

Univerzita Pavla Jozefa Šafárika v Košiciach

Prírodovedecká fakulta

Ústav geografie



Diaľkový prieskum Zeme

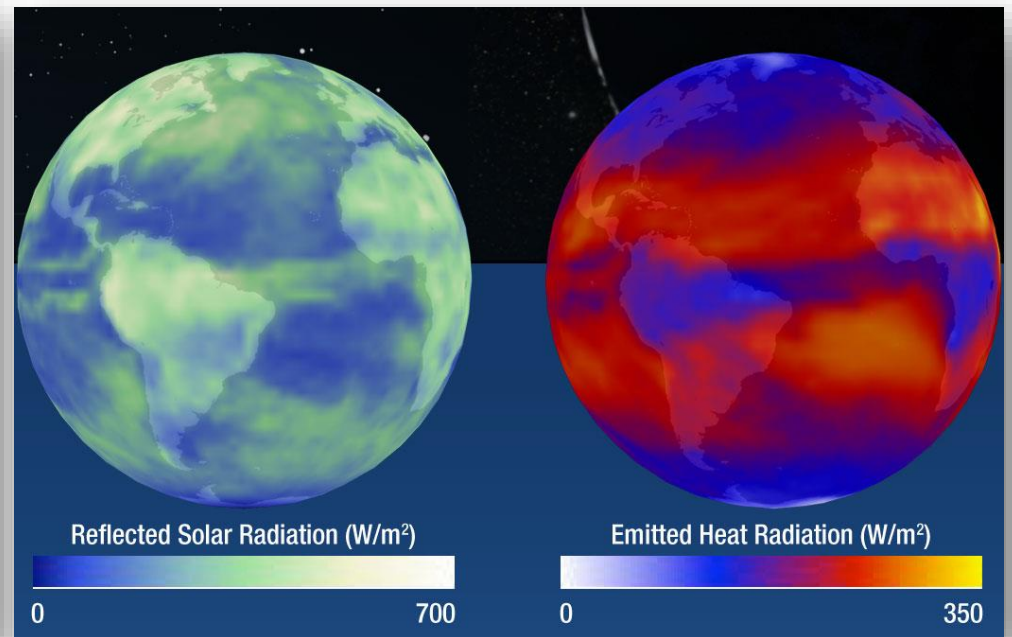
Multispektrálne skenovanie: termálny záznam

Michal Gallay

michal.gallay@upjs.sk

Termálne snímanie/Thermal sensing

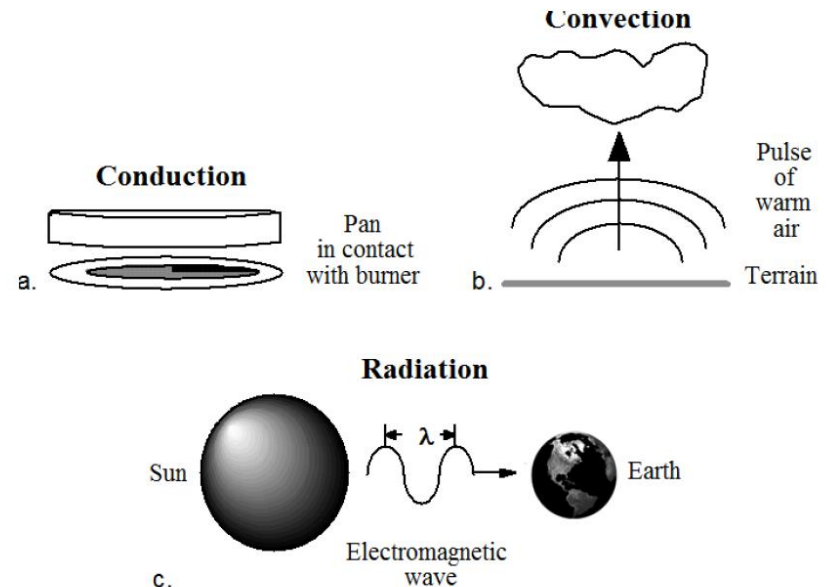
- Pre pochopenie termálneho DPZ je potrebné poznať princípy vyžarovania elektromagnetickej energie, ktorej súčasťou je aj termálne žiarenie.
- Termálnu energiu (teplo) vyžaruje každý objekt v závislosti od jeho teploty a povrchu materiálu.



Termálne snímanie: 3 základné fakty

Prenos energie

- **kondukcia** – prenos energie vzájomným odovzdávaním kinetickej energie, častice hmoty sa navzájom fyzicky zrážajú (kolidujú), princíp ohrievania panvice na železnej platni
- **konvekcia** – kinetická energia hmoty sa prenáša jej pohybom, napr. stúpajúce vzdušné prúdy ohrievajú atmosféru zdola nahor, dtto morské prúdy.
- **radiácia** (vyžarovanie) – prenos kinetickej energie elektromagnetickou radiáciou (vo forme elektromagnetického žiarenia), vďaka tomu je možná aj vo vákuu a Slnko teda môže nás ohrievať



Rozdiel medzi optickým a termálnym snímaním

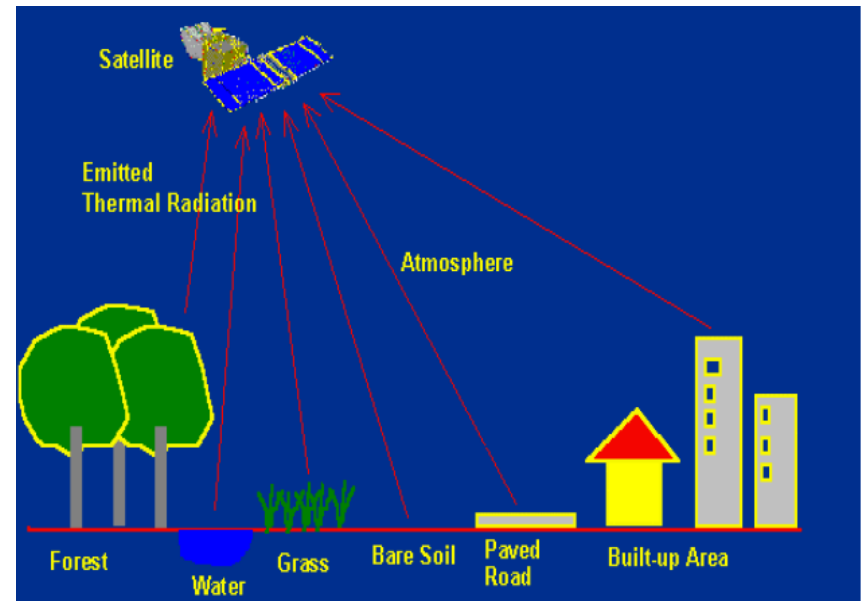
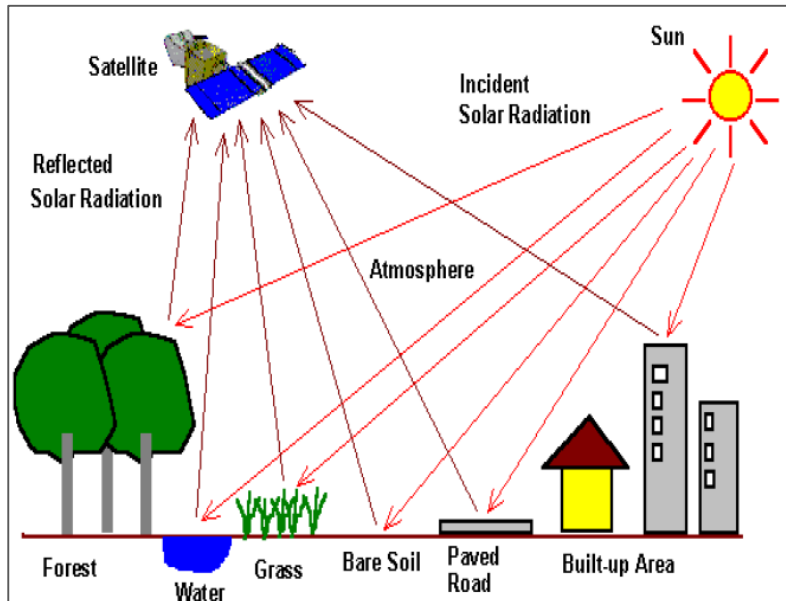
Optický záznam

cez deň



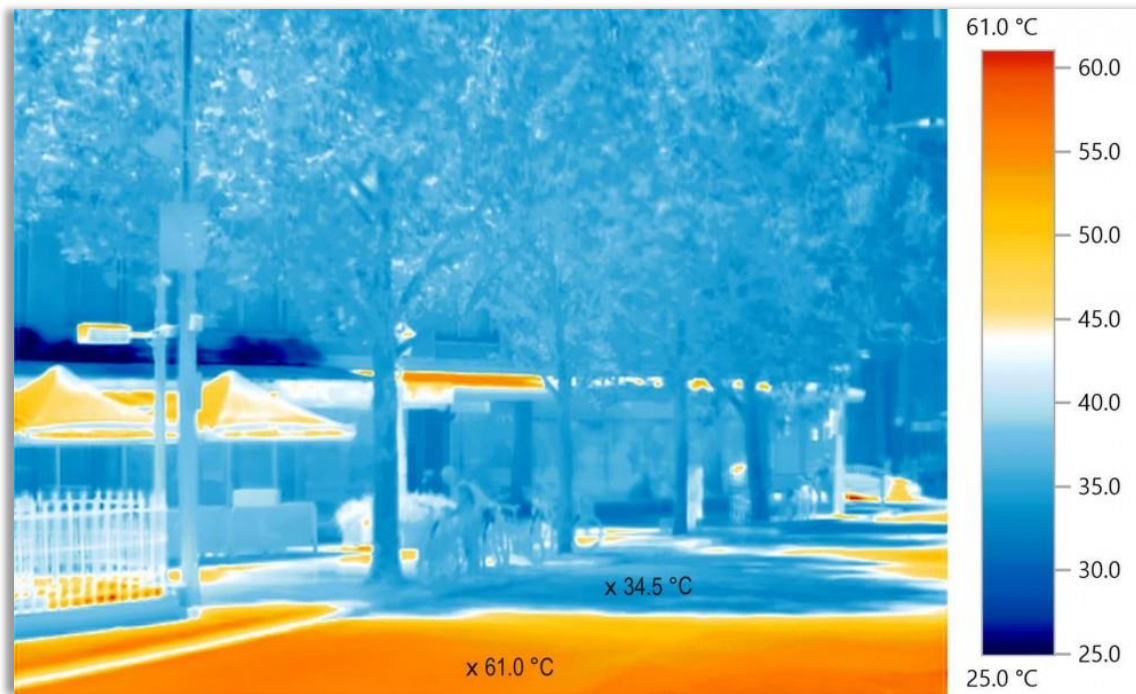
Termálny záznam

v noci
(aj cez deň)
aj za dažďa/hmly



Rozdiel medzi optickým a termálnym snímaním

- Termálny záznam cez deň

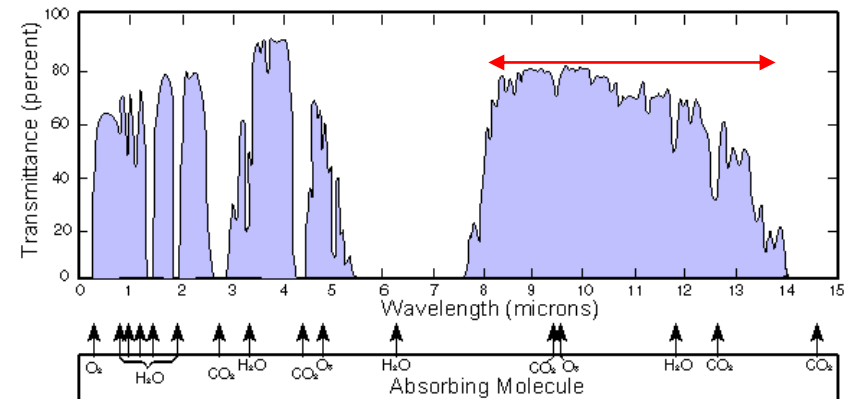
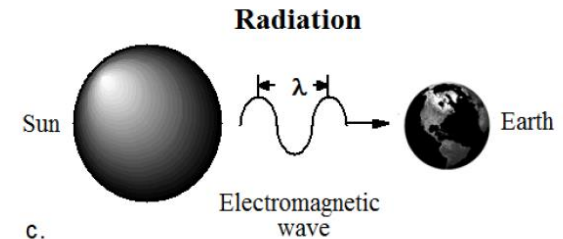


Teplota povrchov; Zdroj: City of Melbourne (2017)

Termálne snímanie: 3 základné fakty

Priepustnosť atmosféry

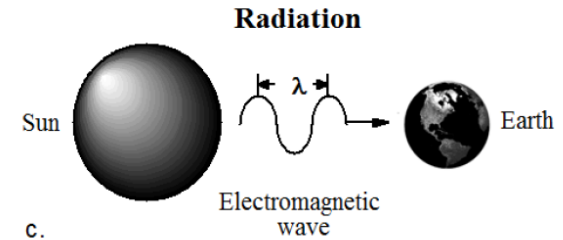
- Dôvodom, prečo možno použiť senzory DPZ pre snímanie termálneho vyžarovania je existencia **atmosférického okna** práve v rozsahu vlnových dĺžok, v ktorom zemský povrch teplo vyžaruje.
- Intervaly vlnových dĺžok spektra, v ktorých atmosféra pohlcuje žiarenia sú **absorpčné pásma** („zatvorené okná“)
- Absorpciu termálneho vyžarovania spôsobujú najmä CO_2 , O_3 , H_2O , ktoré tiež podmieňujú skleníkový efekt



Termálne snímanie: 3 základné fakty

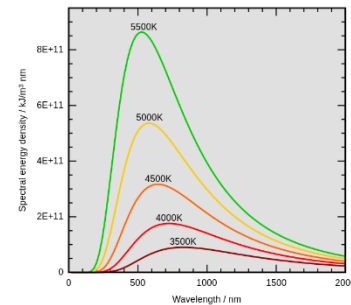
Radiačný tok

- Kinetická energia telesa sa premieňa na vyžarovanie – **radiačný tok (radiant flux)**
- Určuje sa vo wattoch (W)
- Koncentrácia radiačného toku vyžarovaného telesom sa dá určiť ako jasová teplota / teplota z vyžarovania T_{jas}
- Určuje sa v kelvinoch (K)
- Medzi skutočnou kinetickou teplotou T_{kin} a radiačnou termálnou energiou telesa, meranou ako jasová teplota T_{jas} , je **silná pozitívna korelácia**
- Tento vzťah sa využíva pri termálnom DPZ
- To je aj princíp bezdotykových teplomerov
- Avšak korelácia T_{jas} a T_{kin} nie je perfektná, pretože T_{jas} závisí od emisivity telesa/jeho povrchu
- Pre výpočet T_{kin} je potrebné pochopiť niekoľko fyzikálnych zákonov



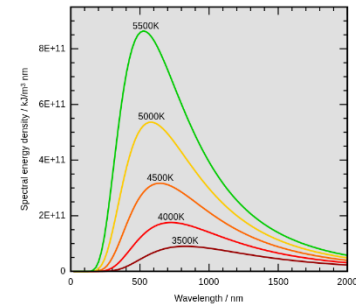
Zákony termálneho vyžarovania

- Každé teleso s teplotou > 0 K vyžaruje EMG žiarenie
Maximálne vyžarovanie je funkciou teploty telesa/povrchu.
- Uvažuje sa ideálne čierne teleso, ktoré absorbuje všetku prijatú energiu a rovnaké množstvo (všetko) vyžiari.
- Miera pohltienia (absorpcie) a vyžiarovania (emisie) sú vlastnosťou materiálu, ich vzájomný vzťah definuje **Kirchhoffov zákon**.
- Závislosť teploty povrchu telesa od množstva vyžarovanej energie definuje **Stefan-Boltzmanov zákon**. EMG energia je vyžarovaná ako vlnenie, ktorého intenzita je funkciou vlnovej dĺžky. Pri istej vlnovej dĺžke existuje maximum termálneho vyžarovania, čo vysvetľuje **Wienovo posuvné pravidlo**. Tvar/plochu celého emisného spektra pod krivkou definuje **Planckov zákon**.
- Inverziou Planckovej rovnice vieme vypočítať T_{jas} jasovú teplotu povrchu telesa.



Zákony termálneho vyžarovania

- Inverziou Planckovej rovnice vieme vypočítať T_{jas} jasovú teplotu povrchu telesa.
- Ak poznáme aj emisivitu telesa a atmosféry, vieme z T_{jas} vypočítať skutočnú kinetickú teplotu T_{kin}

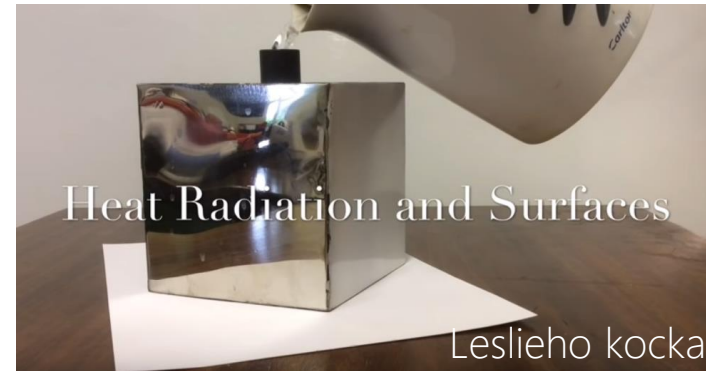


Vyžarovanie ideálneho čierneho telesa definujú

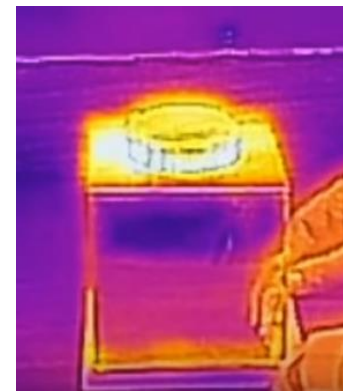
- Kirchhoffove pravidlo / „zákon“ (1859)
- Stefanov-Boltzmannov zákon (1879)
- Wienov posuvný zákon (1893)
- Planckov vyžarovací zákon (1900)

Kirchhoffove pravidlo „zákon“ (1859)

- ϵ emisivita = α absorbanca (pohlcovanie)
- každá látka pohlcuje najsilnejšie žiarenie s tou vlnovou dĺžkou , ktorú najsilnejšie vyžaruje.
- α = pohltené žiarenie / dopadnuté žiarenie
- Albedo = odrazené žiarenie/ dopadnuté žiarenie = $1 - \alpha$
- ϵ emisivita = $1 - \text{albedo}$
- Vysokoodrazivé materiály majú slabé/nízke termálne vyžarovanie, hoci teplota povrchu môže byť vysoká (napr. vyleštený kov, plech natretý bielou farbou)



<https://www.youtube.com/watch?v=4Pz8xcEQtMU>



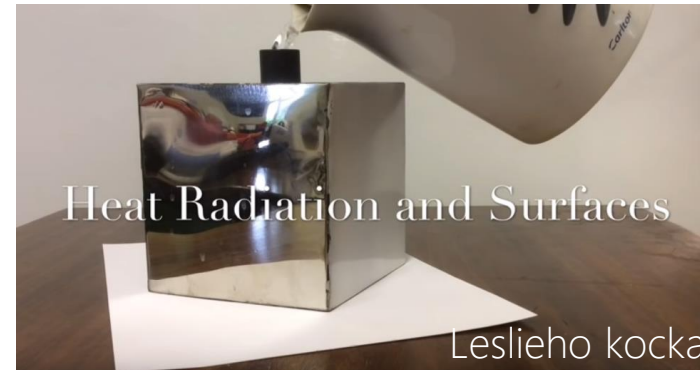
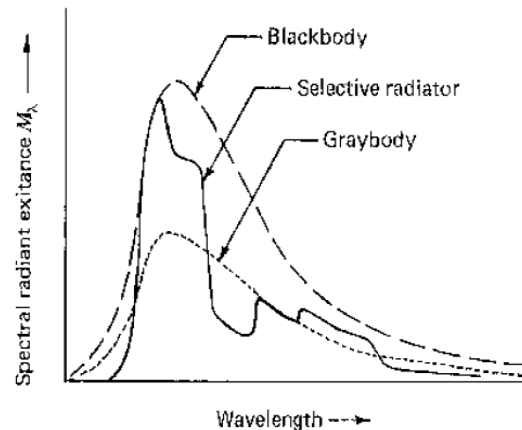
<https://www.youtube.com/watch?v=CIRrU6JuBOc>

Kirchhoffove pravidlo „zákon“ (1859)

- Miera pohlcovania a emisivity súvisí s vlnovou dĺžkou. Materiály s vysokou emisivitou pri istej vlnovej dĺžke majú pri tejto vlnovej dĺžke slabé pohlcovanie a naopak. Pri inej vlnovej dĺžke to môže byť inak. => **selektívna emissivita**
- Čierne teleso: $\varepsilon = 1$, $\alpha = 1$, albedo = 0
- Šedé teleso: $\varepsilon < 1$, $\alpha < 1$, albedo > 0 , < 1
- Selektívny žiarič: $\varepsilon_\lambda = \alpha_\lambda$

Material	Average Emissivity over 8-14 μm
Clear water	0.98 - 0.99
Healthy green vegetation	0.96 - 0.99
Dry vegetation	0.88 - 0.94
Asphaltic concrete	0.94 - 0.97
Basaltic rock	0.92 - 0.96
Granitic rock	0.83 - 0.87
Dry mineral soil	0.92 - 0.96
Polished metals	0.06 - 0.21

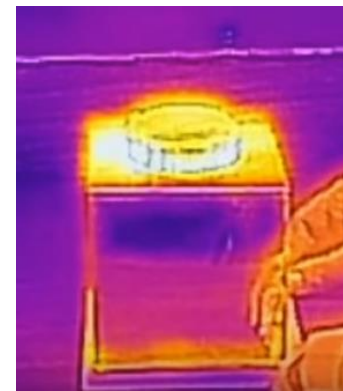
Source: Lillesand et al. (2008)



Heat Radiation and Surfaces

Leslieho kocka

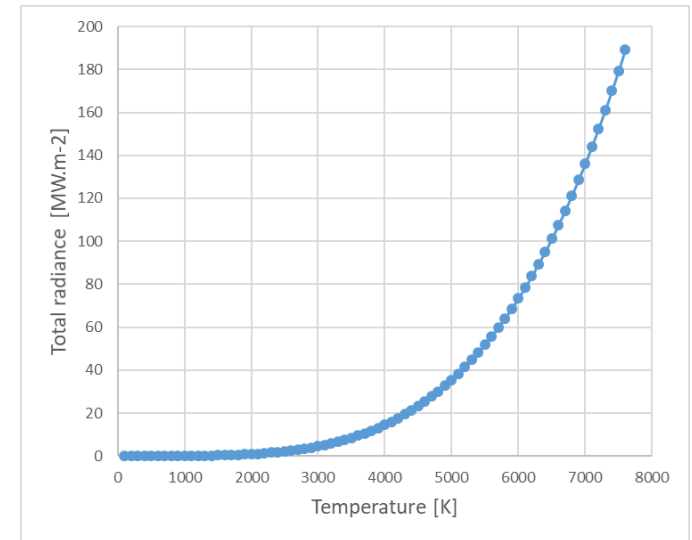
<https://www.youtube.com/watch?v=4Pz8xcEQtMU>



<https://www.youtube.com/watch?v=CIRrU6JuBOc>

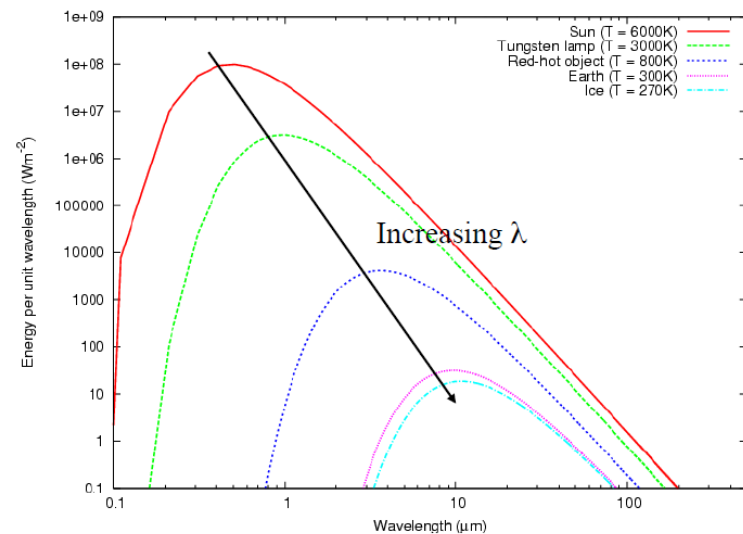
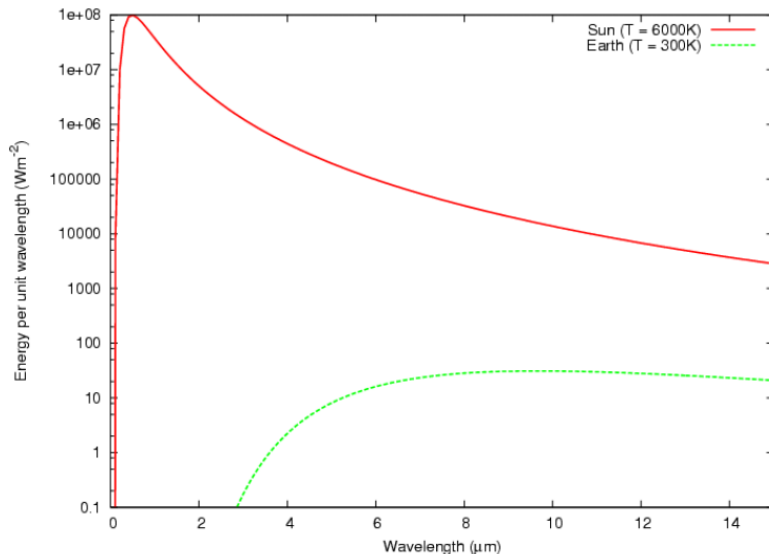
Stefanov-Boltzmannov zákon

- Stefanov-Boltzmannov zákon
 - celkové množstvo energie M vyžarovanej čiernym telesom súvisí s absolútnou teplotou telesa T
 - $M = \sigma \cdot T^4$, Stefan-Boltzmannova konšt. $\sigma = 5.670374419 \times 10^{-8} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$
 - $M = \varepsilon \cdot \sigma T^4$,
 - $\varepsilon = 1$ pre čierne teleso,
 - $\varepsilon < 1, \varepsilon > 0$ pre šedé teleso
 - Vyžarovanie šedého telesa je slabšie ako vyžarovanie čierneho telesa pri tej istej teplote.
 - **Termálne žiarenie snímané skenerom ukazuje nižšiu teplotu povrchu ako je kinetická teplota materiálu v skutočnosti**, lebo materiály na zemskom povrchu sú šedé telesá, teda $\varepsilon < 1, \varepsilon > 0$.
 - Pre bežné materiály v krajine nadobúda ε okolo 0,9-0,7.



Wienov posuvný zákon

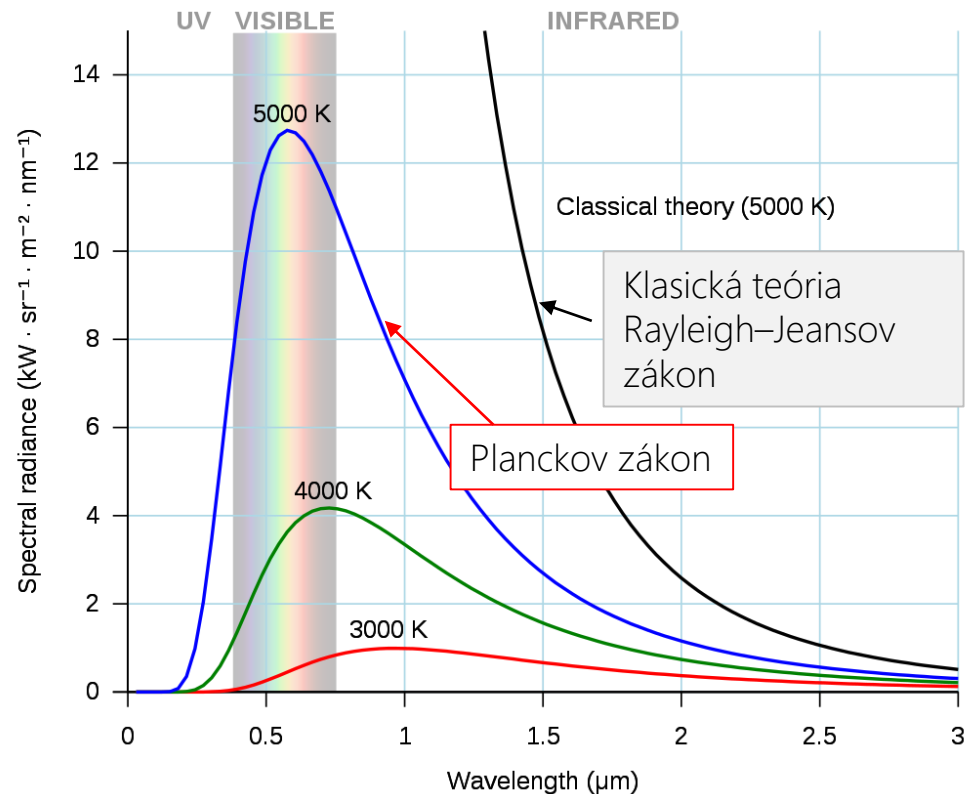
- Wienov posuvný zákon
 - Vlnová dĺžka EMG žiarenia, pri ktorej dosahuje teleso maximálne vyžarovanie je daná teplotou telesa T , hodnota vlnovej dĺžky sa posúva so zmenou teploty telesa
 - $\lambda_m \cdot T = 2898 \mu\text{m} \cdot \text{K}$, $T = 2898 \mu\text{mK} / \lambda_m$
 - $T_{\text{sun}} \approx 6000\text{K} \Rightarrow M_{\lambda, \text{sun}} \approx 73.5 \text{ MW} \cdot \text{m}^{-2} \Rightarrow \lambda_{m, \text{sun}} = 0.48 \mu\text{m}$
 - $T_{\text{Earth}} \approx 300\text{K} \Rightarrow M_{\lambda, \text{Earth}} \approx 460 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \Rightarrow \lambda_{m, \text{Earth}} = 9.66 \mu\text{m}$



Planckov zákon

- Vlnová teória elektromagnetického žiarenia nevyhovuje pre vysvetlenie fyziky termálneho vyžarovania
- emisia a absorpcia vyžarovania pre čierne teleso sa môže diať iba po celistvých násobkoch „kvantách“
- $\epsilon_0 = h \cdot f$
- tento násobok je Planckovou konštantou $h = 6,62607004 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$
- $k = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$ Boltzmannova konštanta

$$B_\lambda(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k_B T}} - 1}$$



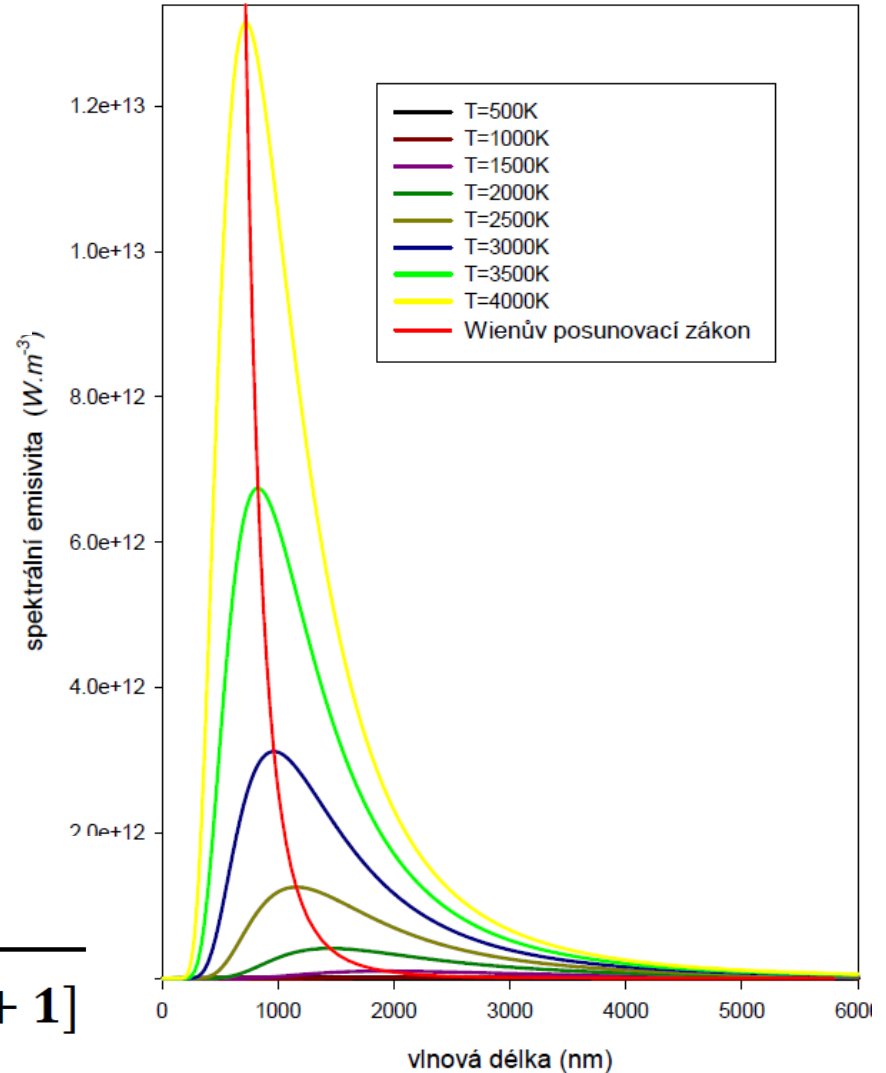
Umožňuje vypočítať celkové množstvo vyžiarenej energie (intenzitu) pri danej teplote telesa bez ohľadu na vlastnosti materiálu. Prepája Stefan-Boltzmannov a Wienov zákon.

Planckov zákon

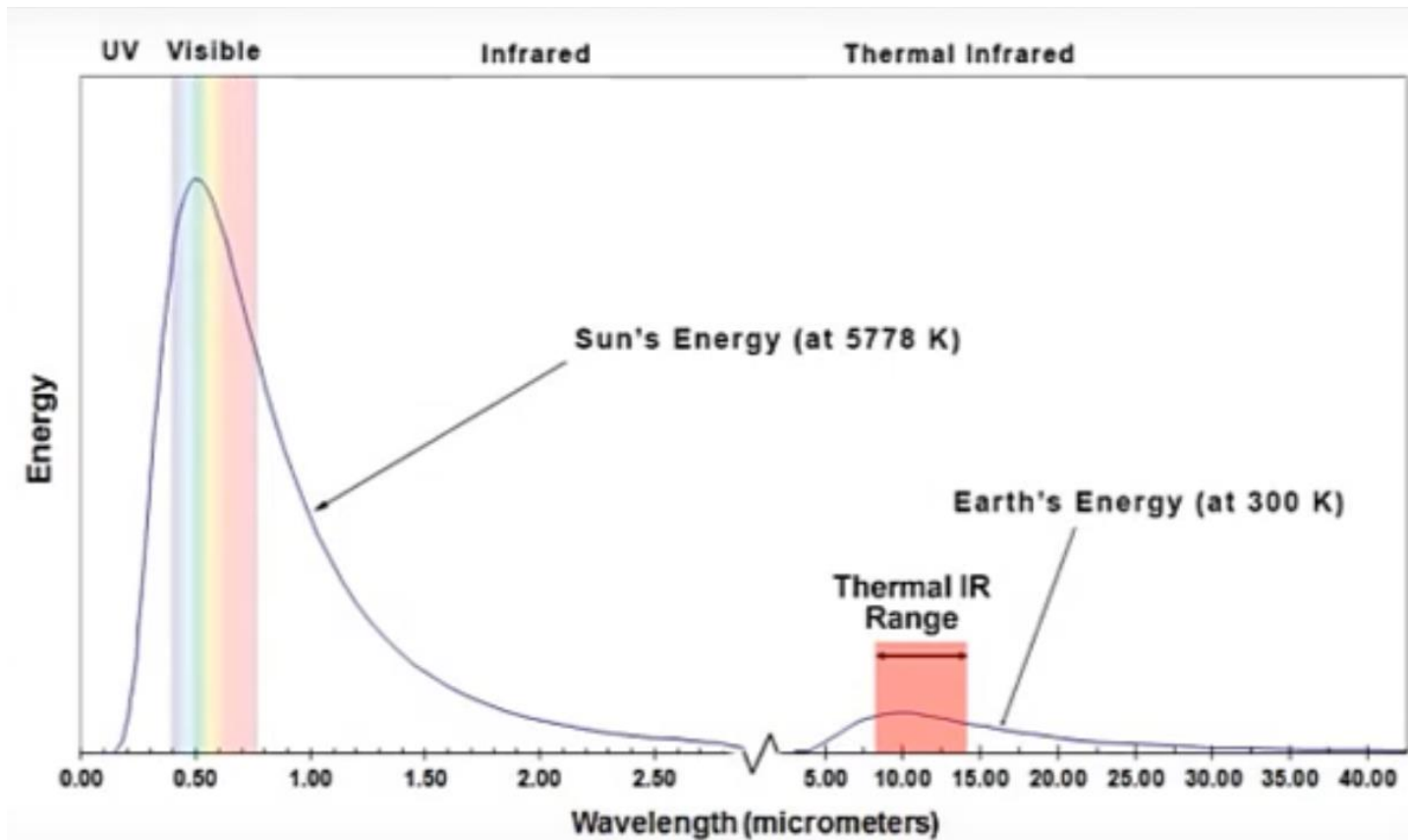
$$B_{\lambda}(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k_B T}} - 1}$$

T je jasová teplota a inverziou rovnice ju vieme vypočítať z hodnoty zaznamenananej energie vyžarovanej povrchom Zeme

$$T = \frac{\frac{C_2}{\lambda}}{\ln \left[\frac{C_1}{\lambda^5} \frac{1}{B_{\lambda}(T)} + 1 \right]}$$



- Teplota povrchu Zeme je okolo 27°C (300 K), teda maximálne vyžarovanie je pri vlnovej dĺžke okolo $9,6\text{ mikrometra}$.
Avšak rozsah termálneho žiarenia je širší zhruba $5\text{ do }14\text{ mikrometrov}$, čo zodpovedá teplote povrchu od -60°C do $+300^{\circ}\text{C}$, čo umožňuje snímať teploty povrchu v tomto rozsahu.
Nastavenie termálneho pásma v DPZ sa sústreďuje na $10\text{-}12\text{ mikrometrov}$.



Odvodenie teploty povrchu

DN

- DN – to Radiance

BT

- Radiance to **at sensor** temperature

LST

- **At sensor** brightness temperature to surface temperature

1. Rádiometrická kalibrácia: z hodnôt DN k spektrálnemu vyžarovaniu L_λ - DN \rightarrow Radiance L_λ

- $L_\lambda = [(L_{MAX\lambda} - L_{MIN\lambda}) / (QCAL_{MAX} - QCAL_{MIN})] * (QCAL - QCAL_{MIN}) + L_{MIN\lambda}$
- λ – v tomto prípade ide o poradie pásma, v ktorom senzor sníma EMG žiarenie
- pre termálne snímanie je to pásmo v rozsahu vlnových dĺžok cca 10-12 μm .

$$L_\lambda = \frac{(L_{MAX\lambda} - L_{MIN\lambda})}{QCAL_{MAX} - QCAL_{MIN}} \times (DN - QCAL_{MIN}) + L_{MIN\lambda}$$

where the LMIN and LMAX are the spectral radiances for each band at digital numbers 1 and 255. DN is the pixel DN value, λ is the wavelength. One gets LMIN and LMAX values from the header file.

http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov/handbook/handbook_htmls/chapter11/chapter11.html

2. Rádiometrická kalibrácia: od spektrálneho vyžarovania ku jasovej teplote na základe Planckovho zákona

Intenzita vyžarovania zaznamenaná senzorom na družici $B_\lambda(T) = L_\lambda$

$$B_\lambda(T) = \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1)}$$

$$C_1 = 2 \cdot h \cdot c^2$$

$$C_2 = 2 \cdot h \cdot c / k$$

$$C_1 = 1,19104356 \cdot 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$$

$$C_2 = 1438,76869 \cdot 10^{-5} \text{ K}$$

Jasová teplota T - Brightness temperature T
(teplota z jasů obrazu = intenzity zaznamenané energie/vyžarovania)

$$T = \frac{C_2}{\lambda \cdot \ln \left[\frac{C_1}{\lambda^5 B_\lambda(T)} + 1 \right]}$$

Pre zvolenú vlnovú dĺžku žiarenia

$$K_1 = C_1 / \lambda^5$$

$$K_2 = C_2 / \lambda$$

$$T = \frac{\frac{C_2}{\lambda}}{\ln \left[\frac{C_1}{\lambda^5 B_\lambda(T)} + 1 \right]}$$

Stredná vlnová dĺžka pásma 10 pre L8

Pre LANDSAT 8 pásma B10

$$K_1 = C_1 / \lambda^5 = 1,19104356 \times 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} / (10,8 \times 10^{-6} \text{ m})^5 = 810 \text{ W} \cdot \text{m}^{-7} \cdot \text{sr}^{-1} = 810 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$$

$$K_2 = C_2 / \lambda = 1438,76869 \times 10^{-5} \text{ K} / 10,8 \times 10^{-6} \text{ m} = 1332 \text{ K}$$

2. Rádiometrická kalibrácia: od spektrálneho vyžarovania ku jasovej teplote T na základe Planckovho zákona

$$K_1 = C_1/\lambda^5$$

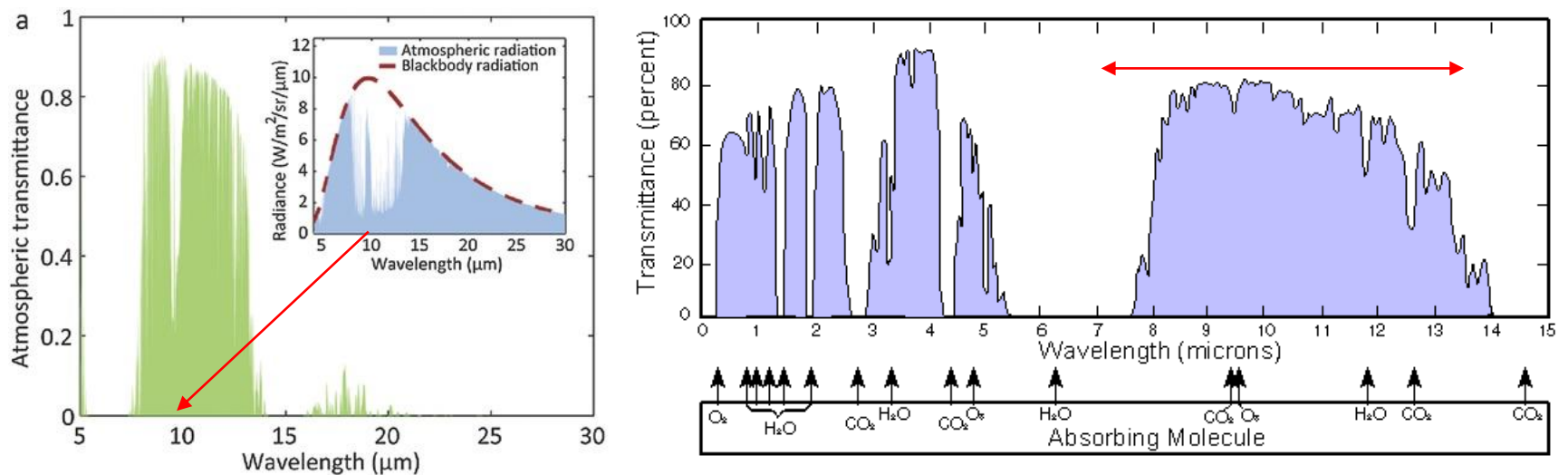
$$K_2 = C_2/\lambda$$

Intenzita vyžarovania zaznamenaná
senzorom na družici $B_\lambda(T) = L_\lambda$
pre dané spektrálne pásmo/vlnovú dĺžku

$$T = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1\right)}$$

družica – senzor – termálne pásmo	stredná vlnová dĺžka pásma (m ⁻⁶)	K_1 (W m ⁻² sr ⁻¹ μm ⁻¹)	K_2 (Kelvin)
Landsat 8 – TIRS - B11	12	480,89	1201,14
Landsat 8 – TIRS - B10	10,8	774,89	1321,08
Landsat 7 – ETM+ - B6	11,335	666,09	1282,71
Landsat 5 – TM - B6	11,335	607,76	1260,56

- Bežné teploty zemského povrchu sa pohybujú okolo $\sim 300 \text{ K} = 27 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Podľa Wienovho zákona maximum vyžarovania nastáva pri týchto teplotách medzi $8 - 14 \text{ } \mu\text{m}$ vlnovej dĺžky.
- Našťastie pre vlnové dĺžky v tomto spektrálnom intervale je atmosféra priepustná („priehľadná“) v porovnaní s inými vlnovými dĺžkami pre vyššie alebo nižšie teploty povrchu.
- Napriek tomu atmosféra oslabuje zaznamenanú intenzitu vyžarovania najmä pre obsah vodnej pary
- Tento efekt atmosféry treba korigovať – atmosférická korekcia
- Pre ešte presnejší výpočet teploty povrchu treba uvažovať rôznu emisivitu materiálov na povrchu, pretože ide o šedé telesá (nie ideálne čierne kde $e = 1$)



3. Konverzia jasovej teploty T na kinetickú teplotu = teplotu zemského povrchu /materiálu

Land Surface Temperature (LST)

$$T_{\text{povrch}} = T_{\text{jas}} / [1 + (T_{\text{jas}}/K_2)^* \ln(\varepsilon)]$$

[Artis and Carnahan, 1982](#). Survey of emissivity variability in thermography of urban areas, *Rem. Sens. Environ.* **12** (1982), pp. 313–329.

$$L_{\lambda} = [\varepsilon * B(T_s) + (1 - \varepsilon) * L_d] * \tau + L_u$$

$$B(T_s) = [L_{\lambda} - L_u - \tau * (1 - \varepsilon) * L_d] / (\tau * \varepsilon)$$

$$T_s = K_2 / \ln[K_1 / B(T_s) + 1]$$

Hofierka, J., Gallay, M., Onáčillová, K., Hofierka, J. Jr. (2020). Physically-based land surface temperature modeling in urban areas using a 3-D city model and multispectral satellite data. *Urban Climate*, 31, 100566

- L_d atmospheric downward and L_u upward radiance ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\mu\text{m}^{-1}$)
- τ atmospheric transmittance for the thermal infrared radiation recorded by thermal spectral band
- $B(T_s)$ is the radiance of a blackbody ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\mu\text{m}^{-1}$) having the real LST T_s (K)
- The three atmospheric correction parameters can be calculated through the online service of NASA (<http://atmcorr.gsfc.nasa.gov>) developed by [Barsi et al. \(2005\)](#)
- ε – emisivita zemského povrchu, Sobrino et al. (2004)

$$\varepsilon = 0.004 * P_n + 0.986$$

3. Konverzia jasovej teploty T na kinetickú teplotu = teplotu zemského povrchu /materiálu

Land Surface Temperature (LST)

Podľa Stefan-Boltzmannovho zákona platí:

$$L = \sigma \cdot T_{jas}^4 = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_{kin}^4$$

$$T_{jas} = \varepsilon^{1/4} \cdot T_{kin} \rightarrow T = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1\right)}$$
$$T_{kin} = T_{jas} / \varepsilon^{1/4}$$

Avšak emisivita zahŕňa emisivitu atmosféry a povrchu a ich podiel je potrebné zistiť a zohľadniť.

3. Konverzia jasovej teploty T na kinetickú teplotu = teplotu zemského povrchu /materiálu

Land Surface Temperature (LST)

Jednoduchší výpočet, bez zohľadnenie vplyvu atmosféry, iba zohľadňujúc emisivitu povrchu ε .

$$T_{\text{kin}\cdot\text{povrch}} = T_{\text{jas}} / [1 + (T_{\text{jas}}/K_2)^* \ln(\varepsilon)]$$

[Artis and Carnahan, 1982](#). Survey of emissivity variability in thermography of urban areas, *Rem. Sens. Environ.* 12 (1982), pp. 313–329.

3. Konverzia jasovej teploty T na kinetickú teplotu = teplotu zemského povrchu /materiálu

Land Surface Temperature (LST)

Zložitejší výpočet zohľadňuje vplyv atmosféry a emisivitu povrchu.

$$L_{\lambda} = [\varepsilon * B(T_s) + (1 - \varepsilon) * L_d] * \tau + L_u$$

$$B(T_s) = [L_{\lambda} - L_u - \tau * (1 - \varepsilon) * L_d] / (\tau * \varepsilon)$$

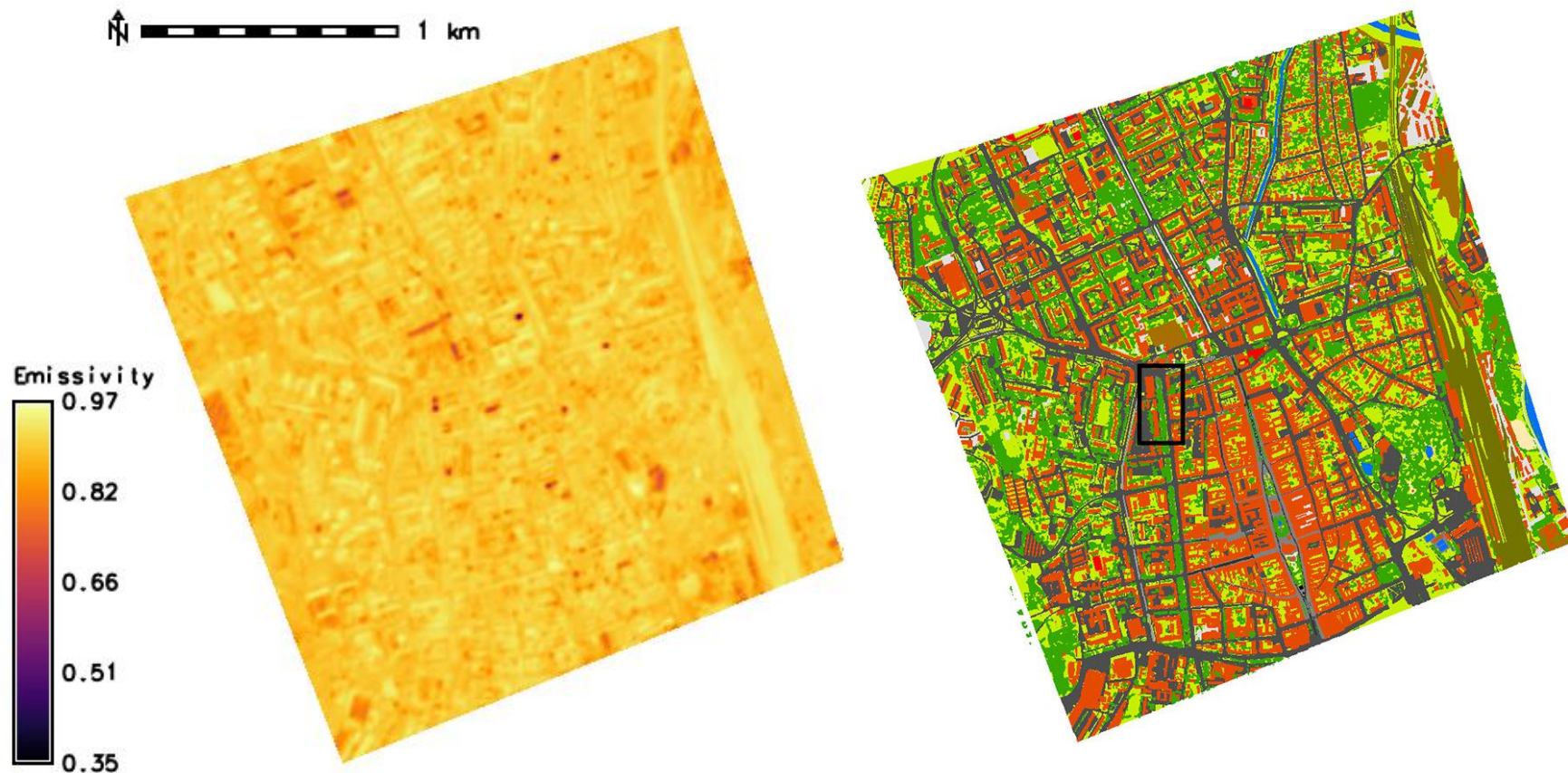
$$T_s = K_2 / \ln[K_1 / B(T_s) + 1]$$

Hofierka, J., Gallay, M., Onáčillová, K., Hofierka, J. Jr. (2020). Physically-based land surface temperature modeling in urban areas using a 3-D city model and multispectral satellite data. Urban Climate, 31, 100566

- L_d atmospheric downward and L_u upward radiance ($\text{W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}.\mu\text{m}^{-1}$)
- τ atmospheric transmittance for the thermal infrared radiation recorded by thermal spectral band
- $B(T_s)$ is the radiance of a blackbody ($\text{W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}.\mu\text{m}^{-1}$) having the real LST T_s (K)
- The three atmospheric correction parameters can be calculated through the online service of NASA (<http://atmcorr.gsfc.nasa.gov>) developed by [Barsi et al. \(2005\)](#)
- ε – emisivita zemského povrchu, Sobrino et al. (2004) 0.99-0.97 podľa NDVI

$$\varepsilon = 0.004 * P_v + 0.986$$

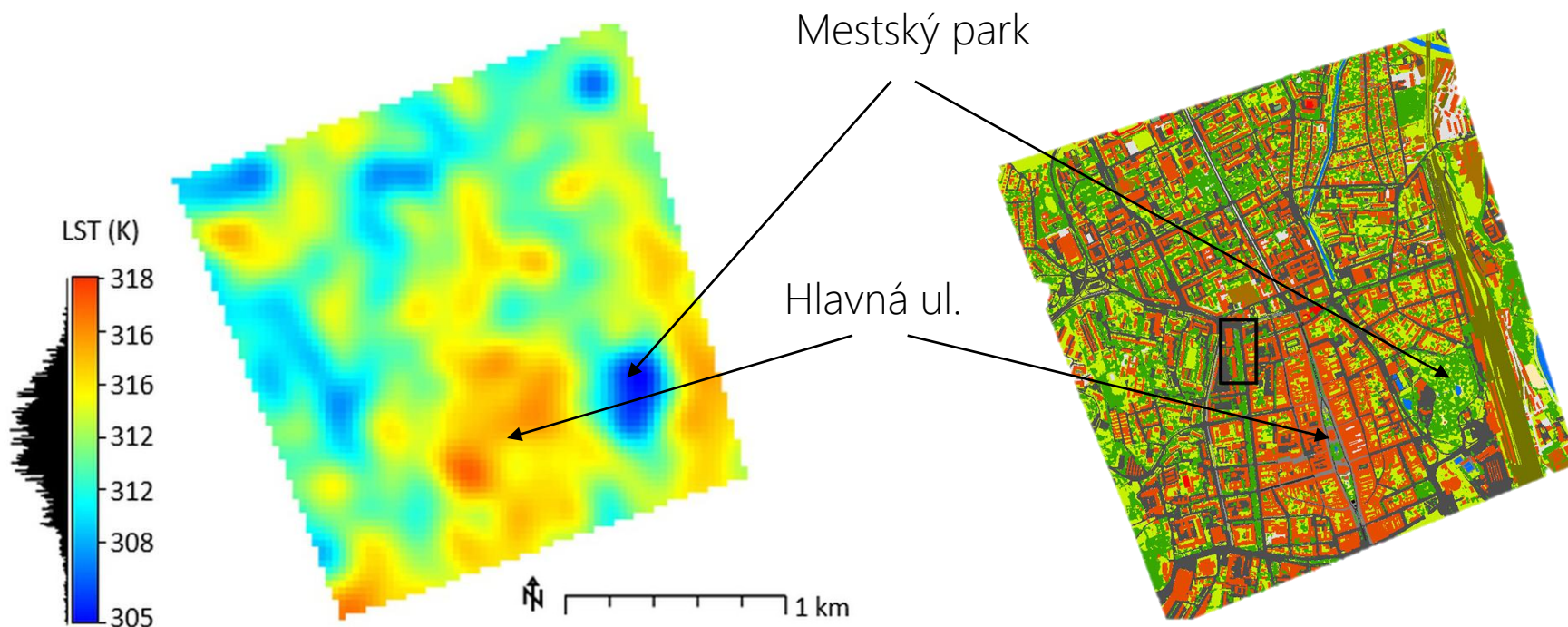
Termálne snímanie z družice Landsat 8 – TIRS: Košice 30. jún 2016



termálna emisivita povrchu vypočítaná
z NDVI (Sobrino et al. 2004)

krajinná pokrývka (pre ilustráciu)

Termálne snímanie z družice Landsat 8 – TIRS: Košice 30. jún 2016

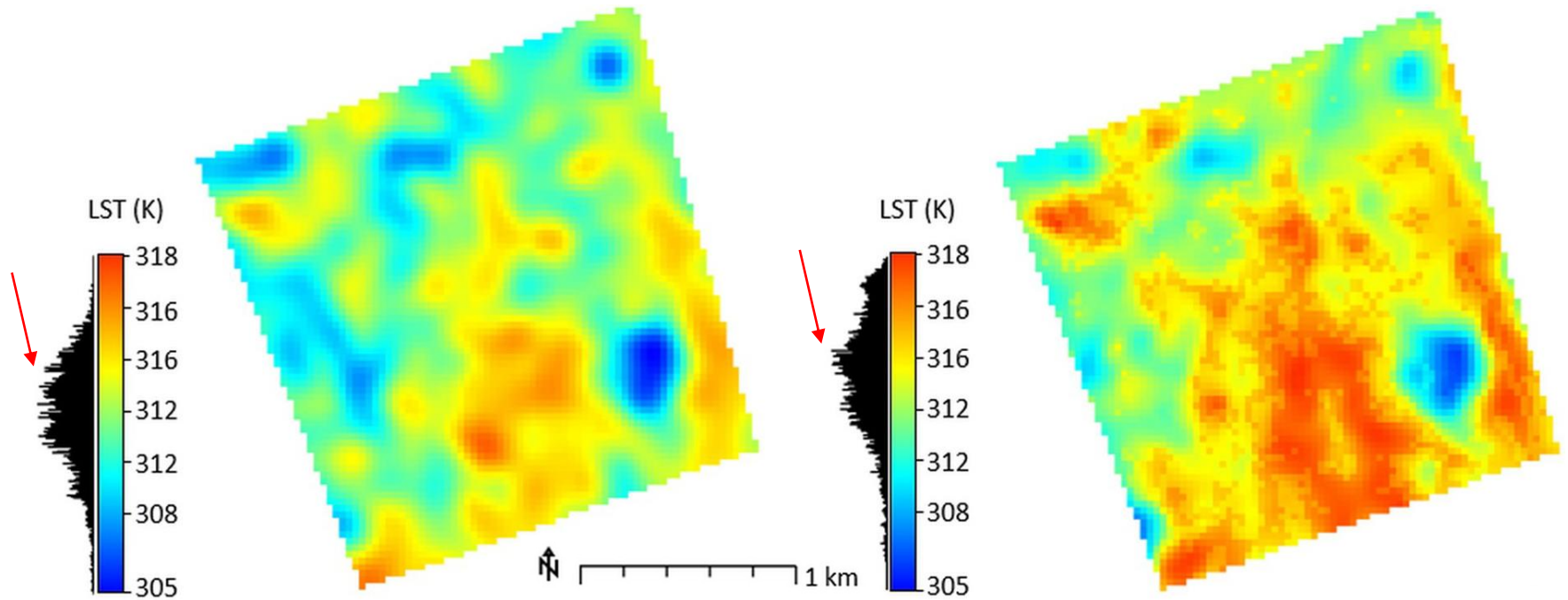


jasová teplota povrchu T_{jas} v kelvinoch

- „at-sensor“ / „top of atmosphere“
- mierne nižšie hodnoty teploty ako v skutočnosti (T_{kin})
- Prečo?

krajinná pokrývka

Termálne snímanie z družice Landsat 8 – TIRS: Košice 30. jún 2016



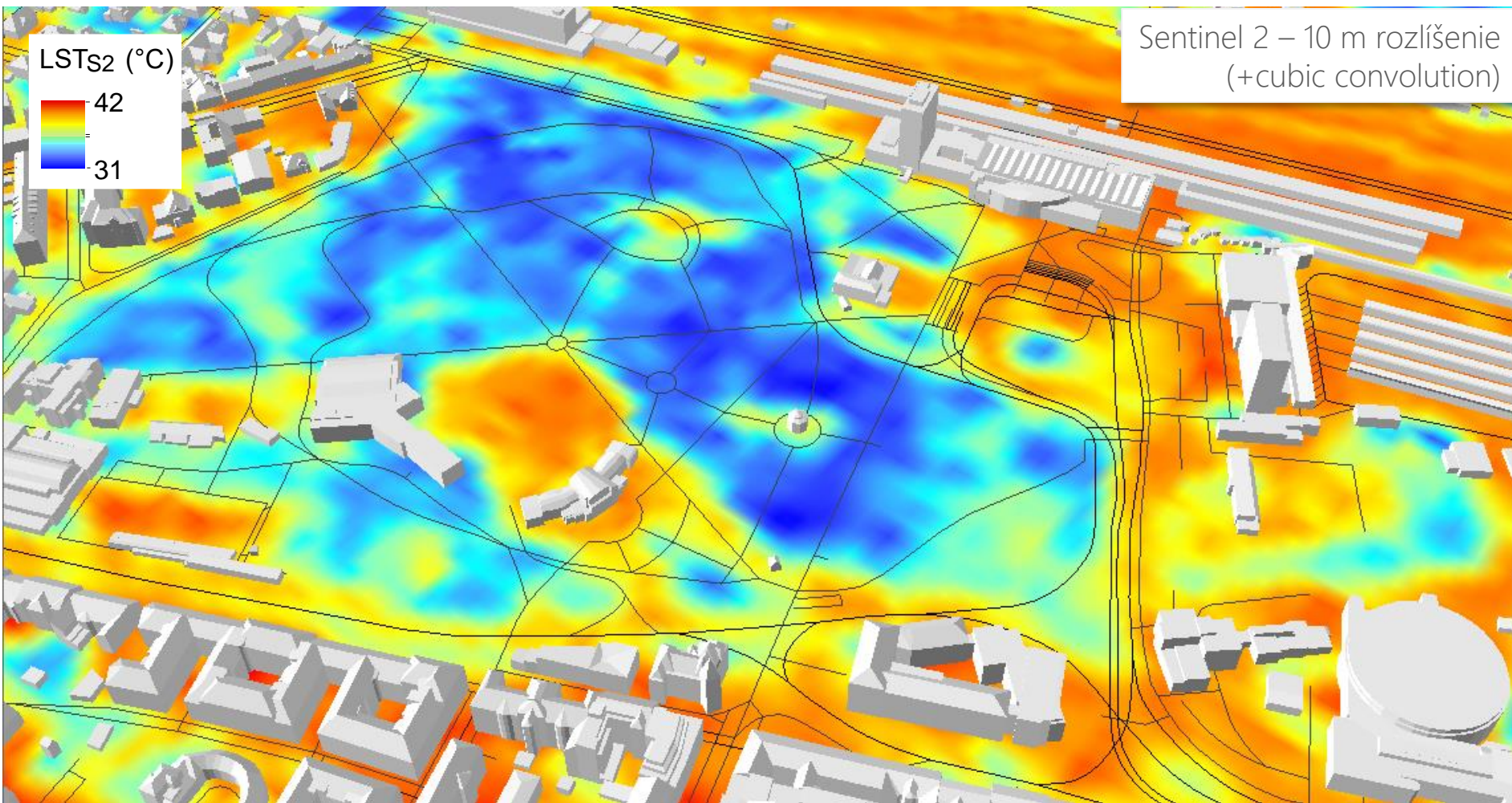
jasová teplota T_{jas} v kelvinoch

- „at-sensor“ / „top of atmosphere“
- mierne nižšie hodnoty teploty ako v skutočnosti ($T_{\text{kin.povrch}}$)
- Prečo?

kinetická teplota povrchu $T_{\text{kin.povrch}}$ v kelvinoch

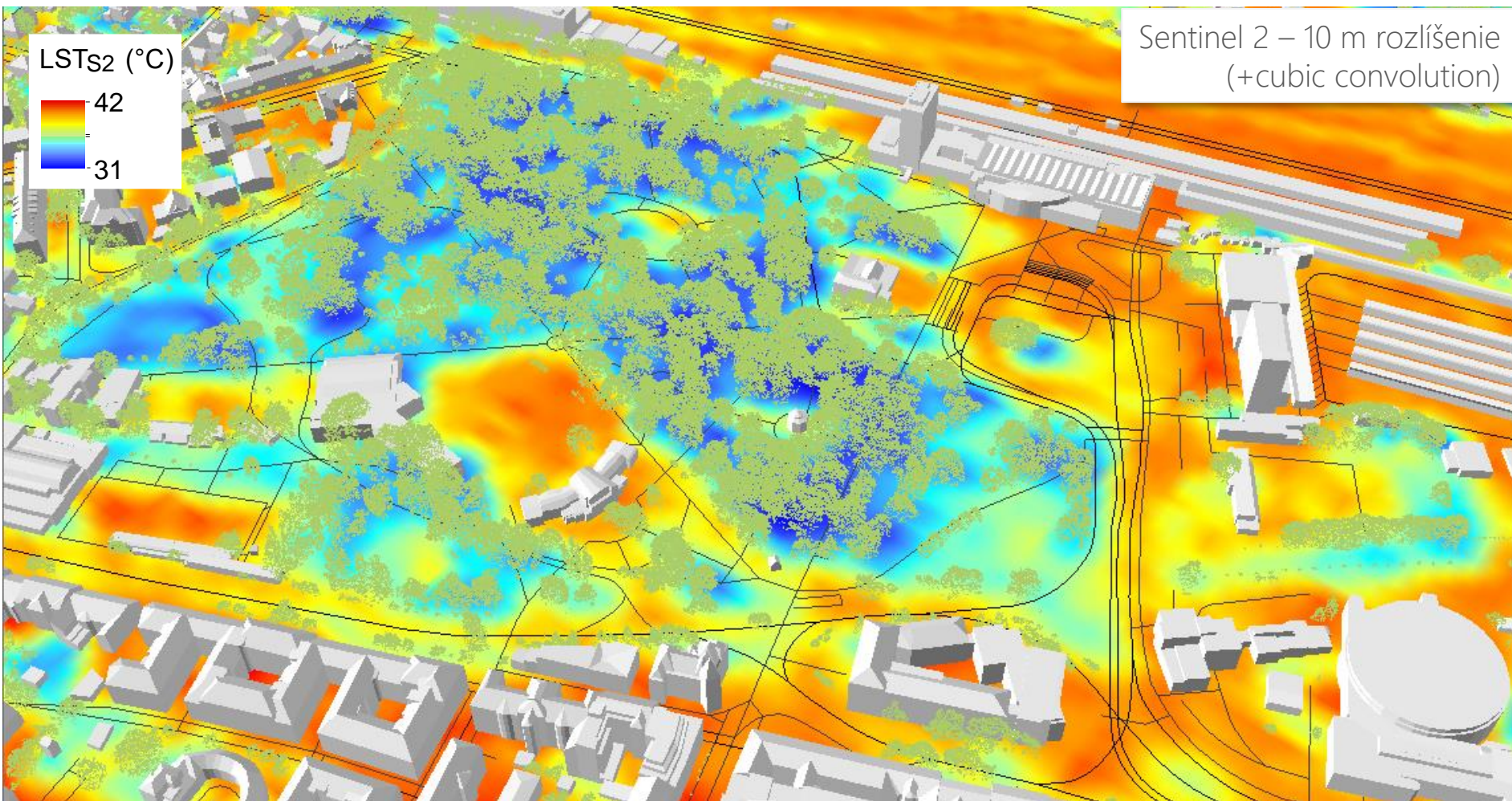
- prepočítaná jasová teplota pri povrchu so zohľadnením emisivity atmosféry a zemského povrchu
- teplota, ktorú by sme cítili pri dotyku ruky s povrchom

Termálne snímanie z družice Landsat 8 – TIRS: Košice 30. jún 2016, Mestský park



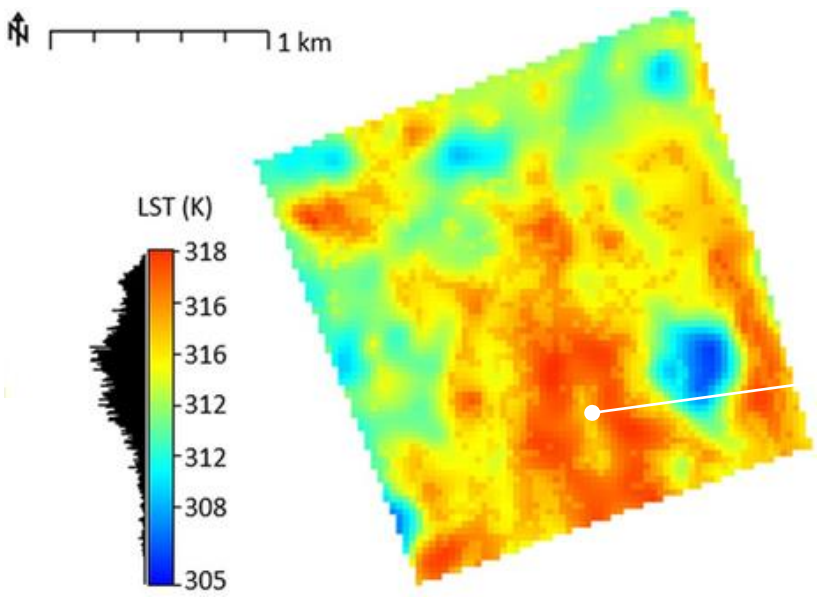
Onačillová, K, Péliová, A., Gallay, M. 2020: Zvýšenie priestorového rozlíšenia teploty povrchu z družice Landsat 8 pomocou dát družice Sentinel 2. Konferencia Geocarto 2020, UPJŠ Košice.

Termálne snímanie z družice Landsat 8 – TIRS: Košice 30. jún 2016, Mestský park

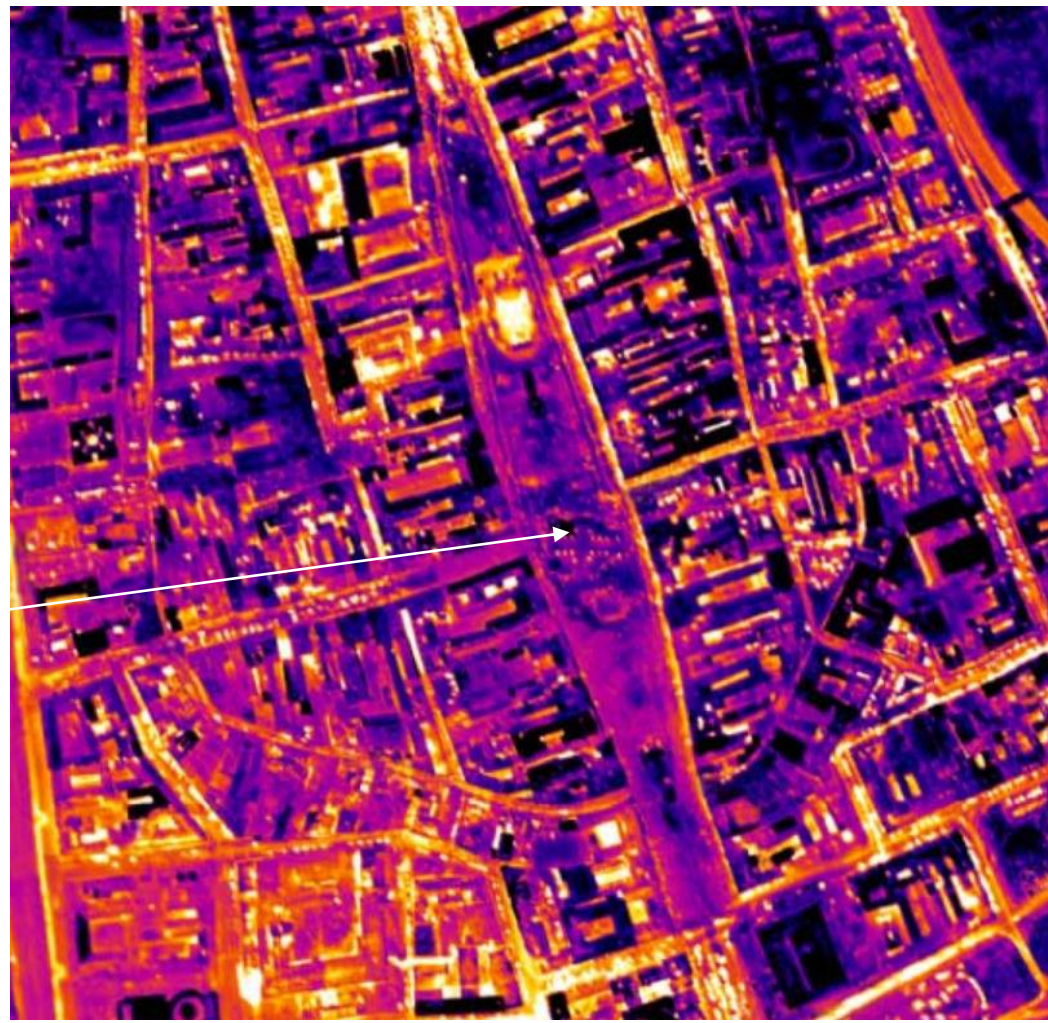


Onačillová, K, Péliová, A., Gallay, M. 2020: Zvýšenie priestorového rozlíšenia teploty povrchu z družice Landsat 8 pomocou dát družice Sentinel 2. Konferencia Geocarto 2020, UPJŠ Košice.

Letecký termálny záznam: centrálna časť mesta Košice



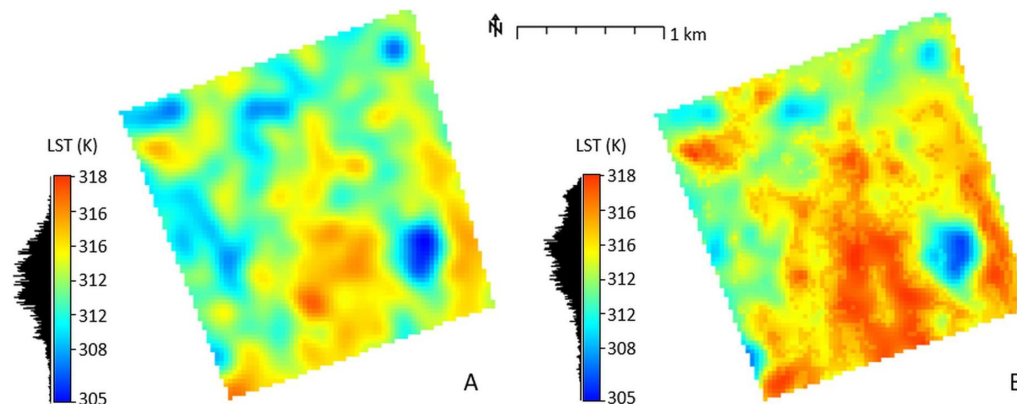
teplota z družice Landsat 8



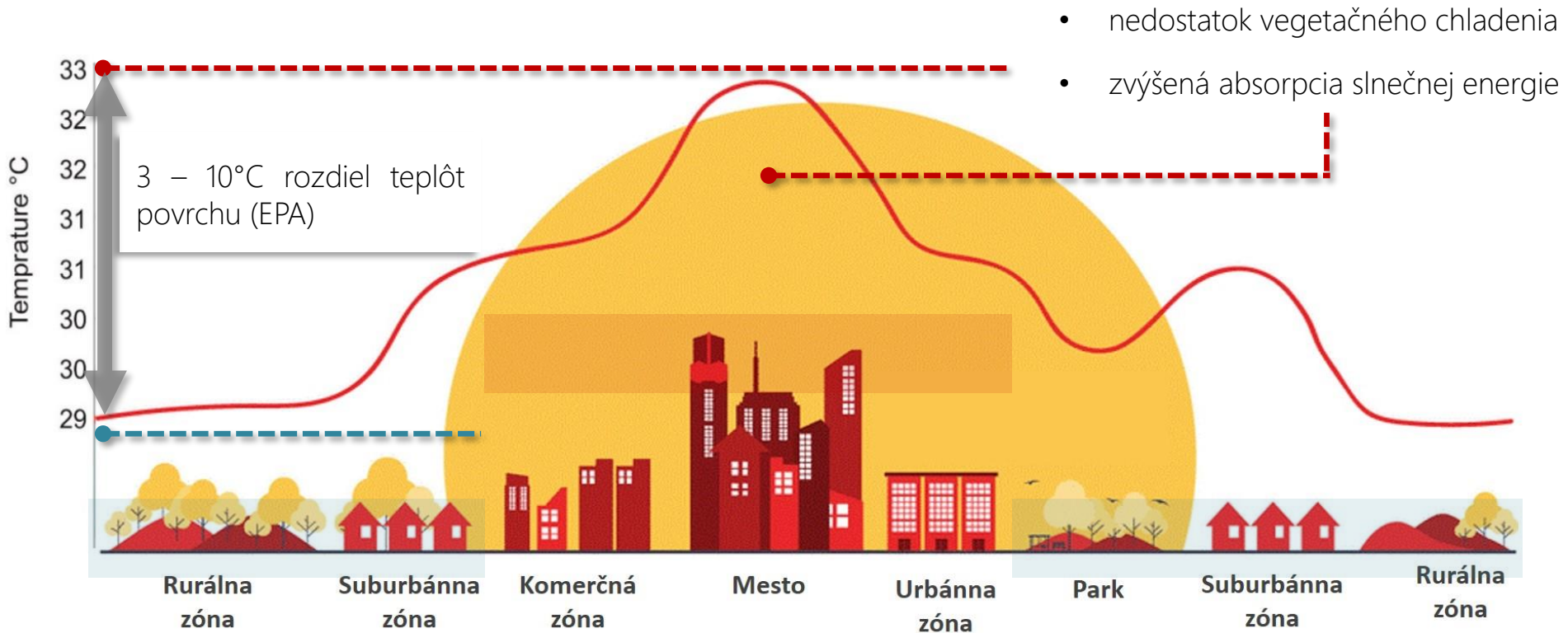
3. Konverzia jasovej teploty T na kinetickú teplotu = teplotu zemského povrchu /materiálu

Land Surface Temperature (LST)

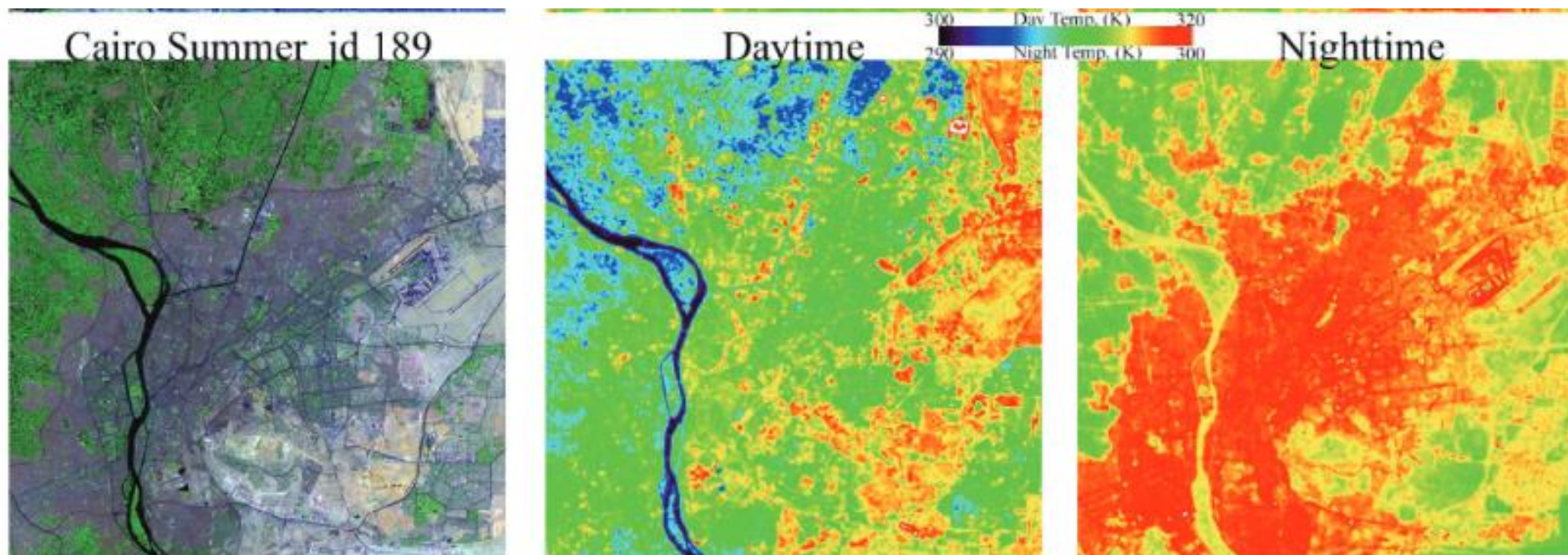
- Bez zohľadnenia vplyvu atmosféry a emisivity povrchu sa vypočítané jasové teploty pre bežné typy krajinej pokrývky líšia od skutočnej kinetickej teploty povrchu rádovo o 3 – 6 kelvinov.
- Ak zohľadníme emisivitu aj vplyv atmosféry dokážeme určiť kinetickú teplotu povrchu s odchýlkou 0-3 kelviny.
- Na určenie teploty povrchu vplýva aj vlhkosť pôdy, farba, uhol snímania, drsnosť povrchu, a iné faktory.



Aplikácia: mestský ostrov tepla/ tepelný stres



Rozdiel medzi denným a nočným termálnym snímaním



jún 2015, Landsat 8 senzor TIRS

Aplikácia: stres vegetácie v dôsledku sucha a horúčav

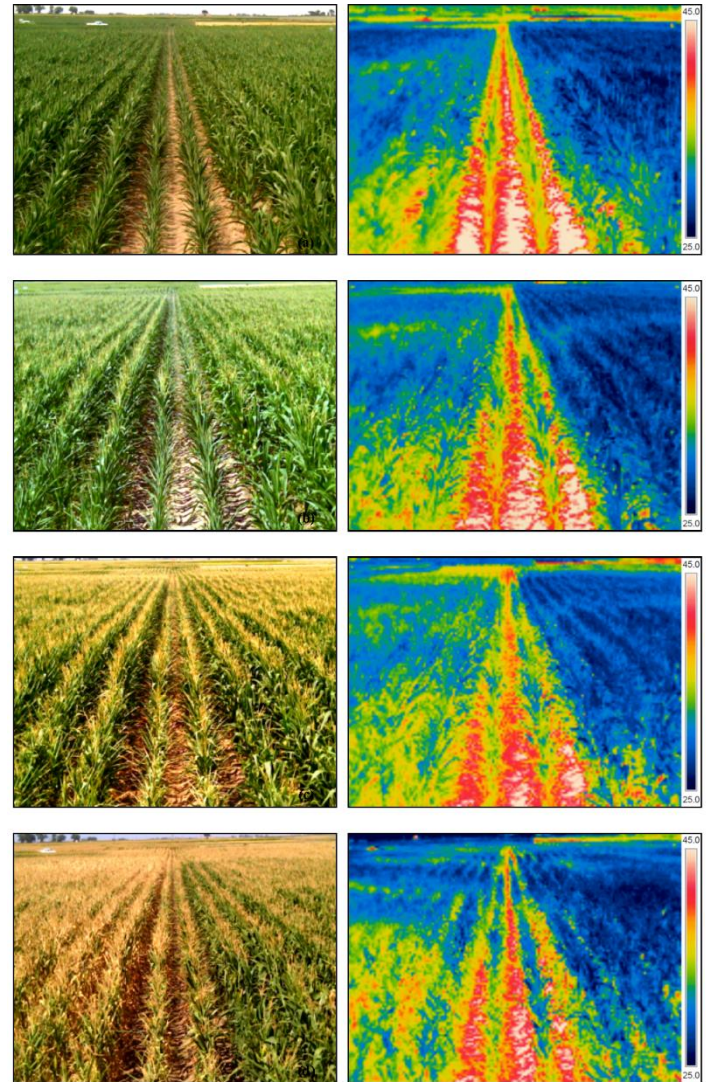
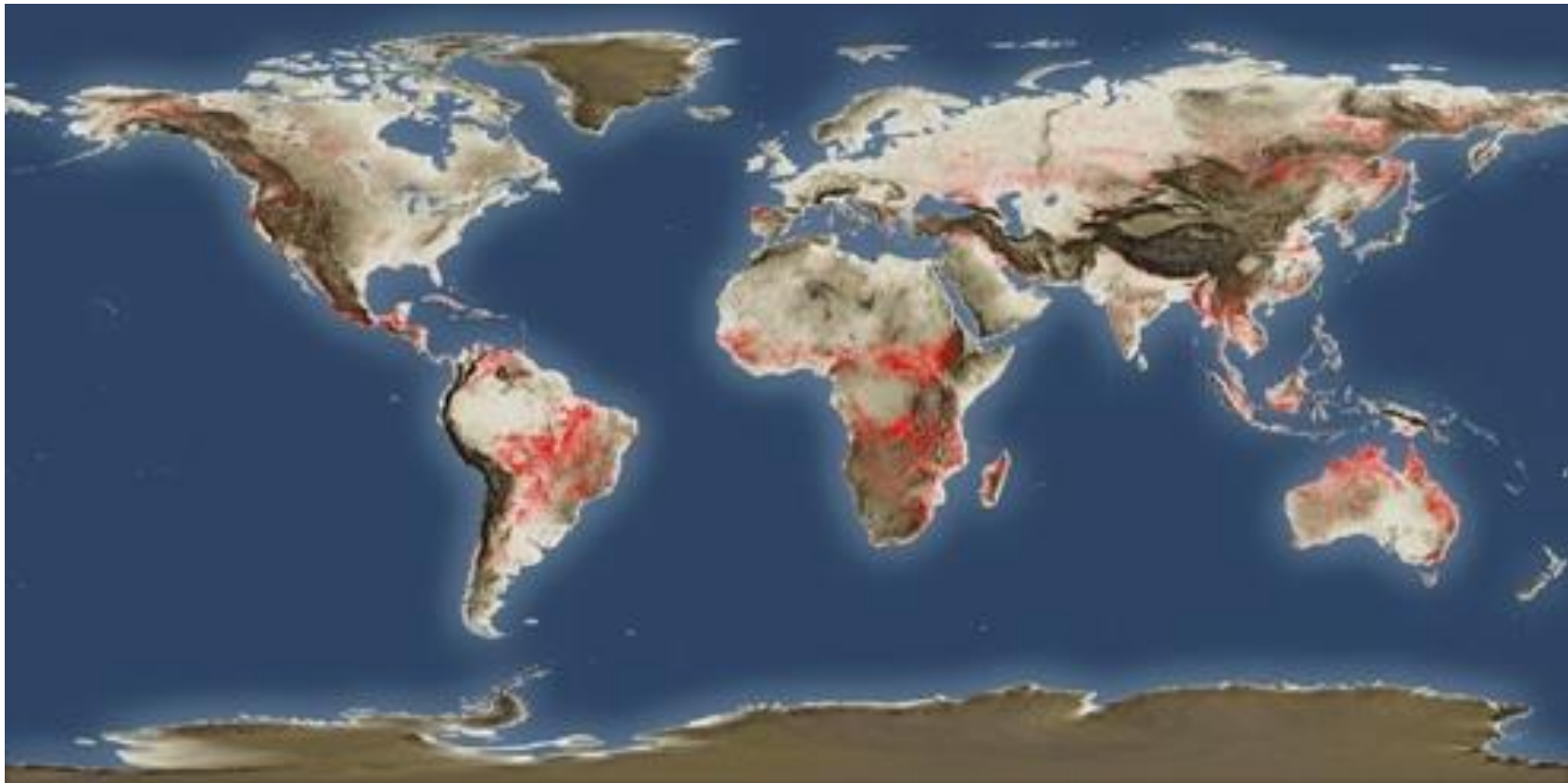


Figure 1. Thermal and visible images taken by the handheld camera on (a) Jul 19; (b) Jul 26; (c) /

Aplikácia: monitoring požiarov

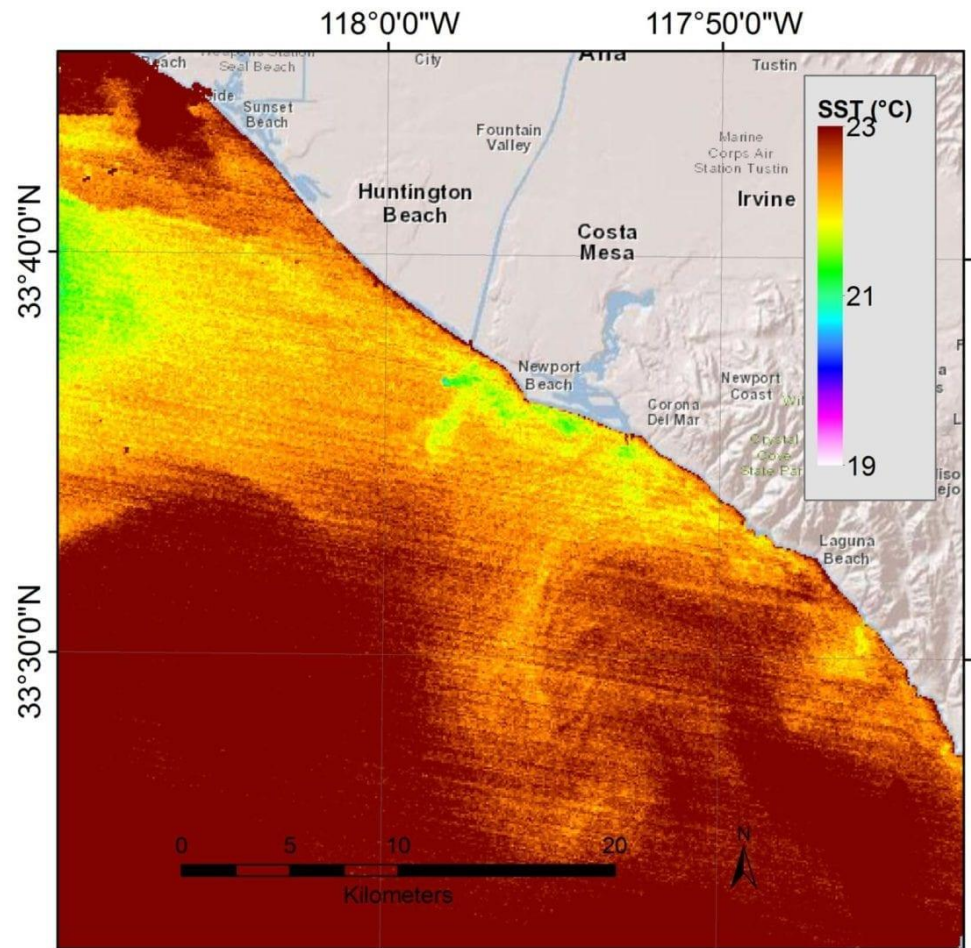
ESA: dáta z družice Sentinel 3



Aplikácia: detekcia odpadových vôd

Družica ASTER: pobrežie južnej Kalifornie, teplejšie odpadové vody vtekajú do Tichého oceánu

<https://earthzine.org/remote-sensing-of-stormwater-and-wastewater-plumes-in-southern-california/>

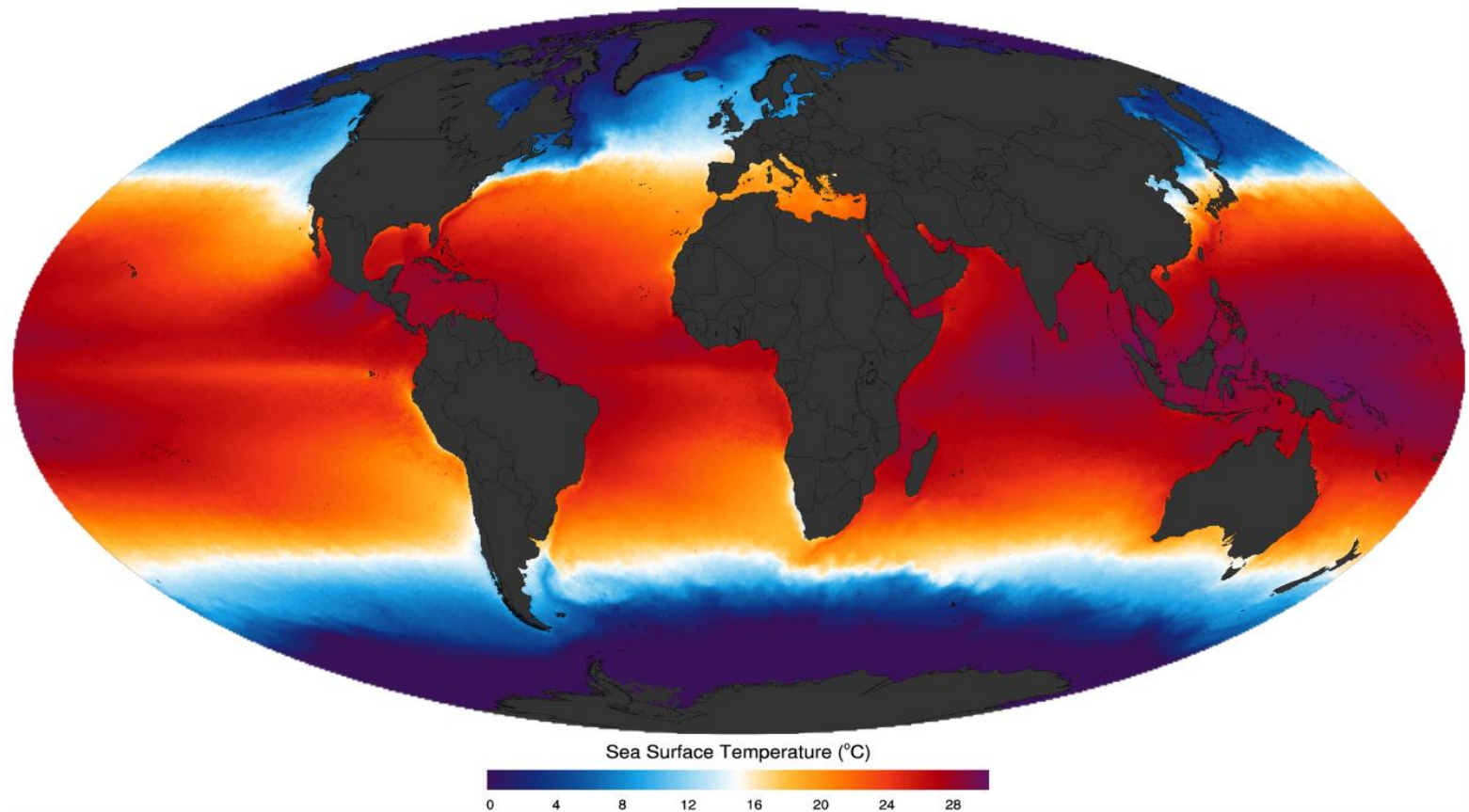


ASTER 9/23/12, 18:43:31

Created By: Develop JPL Fall 2012, Source: ASTER, Created On:10/10/12, WGS 1984 UTM Zone11N

Aplikácia: monitoring teploty oceánov, klimatické modelovanie, predpoveď počasia

Priemerná ročná teplota na hladine oceánu z družica Aqua



<https://earthobservatory.nasa.gov/global-maps/MYD28M>

Aplikácia: monitoring požiarov, vulkanickej činnosti, otvoreného ohňa

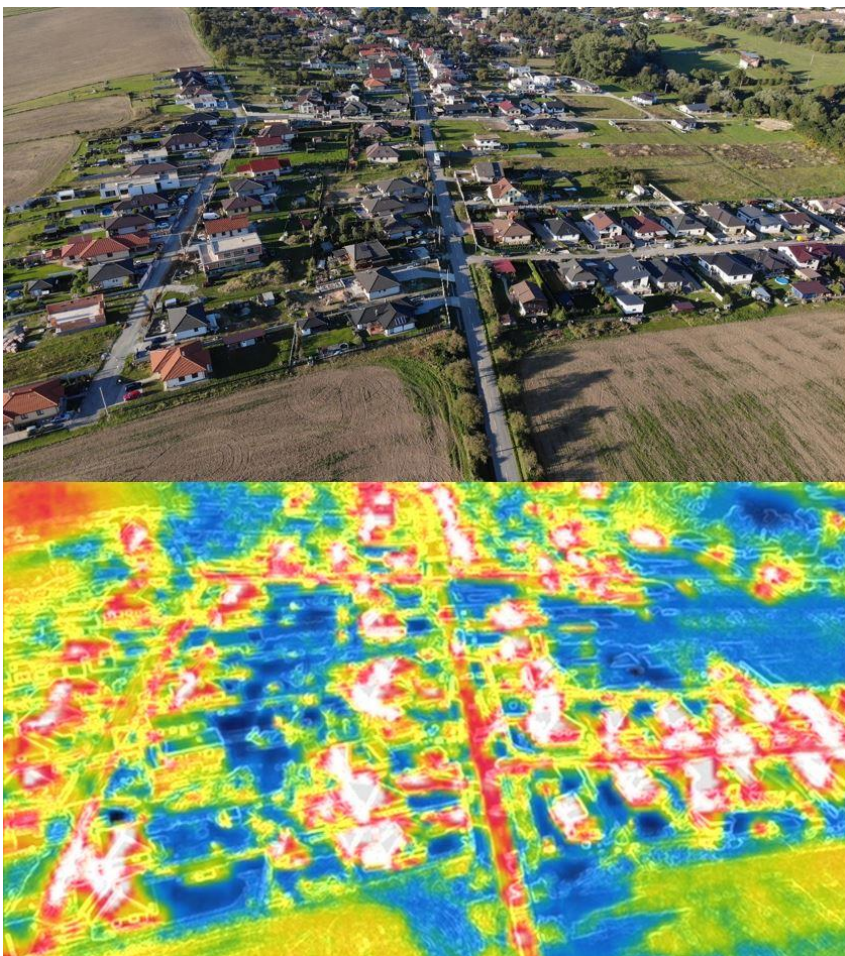
Fire Information for Resource Management: kompozícia zo 4 senzorov pre 5.11.2020



Družice s termálními skenermi

- Družice Landsat 5, 7, 8, 9
- Družica Sentinel 3
- Družica Terra/Aqua (senzor MODIS, ASTER)
- JPSS-1/NOAA-20 (senzor VIIRS)

Termálne snímanie z drónov

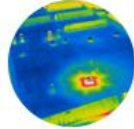


- DJI Mavic 2 Dual Enterprise s integrovaným trojosím gimbalom a termálnou kamerou FLIR

Termálne snímanie z drónov



Power Engineering



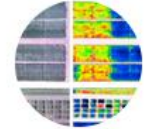
Flat Roofs



Photovoltaic
Power Plants



Cereal
Cultivation and
Phenotyping



Water Stress
Detection



Fakel Burner
Inspection



Security
Applications



Pipeline Inspection



Buildings



Firefighting



Gas Leak
Visualization

Termálne snímanie: zhrnutie

- Bežné teploty zemského povrchu sa pohybujú okolo $\sim 300 \text{ K} = 27 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Podľa Wienovho zákona maximum vyžarovania nastáva pri týchto teplotách medzi 8 - 14 μm vlnovej dĺžky.
- Našťastie pre vlnové dĺžky v tomto spektrálnom intervale je atmosféra priepustná („priehľadná“) v porovnaní s inými vlnovými dĺžkami pre vyššie alebo nižšie teploty povrchu.
- Napriek tomu atmosféra oslabuje zaznamenanú intenzitu vyžarovania najmä pre obsah vodnej pary
- Tento efekt atmosféry treba korigovať – atmosférická korekcia
- Pre ešte presnejší výpočet teploty povrchu treba uvažovať rôznu emisivitu materiálov na povrchu, pretože ide o šedé telesá (nie ideálne čierne, kde emisivita = 1)

