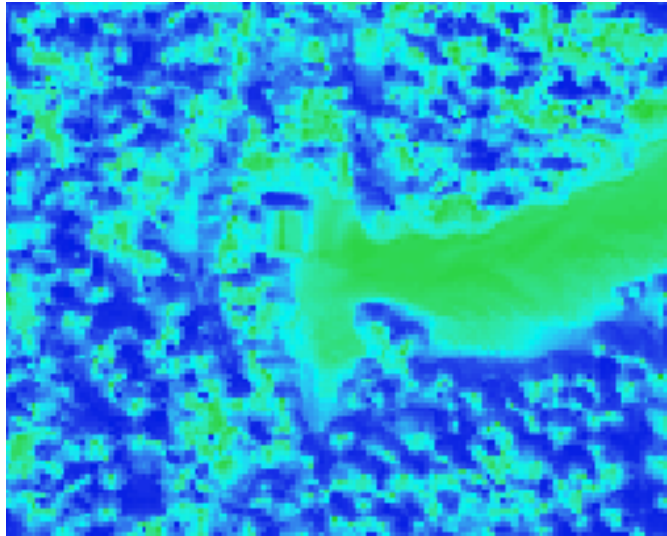


# Porovnanie ArcGIS vs. 3D nástroj

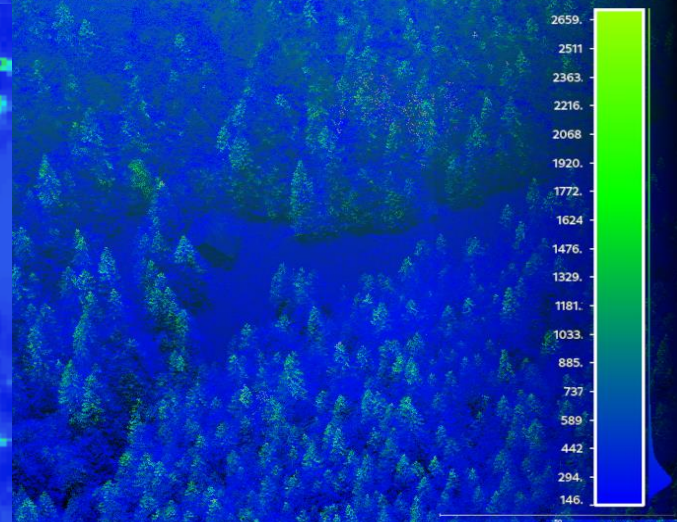
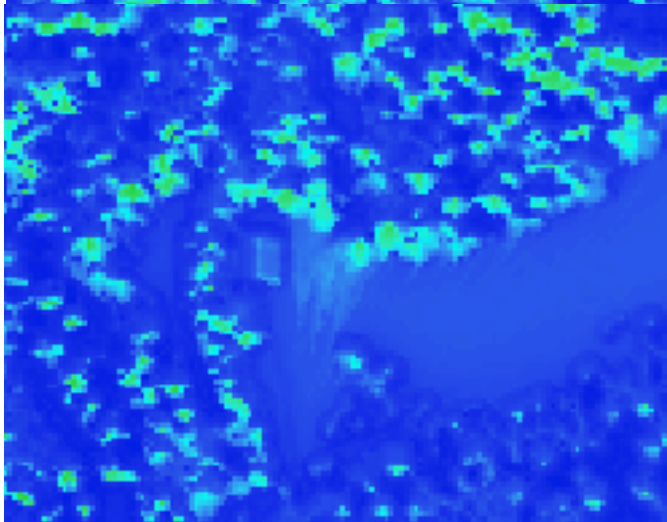
ArcGIS

nový 3D SW nástroj

31.7.



1.1.

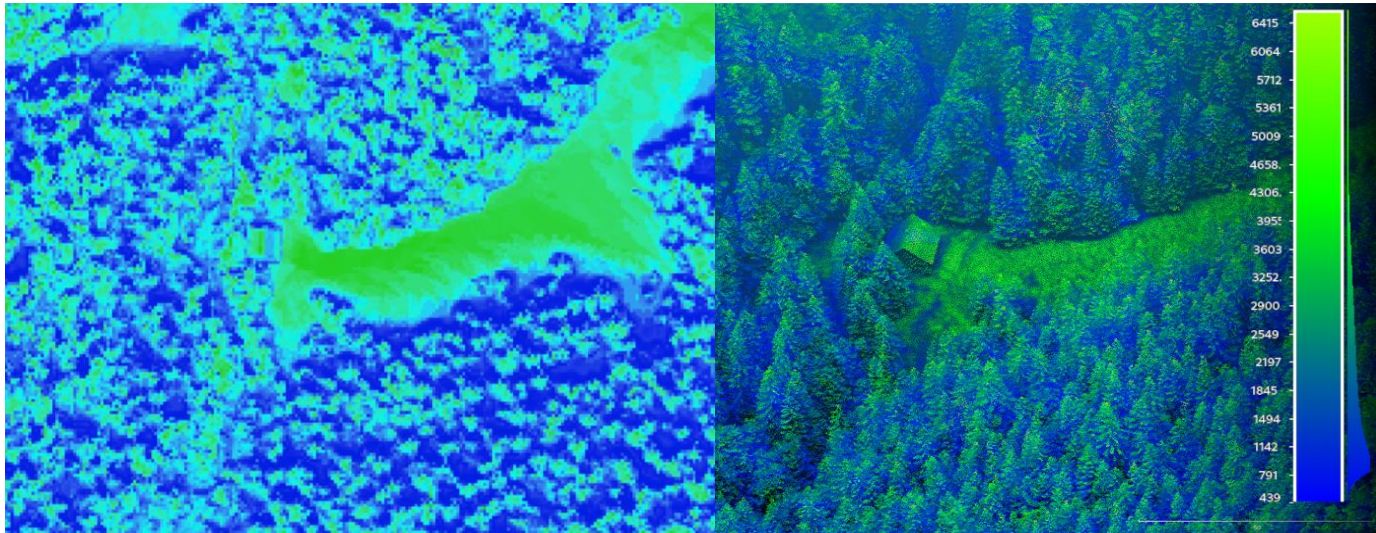


# Porovnanie r.sun vs 3D nástroj

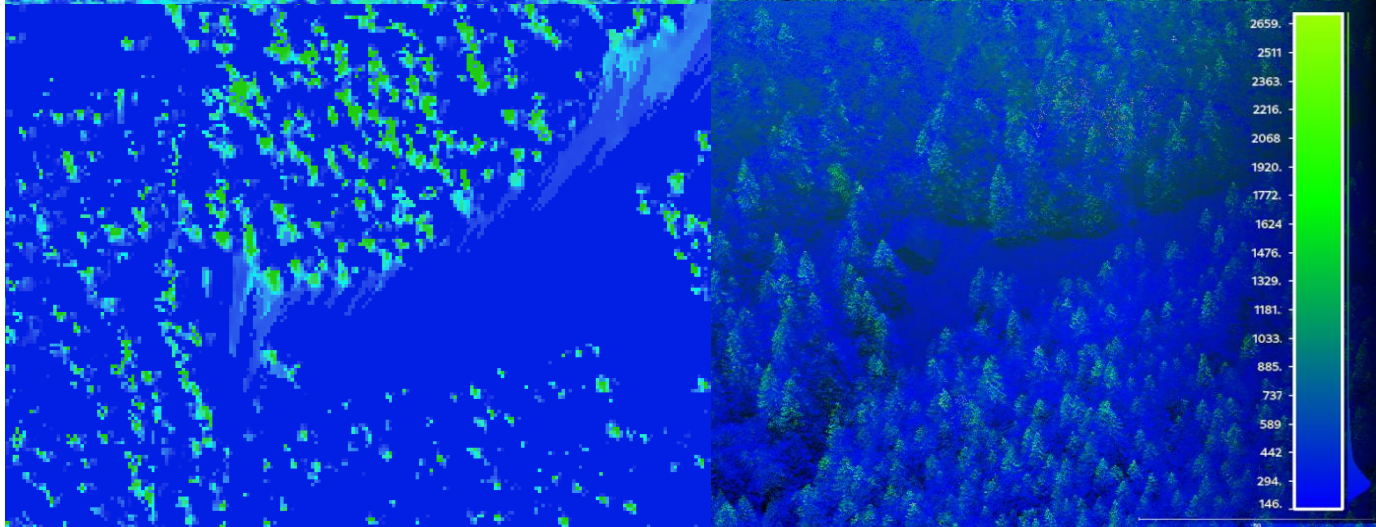
r.sun/GRASS GIS

nový 3D SW nástroj

31.7.



1.1.



# Otvorené otázky a úlohy

- ďalší vývoj a publikovanie softvérového nástroja
- optimalizácia veľkosti voxla
- validácia novovypočítaných výsledkov
- aplikácia solárnej radiácie v predikčnom modelovaní

→ **VEGA 1/0300/19** 3D modelovanie slnečného žiarenia na stromovej vegetácii reprezentovanej mračnom bodov z laserového skenovania

# Záver

- **Solárna radiácia v oblasti Vysokých Tatier – využitie na riešenie úloh z oblasti ekológie, lesníctva, ale napr. aj modelovanie lavínového nebezpečenstva**
  - najväčšie absolútne rozdiely sú na členitom reliéfe → náročnosť a dôležitosť modelovania solárnej radiácie vo vysokohorskom prostredí
- Implementovaný **softvérový nástroj na výpočet solárnej radiácie na voxelovom princípe** z mračna bodov
  - využite aj na modelovanie solárnej radiácie na objektoch so zložitou štruktúrou



# ĎAKUJEME ZA POZORNOSŤ!

[veronika.jakocsova@stuba.sk](mailto:veronika.jakocsova@stuba.sk)

[filip.pruzinec@stuba.sk](mailto:filip.pruzinec@stuba.sk)

[renata.duraciova@stuba.sk](mailto:renata.duraciova@stuba.sk)