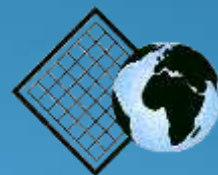
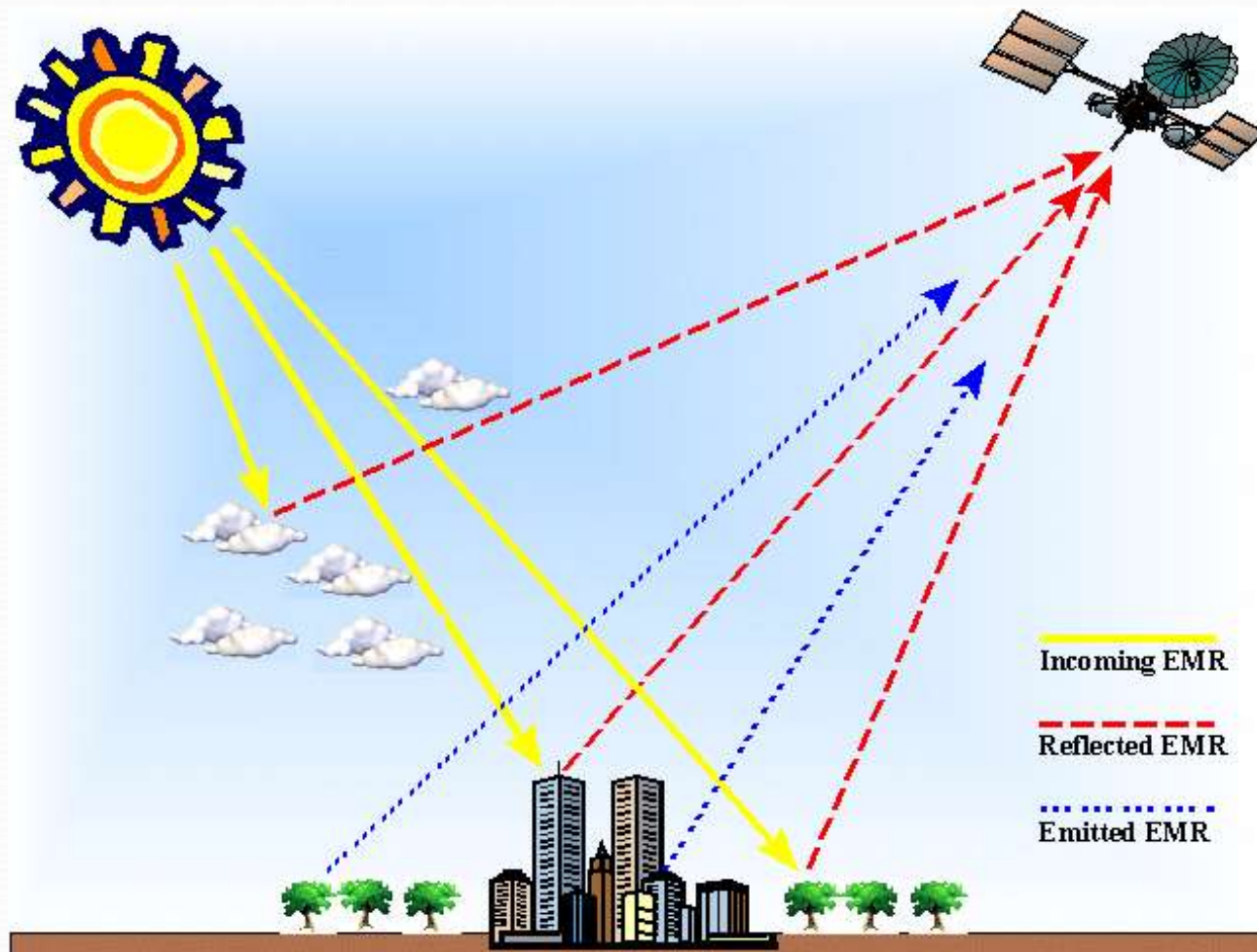


# Dálkový průzkum země v termální části spektra

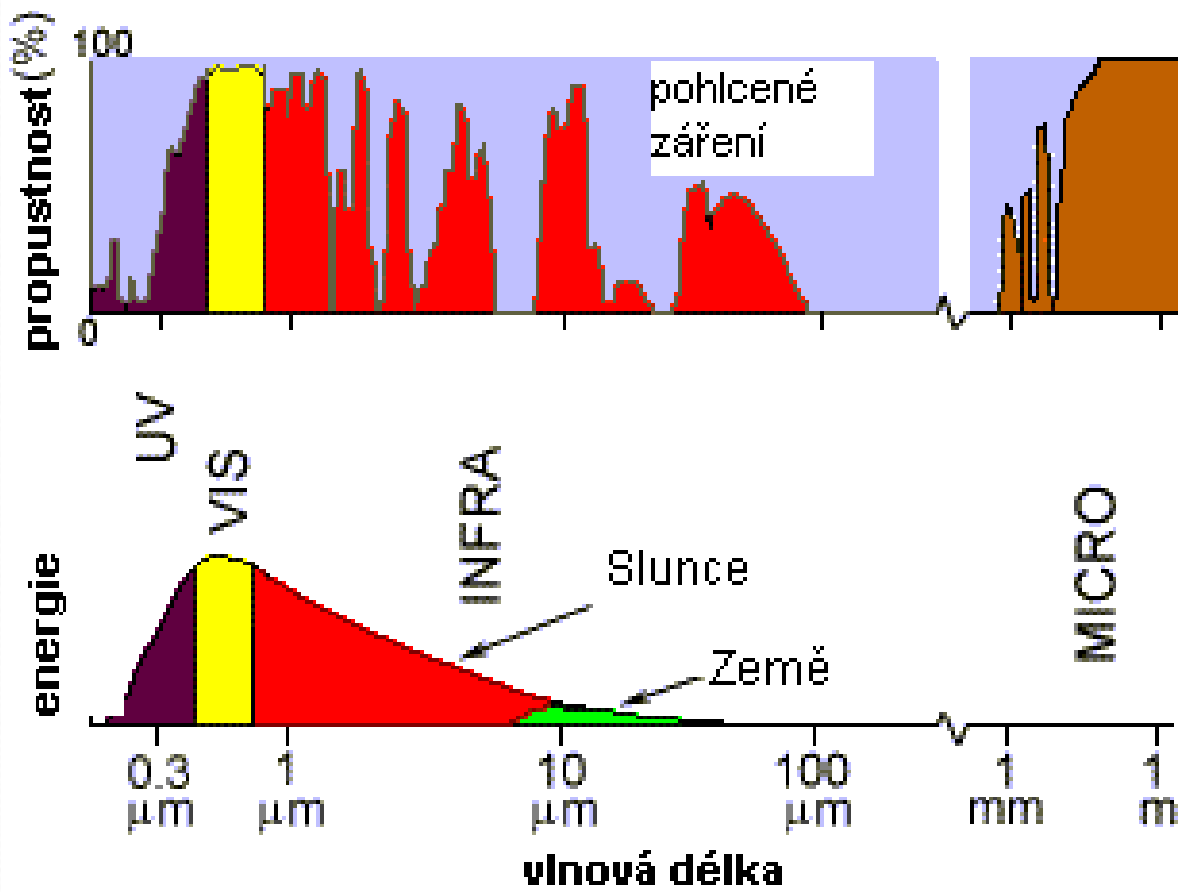


# Princip termálního snímání



**Metoda pasivní nepřímá**

# Fyzikální podstata



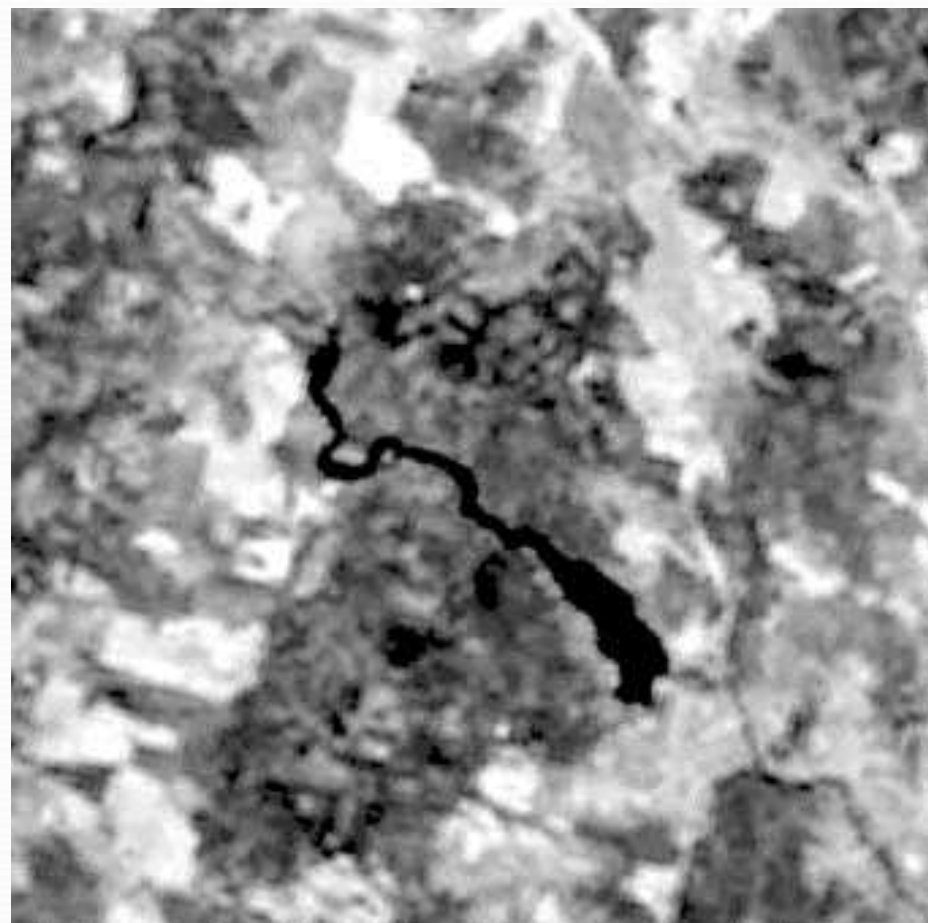
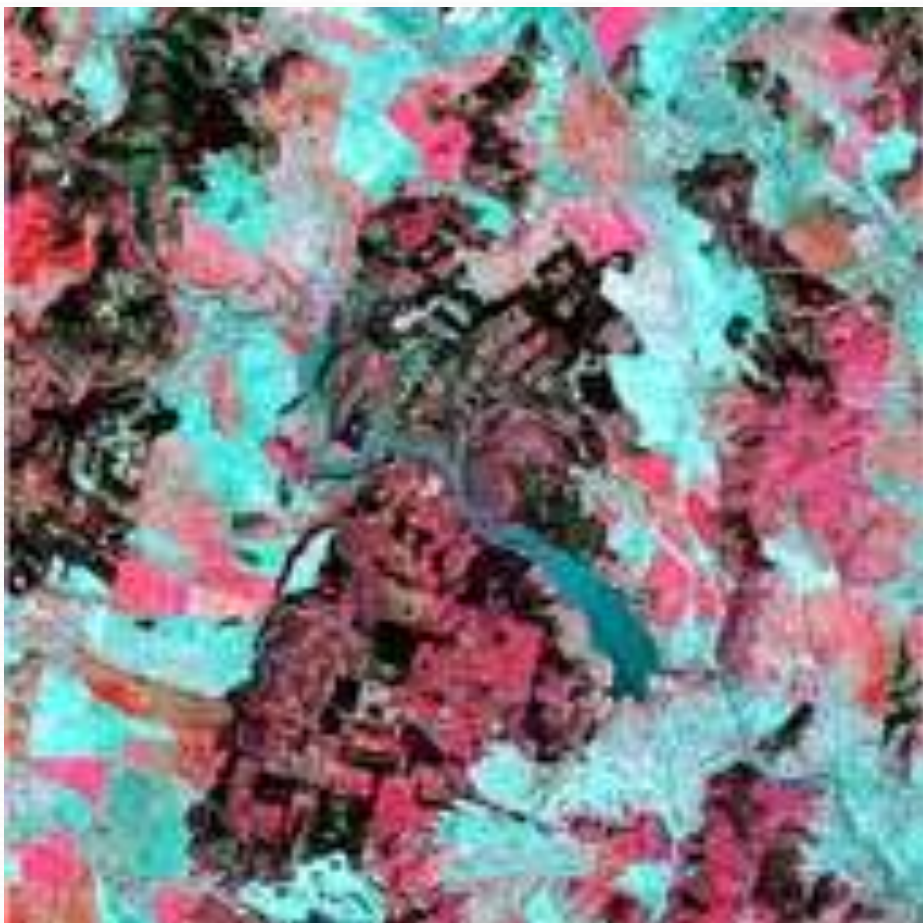
# Charakteristika

- Termální oblast spektra zahrnuje vlnové délky od 3  $\mu\text{m}$  (atmosférická okna v intervalech 3-5  $\mu\text{m}$  a 8-14  $\mu\text{m}$ ), v oblastí 3-5  $\mu\text{m}$  velká intenzita odraženého záření Slunce – měření pouze v noci, v oblasti 8-14 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

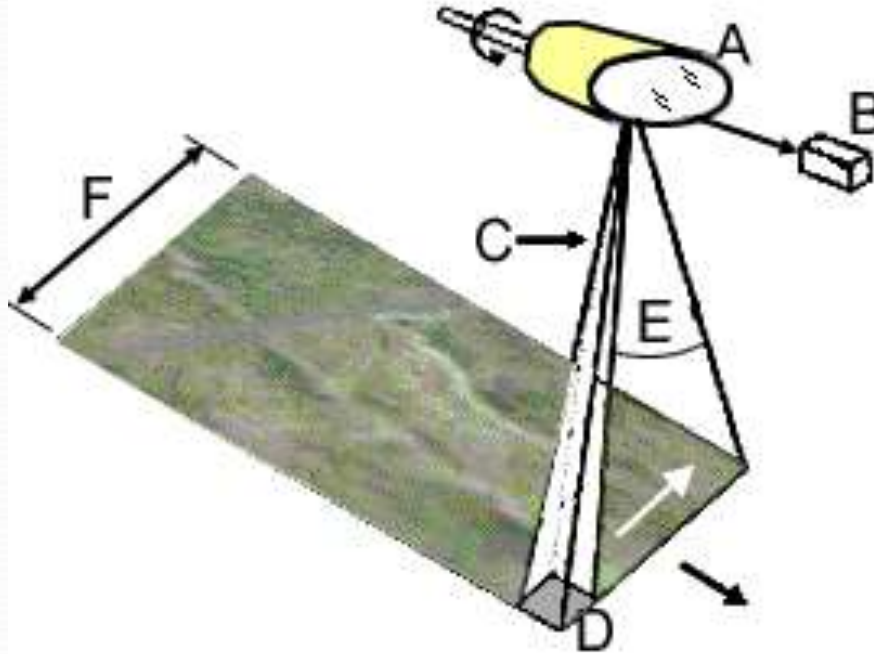
- **Termální snímky se vyznačují menší prostorovou rozlišovací schopností (Landsat 120, 60m, Aster 90m)**
- **Z termálních snímků lze získat charakteristiky území, které jsou klasickými metodami zjistitelné pouze bodovým měřením.**
- **Termální část spektra umožňuje získat především informace o teplotních 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  $-200^{\circ}\text{C}$ )
- 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 ( $\varepsilon$ )

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

$M_R(T)$  - 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  $\mu\text{m}$ ).
- 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 Kirchhoffova 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 blízka 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 fčí 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

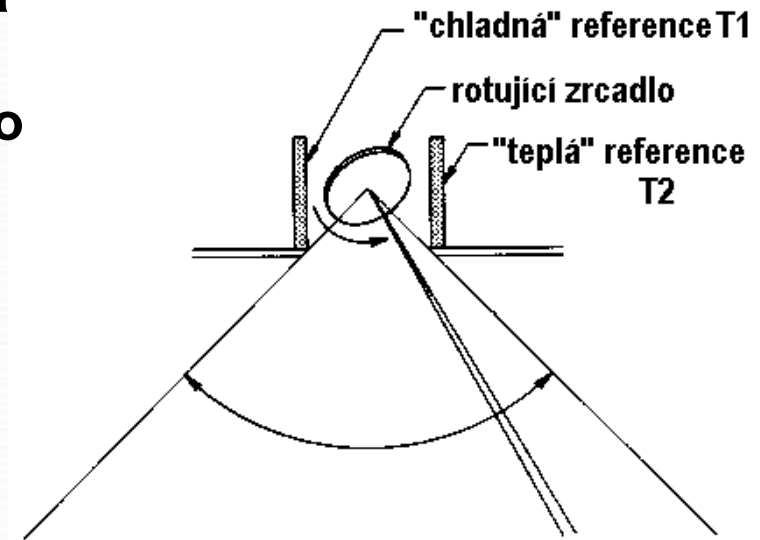
$$T_{rad} = \varepsilon^{\frac{1}{4}} T_{kin}$$

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

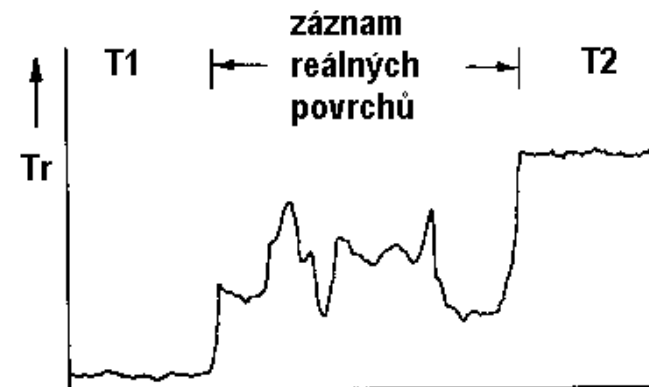
# Kalibrace termálních obrazových záznamů

Vzhledem ke geometrickým distorzím mechanickooptického 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  $\text{CO}_2$ , teplotní profil atmosféry, princip korelace měření ve stejný čas, sestavena kalibrační křivka korigující výsledky



řádek zaznamenaný termálním skenerem





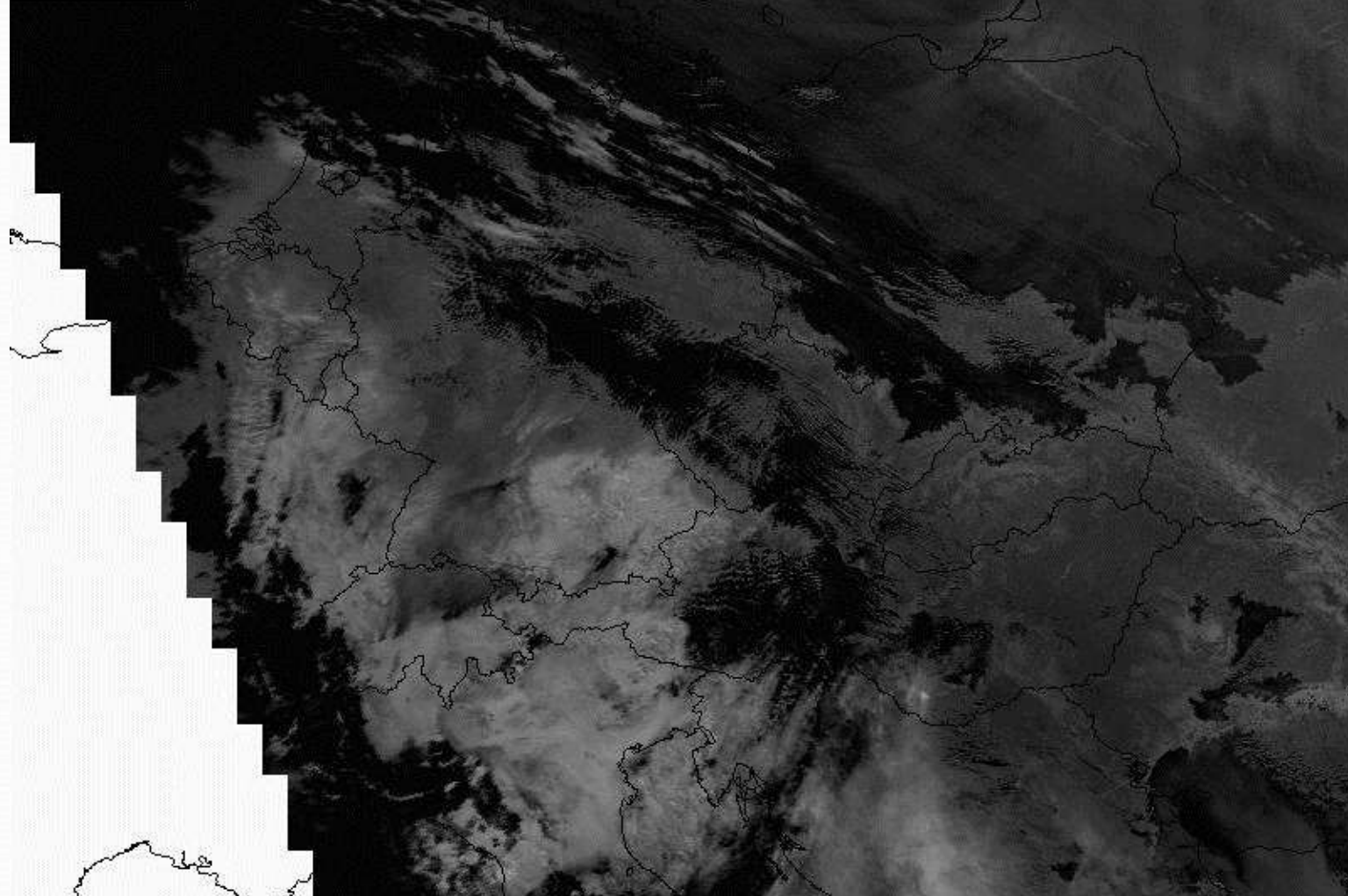
# Zdroje termálních snímků

- 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



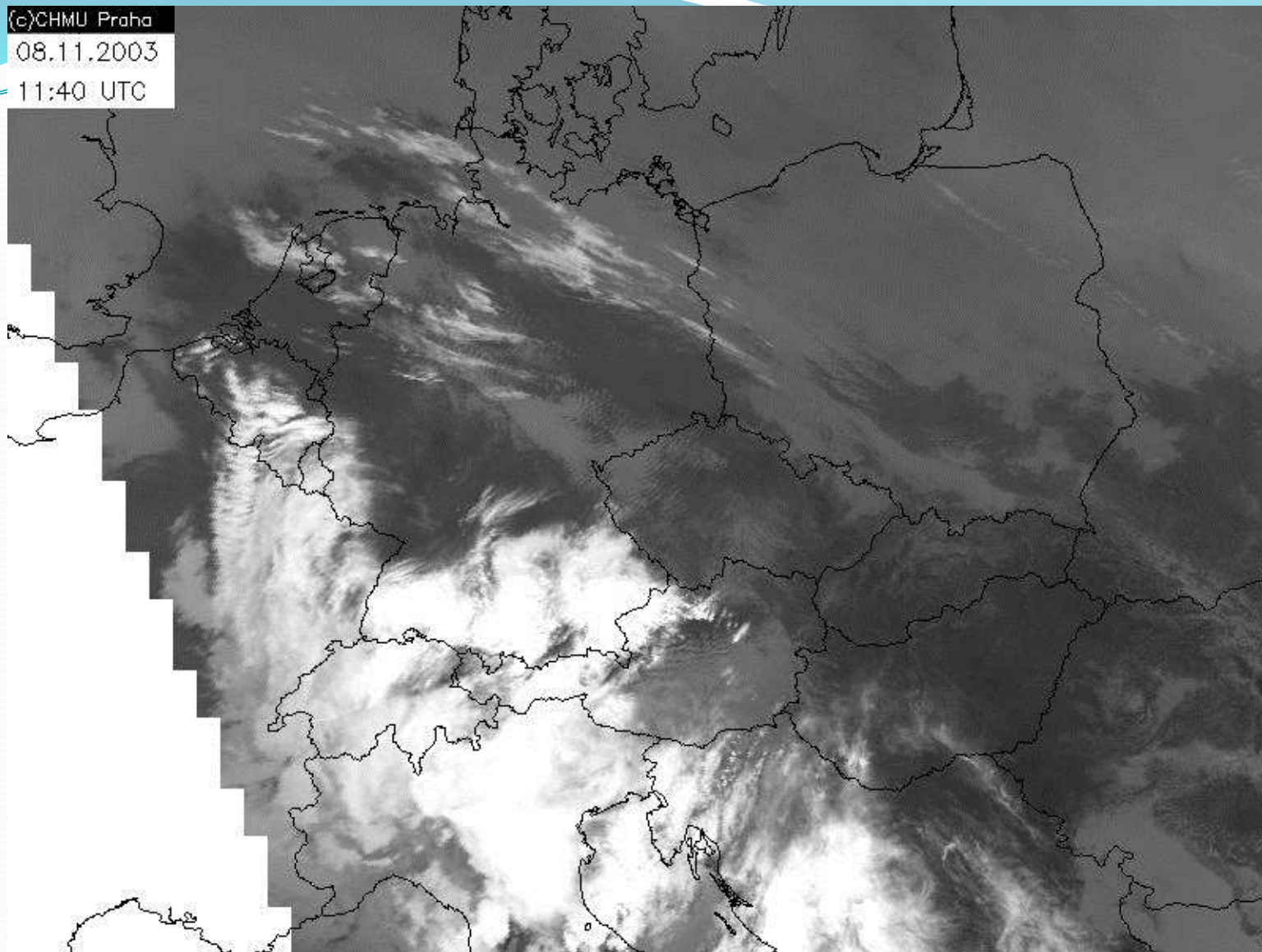
**Pásmo 3B 3,6-3,9  $\mu\text{m}$**

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

(c)CHMU Praha

08.11.2003

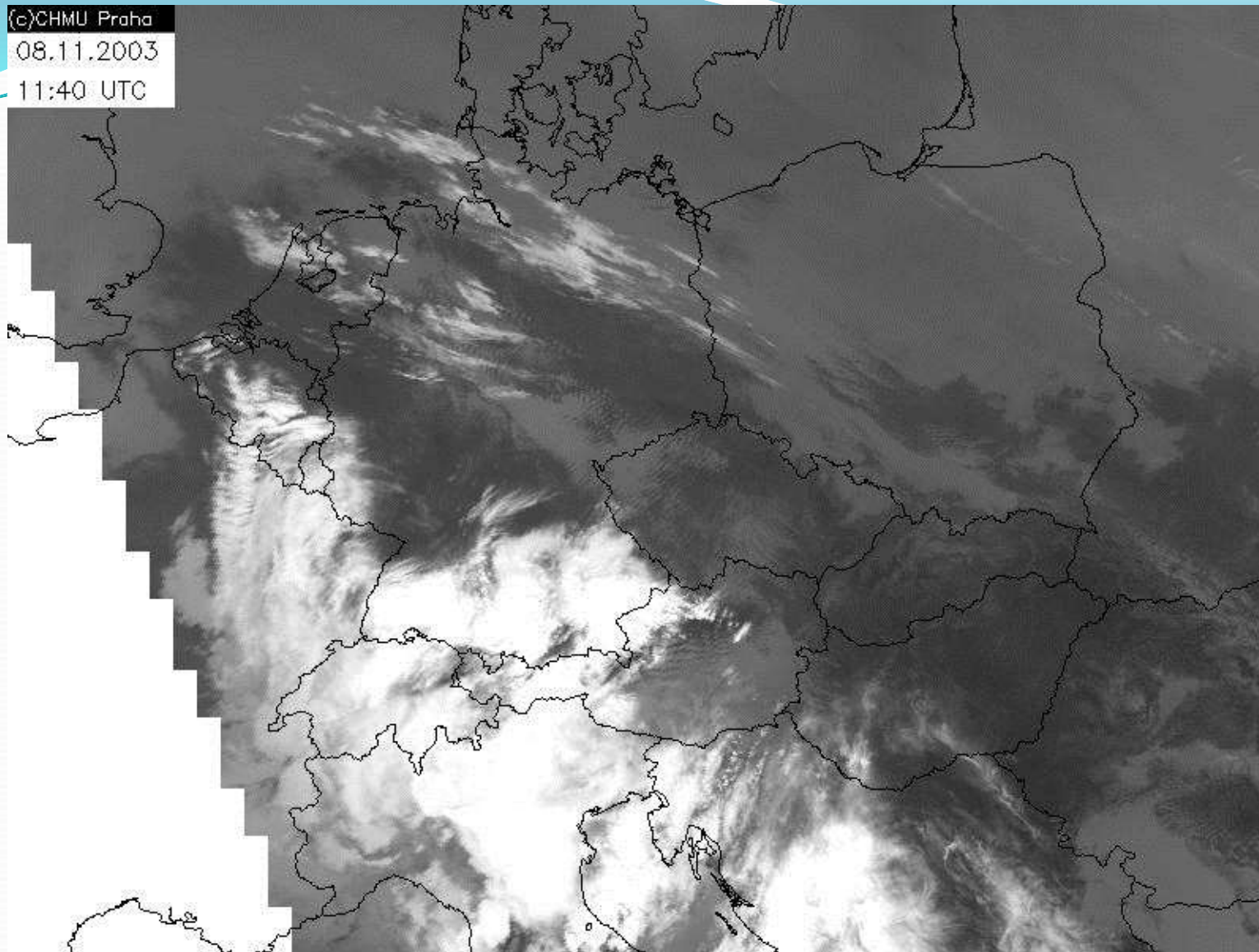
11:40 UTC



**Pásmo 4      10,3- 11,3  $\mu\text{m}$**

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

(c)CHMU Praha  
08.11.2003  
11:40 UTC

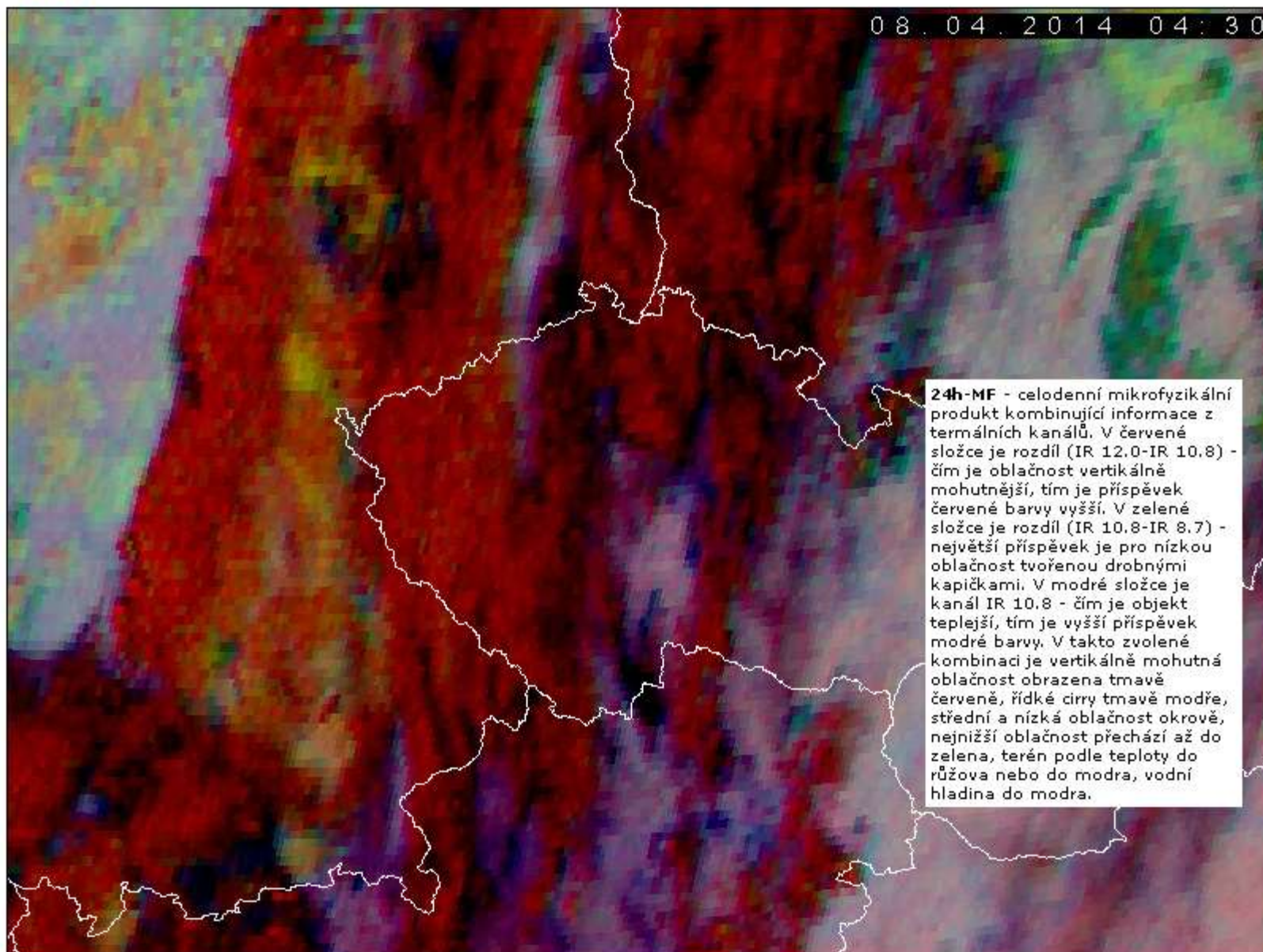


**Pásmo 5 11,5- 12,5  $\mu\text{m}$**

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



08.04.2014 04:30



**Barevná syntéza z termálních snímků družice METEOSAT**

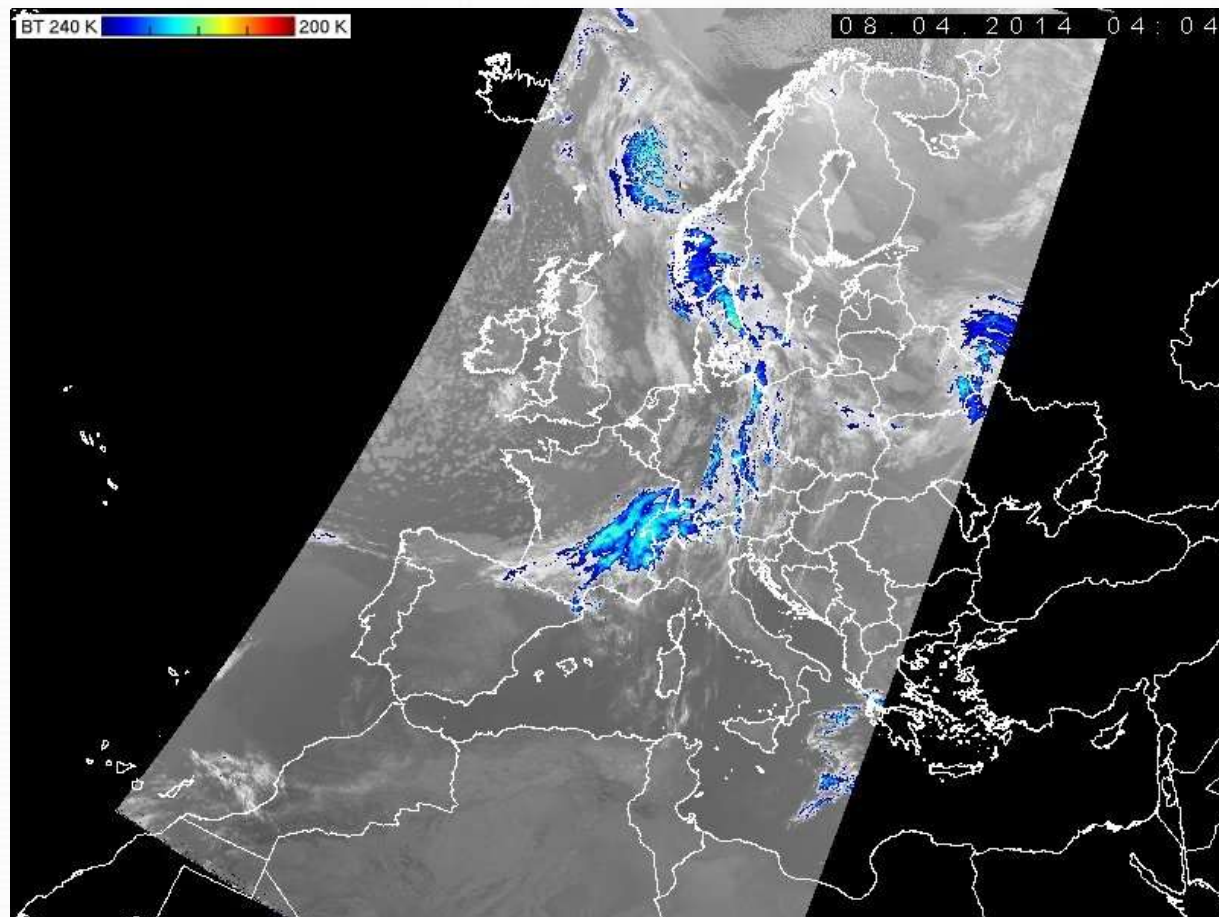
# Vzhled a vlastnosti termálních snímků

- 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 ze 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

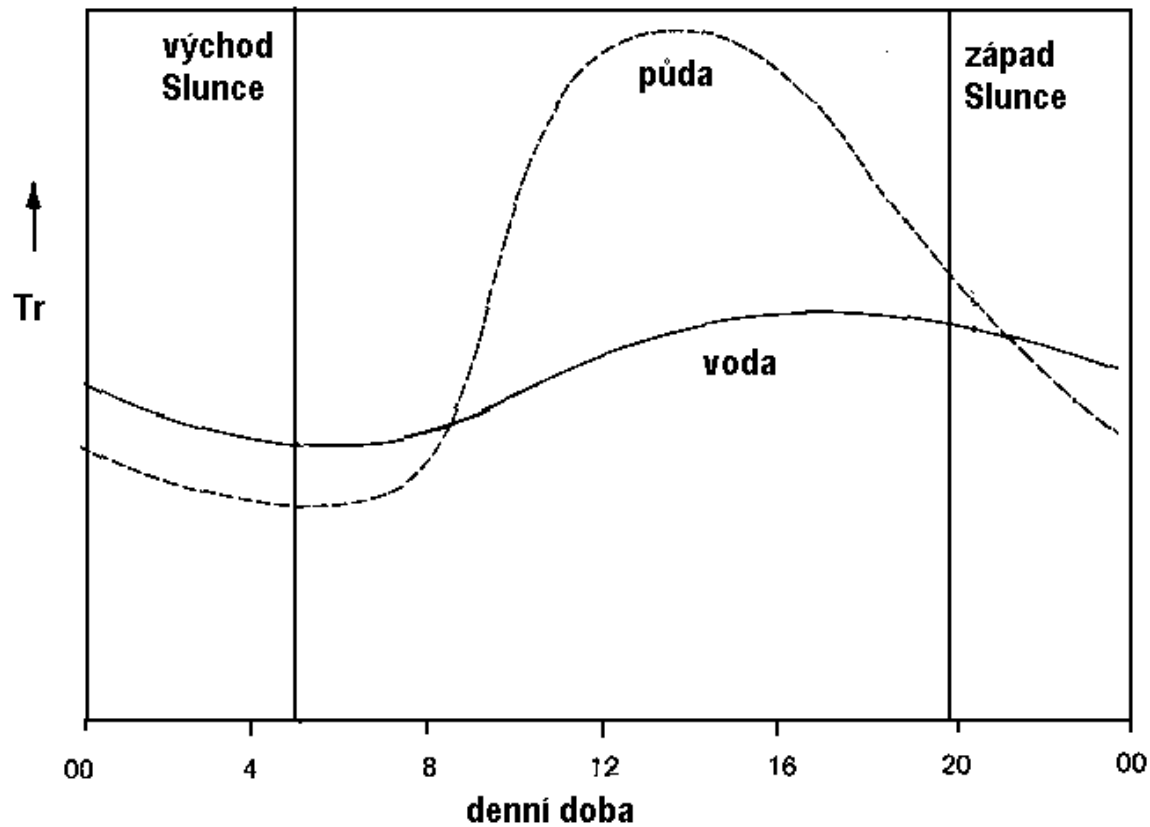
- Vzhled termálních obrazových záznamů je ovlivňován teplotními vlastnostmi povrchů (vodivost, tepelná kapacita, tepelná setrvačnost).
- Vzhled snímků je ovlivňován dále též topografií, orientací snímaných povrchů.
- Vegetační kryt vytváří velmi komplexní povrch s množstvím ke Slunci orientovaných nebo 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  $\mu\text{m}$  a nebude mít vliv na delší vlnové délky (8-14  $\mu\text{m}$ ).**
- **Denní snímky v první uvedené části spektra (3-5  $\mu\text{m}$ ) 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

**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, denní snímky bývají charakterizovány značnou tónovou proměnlivostí.**

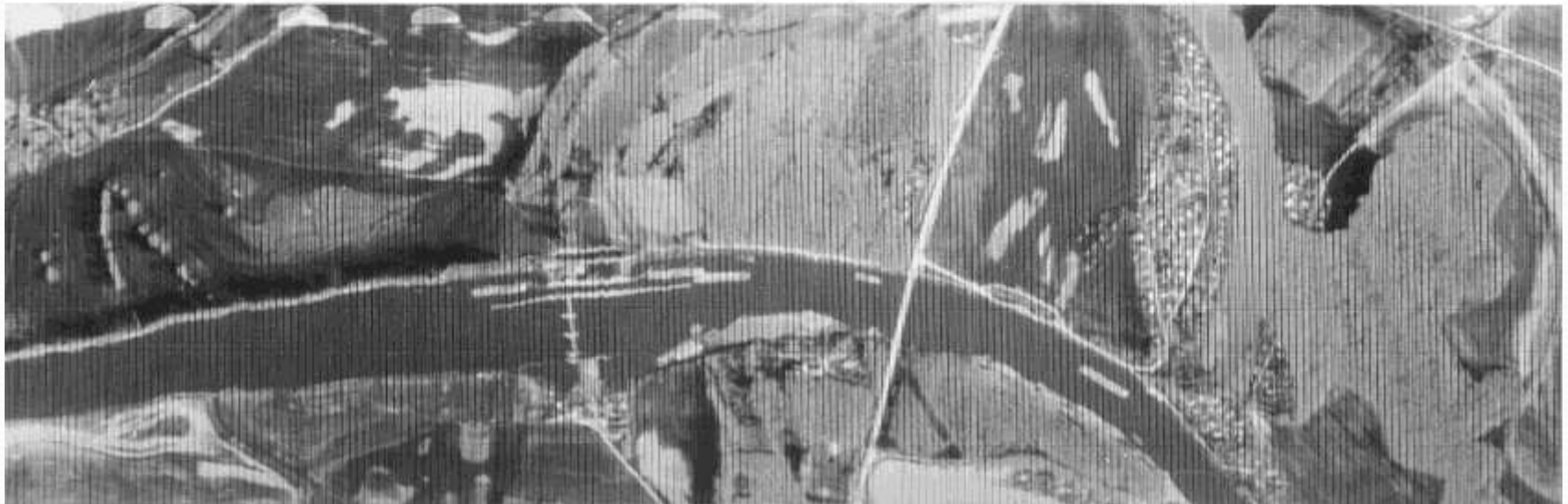
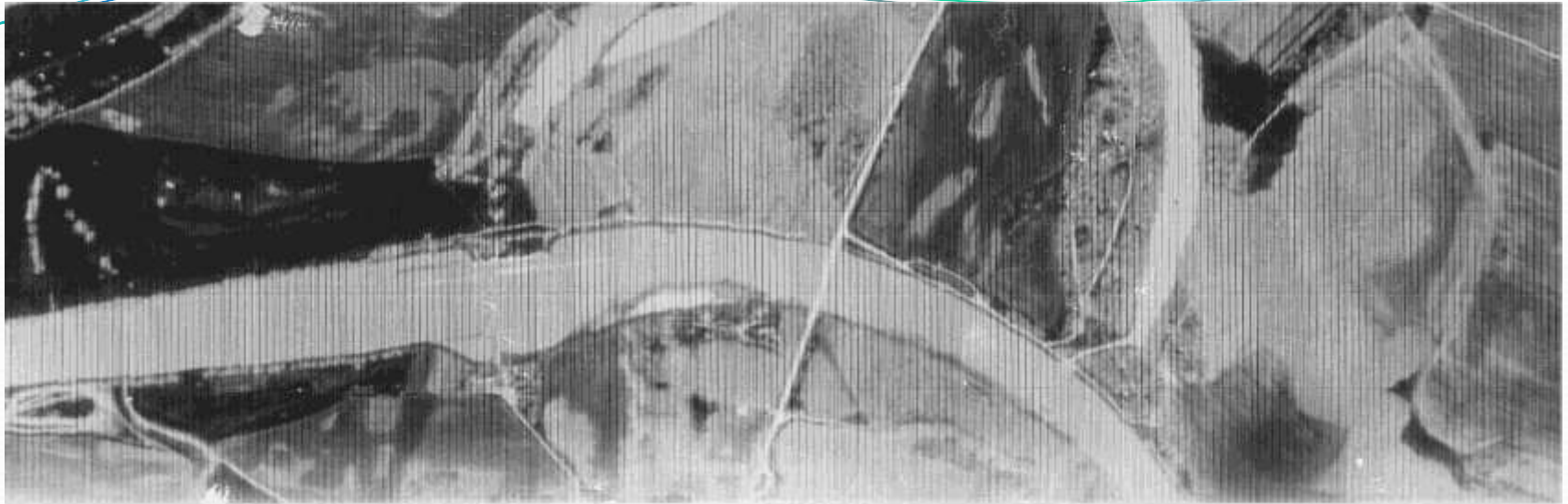
**Z tohoto důvodu se také často provádí termální snímání po západu Slunce, kdy jsou ještě patrné teplotní kontrasty různých povrchů.**

## **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.**

# Termální snímky denní a noční



# Termální snímky denní a noční



# 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

$\varepsilon$  - 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)**

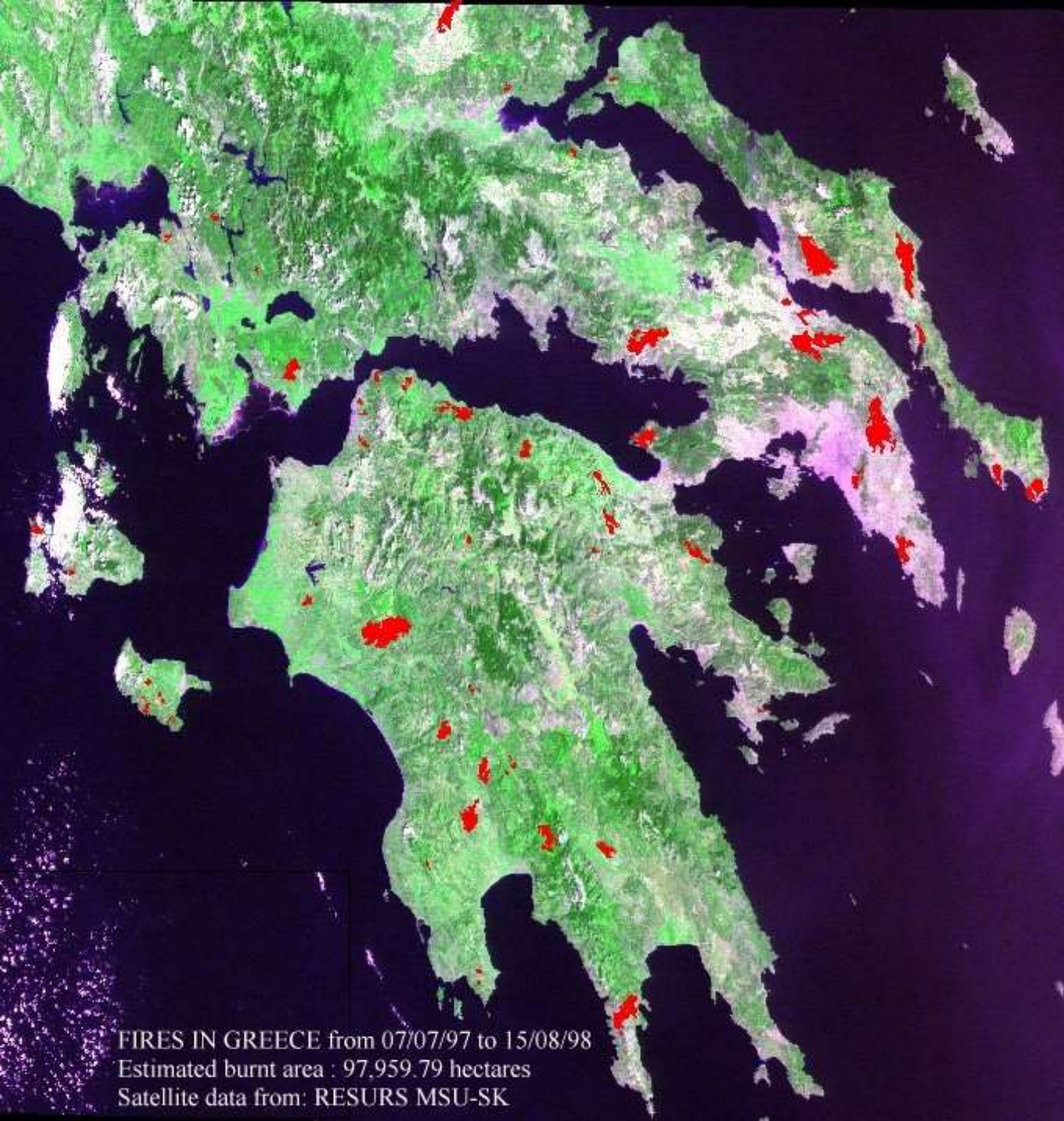


# Příklady aplikací

- 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



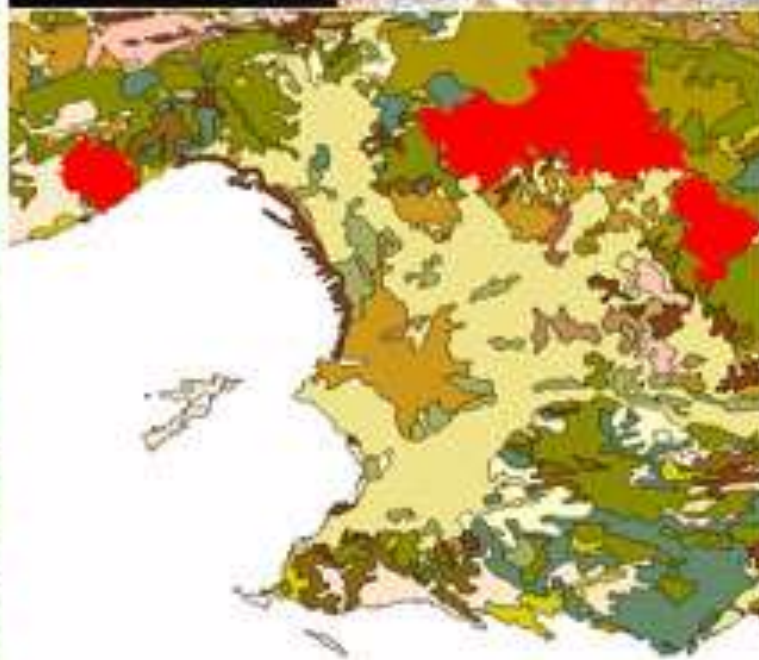
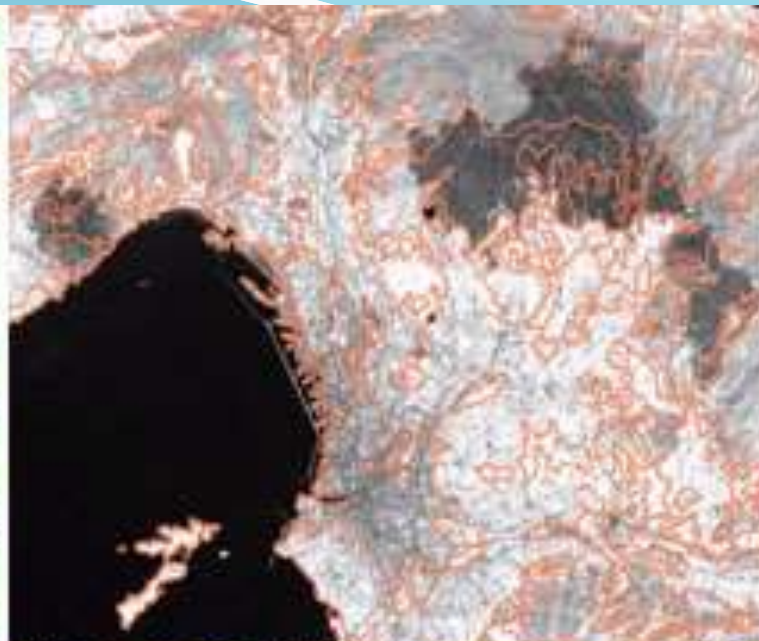
Peloponéský  
poloostrov

Družice  
RESURS  
MSU-SK,

Pixel 600 m

**Monitorování  
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



**Monitorování  
požárů**

# Sledování aktivních požárů (Terra/MODIS)



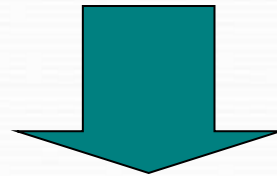
[http://neo.sci.gsfc.nasa.gov/view.php?datasetId=MOD14A1\\_M\\_FIRE&year=2014](http://neo.sci.gsfc.nasa.gov/view.php?datasetId=MOD14A1_M_FIRE&year=2014)

[http://earthobservatory.nasa.gov/GlobalMaps/view.php?d1=MOD14A1\\_M\\_FIRE](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 postižených požárem

$T3 - T4 > 14 \text{ K}$

Eliminates warm background

$T4 \geq 260 \text{ K}$

Eliminates clouds

$R2 < 0.22$

Eliminates highly reflective clouds & surface

Land cover  $\neq$  cropland or grassland

Eliminates cropland and grassland false fires

$T4 - T5 < 4.1 \text{ K}$  and  
 $T3 - T4 \geq 19 \text{ K}$

Eliminates thin clouds with warm background

One of neighbour pixels successful at first 6 tests

Eliminates single pixel fire

**TRUE FIRE PIXEL**

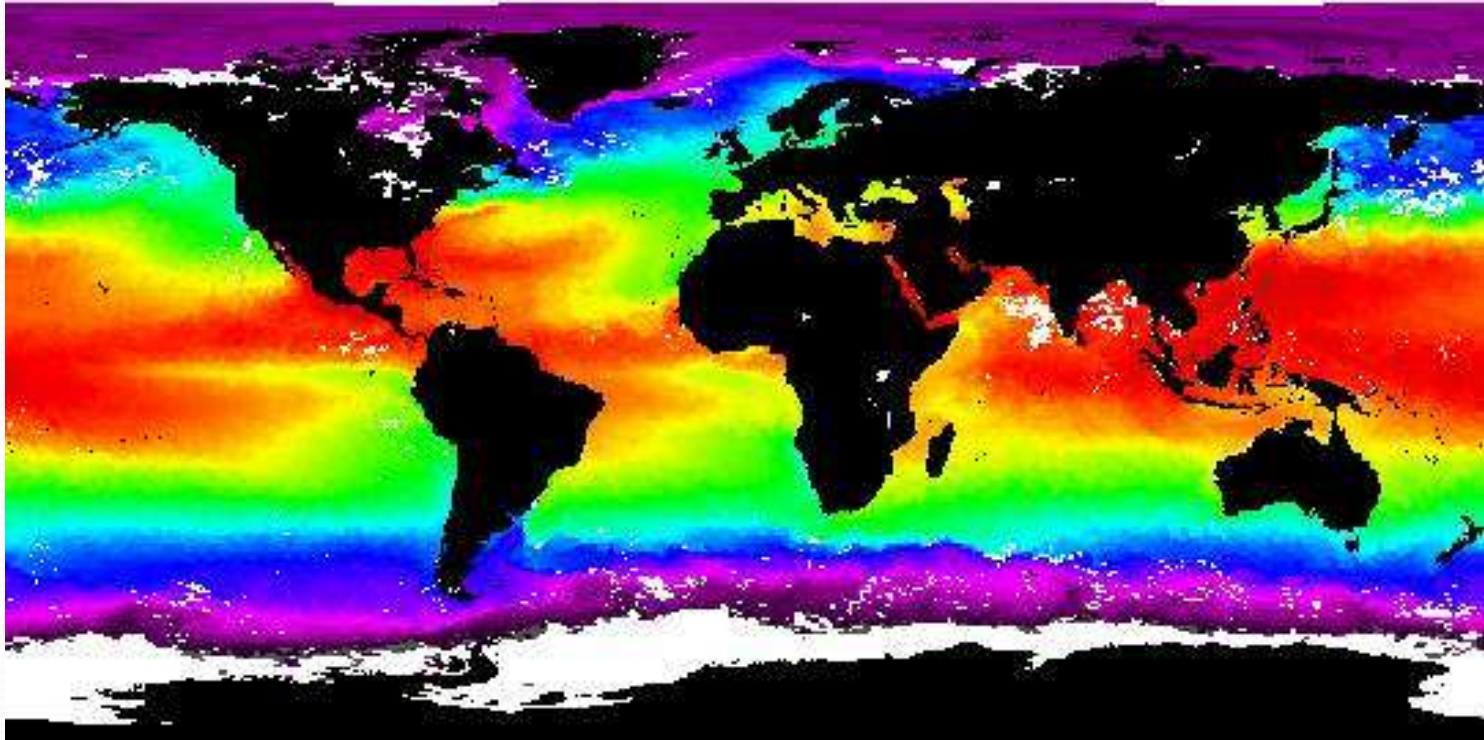
# Mapování SST (Sea Surface Temperature) z družicových měření

## Využitelnost SST:

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



# Výpočet SST ze snímků družice NOAA AVHRR



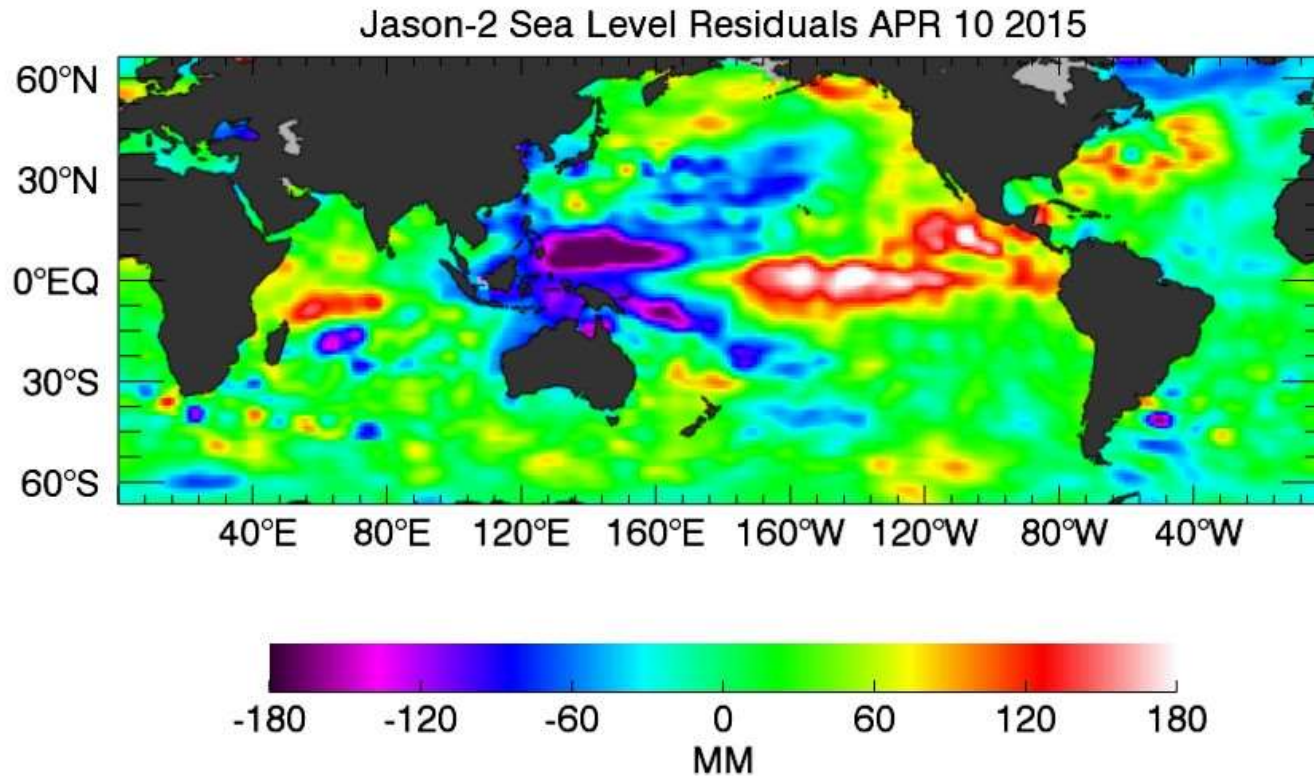
$$\text{SST} = a_0 + a_1 T_3 + a_2 T_4$$

$a_0, a_1, a_2$  – 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)

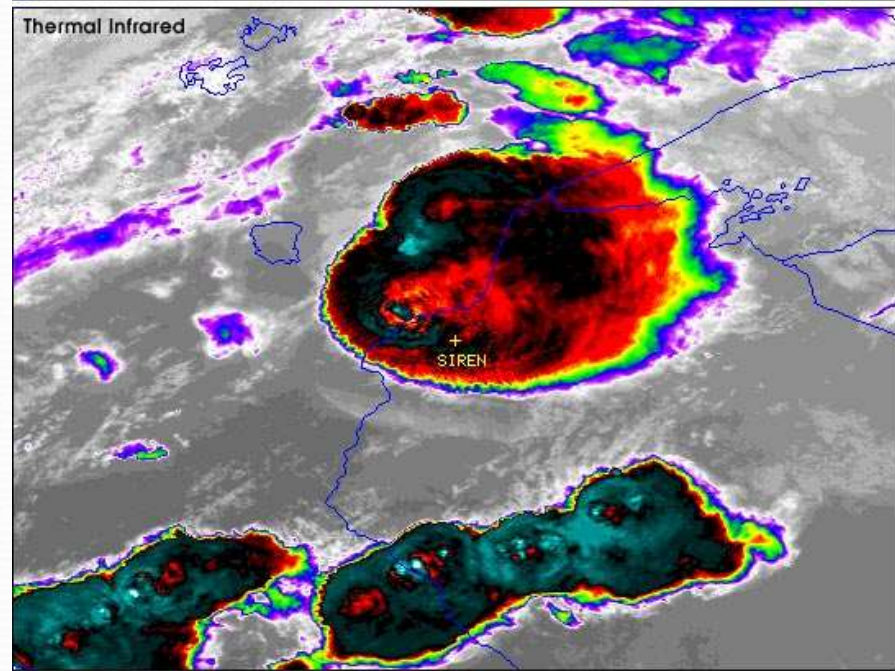
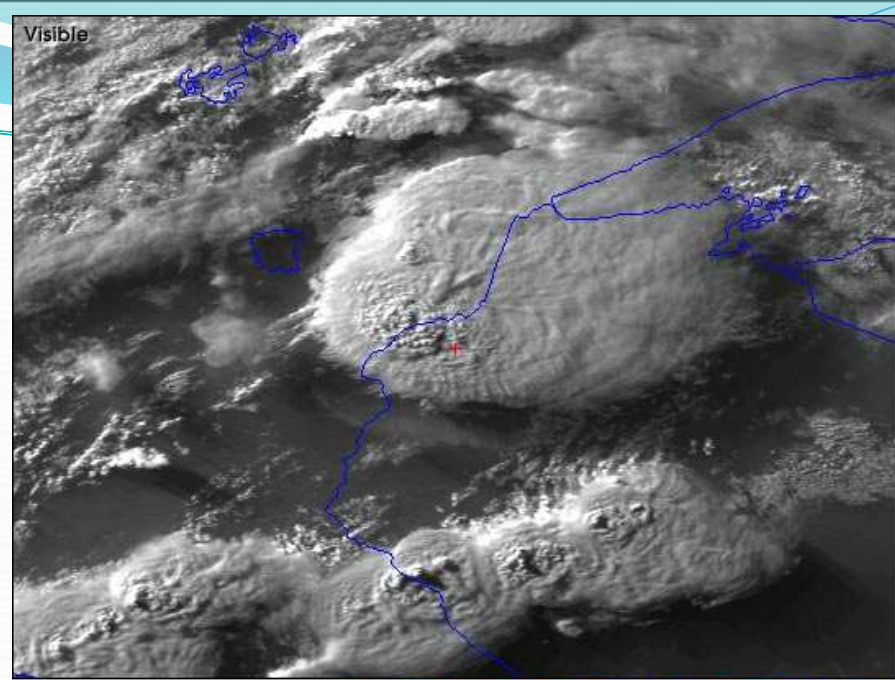
# Studium jevu ENSO s využitím map SST

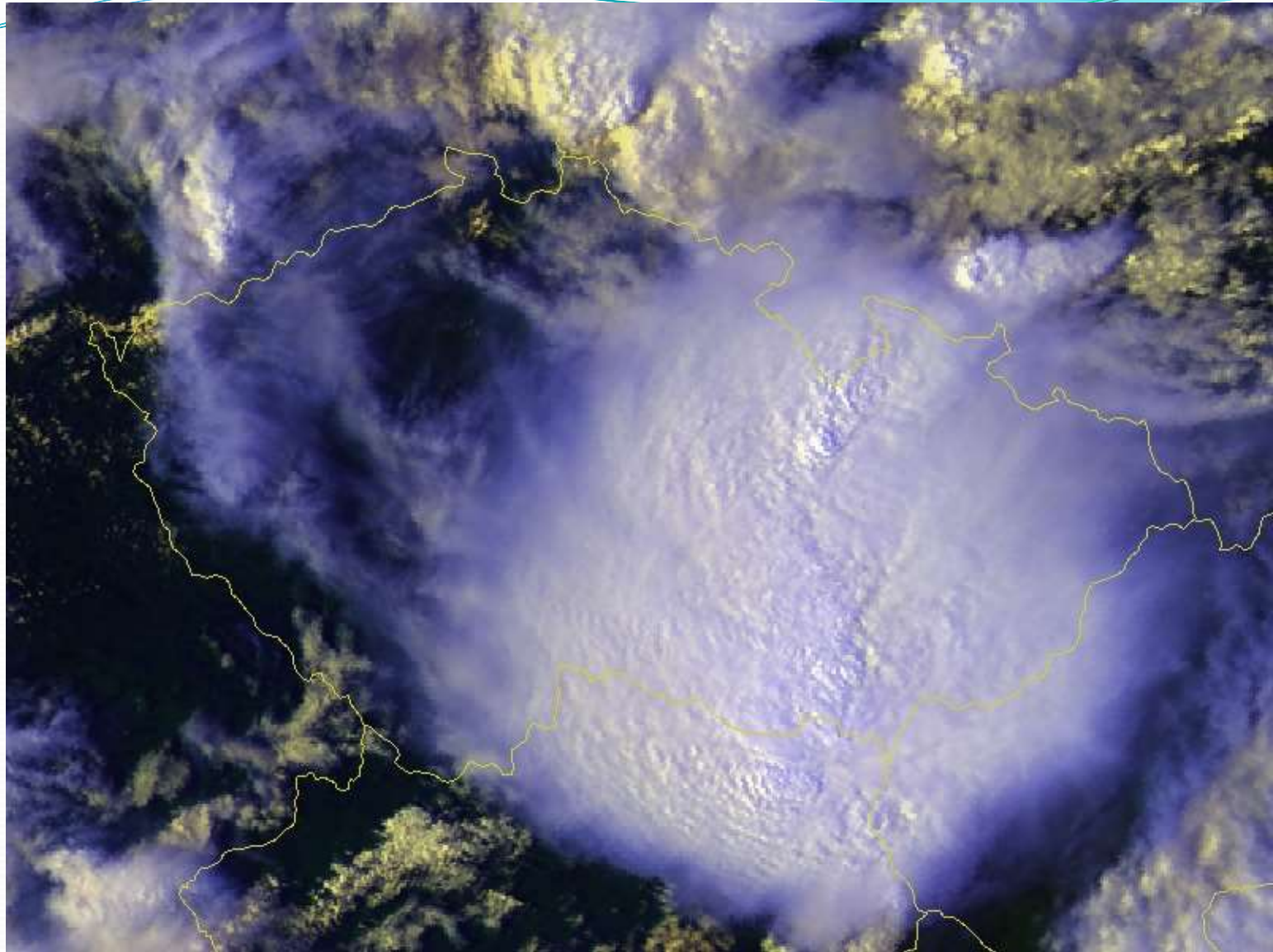


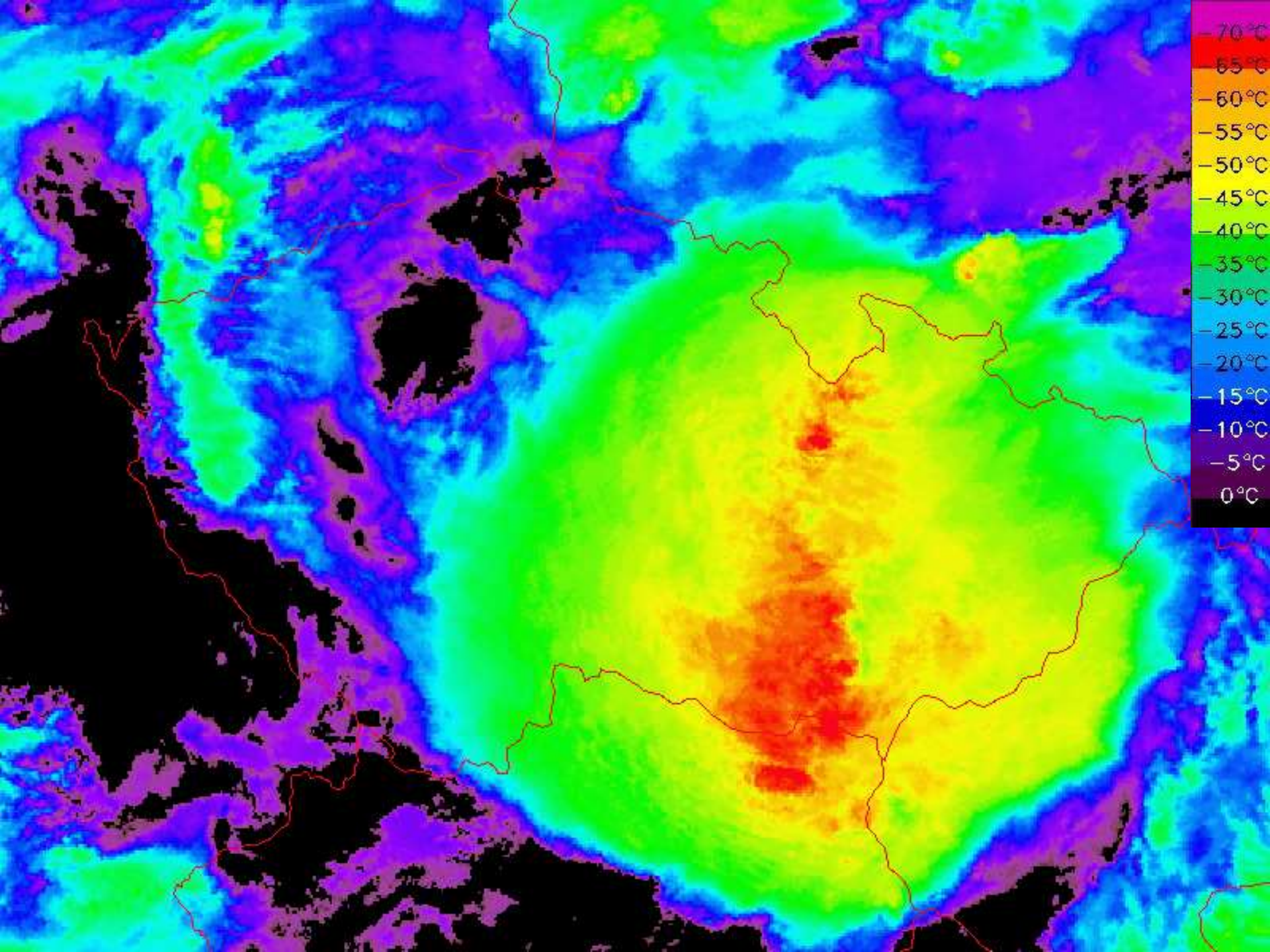
<https://sealevel.jpl.nasa.gov/science/elninopdo/latestdata/>

# Mapování extrémních projevů konvekce

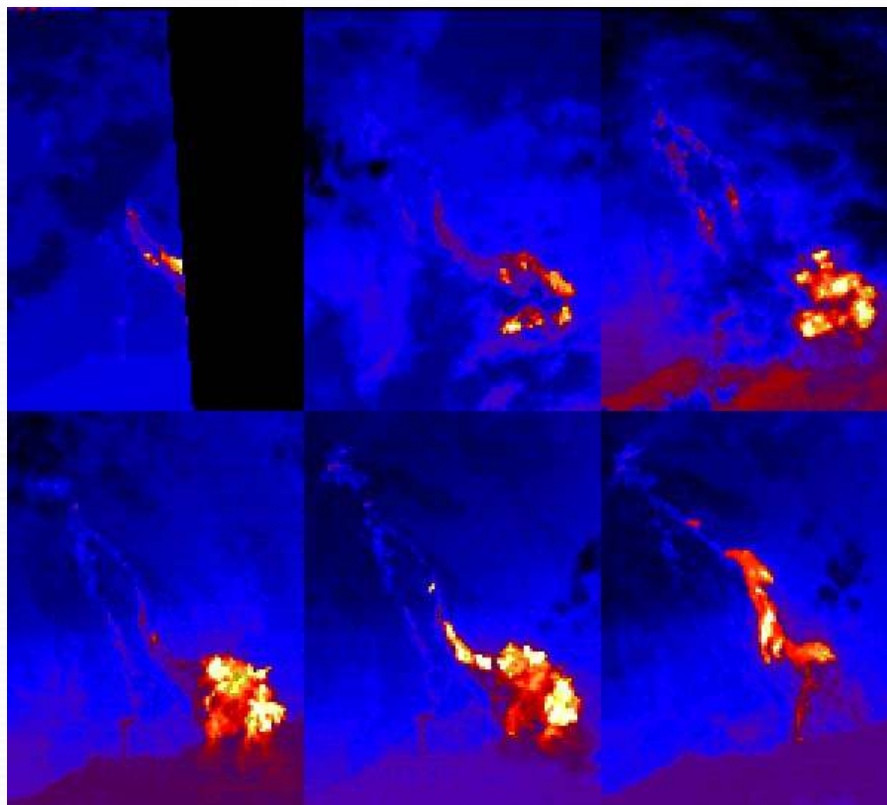
Teplota horní vrstvy bouřkové oblačnosti





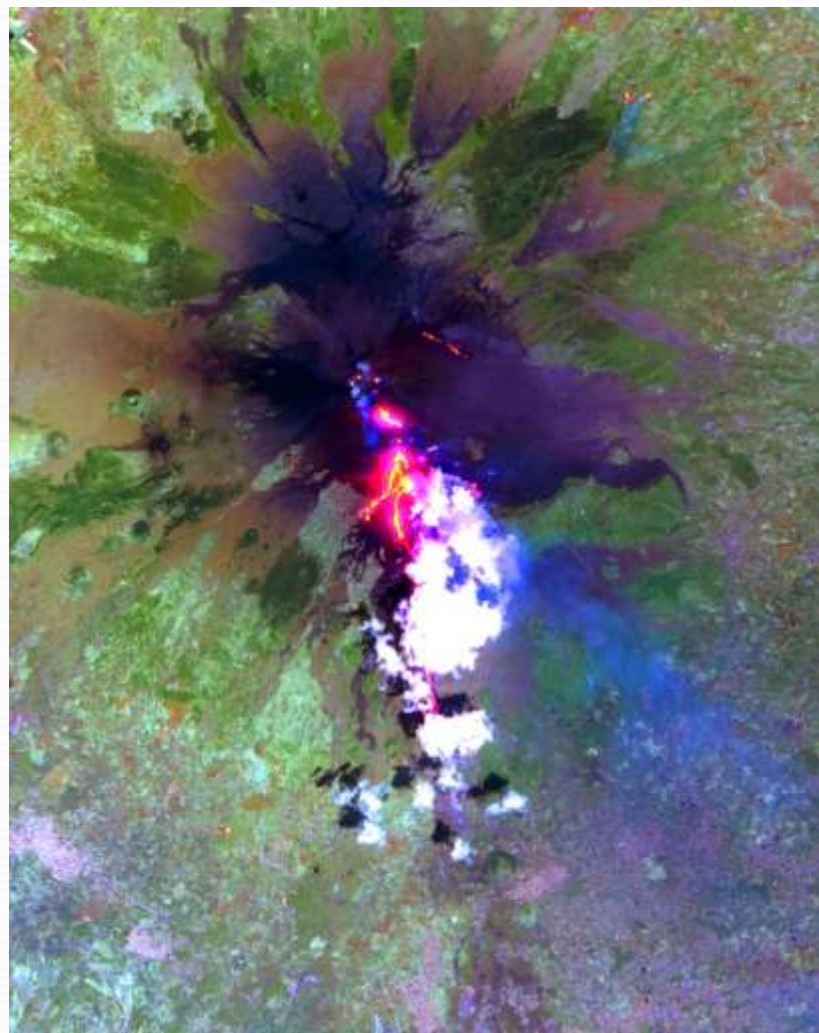


# Mapování rozsahu lávových proudů



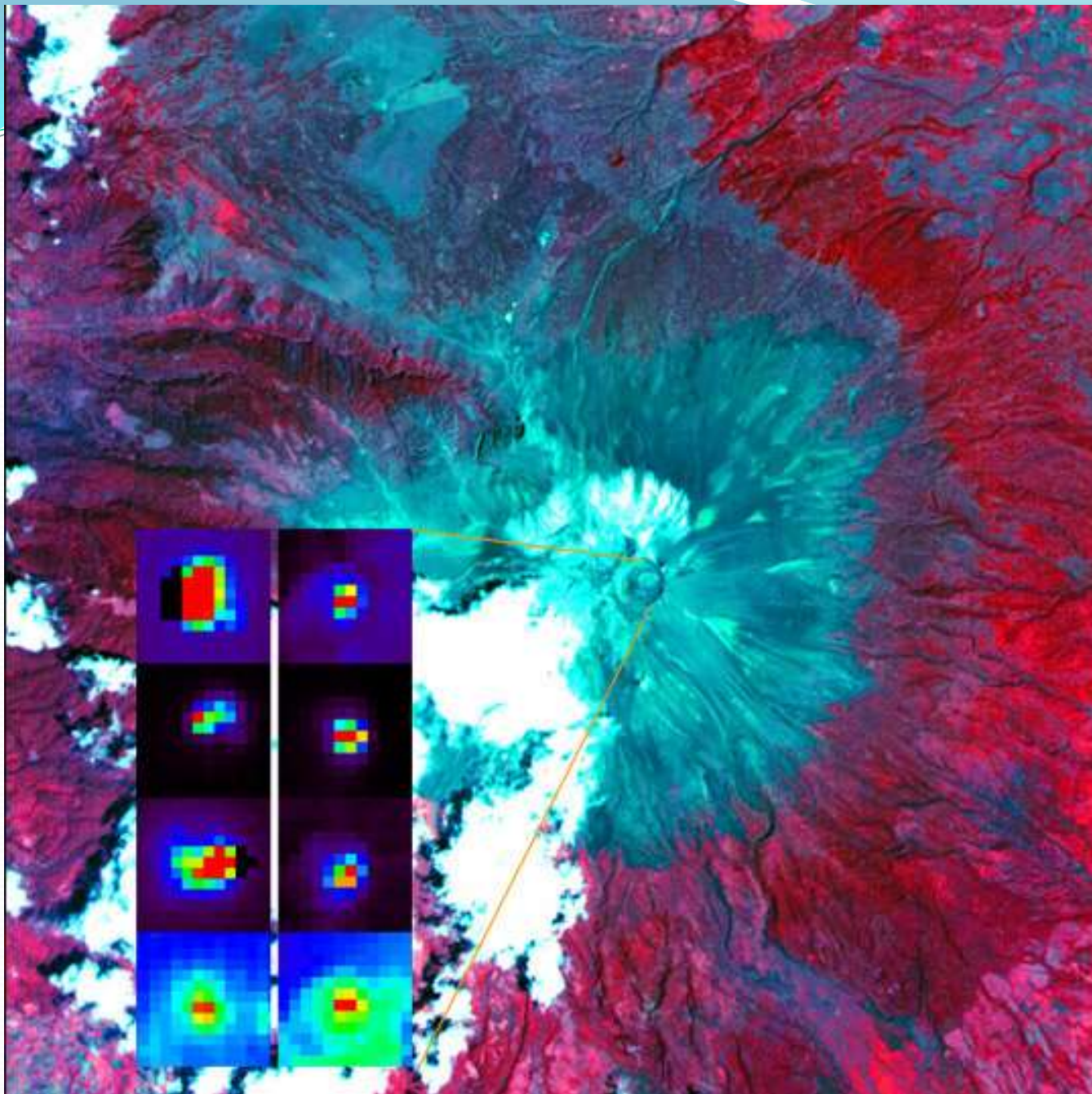
Havaj, série nočních snímků z družice ASTER, plocha 9 x 12 km

# Mapování rozsahu lávových proudů



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

# Studium vulkánů

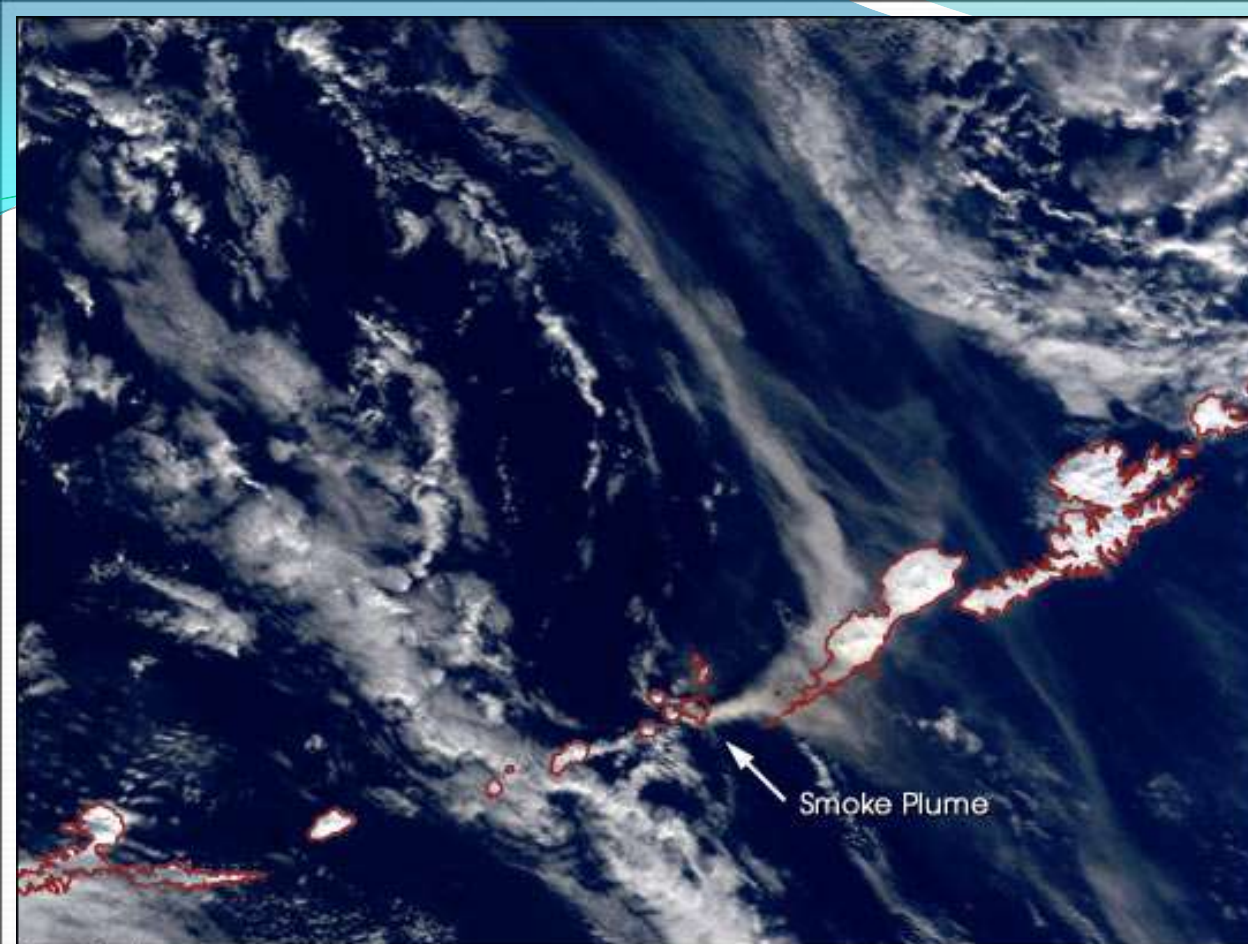


Sopka  
Popocatepetl  
(Mexiko)

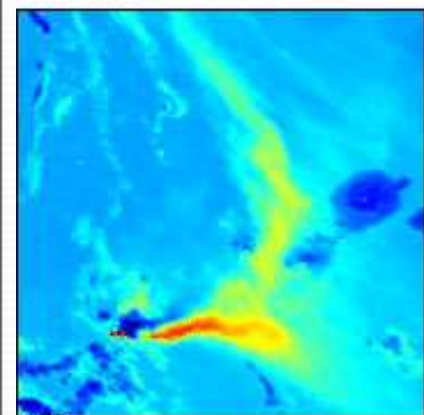
Družice  
TERRA,  
skener ASTER



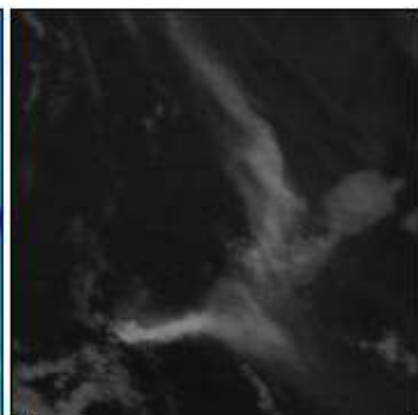
## Mapování oblaků sopečného popela



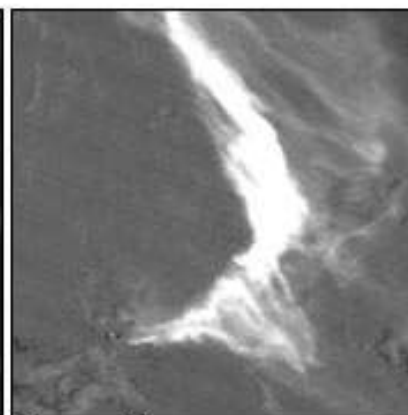
True Color



3.9µm



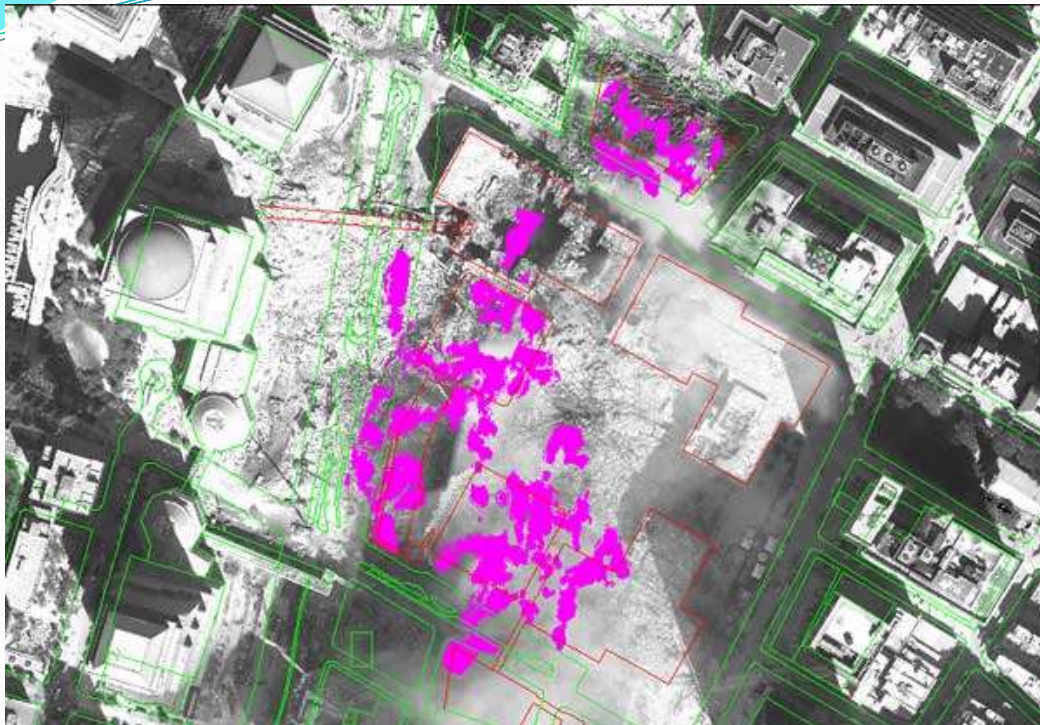
11µm



11µm - 12µm

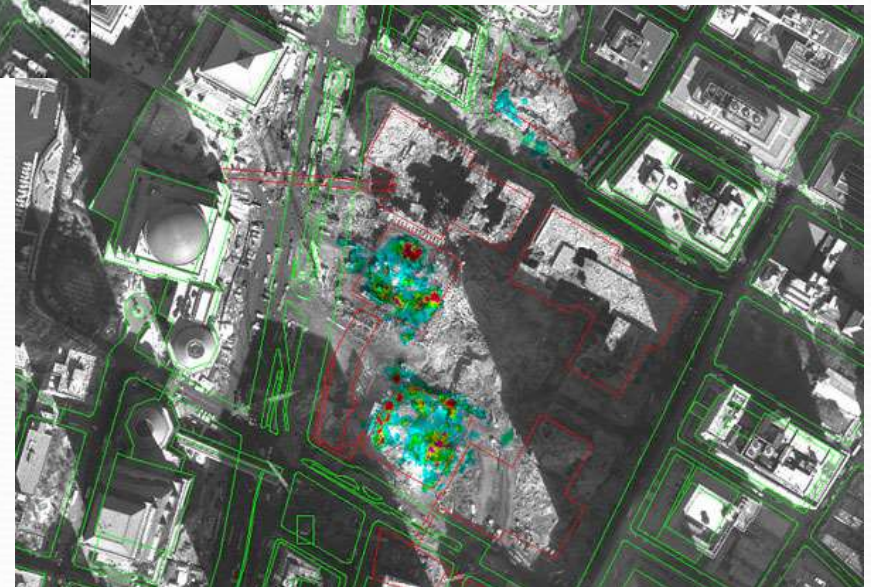
Sopka Cleveland  
(Aleutské ostrovy)  
snímky z družice MODIS

# Mapování teplotních poměrů

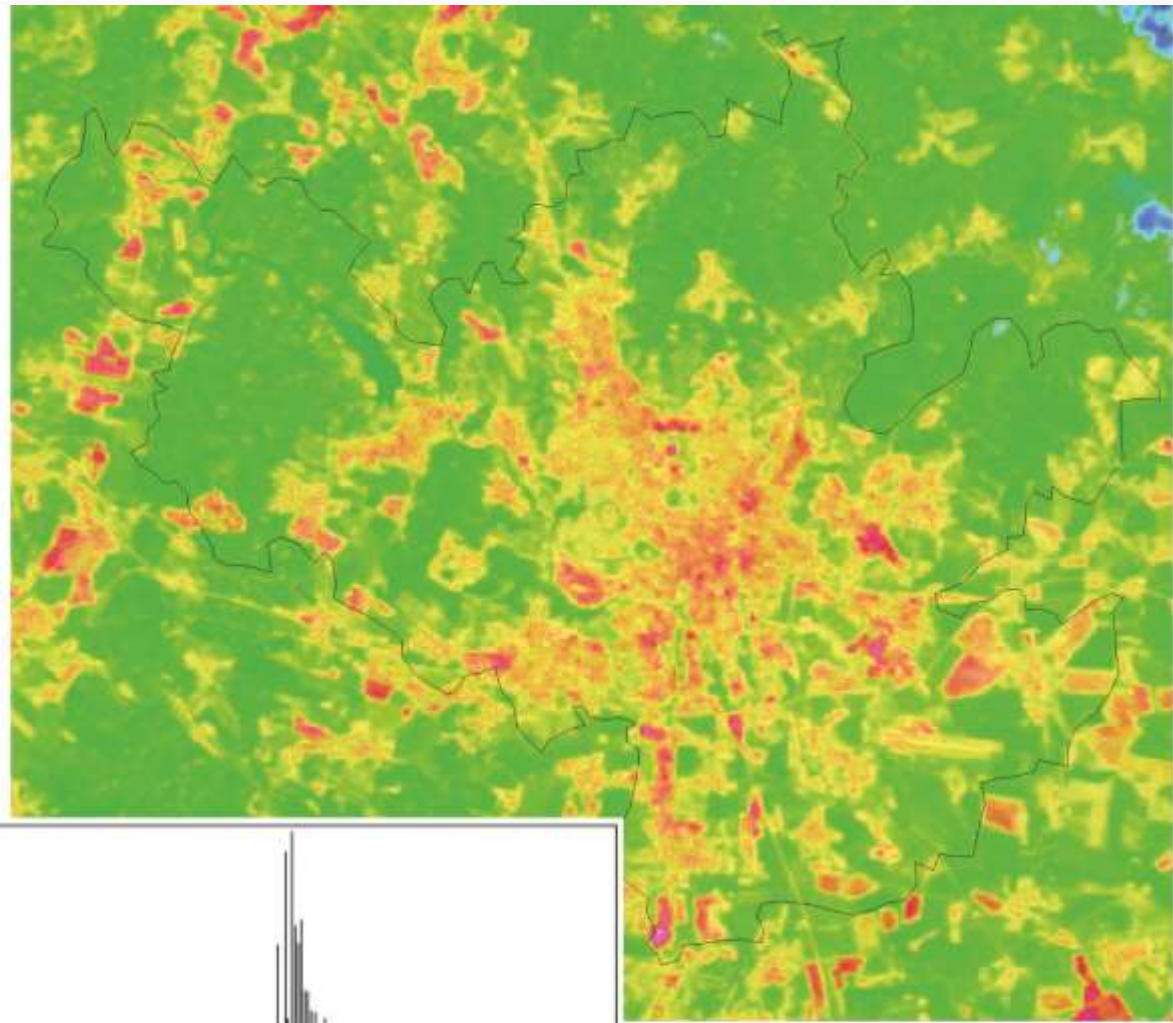
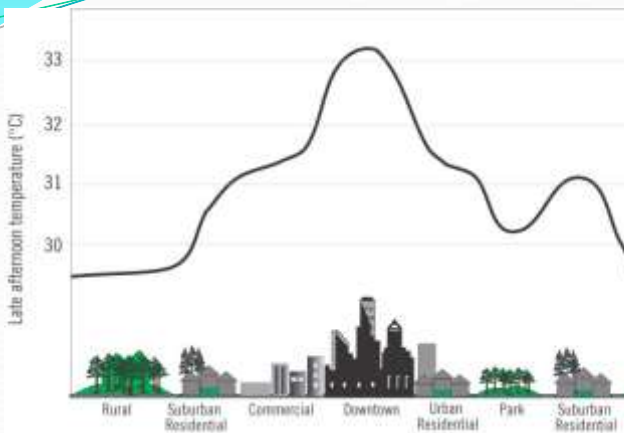


**New York, 16.9.2001**

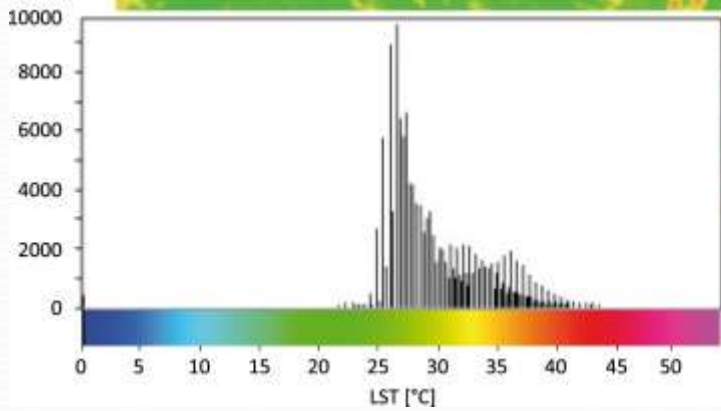
**New York, 18.9.2001**



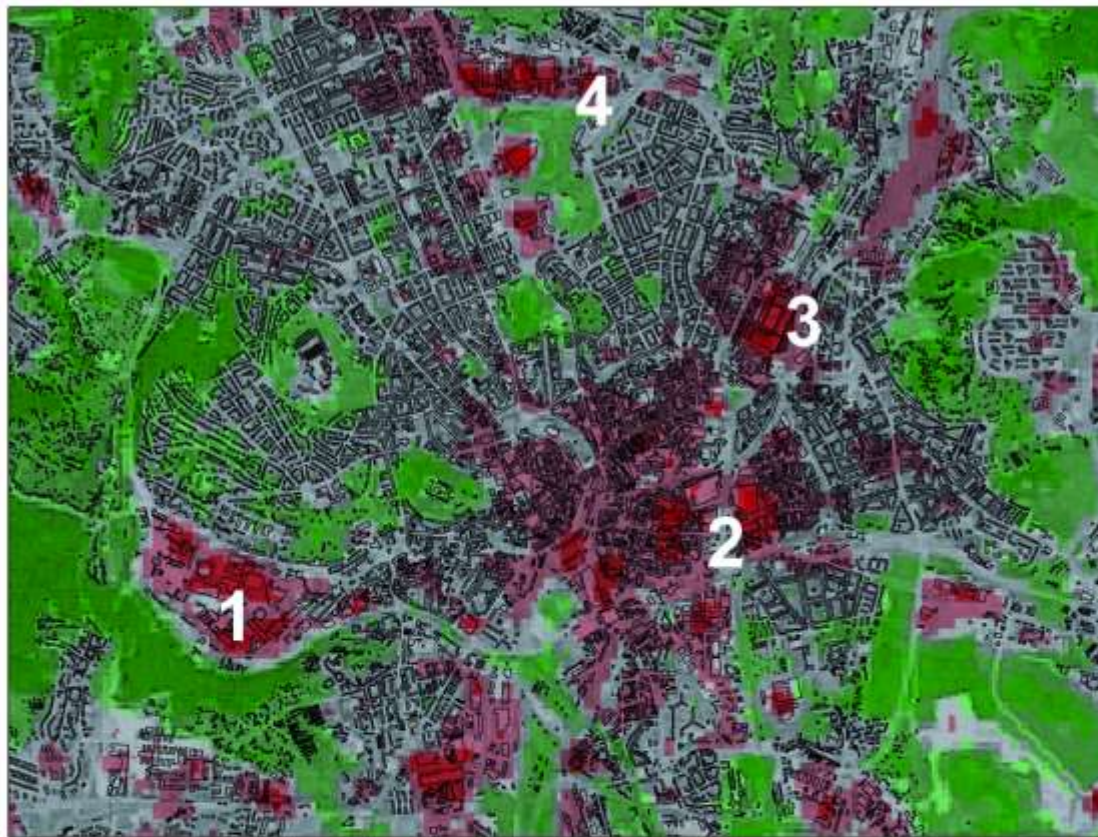
# Mapování tepelného ostrova města



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



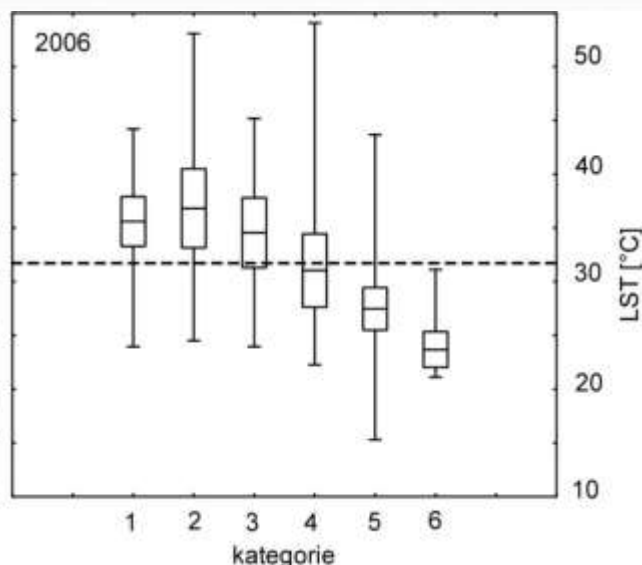
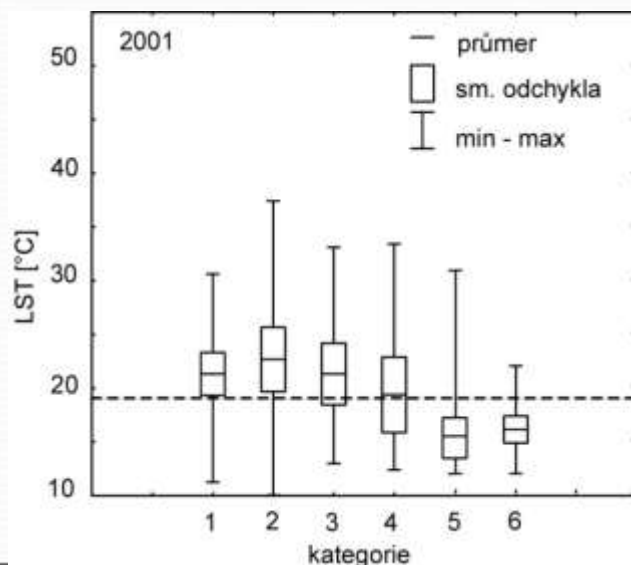
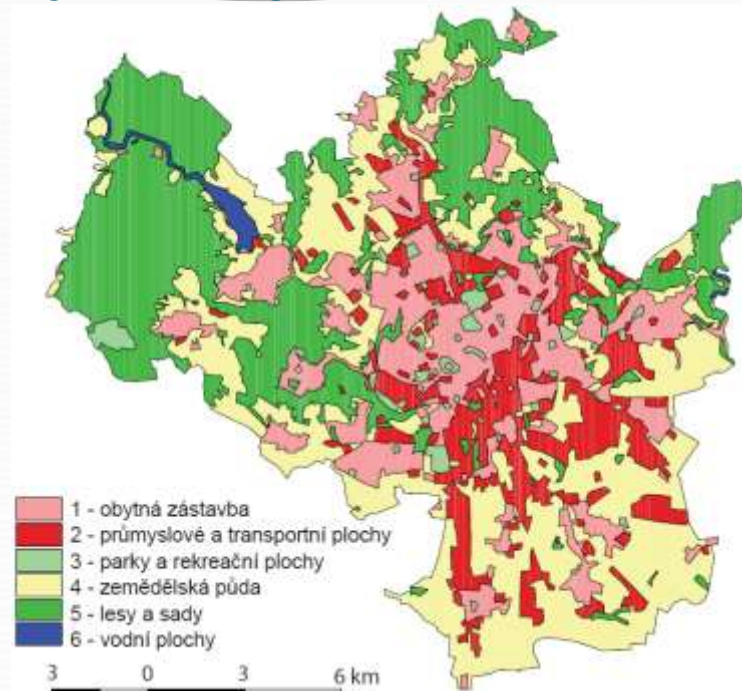
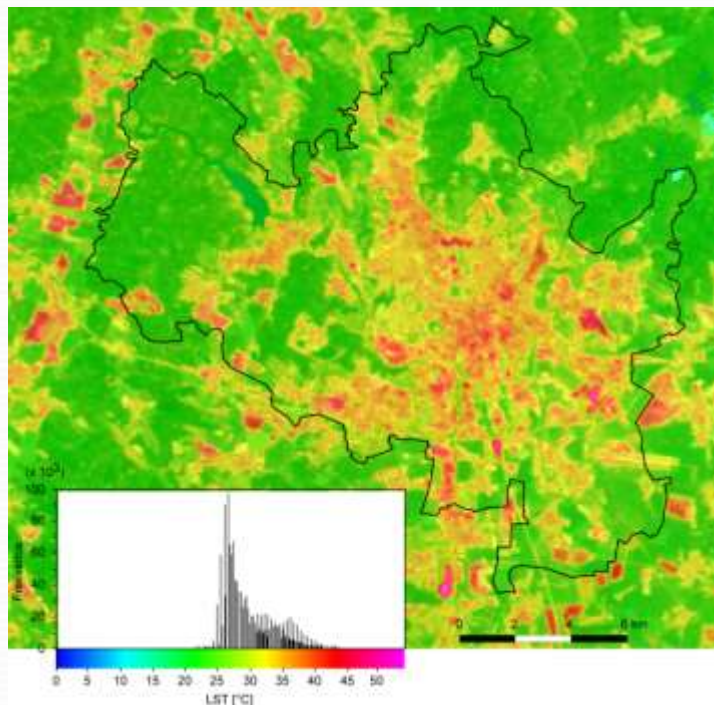
# Vztah mezi teplotou aktivních povrchů (LST) a charakterem zástavby



LST [°C]

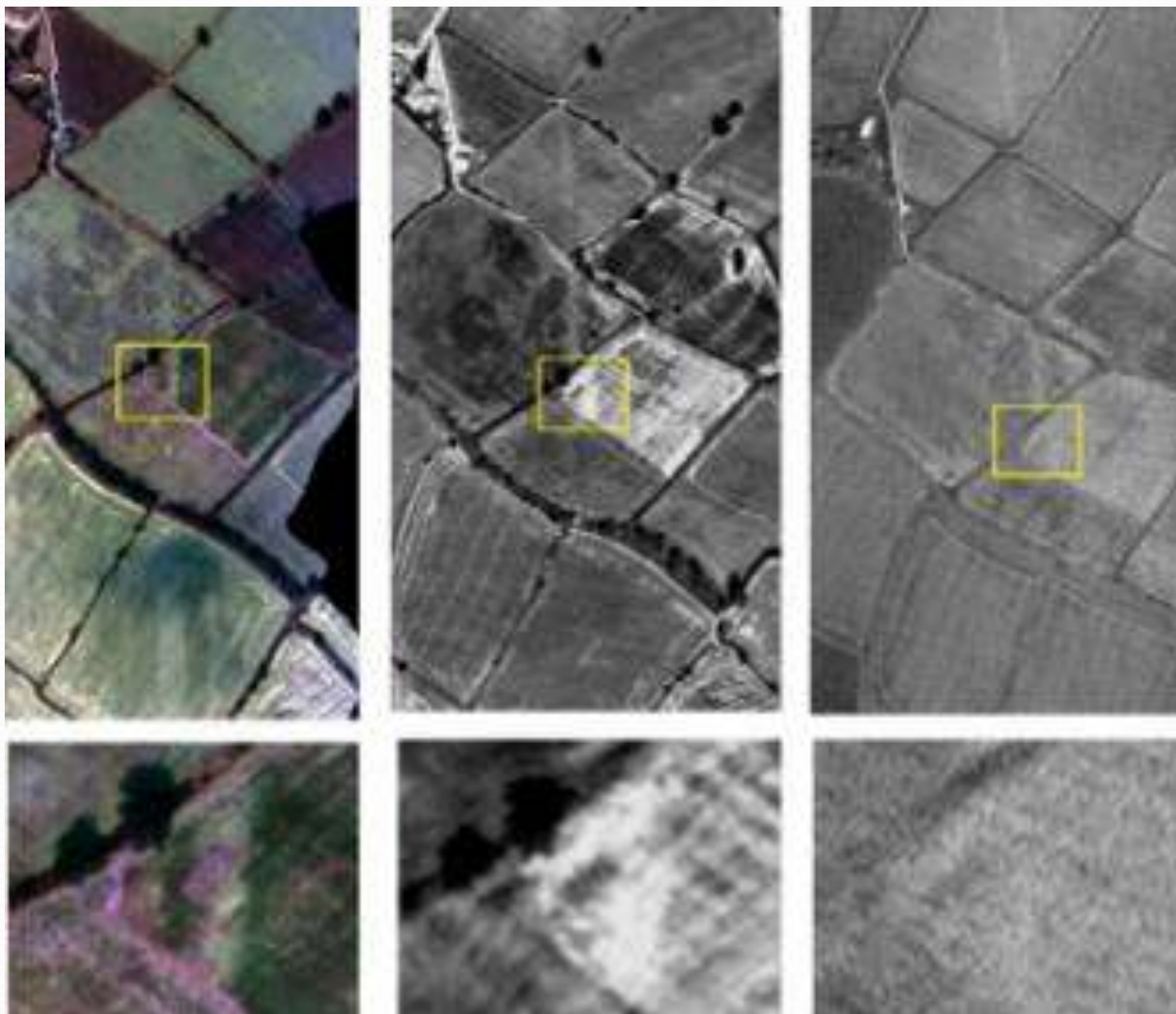


# Podíl vybraných kategorií druhů povrchů na formování tepelného ostrova v Brně

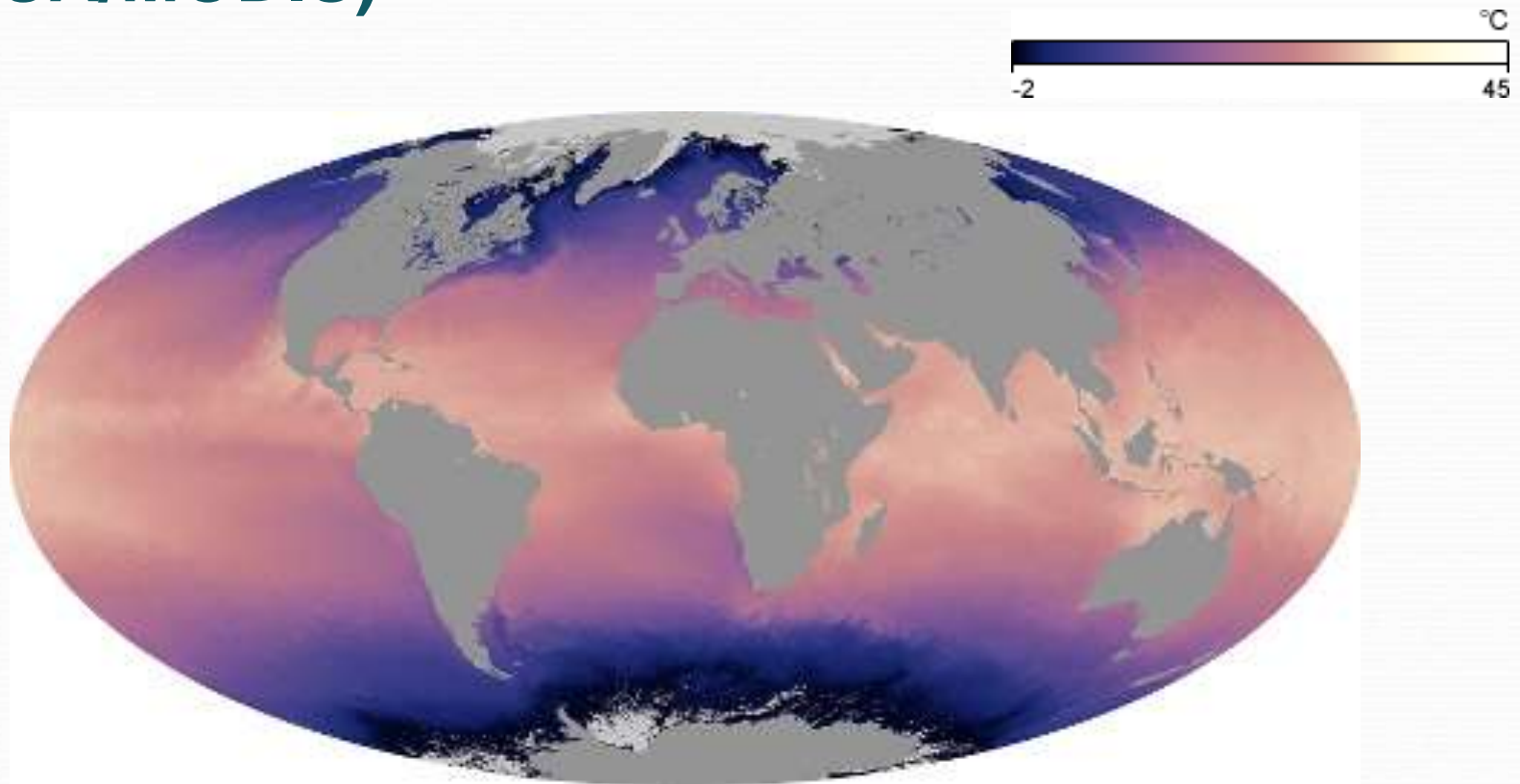


# Lokalizace poruch teplovodů

Termovize – letecké snímání

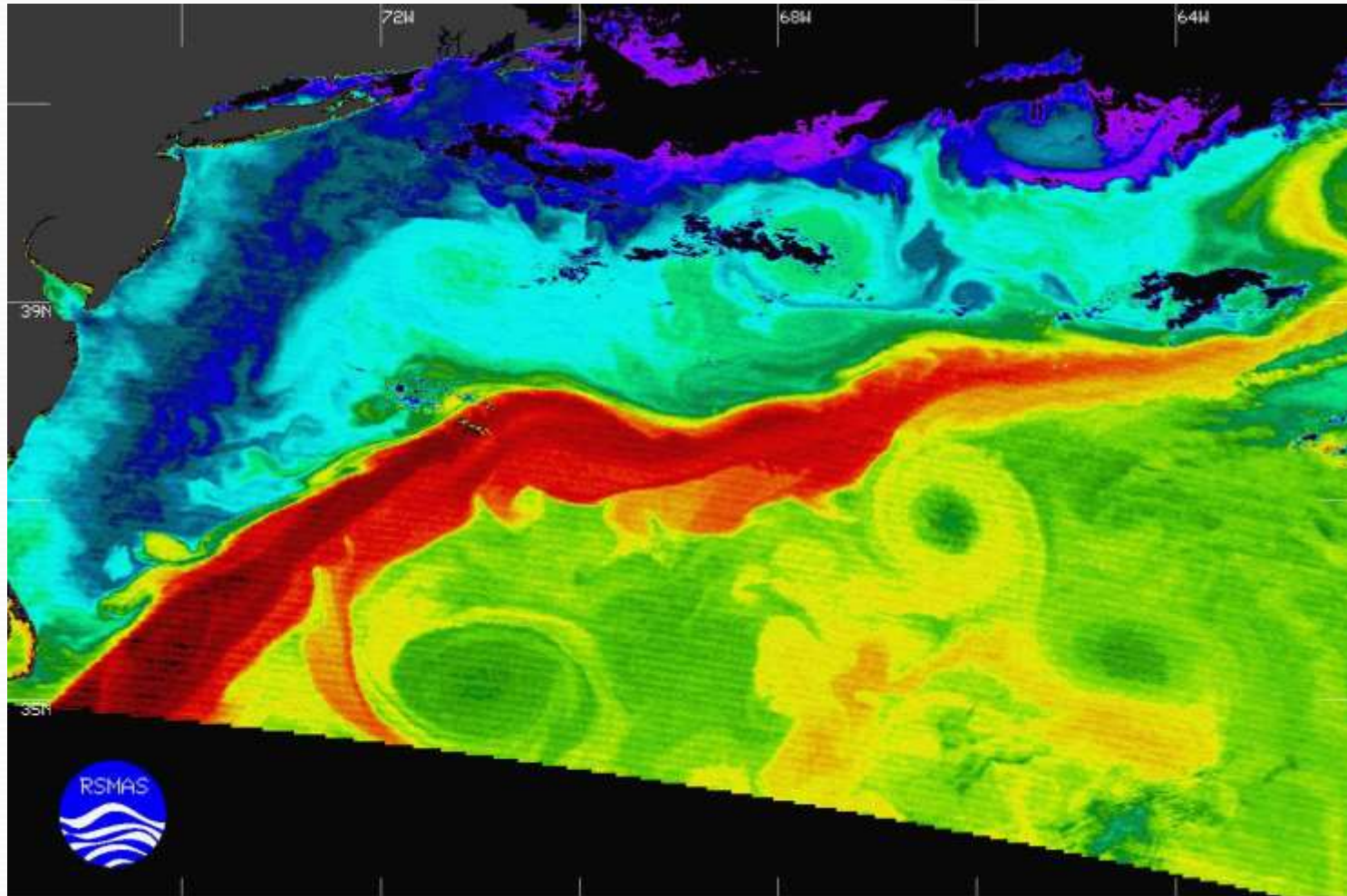


# Mapování povrchové teploty oceánu (AQUA/MODIS)



<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.



[http://www.geog.ucsb.edu/~jeff/115a/remote\\_sensing/thermal/thermalirinfo.html](http://www.geog.ucsb.edu/~jeff/115a/remote_sensing/thermal/thermalirinfo.html)

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

[http://en.wikipedia.org/wiki/Urban\\_heat\\_island](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)