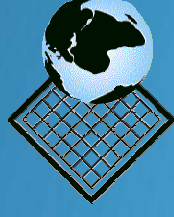
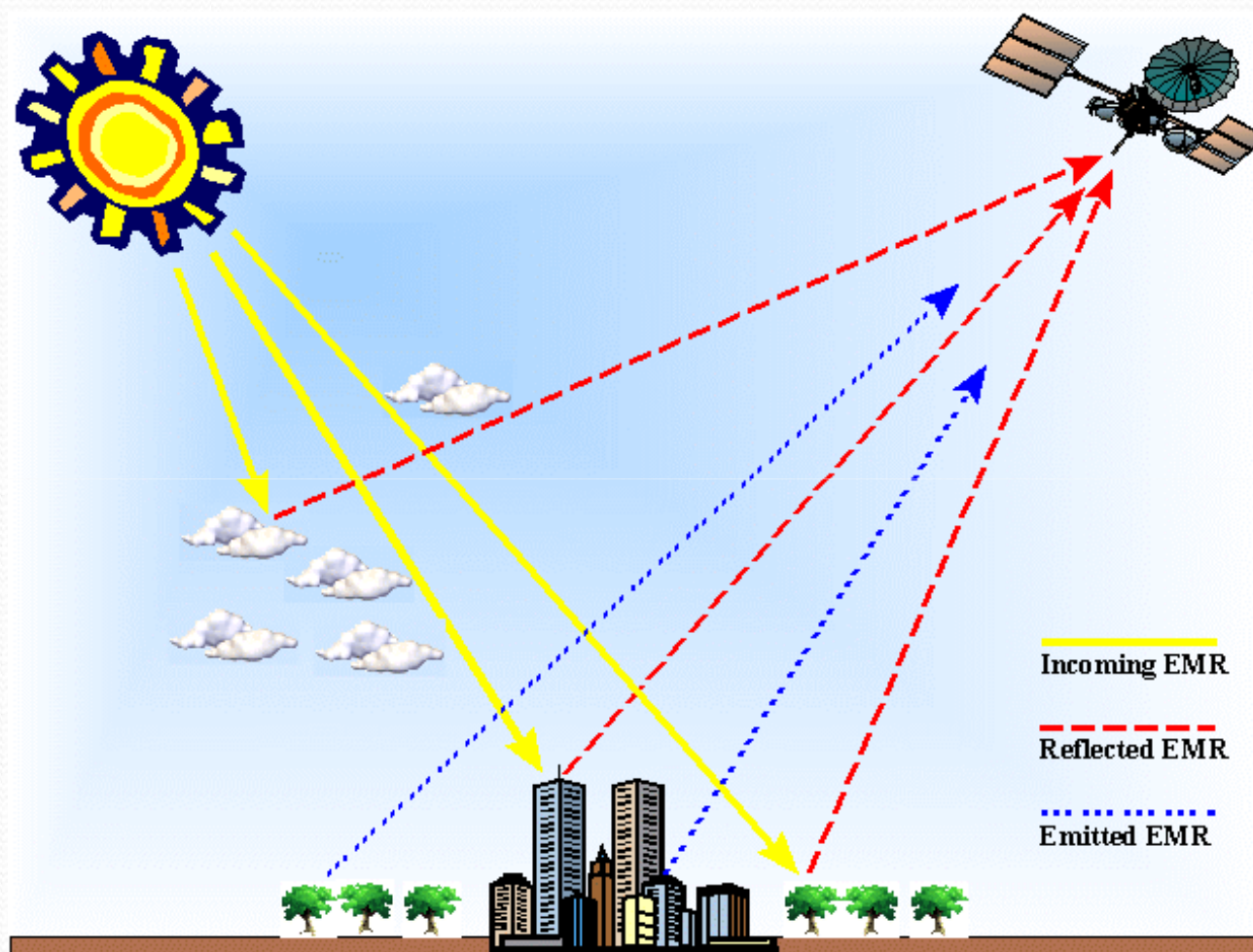


Dálkový průzkum země v termální části spektra

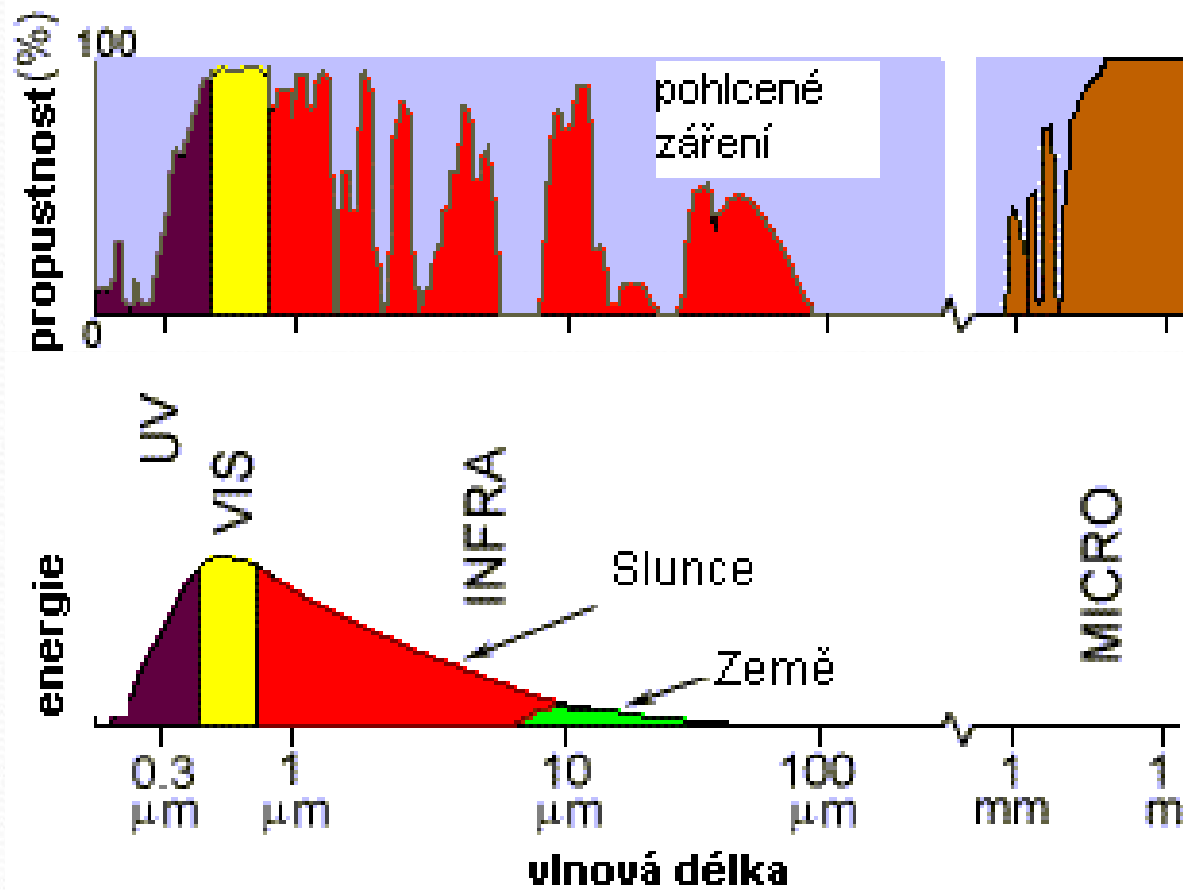


Princip termálního snímání



Metoda pasivní nepřímá

Fyzikální podstata



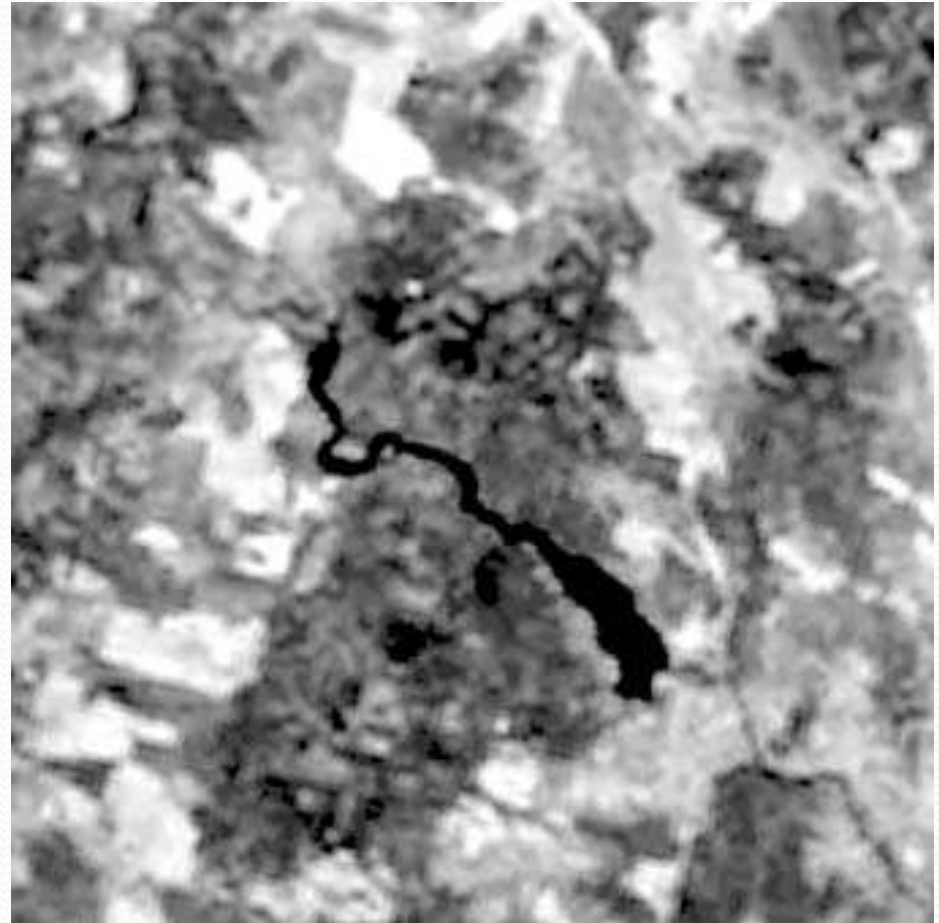
Charakteristika

- Termální oblast spektra zahrnuje vlnové délky od 3 μm (atmosférická okna v intervalech 3-5 μm a 8-12 μm), v oblastí 3-5 μm velká intenzita odraženého záření Slunce – měření pouze v noci, v oblasti 8-12 μm podíl Slunce malý, možno měřit i ve dne
- Ovlivnění okolními podmínkami, atmosférou, nutné znát emisivitu objektů
- Intenzita elektromagnetického záření v těchto vlnových délkách je malá
- V těchto vlnových délkách převažuje vlastní vyzařování objektů nad odraženým slunečním zářením – získání informací o radiační teplotě objektů
- Dlouhovlnné vyzařování je vnějším projevem energie tělesa

Charakteristika

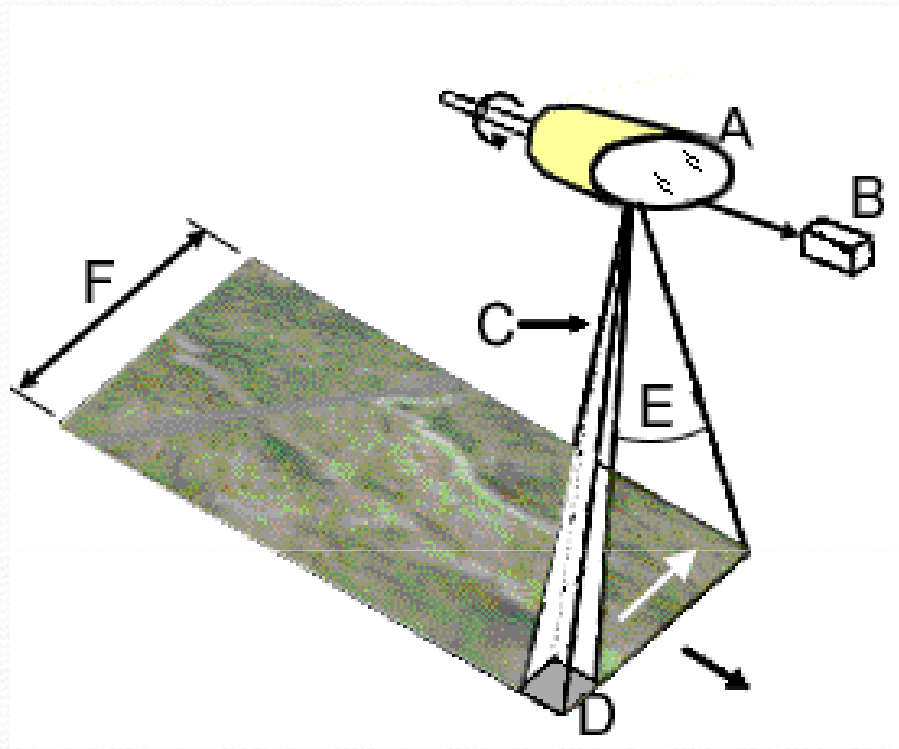
- **Termální snímky se vyznačují menší prostorovou rozlišovací schopností (Landsat 120m, Aster 90m)**
- **Z termálních snímků lze získat charakteristiky území, které jsou klasickými metodami zjistitelné pouze bodovým měřením.**
- **Termální část spektra umožňuje získat především informace o teplotních vlastnostech objektů (tepelná bilance objektů, povrchová teplota oceánů SST, tepelné znečištění jezer a řek, lokalizace lesních požárů)**

Vzhled termálních obrazových záznamů



Termální snímek LANDSAT Thematic Mapper 6, 120 m pixel

Princip práce termálního skeneru



- Princip mechanooptického snímání
- Čidlo – fotonové detektory ochlazované na nízkou teplotu (až -200°C)
- Přístroje umožňují měřit radiační teplotu s přesností $0,1^{\circ}\text{C}$.

Radiační (jasová) teplota

(brightness temperature)

- Tradičním měřením teploty (teploměrem) je měřena tzv. kinetická teplota (termodynamická – meteorologie) - je **interním projevem energie molekul**
- Stefan-Boltzmannův zákon:

$$M = \sigma T^4$$

- Objekty vyzařují energii jako funkci své teploty
- Vyzařování je **vnějším projevem energie tělesa**, která je v DPZ měřena
- Změřená vyzářená energie vyjadřuje tzv. **radiační (jasovou) teplotu tělesa**

Radiace z reálných povrchů

- Každé těleso, které má teplotu vyšší než absolutní nula (minus 273,15 °C) emituje záření, jehož intenzita a spektrální složení jsou funkcí typů materiálu a jeho teploty.
- Reálný povrch emituje pouze část záření, které by emitovalo absolutně černé těleso o stejné teplotě
- Tato míra vyzařovací schopnosti každého reálného tělesa se nazývá koeficient vyzařování - emisivita (ε)

$$\varepsilon = \frac{M_R(T)}{M_A(T)}$$

$M_R(T)$ - intenzita vyzařování reálného objektu o teplotě T

$M_A(T)$ - intenzita vyzařování absolutně černého tělesa o teplotě T

Emisivita základních druhů povrchů

- Většina reálných povrchů se chová jako tzv. selektivní zářič
- Jejich emisivita nabývá hodnot 0 až 1 a mění se s vlnovou délkou
- Určité povrchy vyzařují jako černé těleso v určitých vlnových délkách – (voda 6 až 14 μm).
- U takových povrchů není problém měřit teplotu metodami DPZ
- Hodnoty emisivity základních druhů povrchů na souši se výrazně mění v čase i v prostoru

Emisivita základních druhů povrchů

- V řadě případů lze z termálních snímků získat pouze kvalitativní informaci
- Silný vliv na měření tepelné energie metodou DPZ mají meteorologické podmínky
- Pro přesná měření teploty je nutné provádět tzv. atmosférické korekce

Druh povrchu	teplota [° C]	emisivita
sníh	-10	0,85
písek	20	0,90
les	20	0,90
beton	20	0,92
suchá půda	20	0,92
vlhká půda	20	0,95
destilovaná voda	20	0,96
led	-10	0,96

Hodnoty emisivity vybraných materiálů (Hudson 1969)

Interakce tepelného záření na zemském povrchu

zákon zachování energie

$$M_I = M_A + M_R + M_T$$

M_I - intenzita záření dopadajícího na povrch tělesa

M_A - intenzita pohlceného záření

M_R - intenzita odráženého záření

M_T - intenzita propouštěného (vedeného) záření

$$\frac{M_I}{M_I} = \frac{M_A}{M_I} + \frac{M_R}{M_I} + \frac{M_T}{M_I}$$

Interakce tepelného záření na zemském povrchu

Charakteristiky, které popisují schopnost povrchu absorbovat, odrážet a vést elektromagnetické záření:

$$\alpha(\lambda) = \frac{M_A}{M_I} \qquad \rho(\lambda) = \frac{M_R}{M_I} \qquad \tau(\lambda) = \frac{M_T}{M_I}$$

$\alpha(\lambda)$ - pohltivost

$\rho(\lambda)$ - odrazivost

$\tau(\lambda)$ - propustnost

$$\alpha(\lambda) + \rho(\lambda) + \tau(\lambda) = 1$$

Z Kirkhoffova zákona plyne, že emisivita objektu je rovna jeho pohltivosti na dané vlnové délce. (tělesa, která elm. energii intenzivně vyzařují, budou také intenzivně pohlcovat a naopak)

Položku propustnosti $\tau(\lambda)$ lze považovat v DPZ za rovnu nule

Emisivita reálných povrchů

$$\varepsilon(\lambda) + \rho(\lambda) = 1$$

- Čím nižší je odrazivost tělesa, tím vyšší je jeho emisivita a naopak.
- Emisivita vodních ploch v termální části spektra je blízká 1
- Emisivita povrchů, které výrazně odrážejí záření, je naopak nízká (kovové povrchy)

Emisivita reálných povrchů

Stefan - Boltzmannův zákon upravený pro reálná tělesa
(množství energie vyzářené objektem je fci jeho teploty)

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

- V důsledku různé emisivity stejně teplých objektů termální senzor naměří odlišné hodnoty
- Uvedený vztah umožňuje získat radiační teplotu reálných těles z termálních snímků a následně díky znalosti emisivity spočítat reálnou teplotu povrchu

Vztah mezi radiační a reálnou teplotou povrchu

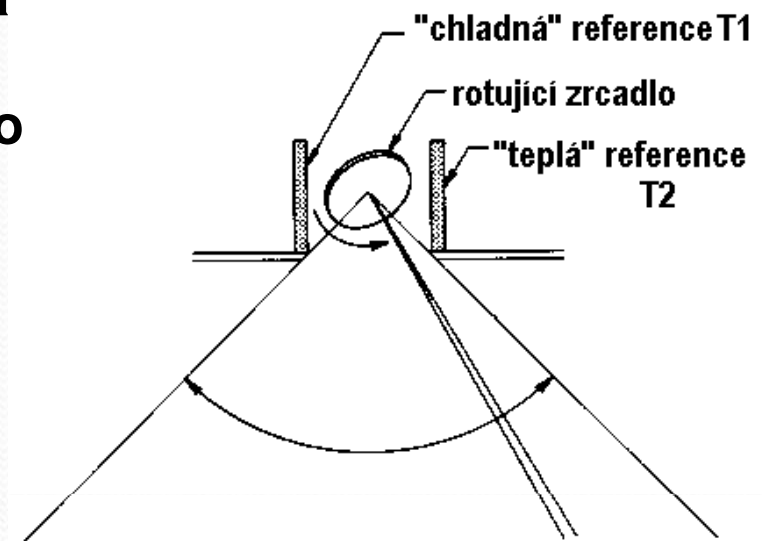
$$T_{rad} = \varepsilon^{\frac{1}{4}} T_{kin}$$

Radiační teplota povrchů je v důsledku emisivity nižší než teplota kinetická (reálná).

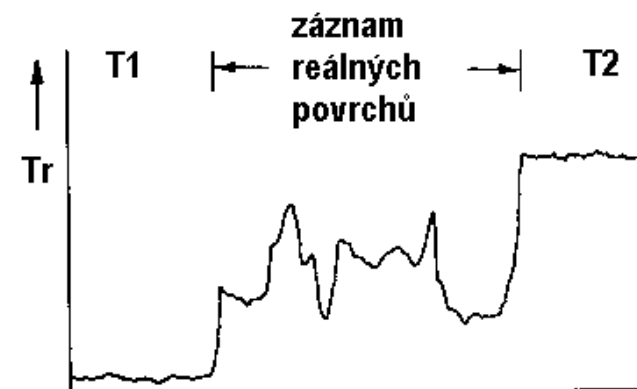
Kalibrace termálních obrazových záznamů

Vzhledem ke geometrickým distorzím mechanicko-optického skeneru je obtížná přesná lokalizace na termálním snímku, možná kombinace leteckého a termálního (pouze ve dne) nutná přesná kalibrace senzoru

- Kalibrace založená na snímání referenčních ploch o známé teplotě (obr. vpravo), přesnost $0,1-1^{\circ}\text{C}$, závisí na parametrech měř. systému, char. povrchu (voda přesnější než souš)
- Kalibrace založená na současných pozemních měřeních teploty vzduchu, vstup atmosférických modelů – tlak vzduchu, obsah CO_2 , teplotní profil atmosféry, princip korelace měření ve stejný čas, sestavena kalibrační křivka korigující výsledky



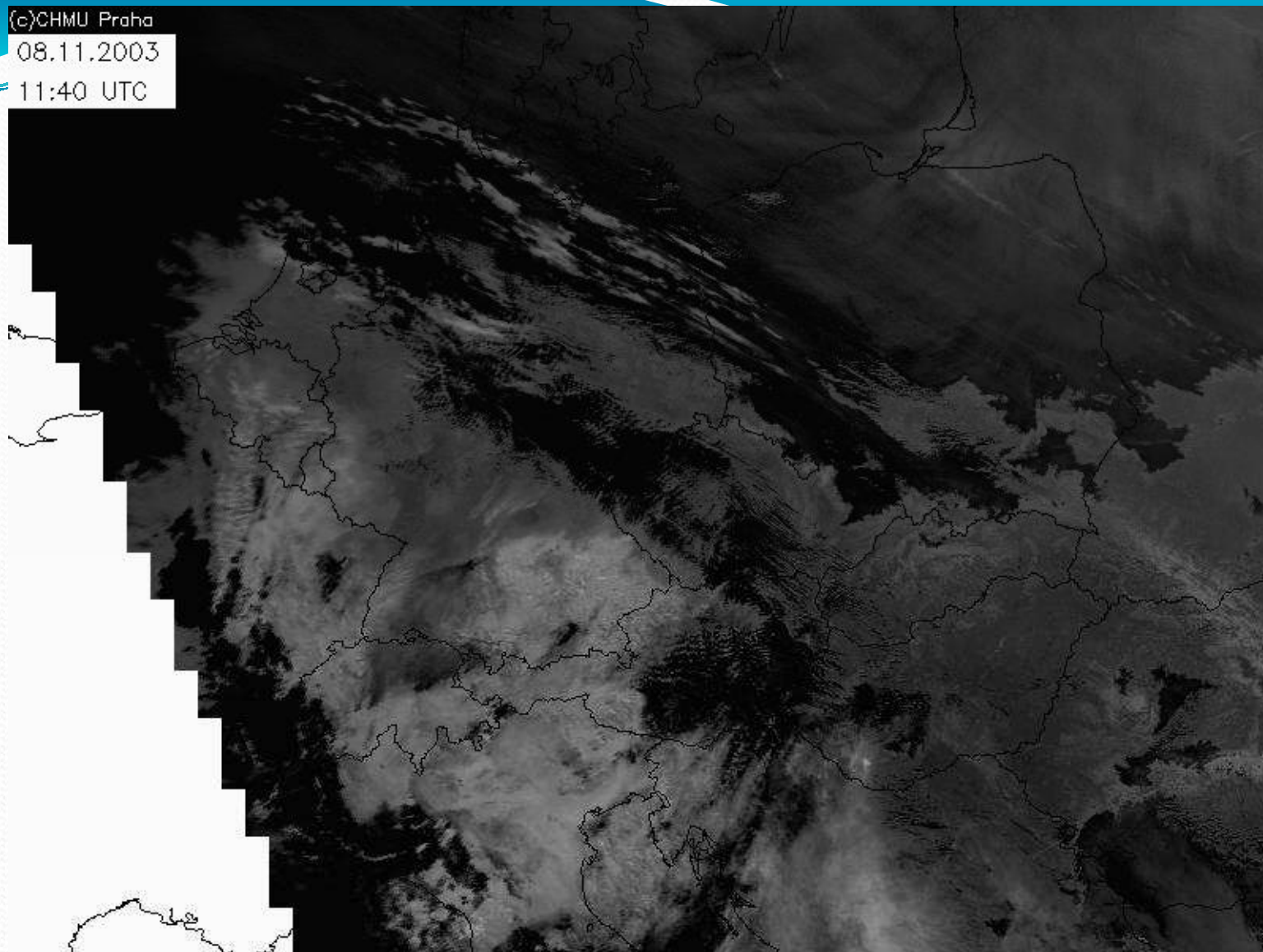
řádek zaznamenaný termálním skenerem



Zdroje termálních snímků

- Termální snímky poskytují všechny meteorologické družicové systémy (METEOSAT, NOAA) a to i v několika pásmech
- Snímky jsou vytvářeny i na snímcích družic pro výzkum přírodních zdrojů (LANDSAT, TERRA)
- Termální snímání se často provádí i z letadel, RPAS (UAV) (termovize)
- Velká většina termálních obrazových záznamů poskytuje pouze kvalitativní informaci

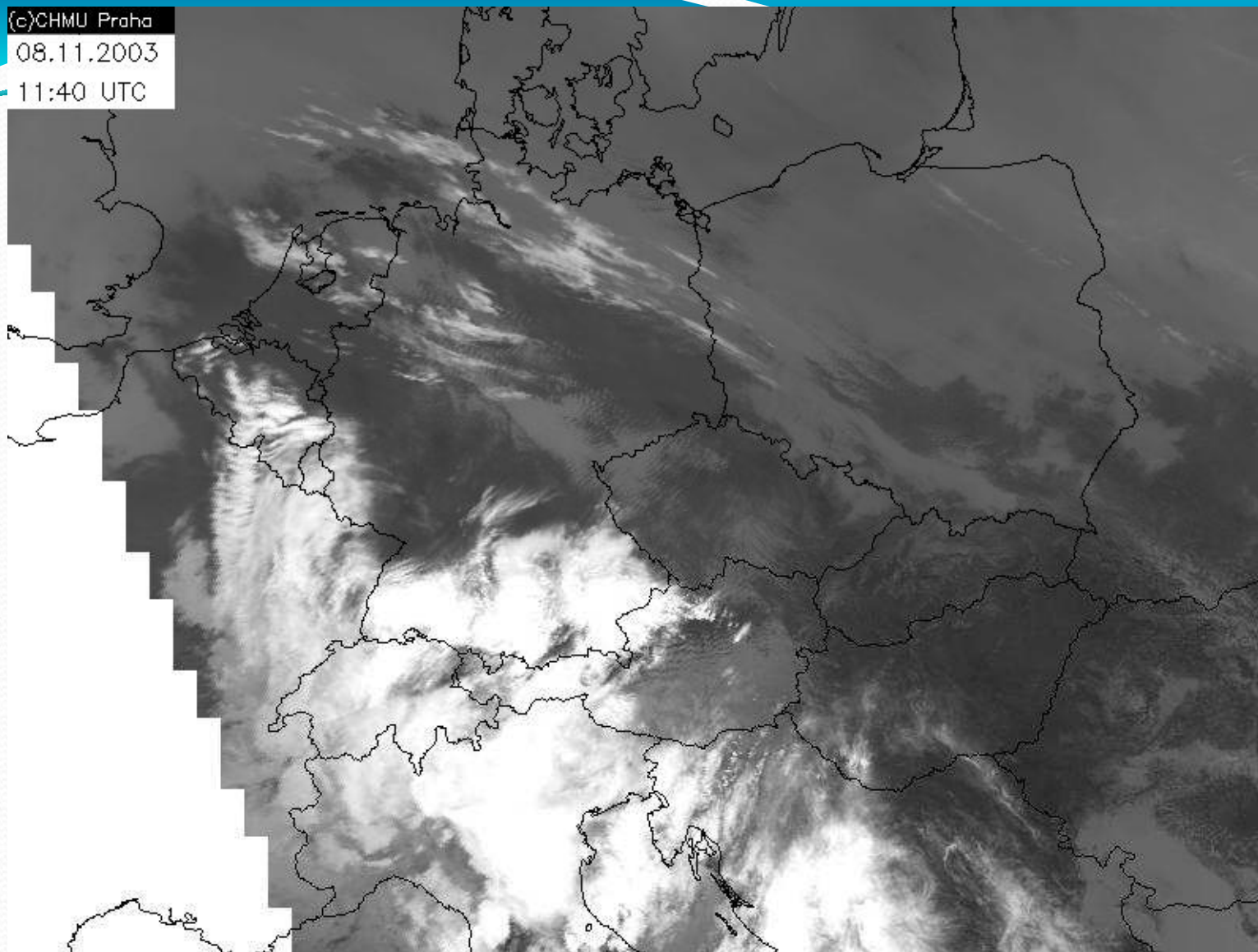
(c)CHMU Praha
08.11.2003
11:40 UTC



Pásma 3B 3,6-3,9 μm

Termální snímky z družice NOAA, skener AVHRR, 1100 m pixel

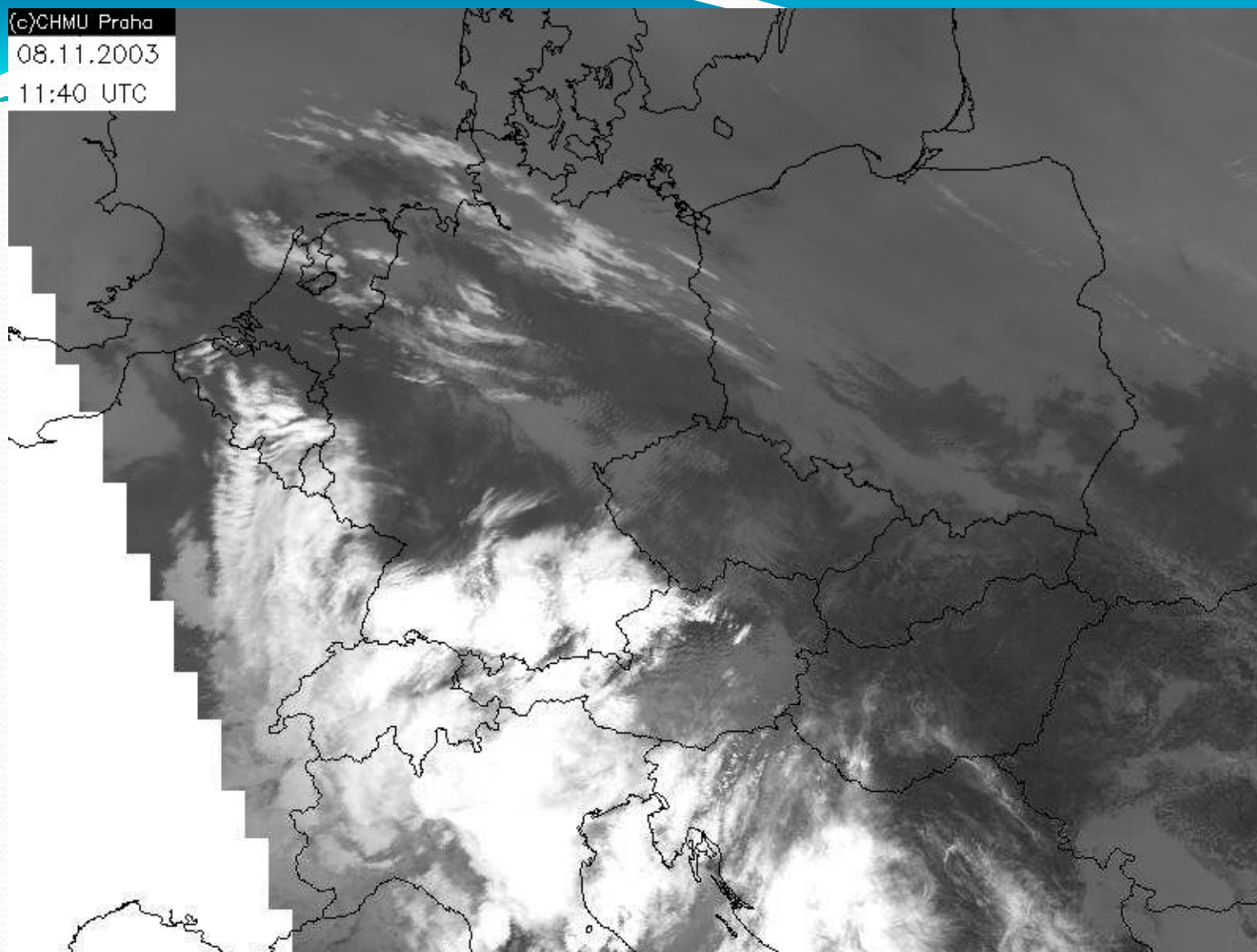
(c)CHMU Praha
08.11.2003
11:40 UTC



Pásmo 4 10,3- 11,3 μm

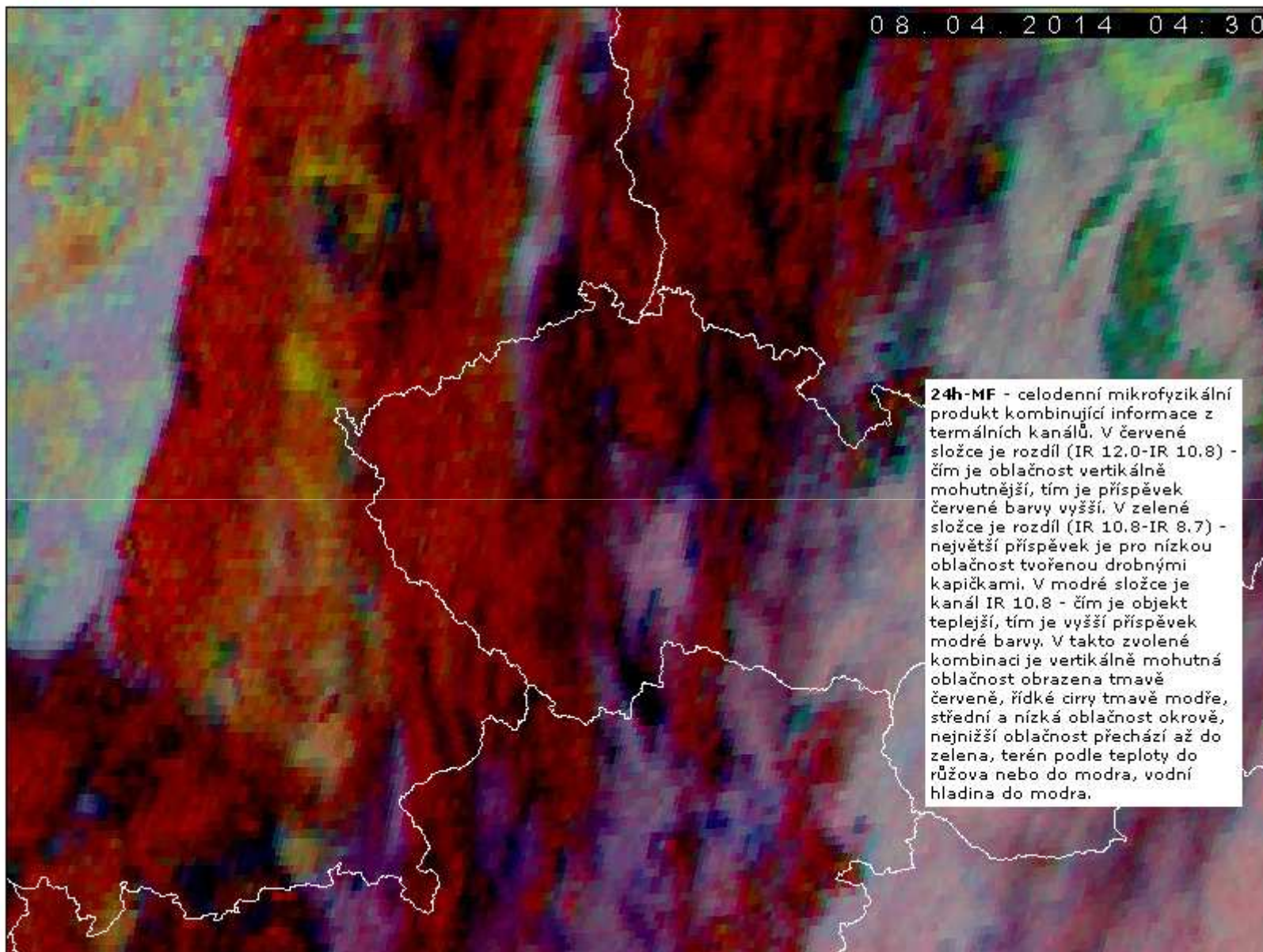
Termální snímky z družice NOAA, skener AVHRR, 1100 m pixel

(c)CHMU Praha
08.11.2003
11:40 UTC



Pásmo 5 11,5- 12,5 μm

Termální snímky z družice NOAA, skener AVHRR, 1100 m pixel



Barevná syntéza z termálních snímků družice METEOSAT

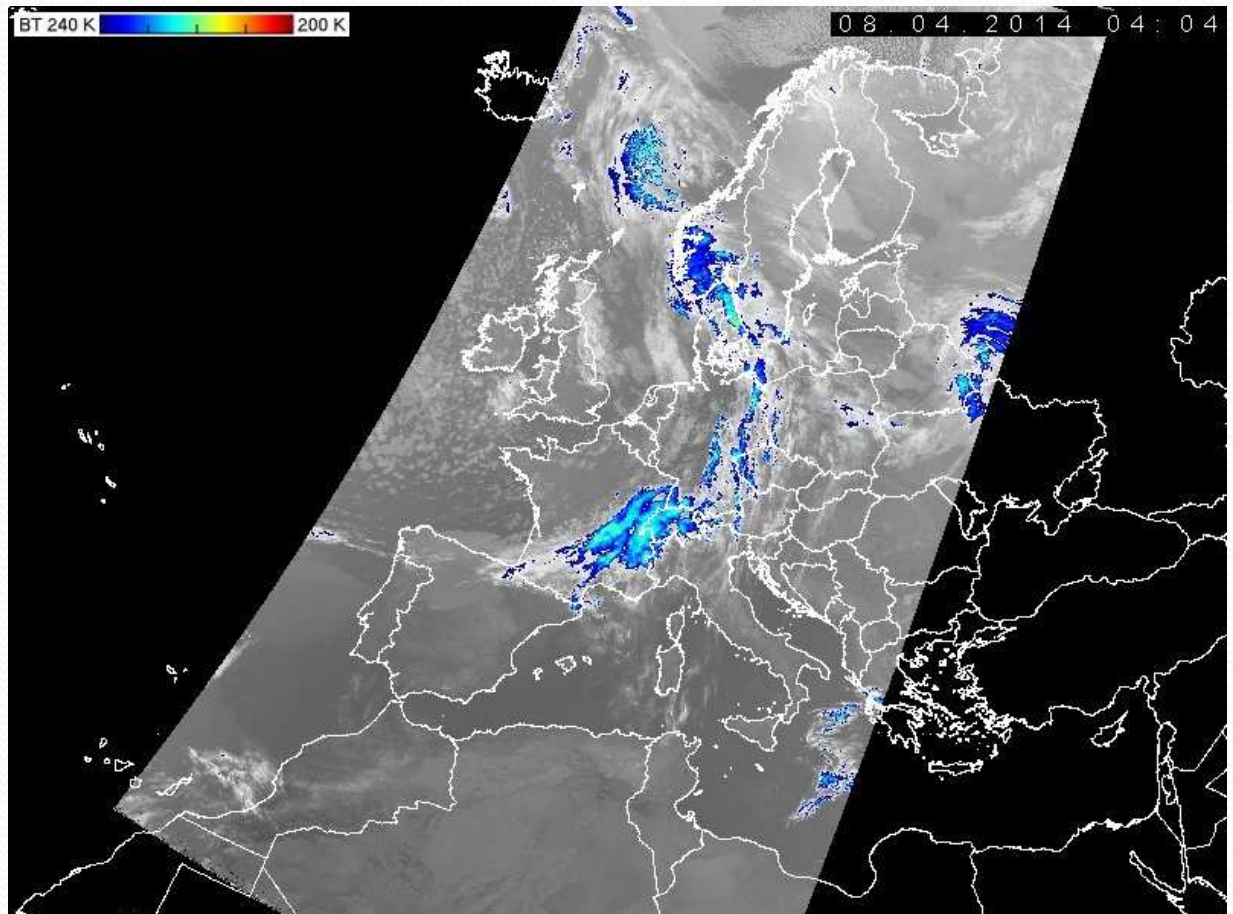
Vzhled a vlastnosti termálních snímků

- Termální snímky jsou většinou zobrazovány ve stupních šedi.
- Obvykle světlé tóny na snímku reprezentují teplé povrchy.
- Na meteorologických snímcích je škála tónů opačná.

- Často se teplotní rozdíly vyjadřují v barevné stupnici (tzv. pseudobarevný režim)

kanál 4 se snímku družice NOAA s barevně zvýrazněným teplotním intervalem 200-240 K

Zdroj: ČHMÚ



Vzhled a vlastnosti termálních snímků

- Protože obrazy zachycují dlouhovlnnou část spektra mimo viditelné vlnové délky, mají často velmi neočekávaný vzhled daný teplotními rozdíly povrchů na snímku.**
- V důsledku rozdílných teplotních vlastností povrchů mají denní a noční snímky velmi odlišný vzhled.**
- Termální obrazové záznamy často nezobrazují ani hlavní terénní tvary**
- Mají málo orientačních bodů, často se proto používají v kombinaci s fotografií, snímkem z optické části spektra či mapou**

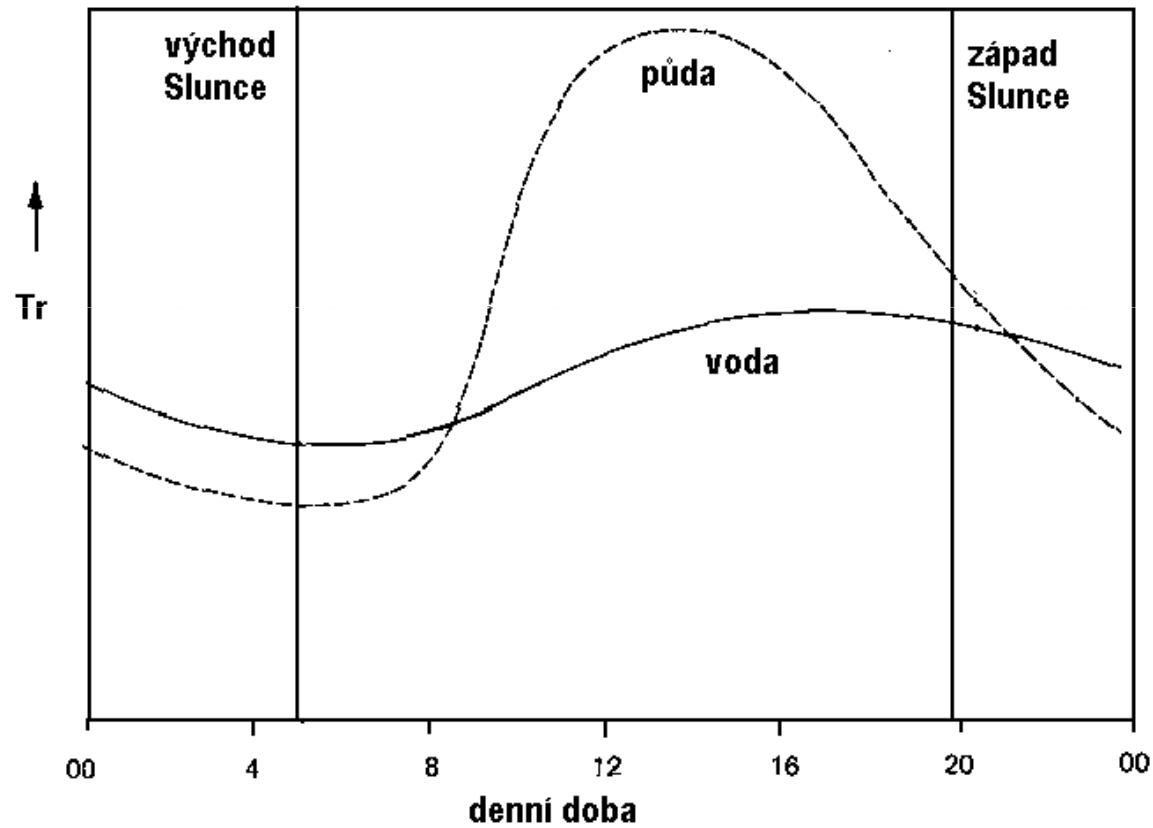
Vzhled a vlastnosti termálních snímků

- **Vzhled termálních obrazových záznamů je ovlivňován teplotními vlastnostmi povrchů (vodivost, tepelná kapacita, tepelná setrvačnost).**
- **Vzhled snímků je ovlivňován dále též topografií, orientací snímaných povrchů.**
- **Vegetační kryt vytváří velmi komplexní povrch s množstvím ke Slunci orientovaných nebo naopak zastíněných částí.**
- **Voda výrazně mění teplotní vlastnosti povrchů. Termální snímky mohou sloužit k mapování půdní vlhkosti či obsahu vody ve vegetačním krytu.**

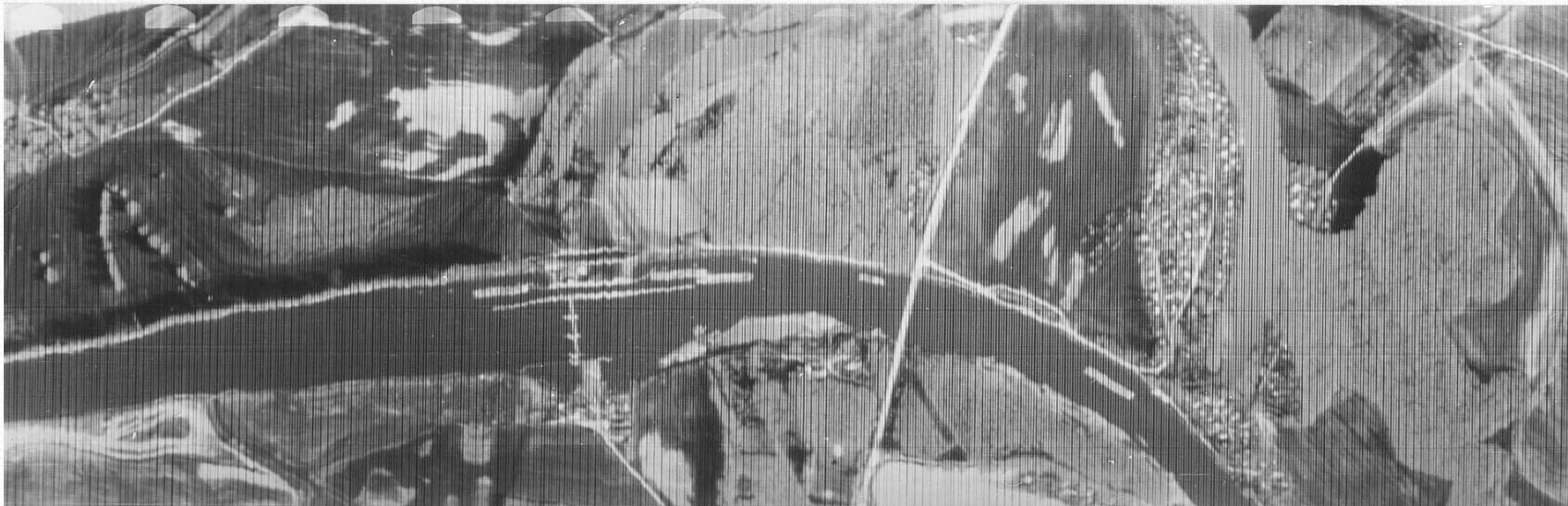
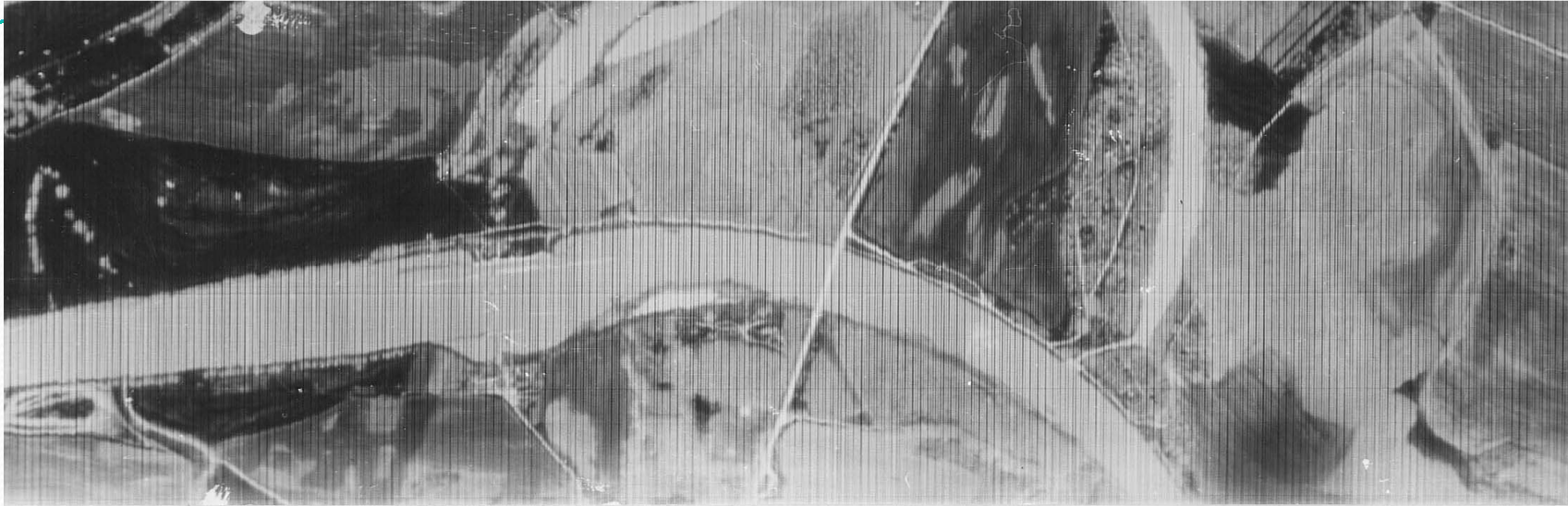
Vzhled a vlastnosti termálních snímků

- Krátkovlnné sluneční záření bude ovlivňovat vzhled termálních snímků pouze v oblasti 3-5 μm a nebude mít vliv na delší vlnové délky (8-14 μm).
- Denní snímky v první uvedené části spektra (3-5 μm) budou obsahovat tzv. termální stíny v částech, kam nedopadá přímé sluneční záření.
- Množství přijatého záření bude modifikovat také orientace svahů.
- Tyto efekty jsou minimalizovány na obrazových záznamech pořízených těsně před východem Slunce.

Denní chod radiální teploty



Termální snímky denní a noční



Termální snímky denní a noční



Termální snímky denní

Terén bývá světlejší než voda, voda bývá velmi tmavá. Tmavšími tóny bývá znázorněn i lesní porost. Teplotní rozdíl mezi lesem a okolní volnou krajinou může být až 5° C.

V denních hodinách je vedle vlastního dlouhovlnného vyzařování objektů registrováno i vyzařování okolních objektů nebo zpětné záření atmosféry, bývají denní snímky charakterizovány značnou tónovou proměnlivostí.

Z tohoto důvodu se také často provádí termální snímání po západu Slunce, kdy jsou ještě patrné teplotní kontrasty různých povrchů.

Termální snímky noční

Na nočních snímcích bývají vodní plochy naopak teplejší než terén, který na rozdíl od vody teplo poměrně rychle ztrácí.

Při teplotní inverzi, kdy se v údolích hromadí studený vzduch, bývají nižší polohy znázorněny tmavšími tóny než teplejší vyšší polohy.

Teplotní mapování

Při přesné kalibraci termálních obrazových záznamů jich lze využít k sestavování map teplotních charakteristik studovaného území.

Cílem je nalézt vztah mezi hodnotou obrazového prvku a teplotou objektu:

$$DN = A + B \cdot \varepsilon \cdot T^4$$

DN - hodnota naměřená termálním radiometrem

A, B - kalibrační konstanty radiometru

ε - emisivita

T - kinetická teplota

Teplotní charakteristiky povrchů

Na termálních snímcích lze sledovat:

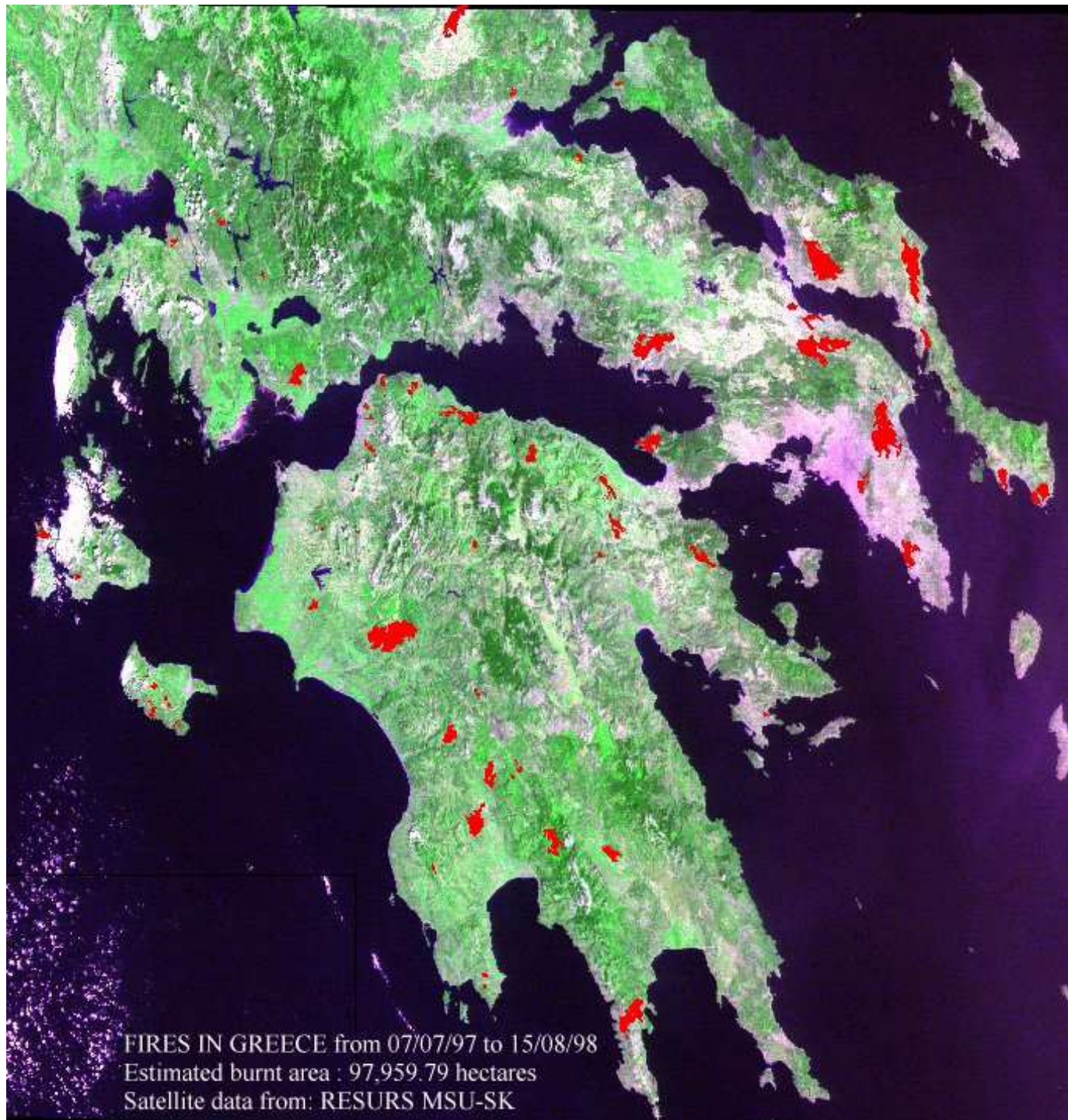
- Jevy a procesy bodové (např. lokalizace termálních pramenů)**
- Jevy a procesy plošné (např. lesní požáry).**
- Mnoho aplikací má pouze kvalitativní povahu (geologie, pedologie) – není třeba znát přesnou hodnotu, stačí relativní vztahy mezi objekty, některé vyžadují přesná kvantitativní měření (teplota vypouštěná z atomové elektrárny)**

Příklady aplikací

- **mapování povrchové teploty půdy**
- **odhady radiační bilance území**
- **studium teplotního znečištění**
- **určování druhů hornin**
- **lokalizace geologických zlomů**
- **mapování půdních druhů a vodního obsahu půd**
- **lokalizace netěsností zavlažovacích kanálů**
- **zjišťování teplotních charakteristik vulkánů**
- **studium evapotranspirace**
- **lokalizace teplých a studených pramenů a gejzírů**
- **studium cirkulace v nádržích, jezerech i mořích**
- **lokalizace lesních požárů a požárů uhelných slojí**

Monitorování lesních požárů

- **Hodnocení rizika vzniku požárů**
- **Detekce ohnisek a rozsahu požárů**
- **Mapování následků požárů**



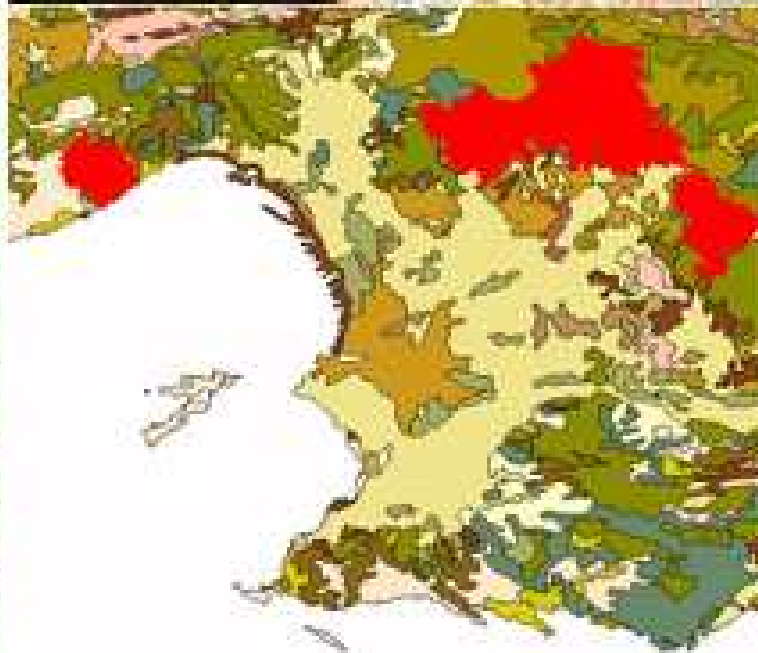
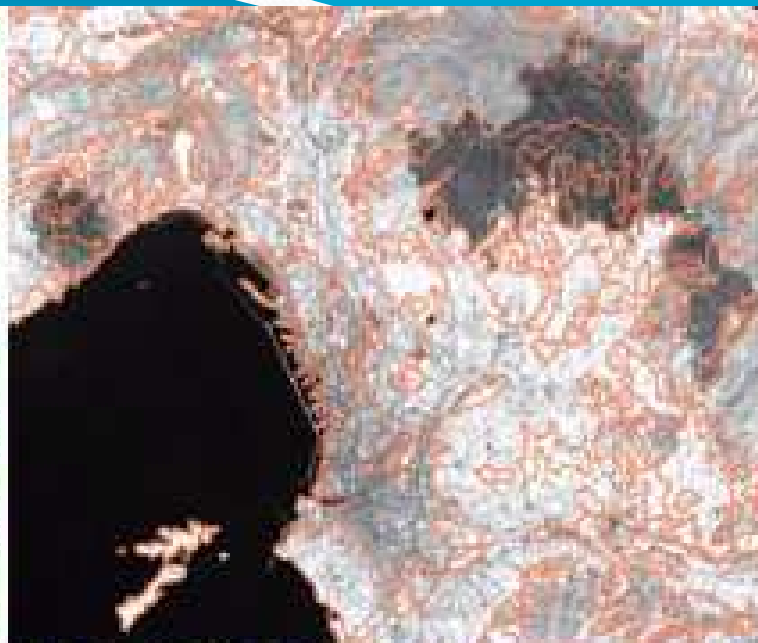
FIRES IN GREECE from 07/07/97 to 15/08/98
Estimated burnt area : 97.959.79 hectares
Satellite data from: RESURS MSU-SK

Peloponéský
poloostrov

Družice
RESURS
MSU-SK,

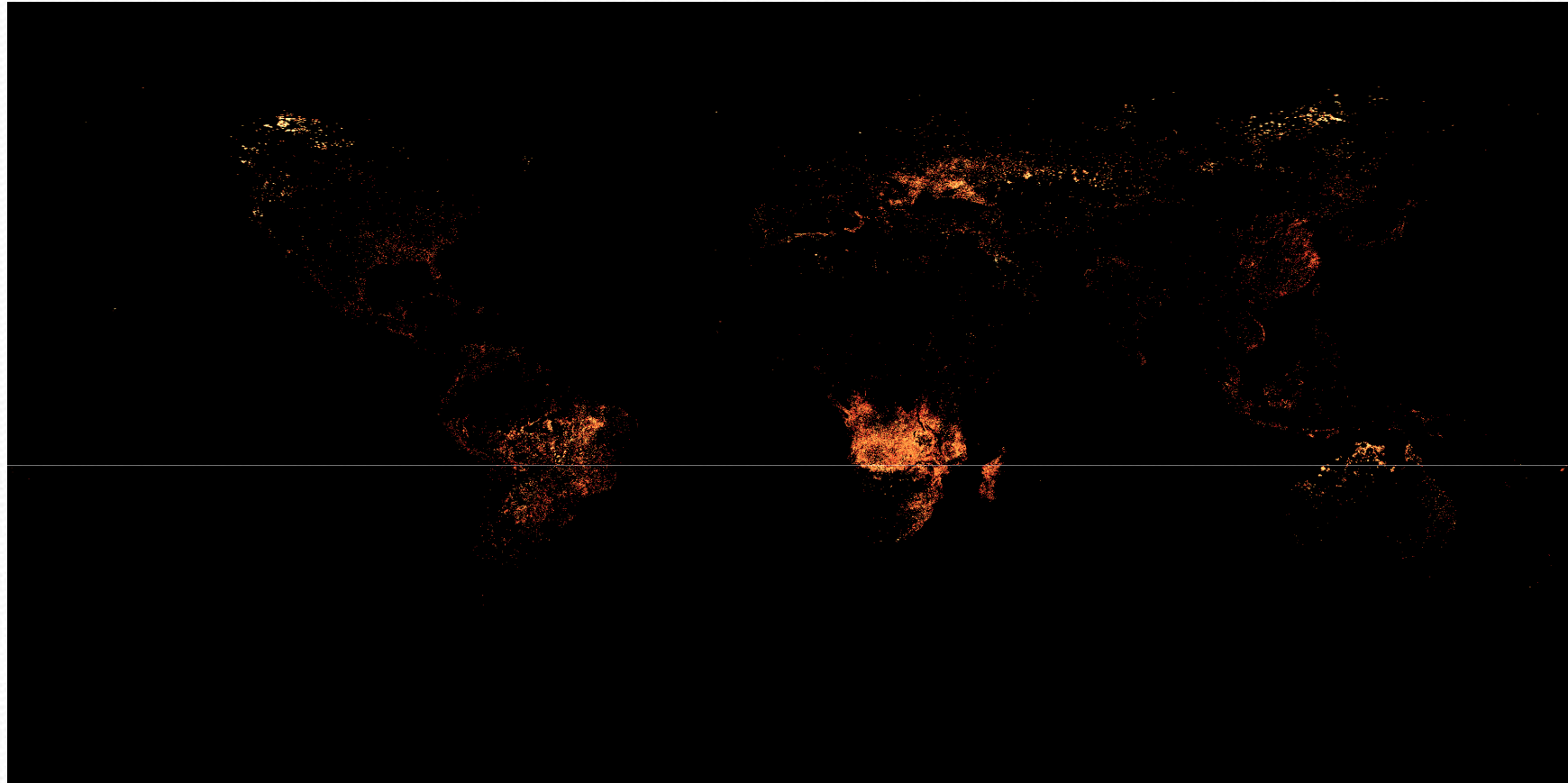
Pixel 600 m

**Monitorování
požárů**



**Monitorování
požárů**

Sledování aktivních požárů (Terra/MODIS)



http://neo.sci.gsfc.nasa.gov/view.php?datasetId=MOD14A1_M_FIRE&year=2014

http://earthobservatory.nasa.gov/GlobalMaps/view.php?d1=MOD14A1_M_FIRE

Fire M3 – algoritmus detekce požárů ze snímků (NOAA-14 AVHRR)

Kalibrace, radiometrická a
geometrická korekce snímků

$(T3) > 315 \text{ K}$

NO

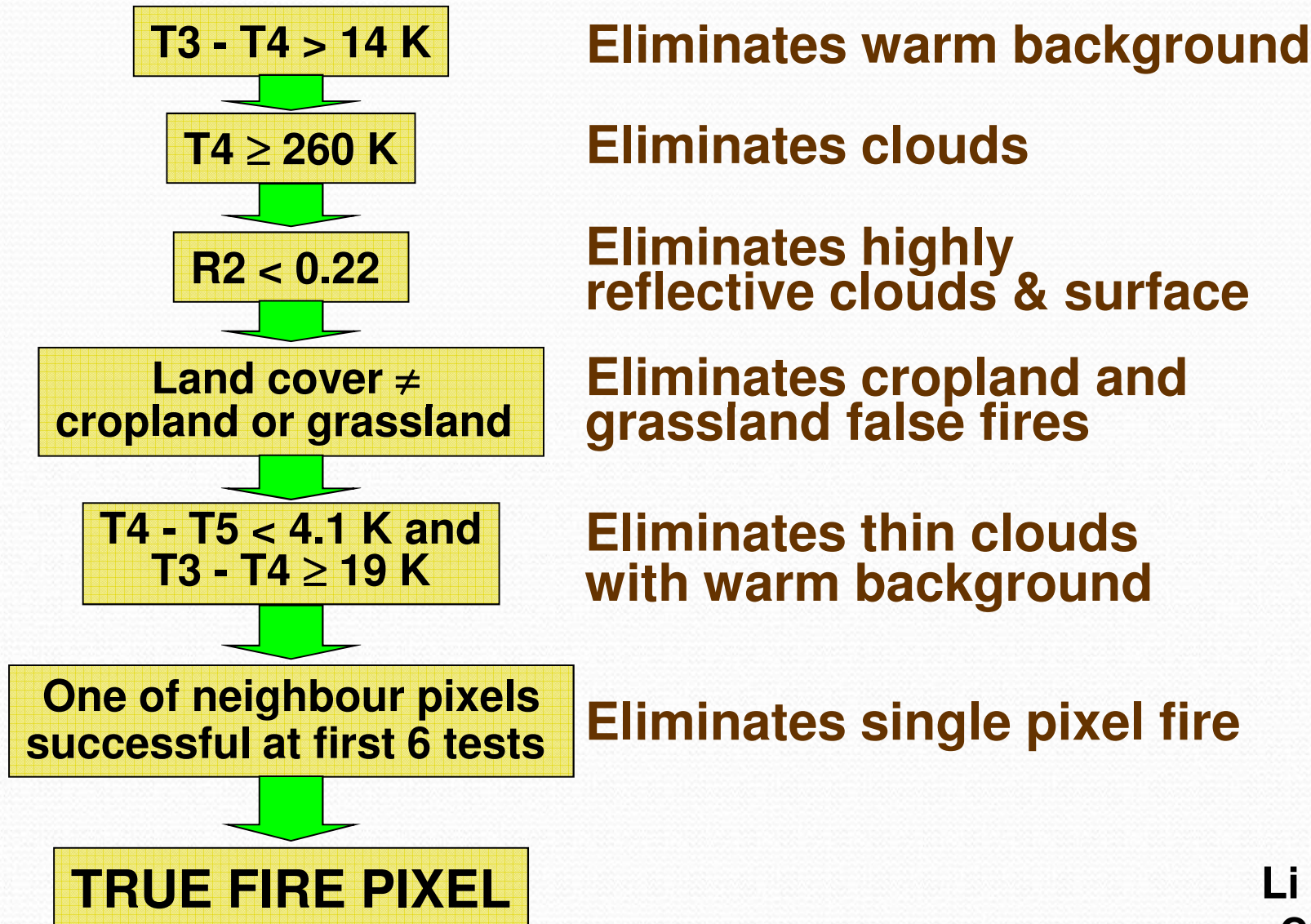
Fire clear pixel

Yes

Fire pixel

1. Vyhledávání „podezřelých“
pixelů pomocí 3. pásma AVHRR

2. Algoritmus detekce ploch postížených požárem

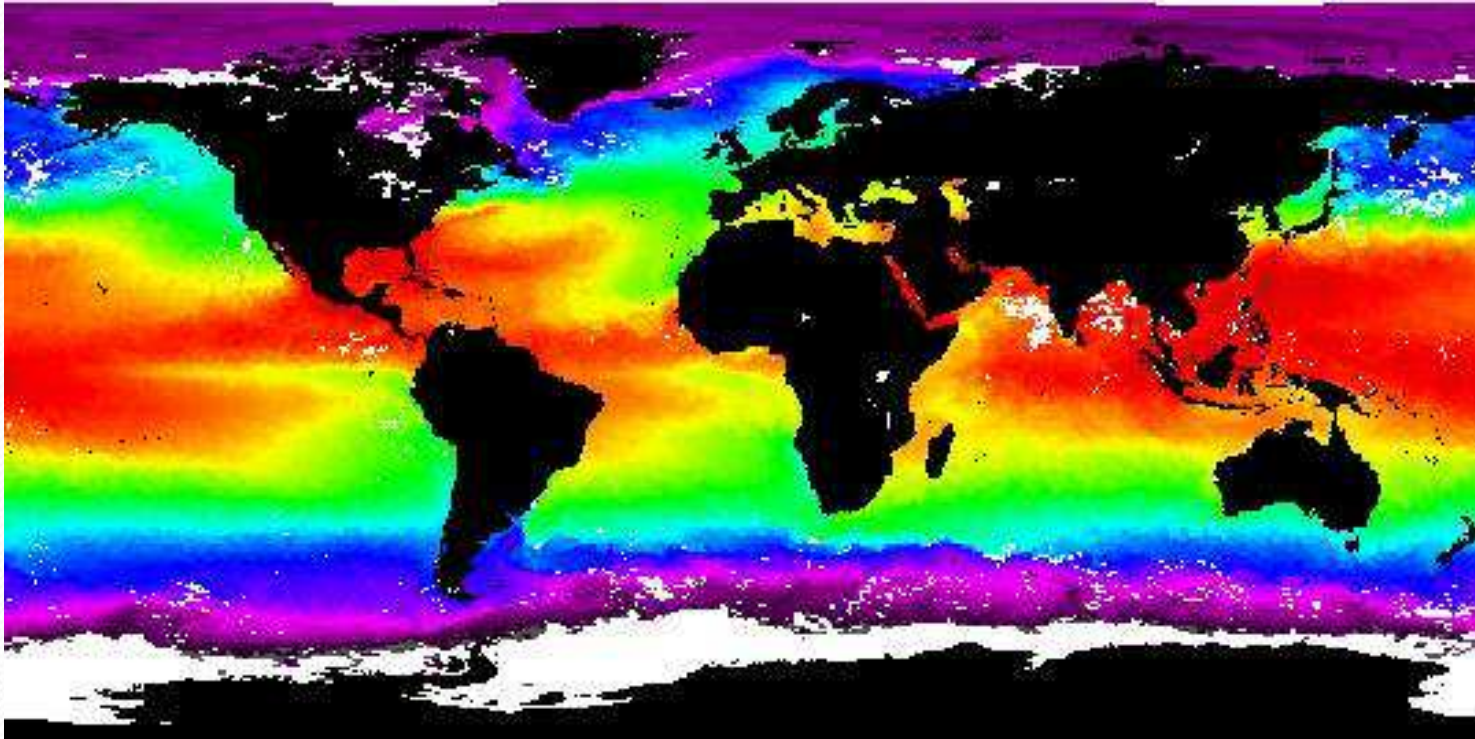


Mapování SST (Sea Surface Temperature) z družicových měření

Využitelnost SST:

- Studium kolísání klimatu
- Studium jevu ENSO
- Vstup do GCM (Global Circulation Models)

Výpočet SST ze snímků družice NOAA AVHRR



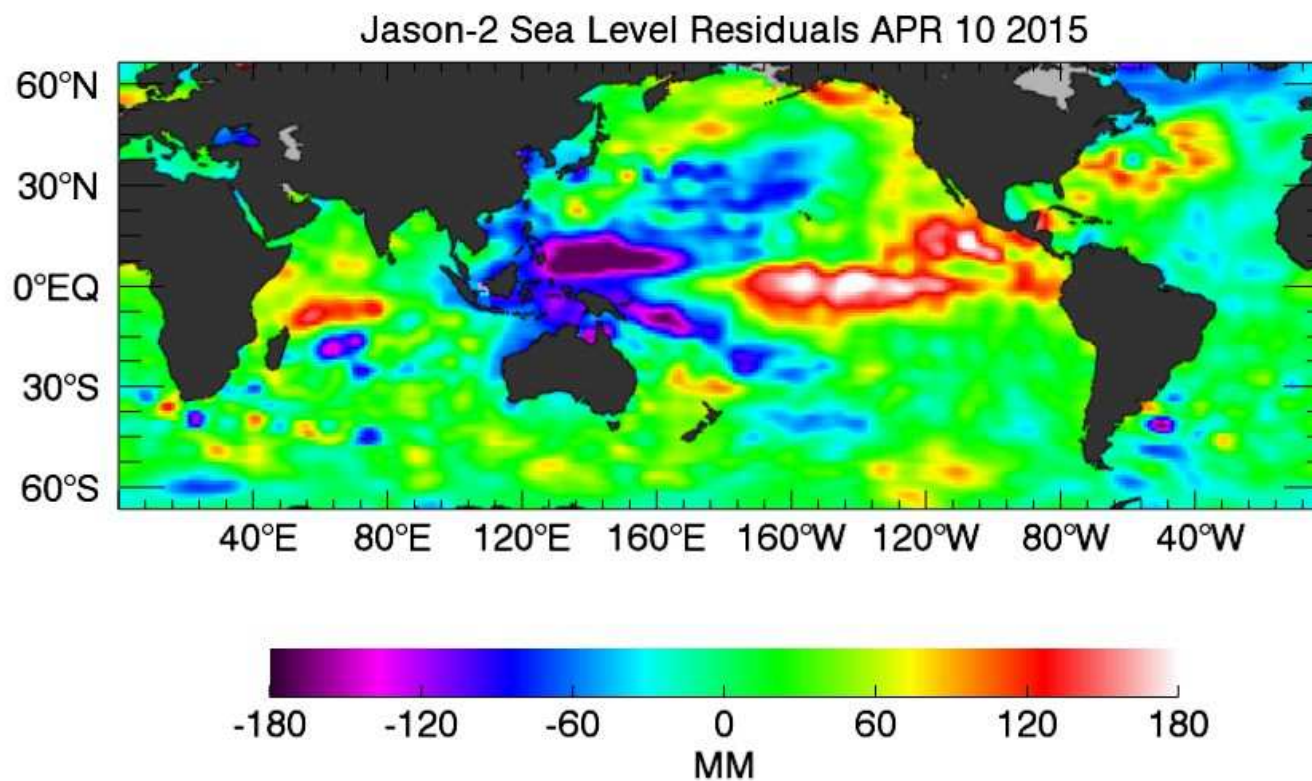
$$\text{SST} = a_0 + a_1 T_3 + a_2 T_4$$

a_0, a_1, a_2 – konstanty odvozené empiricky z regresního vztahu

T_3 – radiační (jasová) teplota 3. pásma AVHRR (3,55 – 3,93 mikrometrů)

T_4 – radiační (jasová) teplota 4. pásma AVHRR (10,3 – 11,3 mikrometrů)

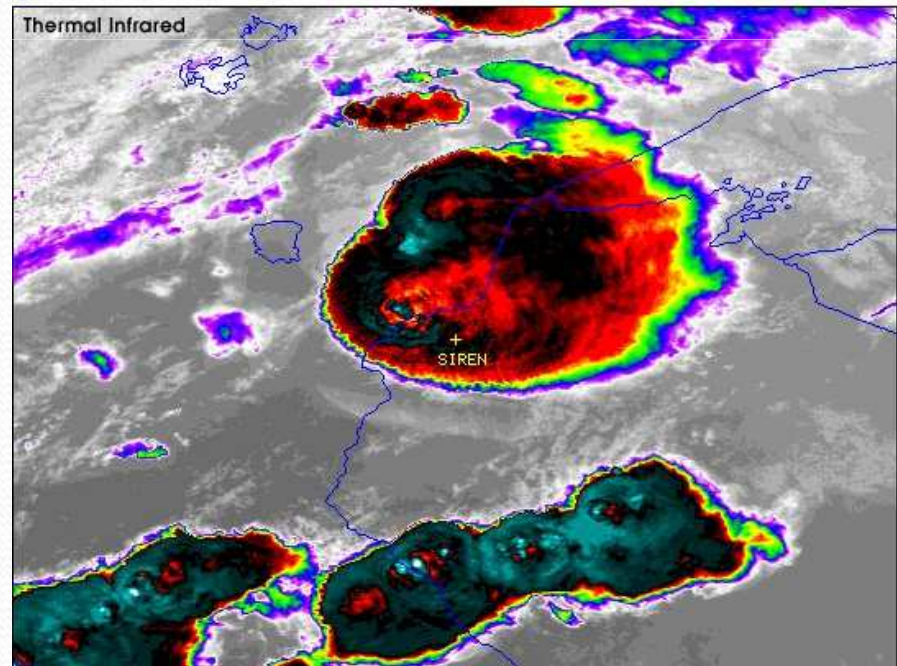
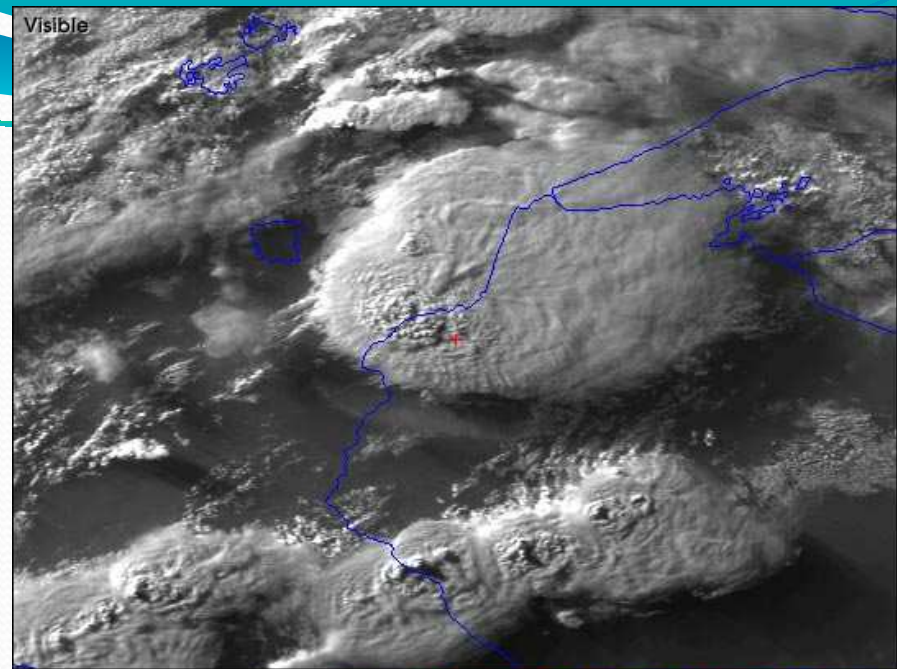
Studium jevu ENSO s využitím map SST



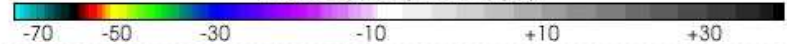
https://sealevel.jpl.nasa.gov/science/el_nino_pdo/latestdata/

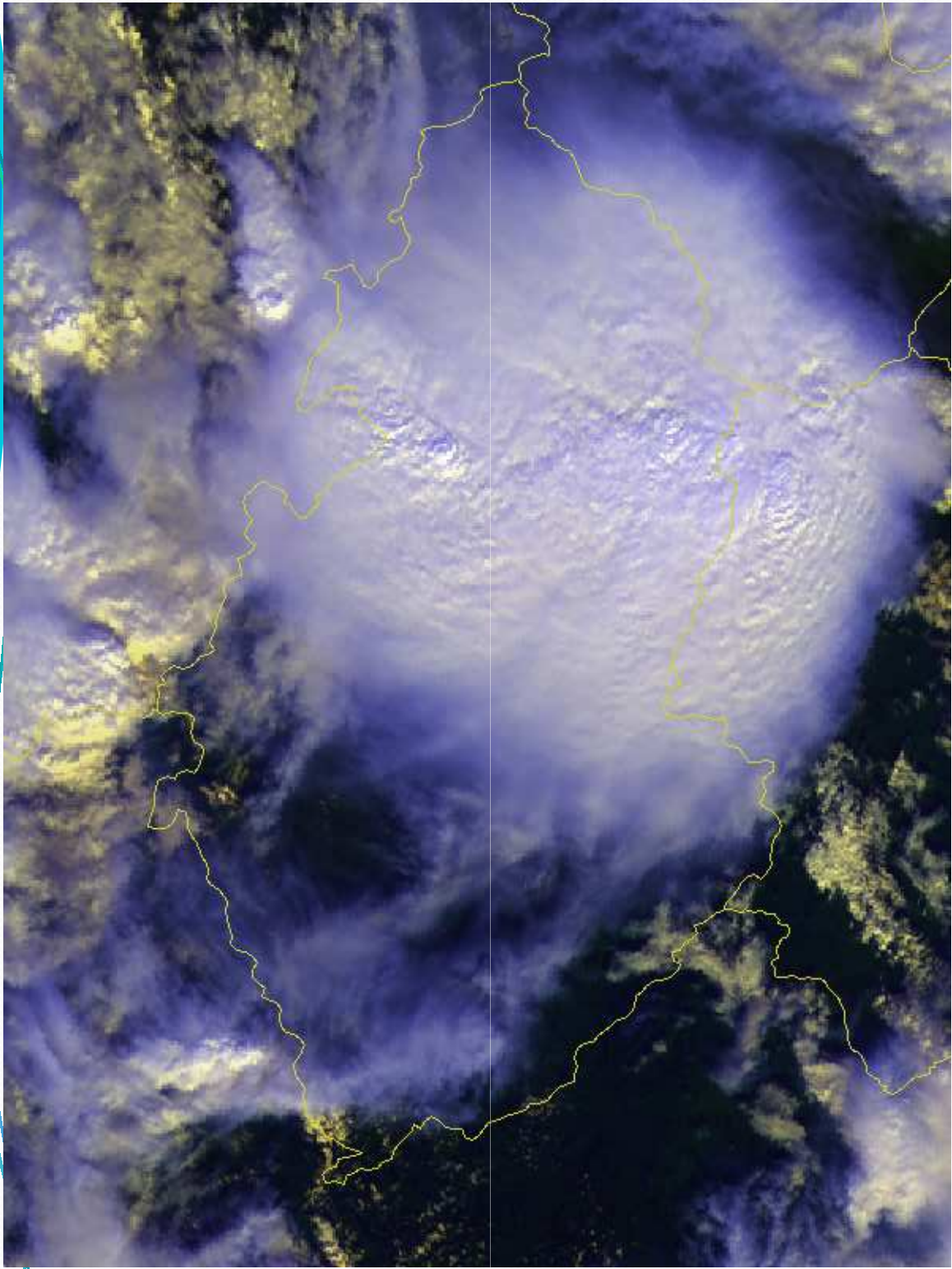
Mapování extrémních projevů konvekce

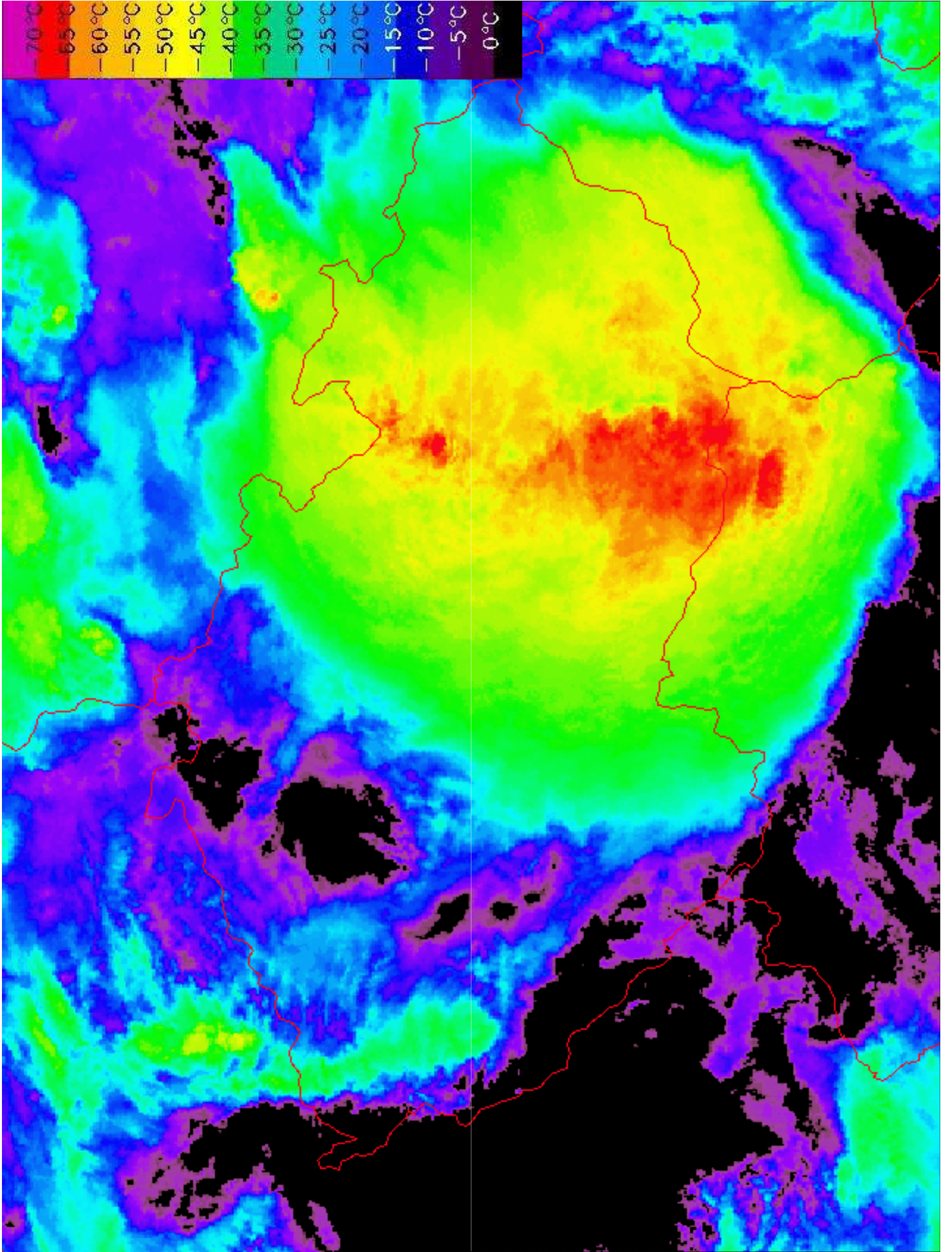
Teplota horní vrstvy bouřkové oblačnosti (Cb)



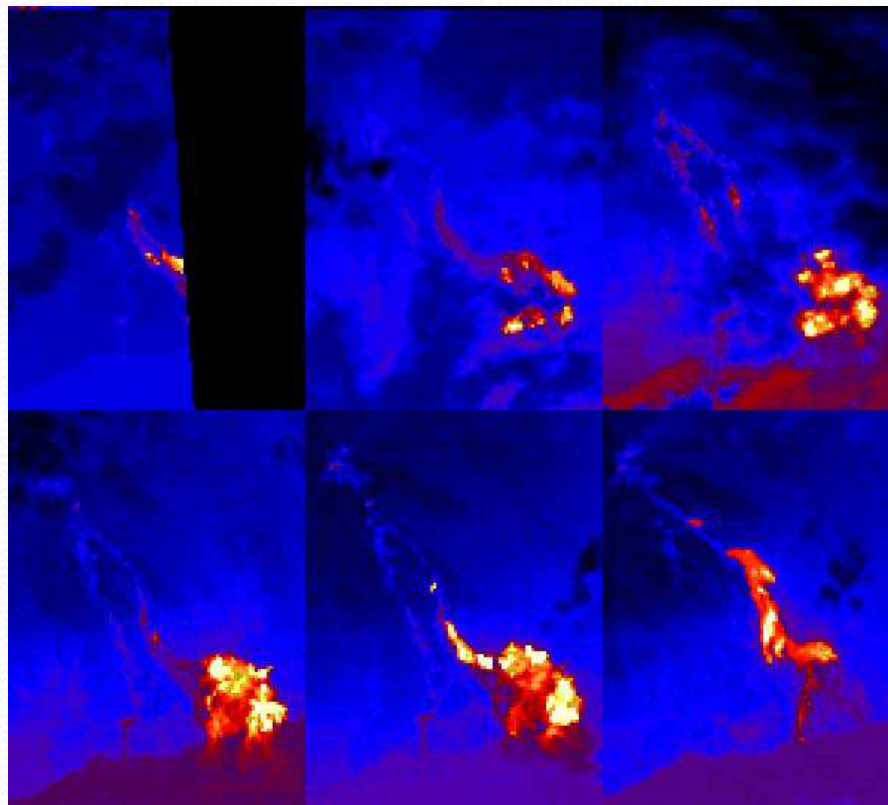
Cloud Top Temperature (°C)





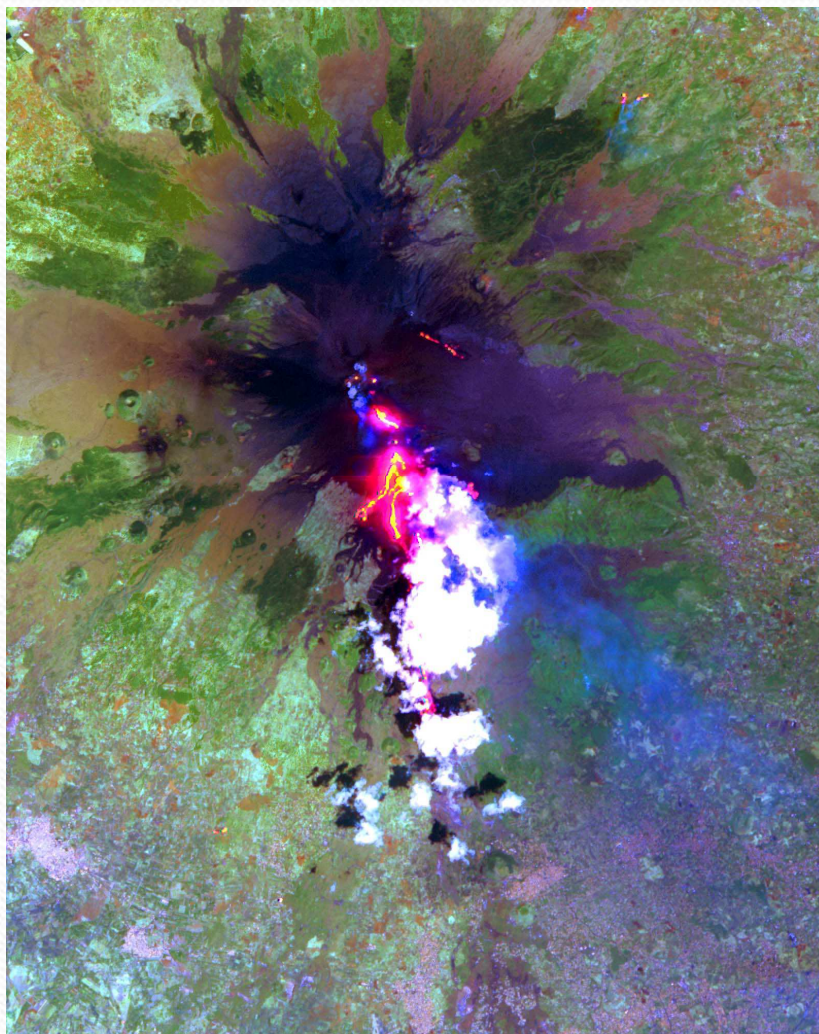


Mapování rozsahu lávových proudů



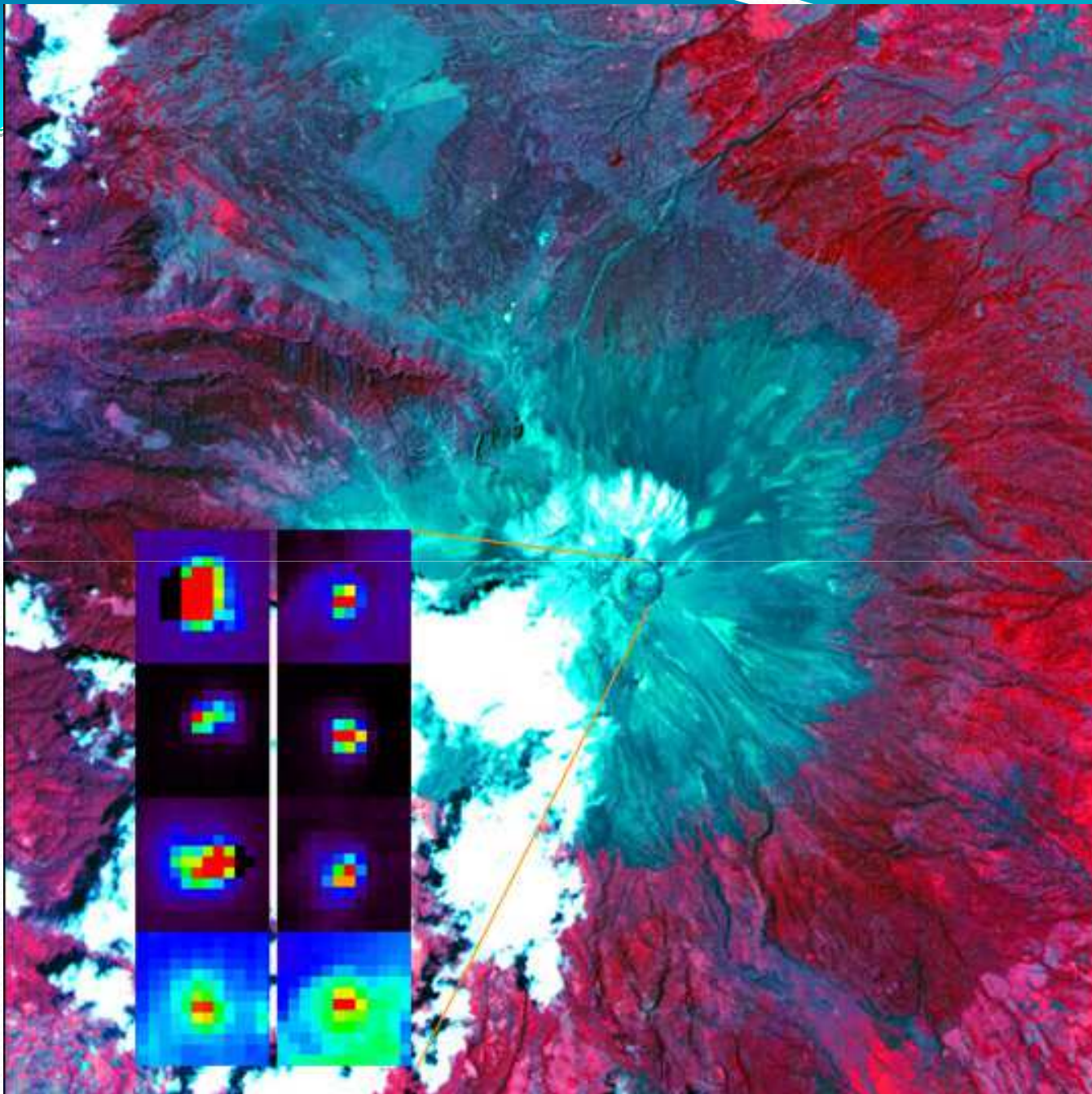
Havaj, série nočních snímků z družice ASTER, plocha 9 x 12 km

Mapování rozsahu lávových proudů



Etna, termální snímek z družice ASTER, plocha 24 x 30 km

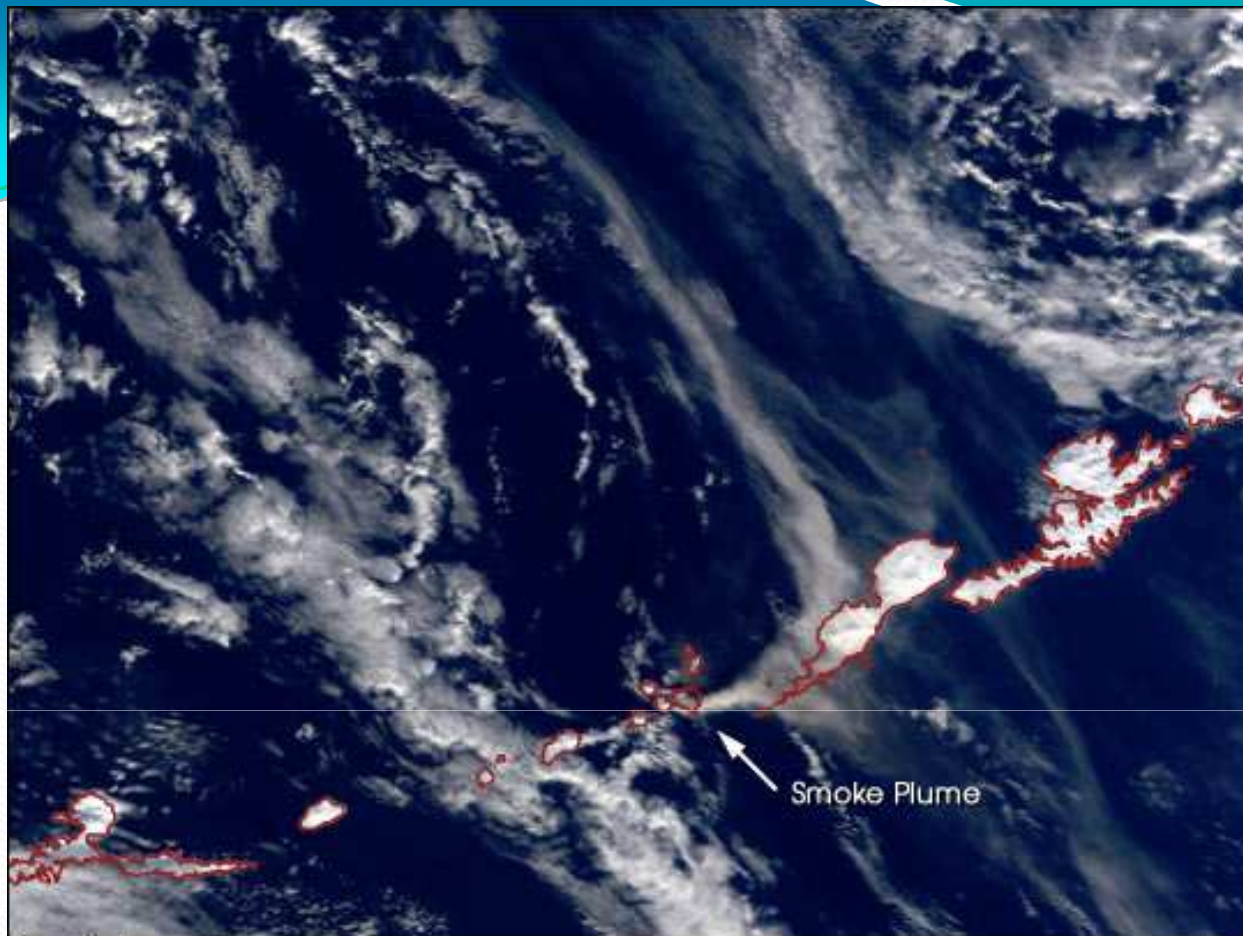
Studium vulkánů



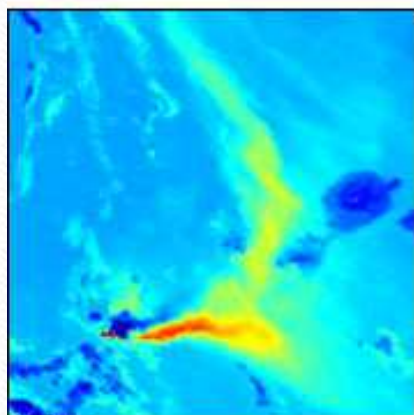
Sopka
Popocatepetl
(Mexiko)

Družice
TERRA,
skener ASTER

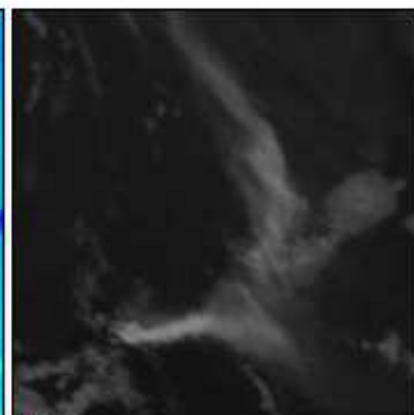
Mapování oblaků sopečného popela



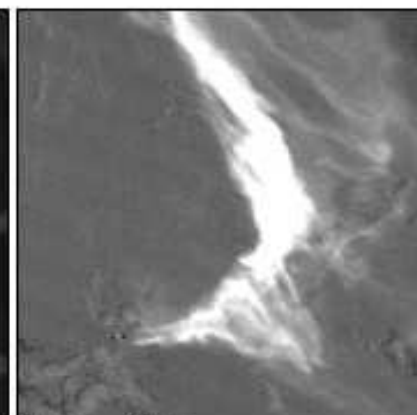
True Color



3.9µm



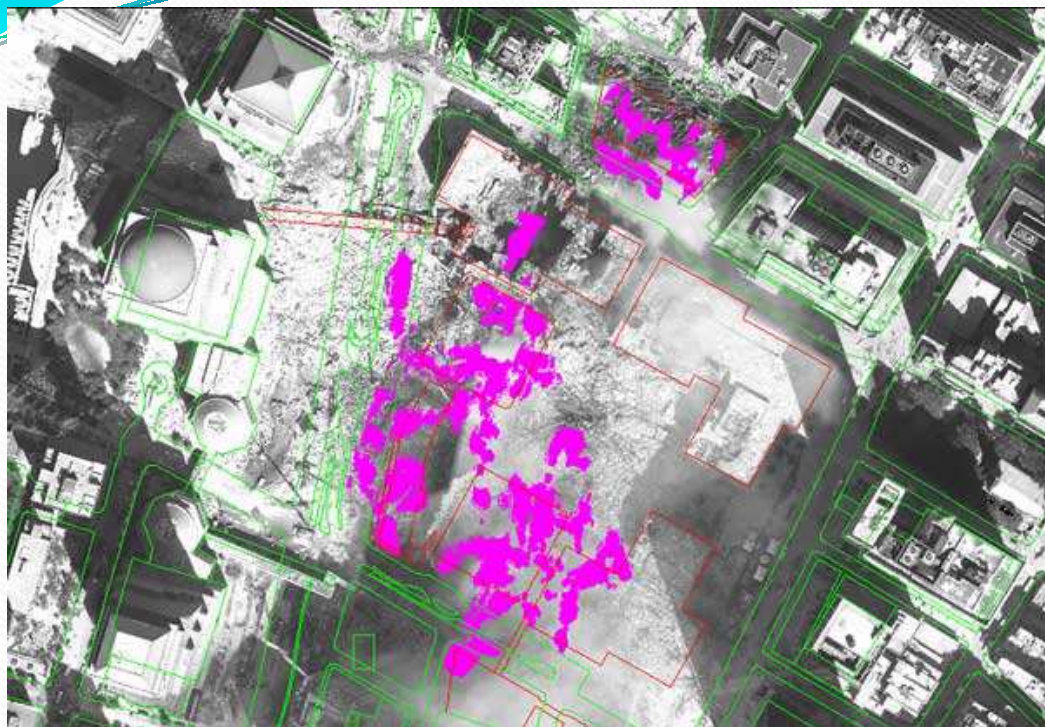
11µm



11µm - 12µm

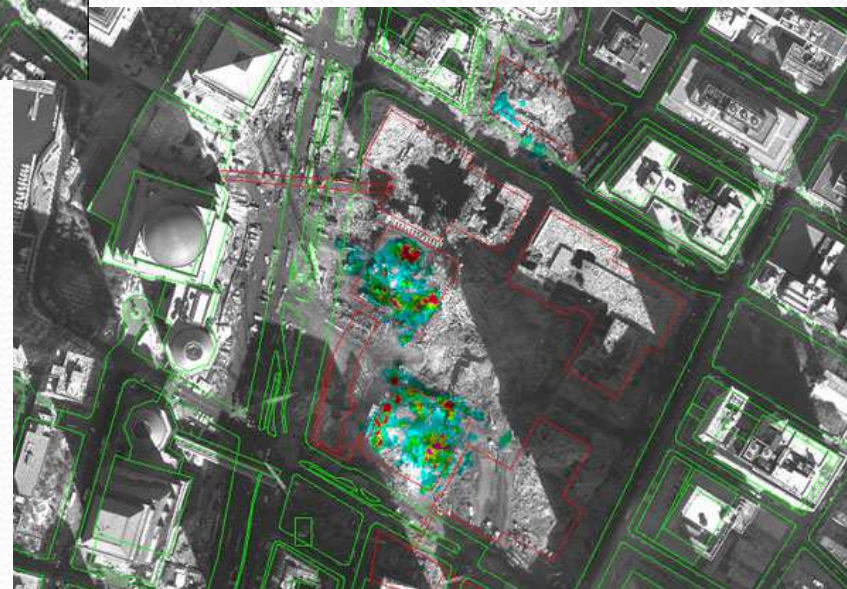
Sopka Cleveland
(Aleutské ostrovy)
snímky z družice MODIS

Mapování teplotních poměrů

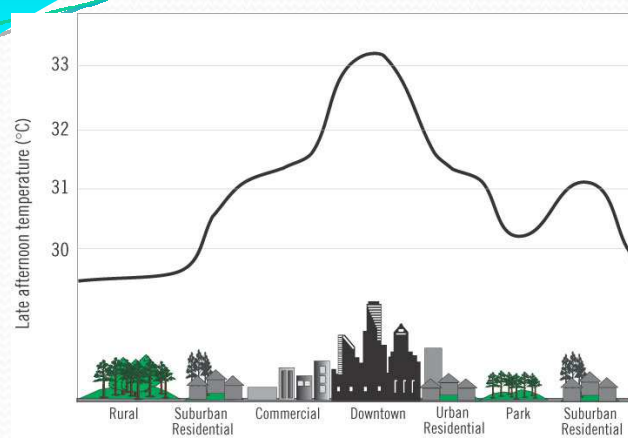


New York, 16.9.2001

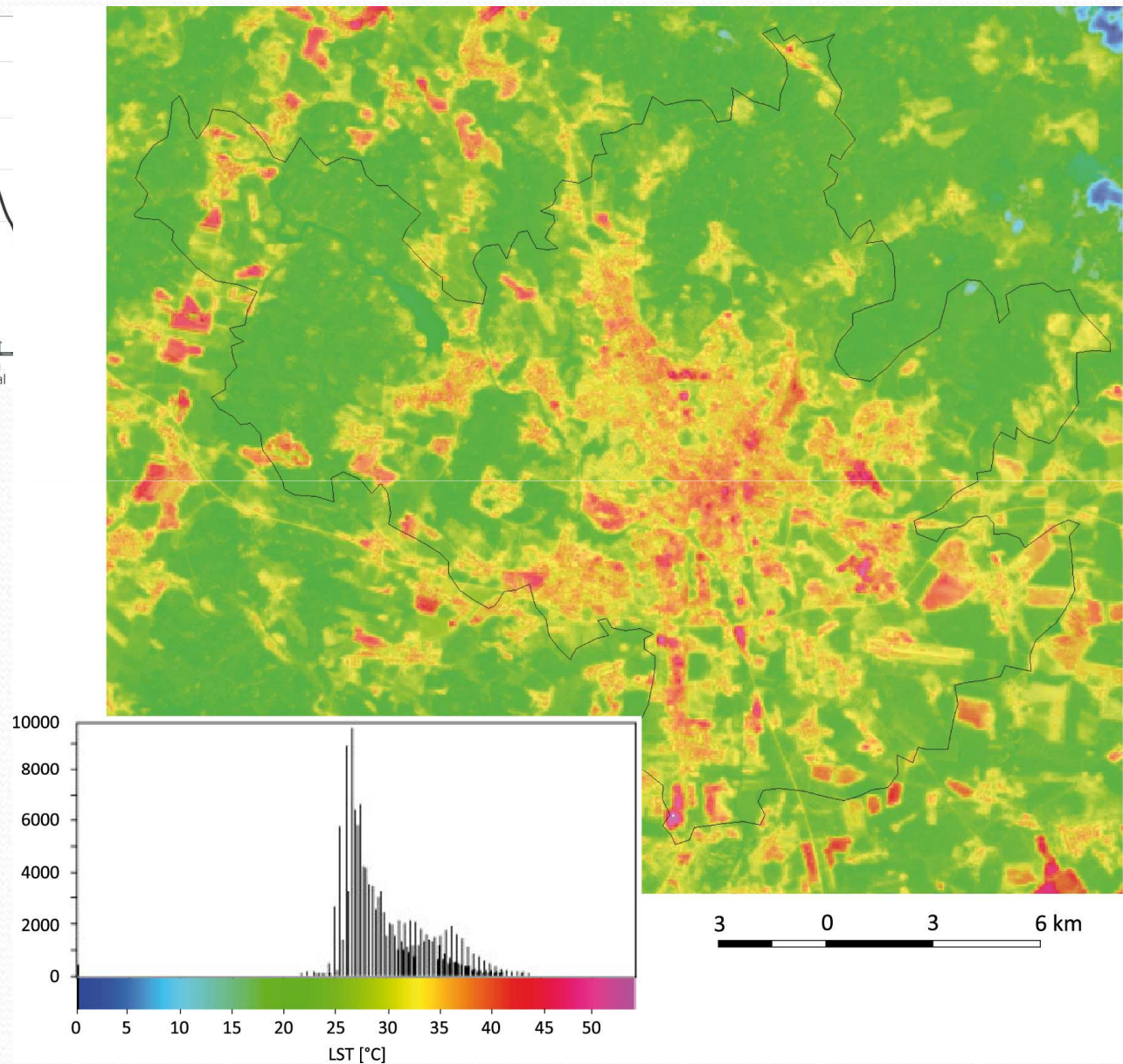
New York, 18.9.2001



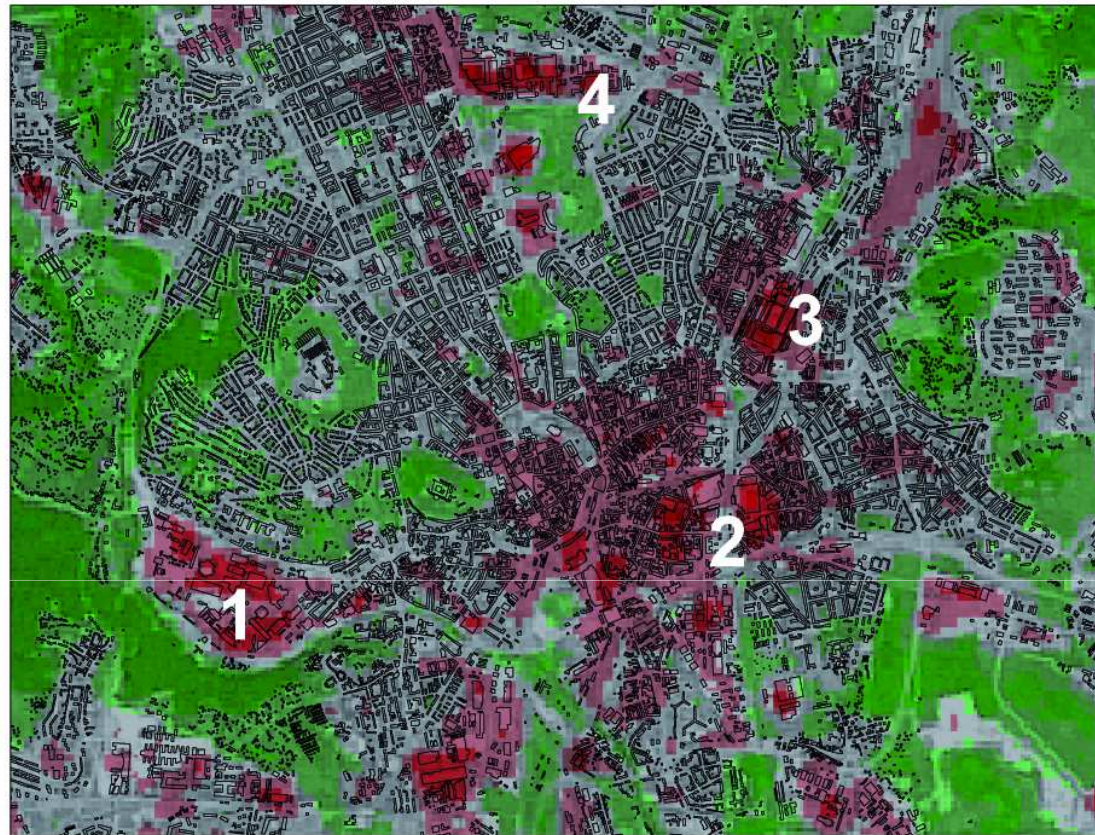
Mapování tepelného ostrova města



Variabilita povrchových teplot (LST) v oblasti města Brna a okolí vypočtená z termálního snímku pořízeného družicí Landsat 5 dne 15. června 2006 a histogram dokumentující rozdělení povrchových teplot na katastrálním území Brna



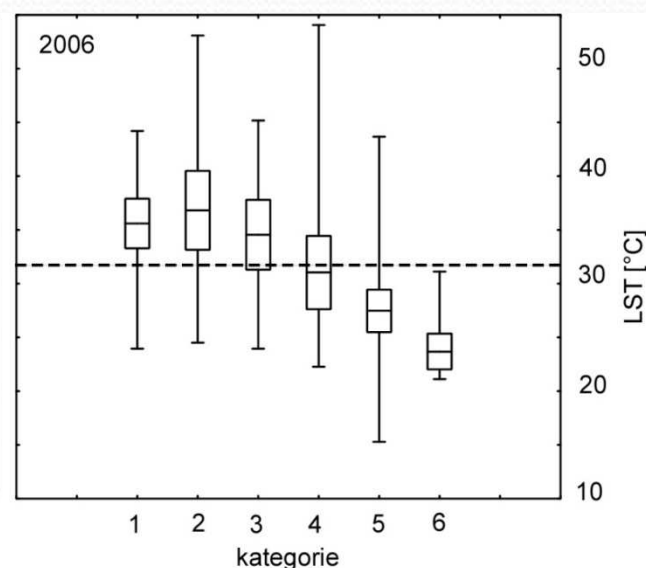
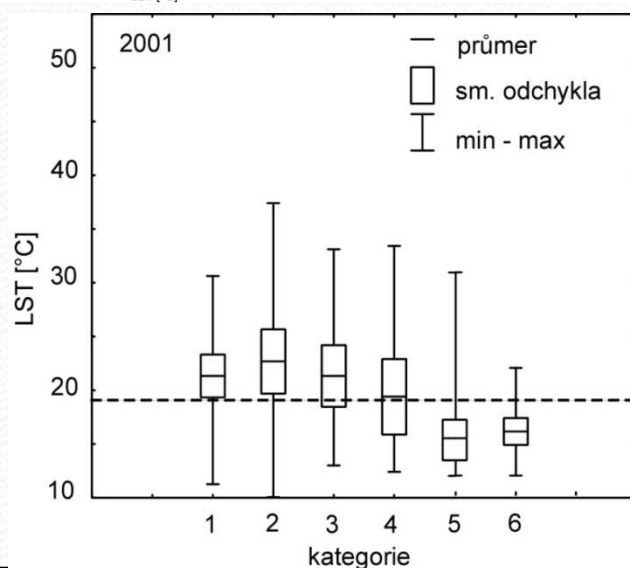
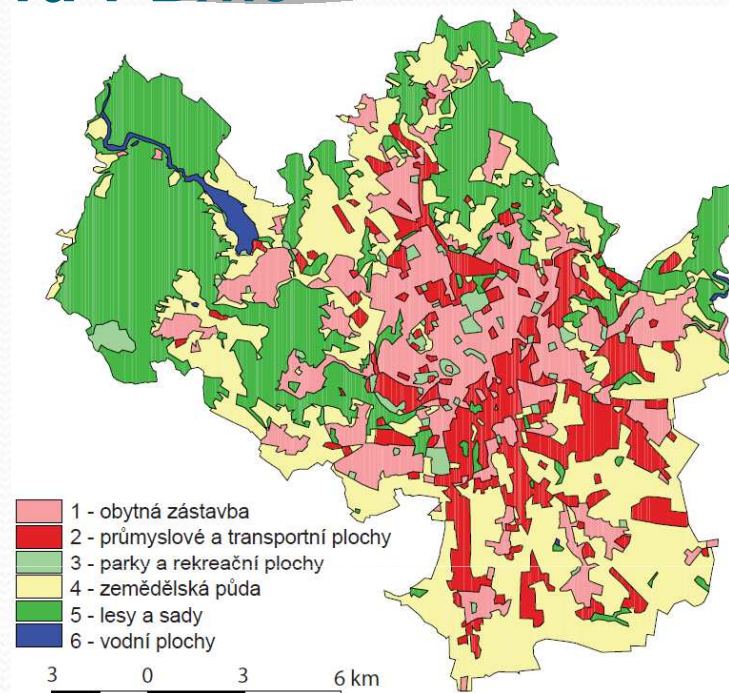
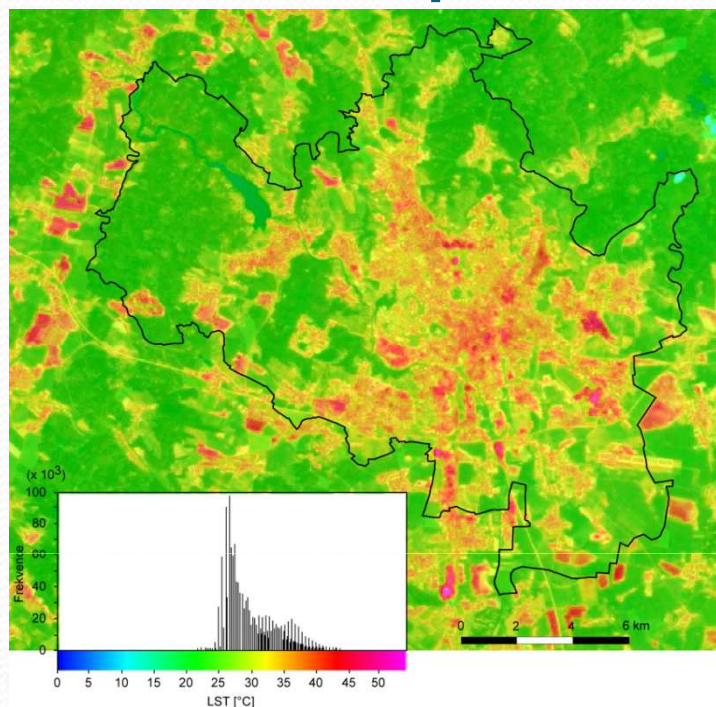
Vztah mezi teplotou aktivních povrchů (LST) a charakterem zástavby



LST [°C]

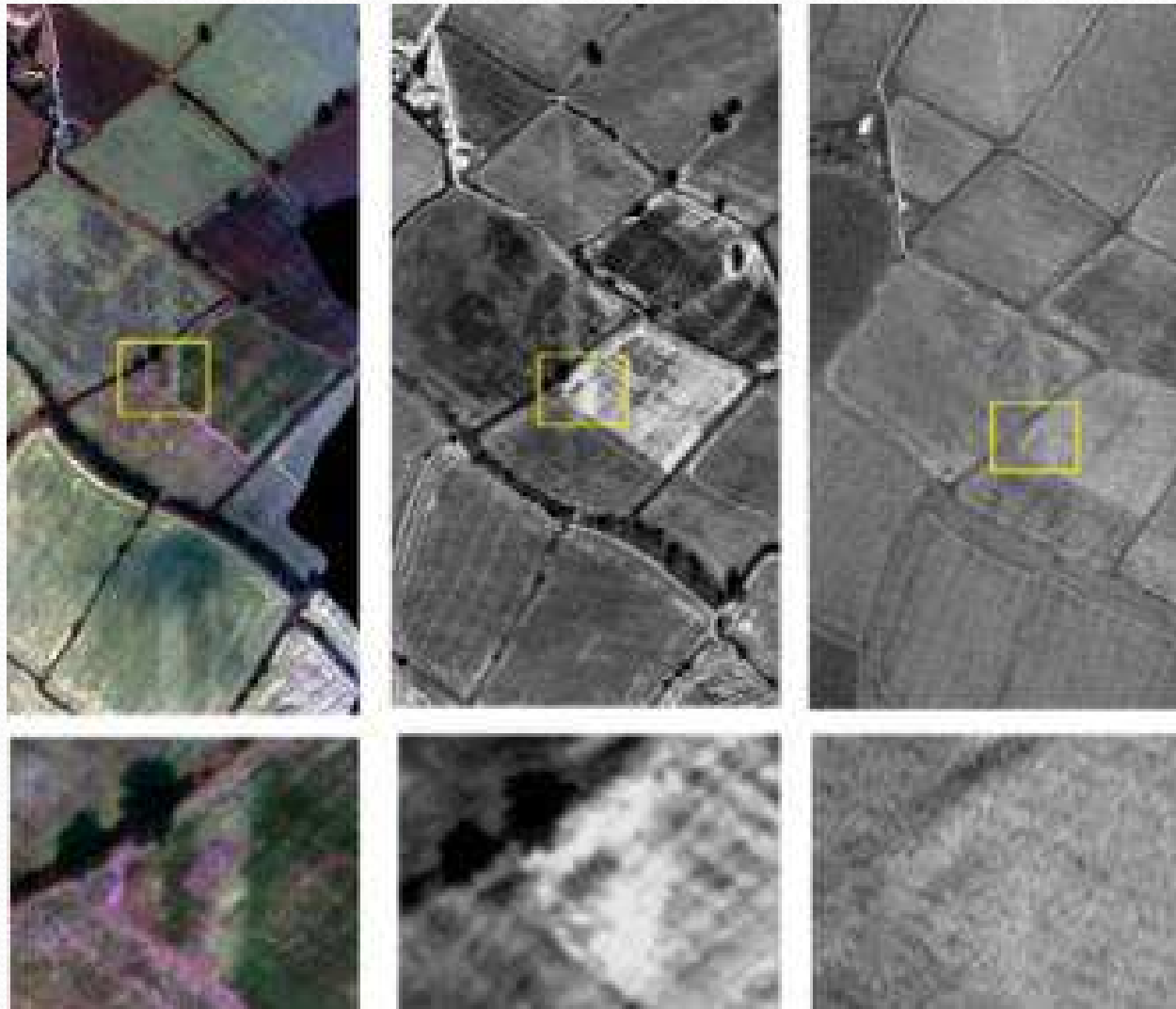


Podíl vybraných kategorií druhů povrchů na formování tepelného ostrova v Brně



Lokalizace poruch teplovodů

Termovize – letecké snímání





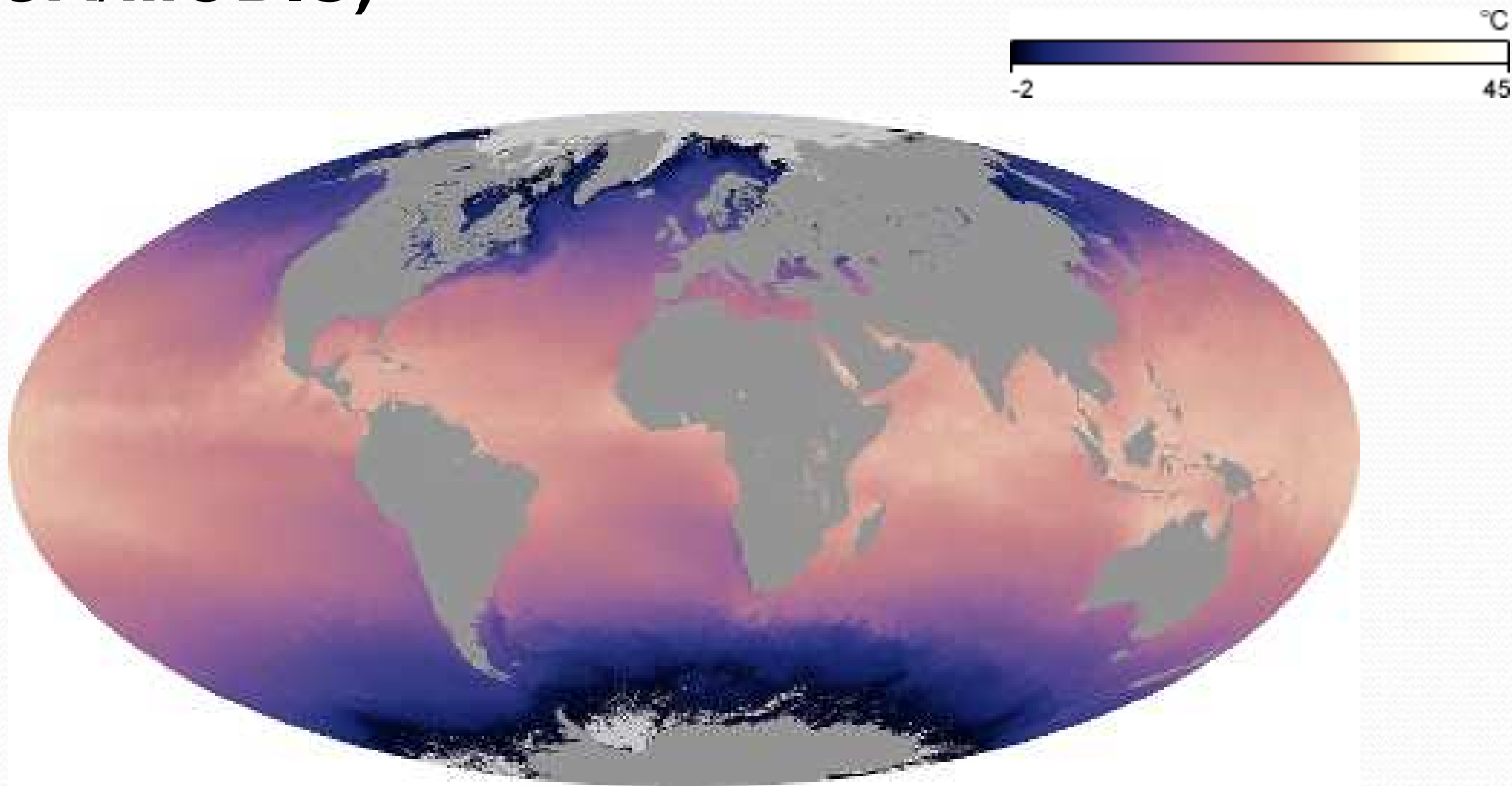
http://www.geog.ucsb.edu/~jeff/115a/remote_sensing/thermal/thermal_iriinfo.html

<http://www.realclimate.org/index.php?p=43>

http://en.wikipedia.org/wiki/Urban_heat_island

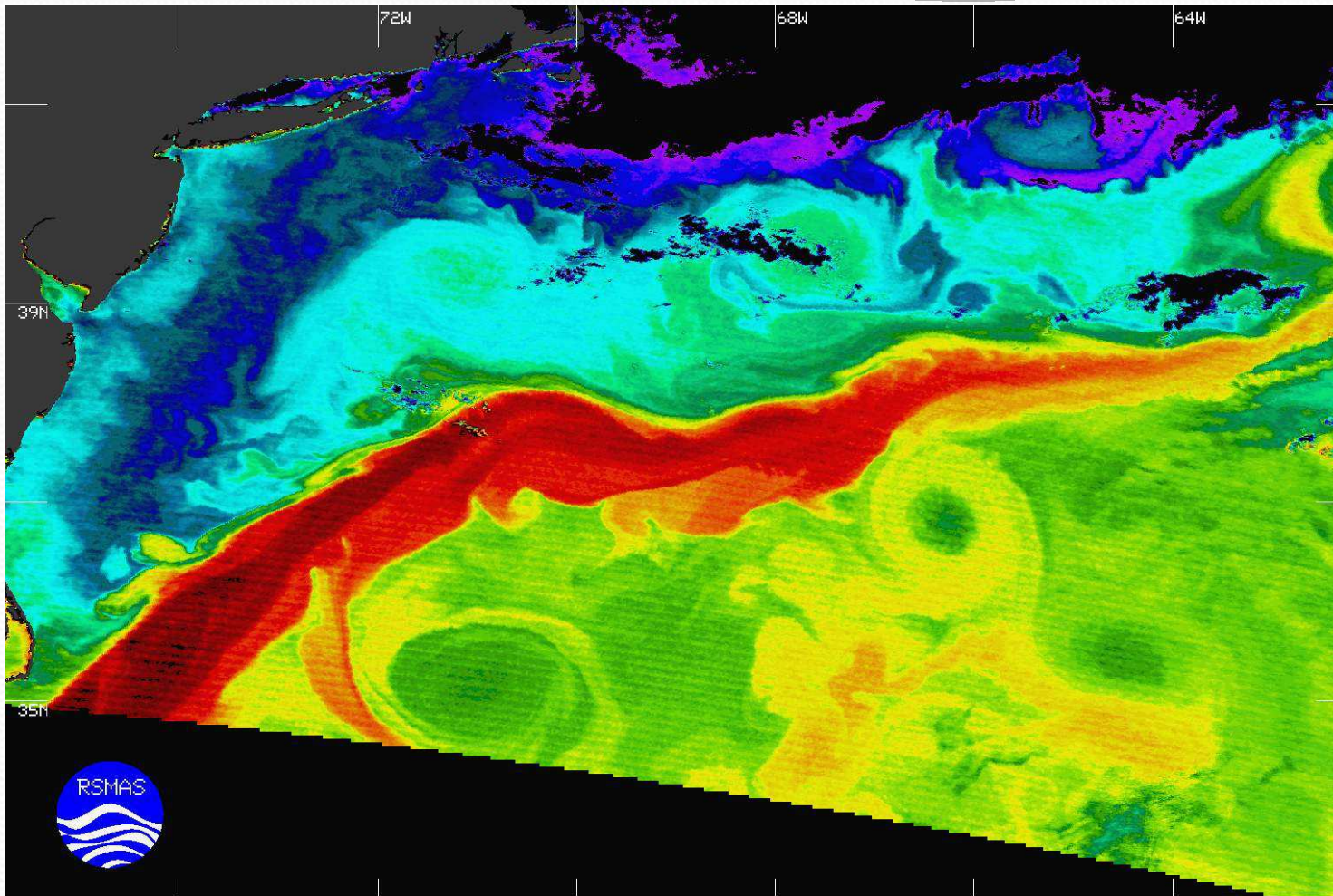
[http://employees.oneonta.edu/baumanpr/geosat2/Urban Heat Island/Urban Heat Island.htm](http://employees.oneonta.edu/baumanpr/geosat2/Urban_Heat_Island/Urban_Heat_Island.htm)

Mapování povrchové teploty oceánu (AQUA/MODIS)



<http://earthobservatory.nasa.gov/GlobalMaps/view.php?d1=MYD28M>

Teplotní poměry golfského proudu



Družice TERRA, skener MODIS

Teplotní poměry jsou mapovány na základě odhadu radiační teploty z termálních snímků v oblasti 11 a 12 mikrometrů.