

Физические основы спутникового детектирования активных пожаров и оценки их характеристик

Б.С. Жуков

Институт космических исследований РАН

Ежегодно выгорает:

- 350-500 млн. га саванны
- 5-10 млн. га тропических лесов
- 5-20 млн. га бореальных лесов

Отрицательные эффекты пожаров высокой интенсивности:

- уничтожение основного древостоя,
- эрозия почв,
- влияние на радиационный баланс атмосферы (CO/CO₂, аэрозоль),
- в населенных районах: уничтожение инфраструктуры, угроза здоровью и жизни человека.

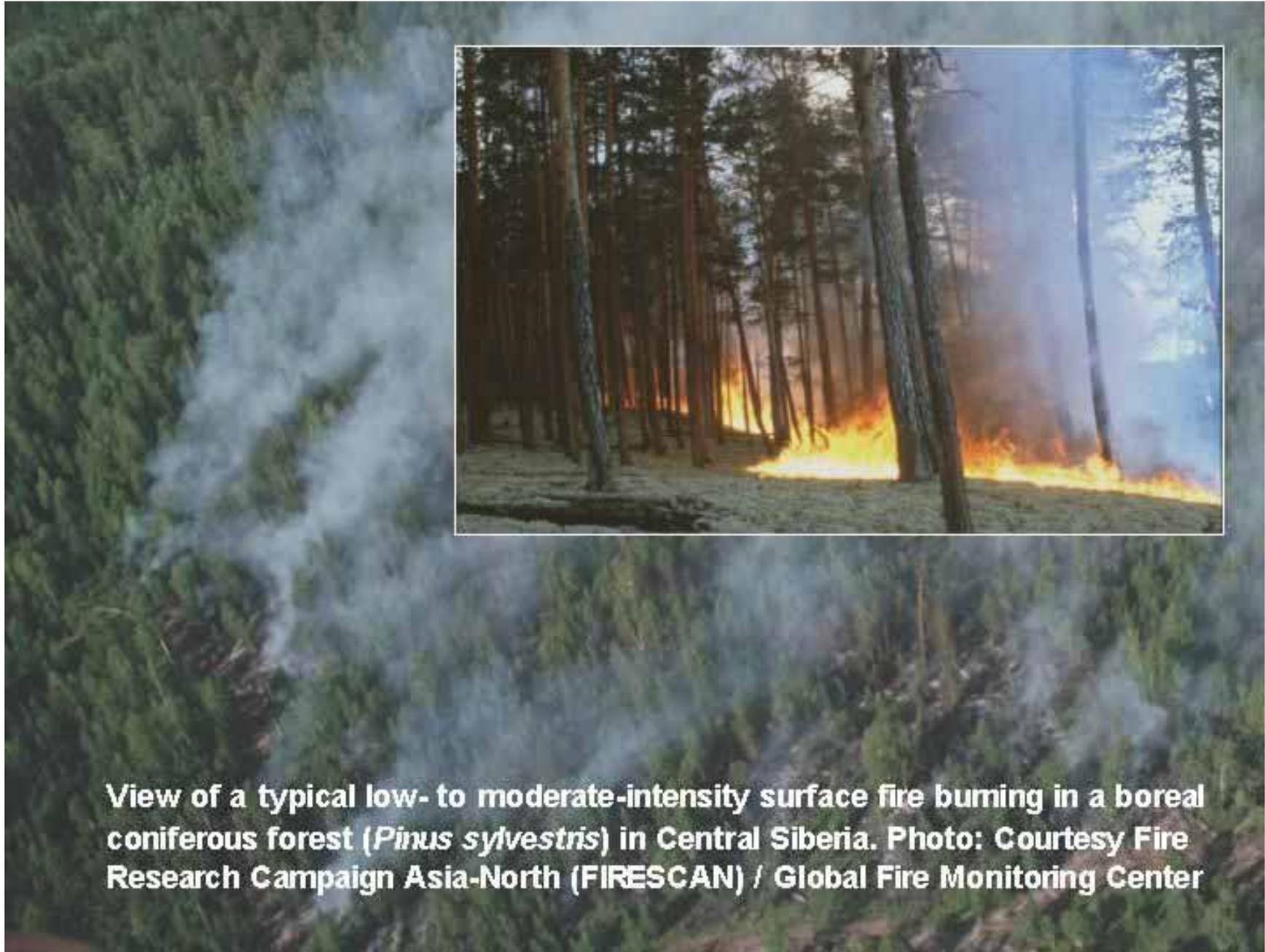
Положительные эффекты низовых пожаров малой и средней интенсивности:

- регулирование состава и структуры растительного покрова,
- ускорение обмена веществ,
- снижение топливной нагрузки и вероятности разрушительных пожаров,
- увеличение стабильности и продуктивности экосистем.



View of a typical high-intensity stand-replacement fire burning in a boreal coniferous forest (*Pinus sylvestris*) in Eastern Siberia. Photo: Global Fire Monitoring Center (GFMC)

Пример верхового пожара высокой интенсивности



Пример низового пожара низкой/средней интенсивности

Задачи спутникового мониторинга активных пожаров

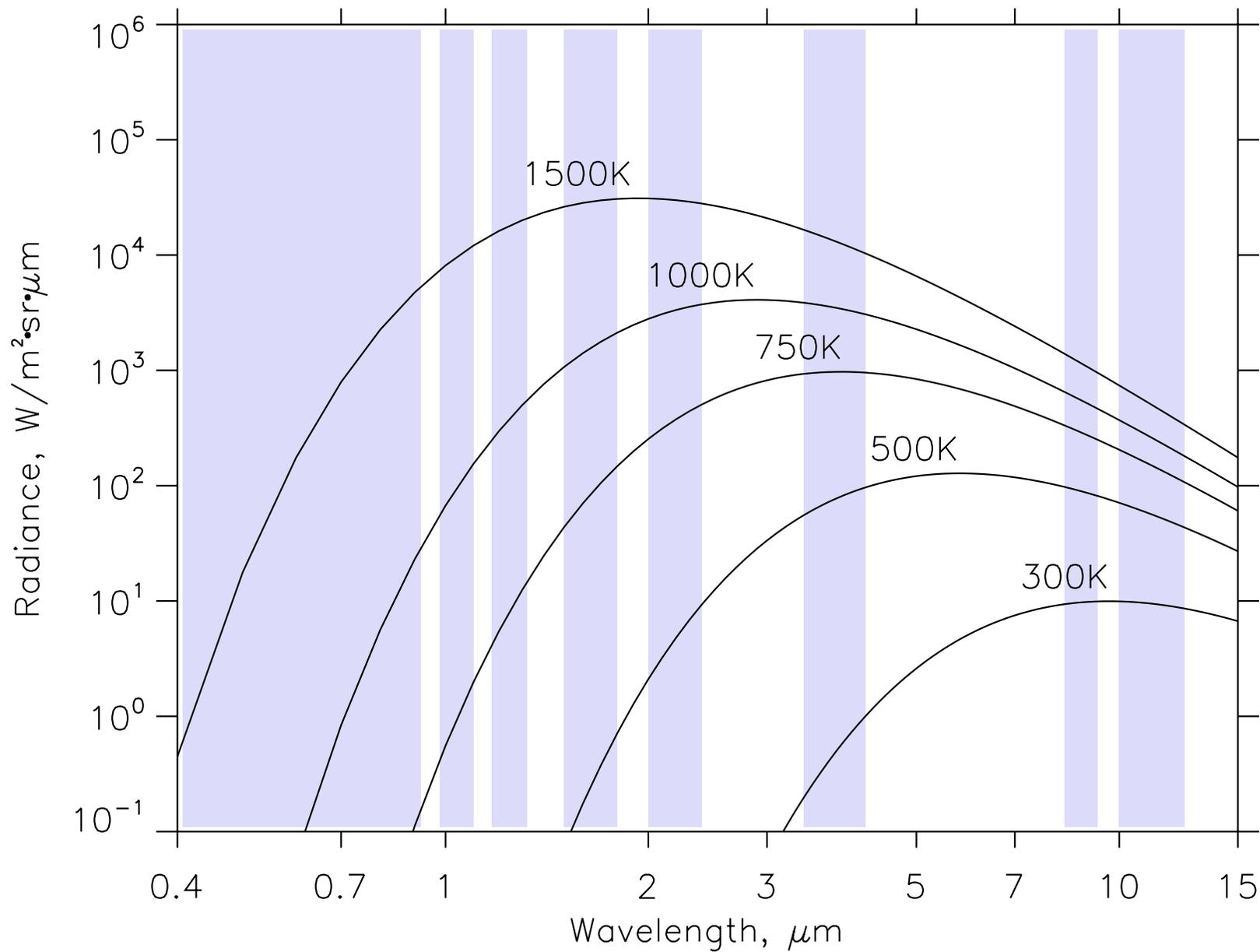
I. Детектирование

II. Оценка характеристик:

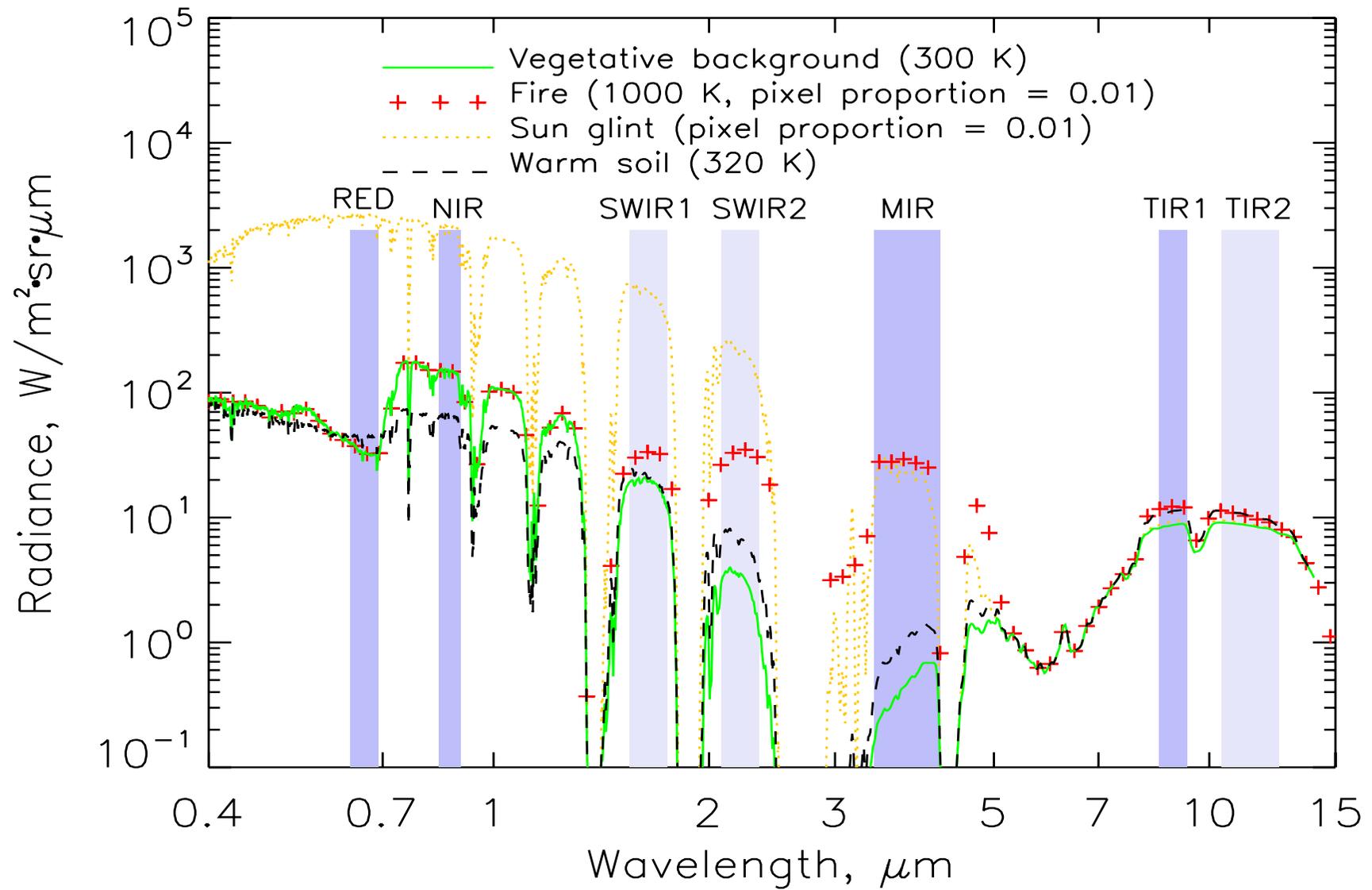
- эффективная температура пожара,
- эффективная площадь пожара,
- радиационная интенсивность пожара,
- длина фронта,
- радиационная интенсивность фронта пожара

Интенсивность фронта, кВт/м	Возможность тушения пожара
350	Может быть погашен вручную
1700	Может быть погашен техническими средствами
7000	Пожар выходит из-под контроля

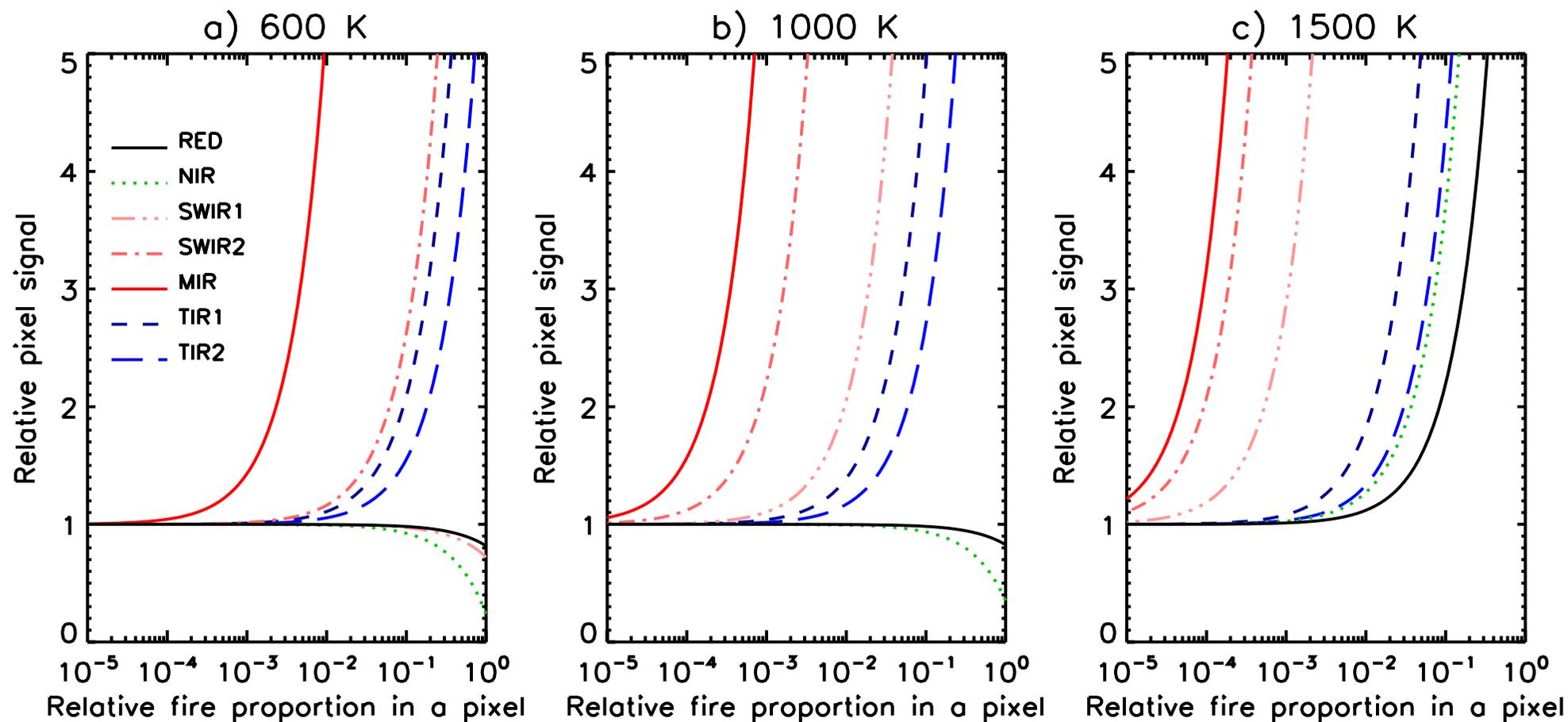
Спутниковый мониторинг пожаров должен проводиться как в дневных, так и в ночных условиях. Приоритет – дневной мониторинг, поскольку днем пожарная активность на порядок выше



Спектральное распределение яркости черного тела
в зависимости от температуры



Яркость пожаров на изображении в сравнении с яркостью других объектов в дневных условиях



Чувствительность спектральных зон к пожару в дневных условиях:

RED: 0.63-0.69 мкм; NIR: 0.84-0.89 мкм; SWIR1: 1.55-1.75 мкм;

SWIR2: 2.1-2.35 мкм; MIR: 3.4-4.2 мкм; TIR1: 8.5-9.3 мкм; TIR2: 10.4-12.5 мкм

Спутниковые системы для мониторинга активных пожаров

Съемочная система	Основной канал для детектирования пожаров	Разрешение	Полоса обзора
GOES Imager	MIR (Тнас=320 К)	4 км	С/Ю Америка
SEVIRI/MSG	MIR (Тнас=335 К)	3 км	Европа, Африка
AVHRR/NOAA	MIR (Тнас=325-335 К)	1.1 км	3000 км
AATSR/ENVISAT	MIR (Тнас=311 К)	1 км	500 км
VIRS/TRMM	MIR (Тнас=321 К)	2.1 км	720 км
MODIS/Terra,Aqua	MIR (Тнас=500 К)	1 км	2300 км
HSRS/BIRD	MIR (Тнас=600 К)	0.37 км	190 км
ETM+ /Landsat	SWIR2	30 м	185 км
ASTER/Terra	SWIR2	30 м	60 км
OLS/DMSP	VNIR	560 м	3000 км

Для детектирования пожаров применяются пороговые тесты со следующими параметрами:

Выделение «горячих пикселей»: рад. температура (яркость) в MIR

Фильтрация солнечных бликов: коэффициент яркости в RED, отношение яркостей MIR/RED, угол к направлению зеркального отражения

Фильтрация облаков: коэффициент яркости в RED и/или NIR, рад. температура в TIR, отношение яркостей MIR/RED

Фильтрация теплых поверхностей: разность рад. температур MIR - TIR, отношение яркостей MIR/TIR, эффективная температуры пожара

Дополнительная информация: водная маска, лесная маска или (NDVI)

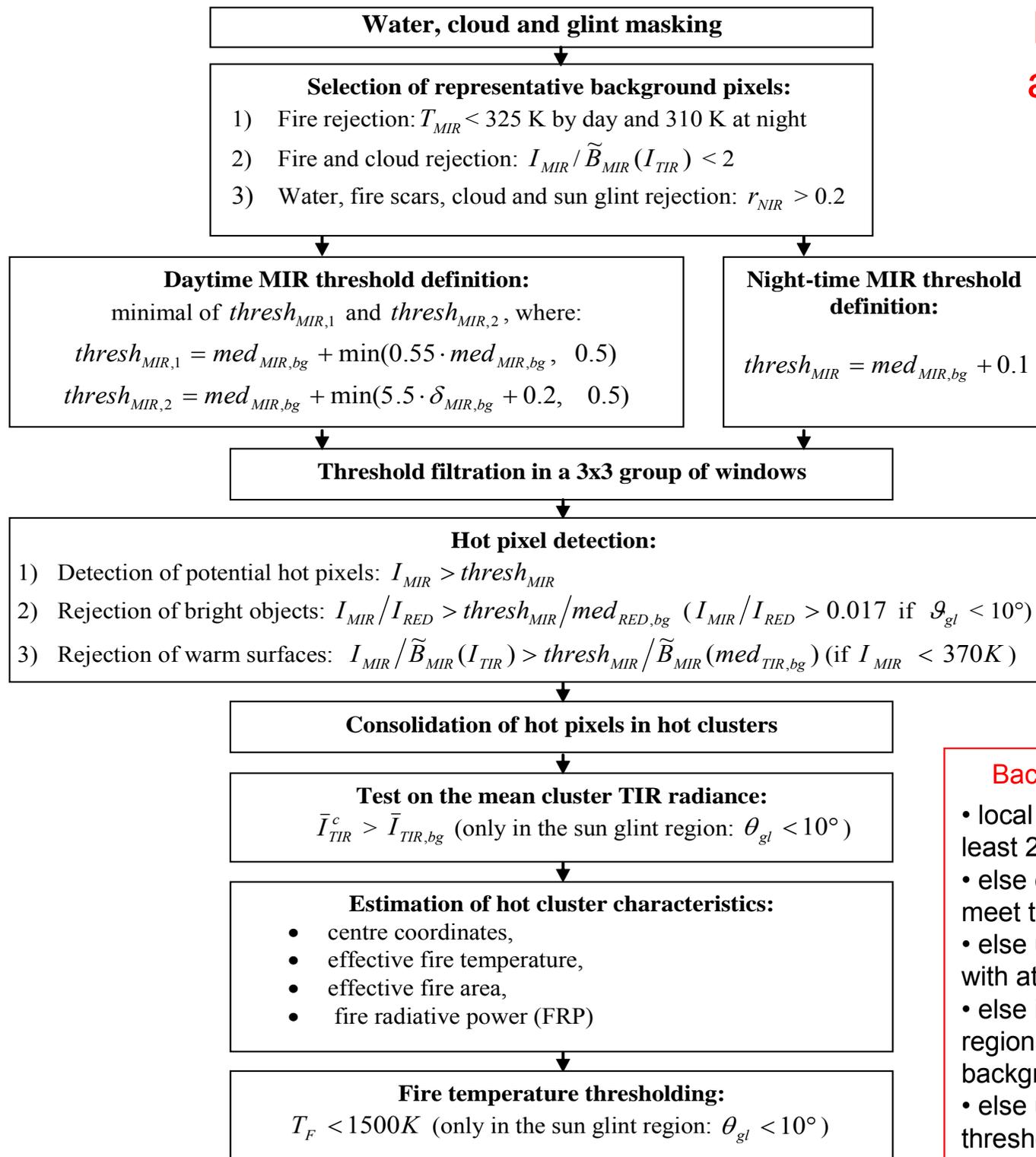
Основные типы алгоритмов детектирования пожаров

Алгоритмы с фиксированными порогами: Kaufman et al., 1990; Setzer, 1991; Pereira and Setzer, 1993a; Chuvieco and Martin, 1994a; Kennedy et al., 1994; Franca et al., 1995; Arino and Melinotte, 1997; Rauste et al., 1997; Arino and Rosatz, 1999

Контекстные адаптивные алгоритмы: Flannigan and Vonder Haar, 1986; Lee and Tag, 1990; Prins and Menzel, 1992, 1994; Flasse and Cessato, 1996; Justice et al., 1996; IGBP-DIS, 1997; Giglio et al., 1999; Boles and Verbyla, 2000; Kaufman et al, 1998; Justice et al, 2002; Giglio et al, 2003; Zhukov et al, 2003

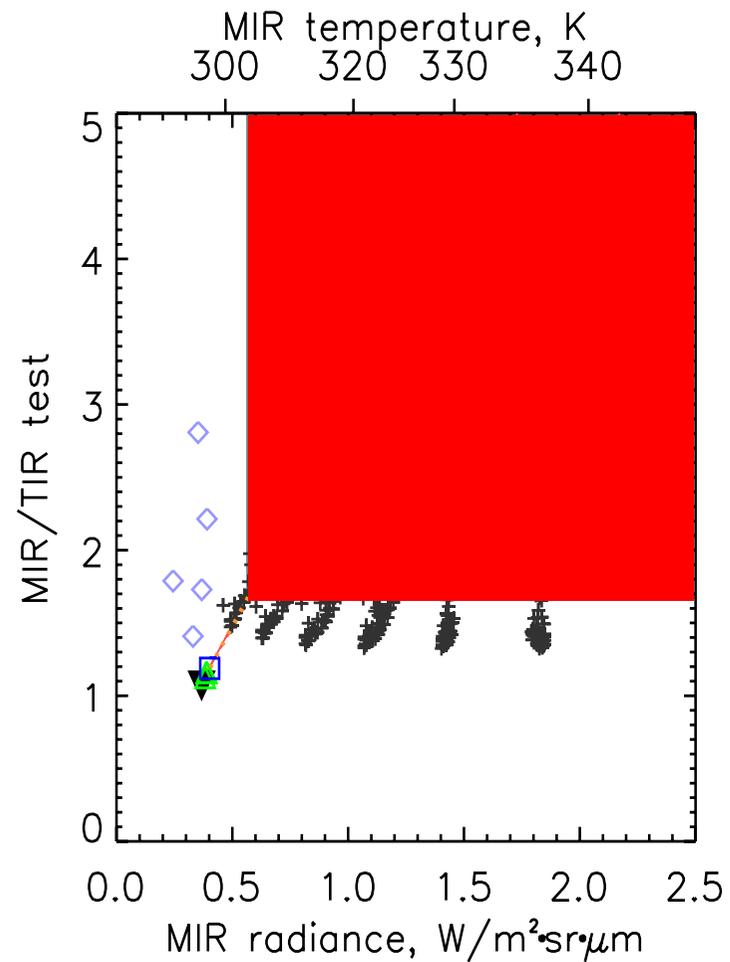
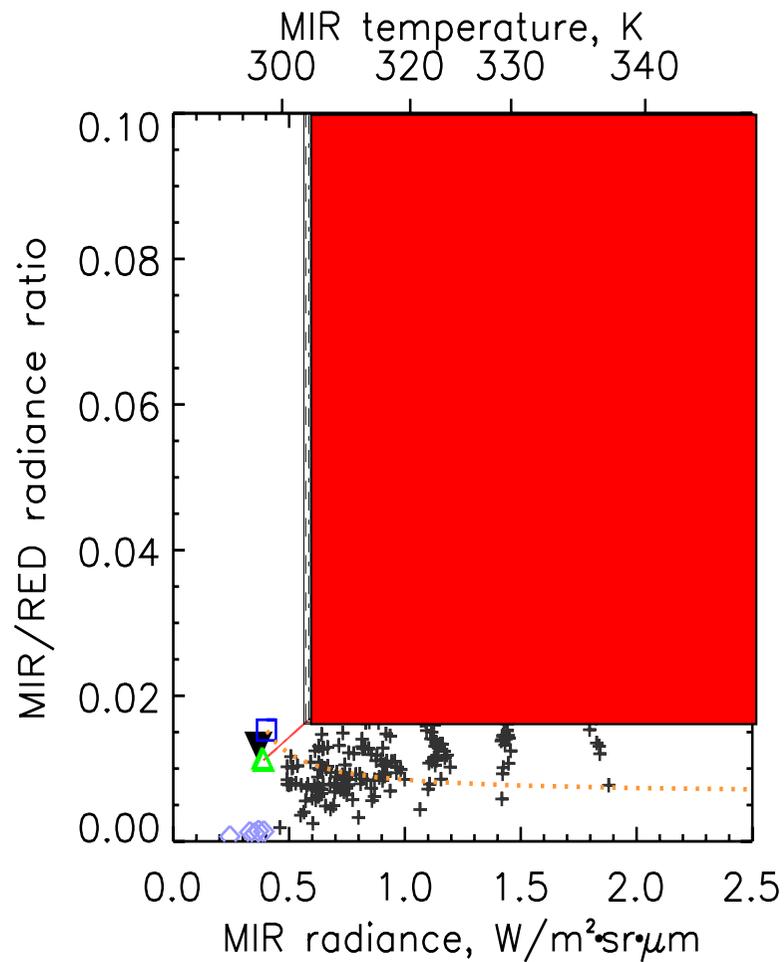
Многовременные алгоритмы: Pozo et al, 1997; Cuomo et al, 2001; Lasaponara et al, 2003

Пример: контекстный адаптивный алгоритм детектирования пожаров для BIRD



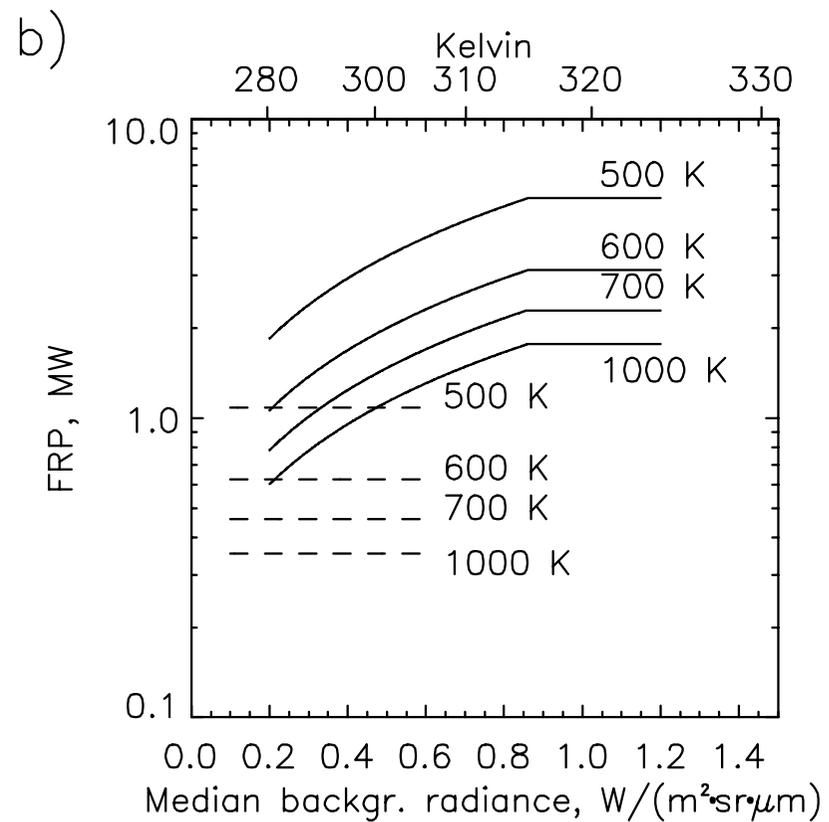
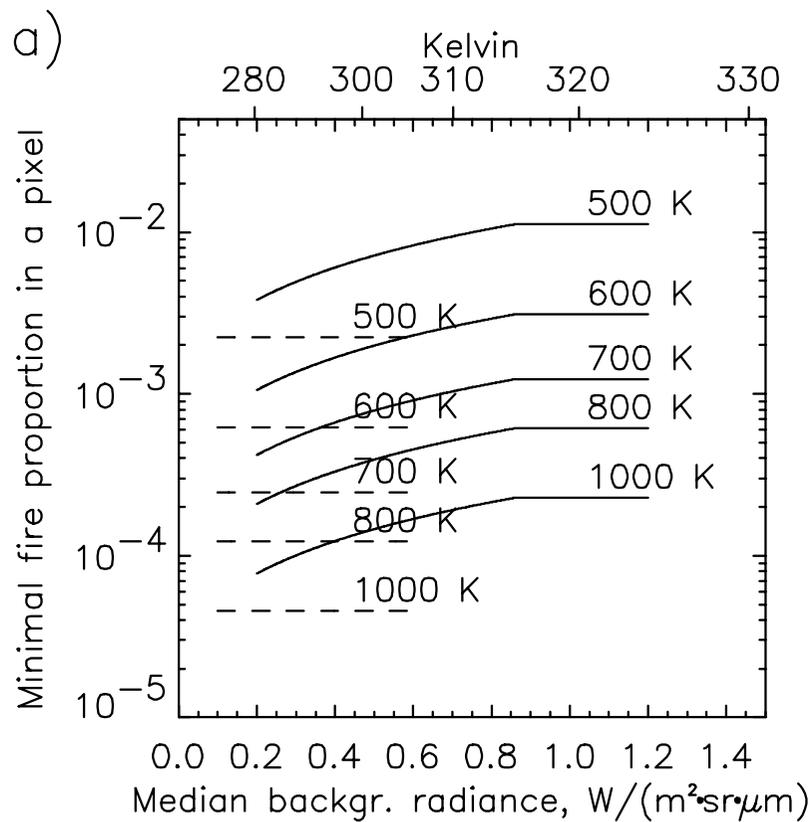
Background window selection strategy:

- local windows of 25 × 25 pixels with at least 25% valid background pixels,
- else combining up to 11 × 11 windows to meet the 25% backgr. percentage condition,
- else using regional windows of 1000 lines with at least 1000 valid background pixels,
- else interpolation between the nearest regional windows containing at least 1000 backgr. pixels,
- else utilisation of the 'worst-case' fixed thresholds.



- | | | |
|---------------------|--------------------|----------|
| — Fire (1500 K) | Sun glint | + Soils |
| - - - Fire (1000 K) | △ Green vegetation | □ Water |
| - · - Fire (600 K) | ▼ Burned grass | ◇ Clouds |

Взаимодействие MIR, MIR/RED и MIR/TIR тестов при детектировании пожаров



————— днём
 - - - - - ночью

Минимальные детектируемые площадь и мощность излучения
 пожара для BIRD (разрешение 370 м)

Оценка эффективной температуры (T_F) и эффективной площади (A_F) пожара

Для «горячих пикселей» (*Dozier, 1981*): $L_j = q_F B_j(T_F) + (1 - q_F)L_{j,bg}$

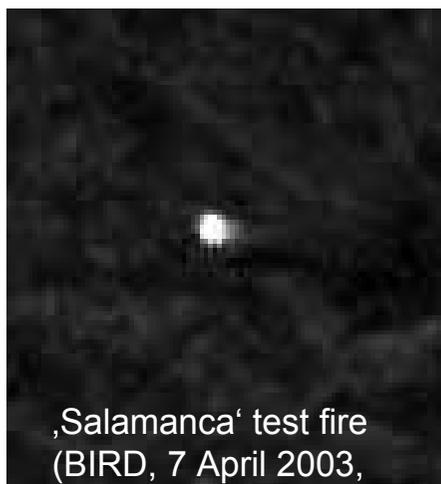
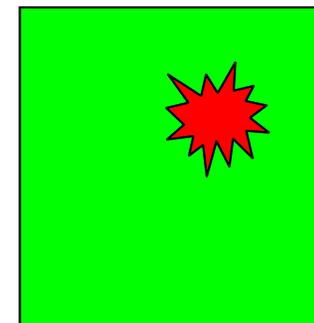
где: L_j и $L_{j,bg}$ – яркость «горячего пиксела» и фона в канале j
($j = \text{MIR, TIR}$),

$B_j(T)$ - яркость черного тела в канале j ,

$q_F = \rho_j(\mathbf{x}_F - \mathbf{x}_p) A_F$ - эффективная пропорция пожара в пикселе (для субпиксельных пожаров)

$\rho_j(\mathbf{x}_F - \mathbf{x}_p)$ - функция рассеяния точки (ФРТ) канала j ,

\mathbf{x}_F и \mathbf{x}_p – координаты центров пожара и пиксела



Для кластеров «горячих пикселей»: $\bar{L}_j = \bar{q}_F B_j(T_F) + (1 - \bar{q}_F)L_{j,bg}$

где: \bar{L}_j - средняя яркость пиксела в кластере,

$\bar{q}_F = A_F / n_{pix}$ - средняя пропорция пожара в кластере (напрямую связана с эффективной площадью пожара) ,

n_{pix} - число пикселей в кластере

Оценка мощности излучения пожара

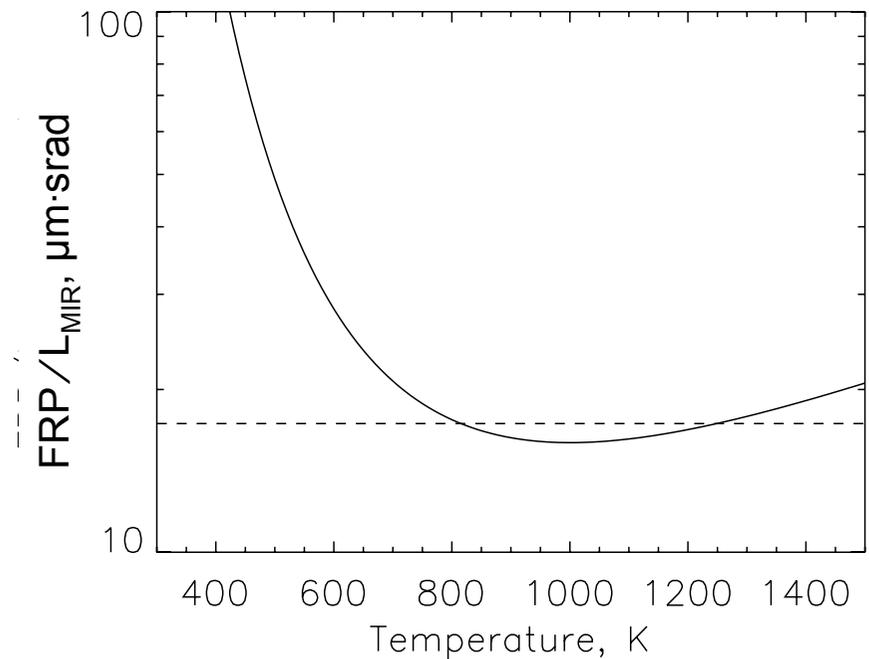
1. На основе эффективной температуры и площади пожара:

$$P_F = \sigma \cdot (T_F^4 - T_{bg}^4) \cdot A_F$$

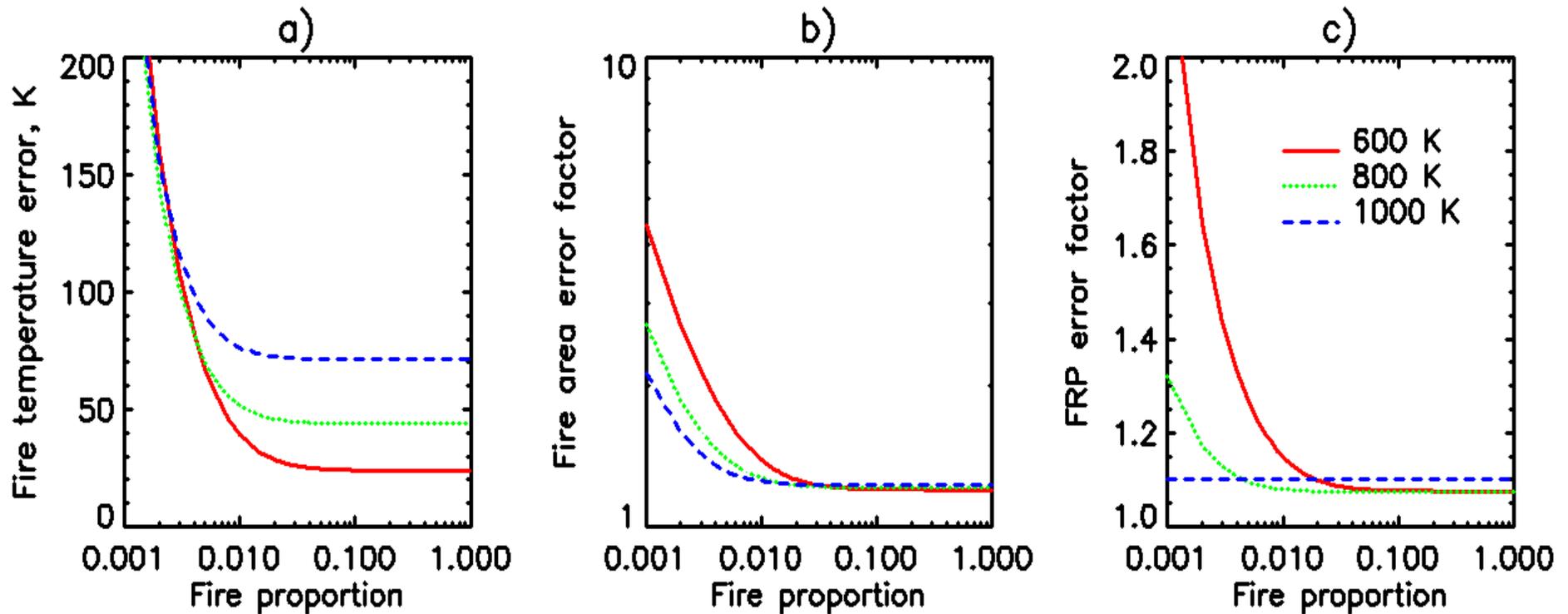
2. На основе соотношения
(*Wooster et al, 2003*):

$$FRP = 17.3 \cdot A_{sample} \cdot (L_{MIR} - L_{MIR,bg}) \quad [W]$$

(применимо при $T_F \geq 700 \text{ K}$)



Ошибки оценки характеристик пожаров



Предположения:

- неоднородность фона = 2 K (MIR, TIR),
- систематическая мультипликативная ошибка = 10% (MIR, TIR),
- систематическая аддитивная ошибка = 5 K (MIR, TIR),
- радиометрический шум = 0.5 K (MIR) and 0.2 K (TIR)

BIRD

Западная
Australia

16 октября 2003

MIR: 3.4-4.2 мкм

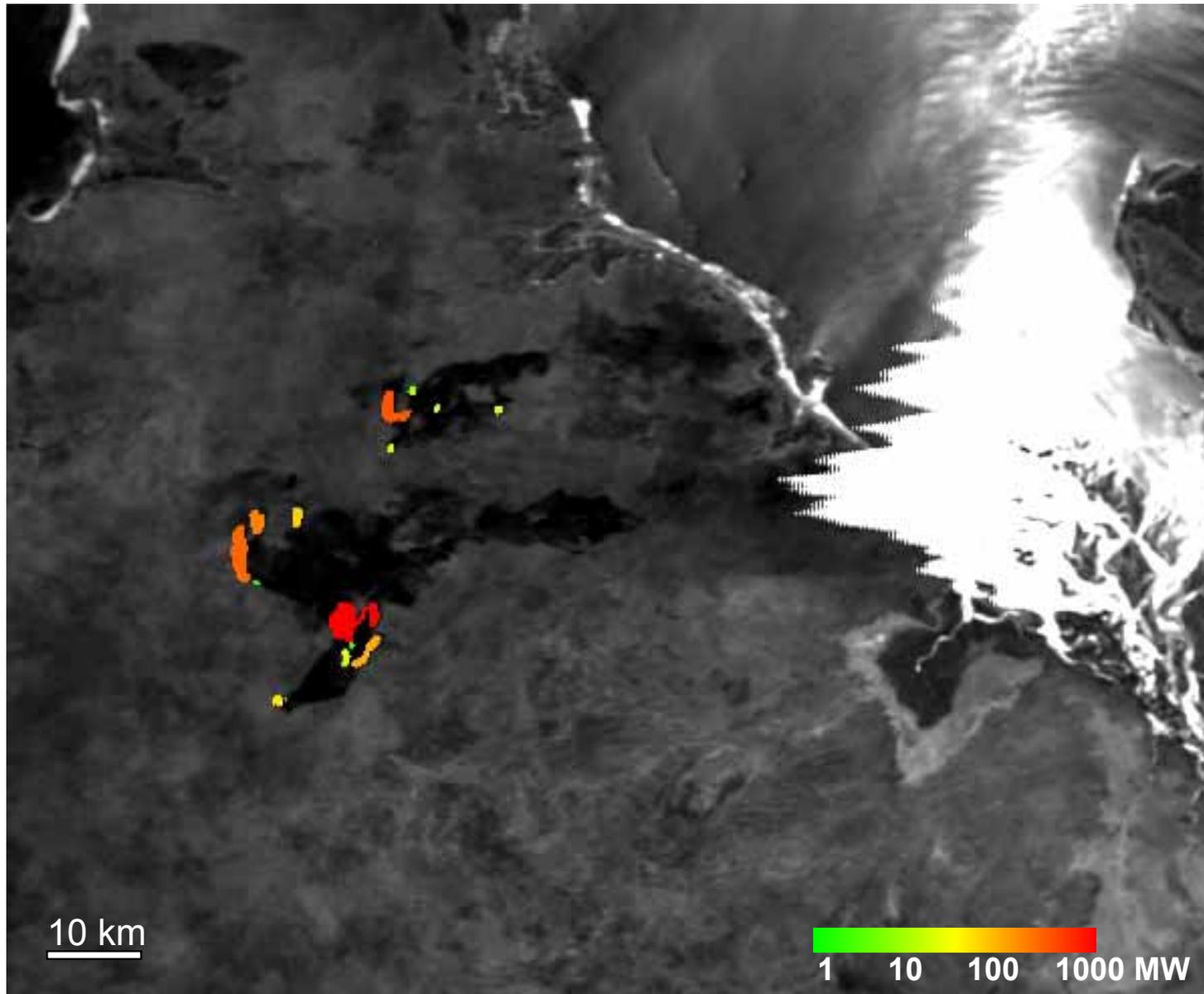
NIR: 0.84-0.90 мкм

TIR: 8.5-9.3 мкм

Эфф. температура
пожара

Эфф. площадь
пожара

Мощность
излучения пожара



BIRD

Португалия
4 августа 2003

MIR: 3.4-4.2 мкм

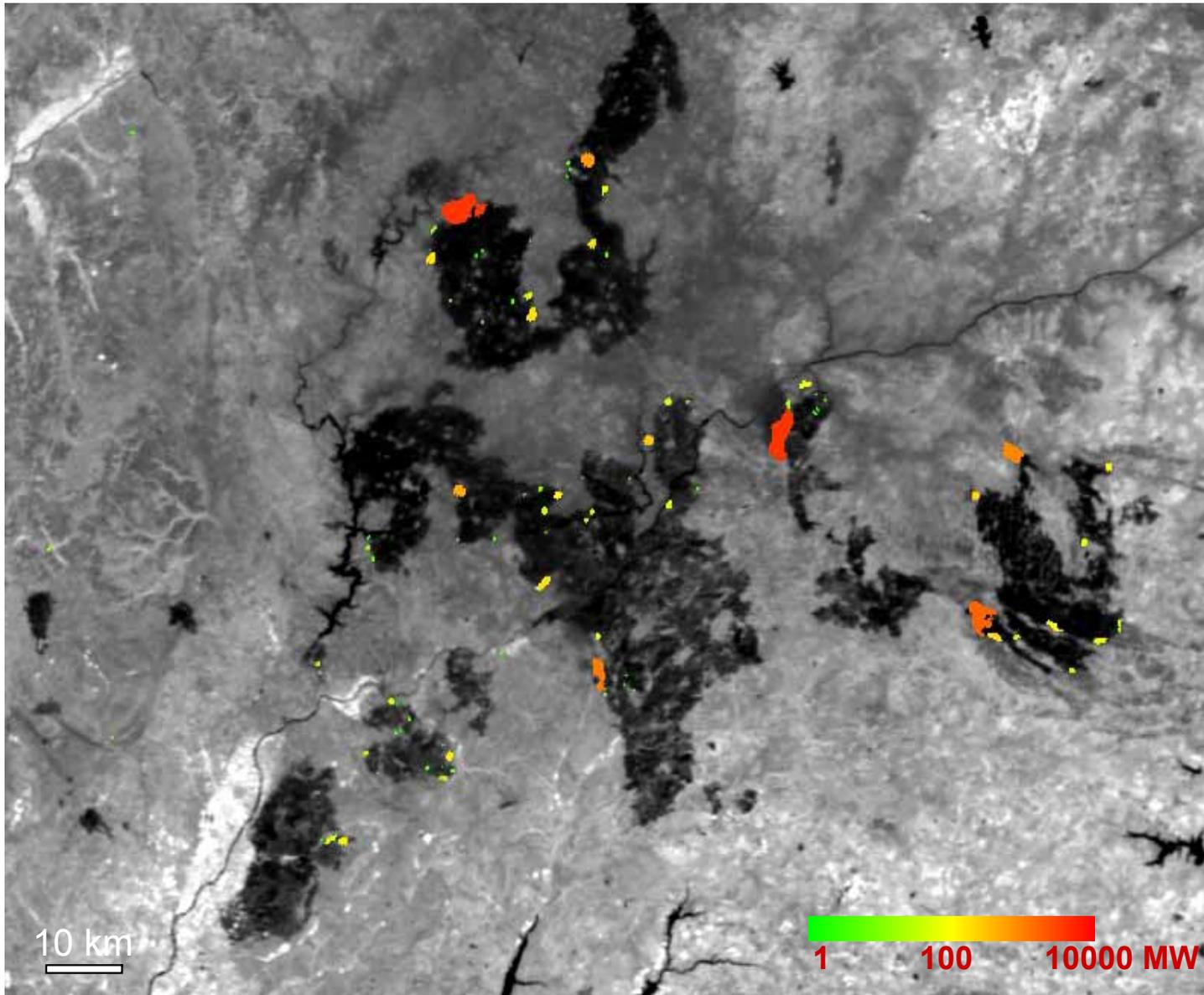
NIR: 0.84-0.90 мкм

TIR: 8.5-9.3 мкм

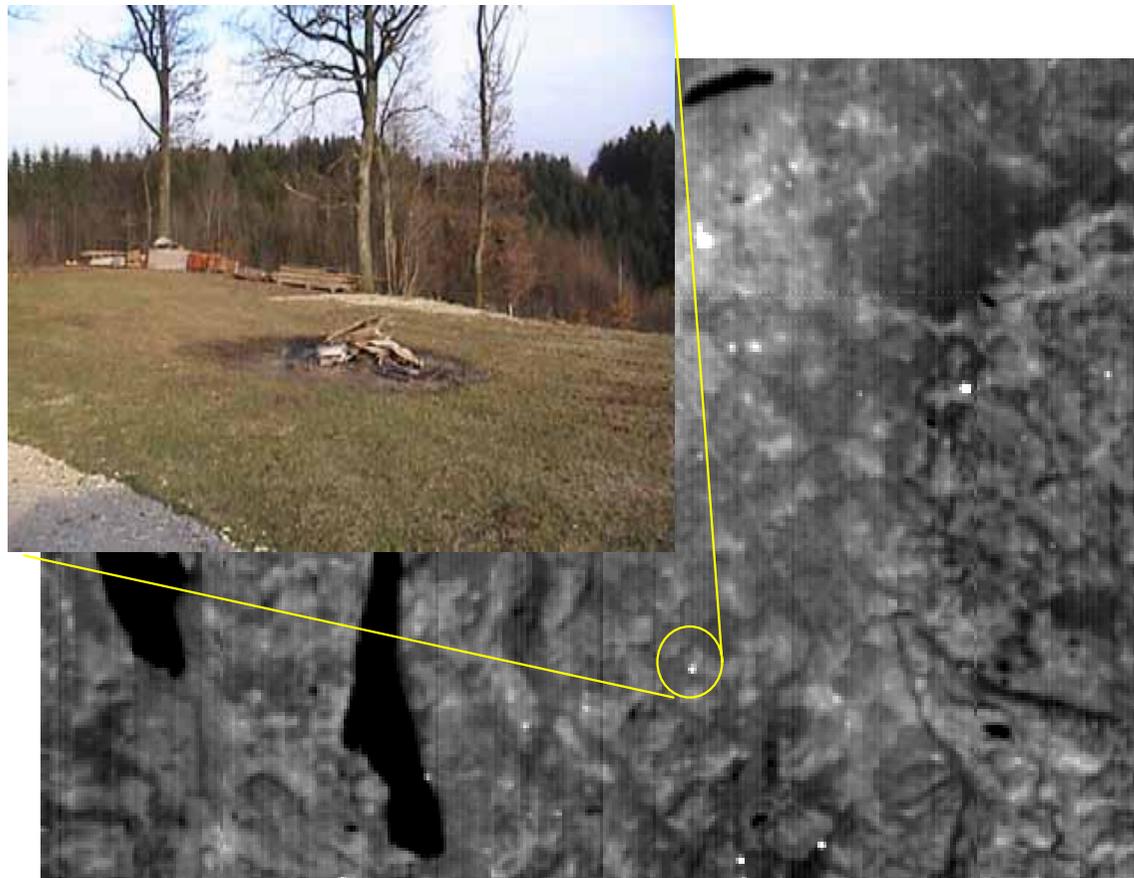
Эфф. температура
пожара

Эфф. площадь
пожара

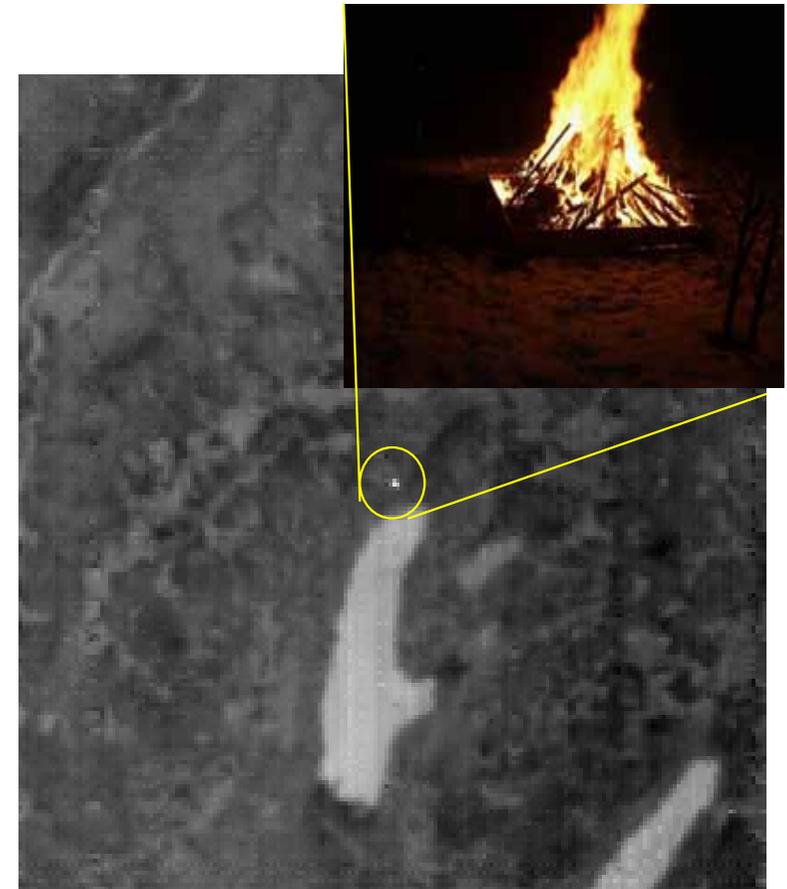
Мощность
излучения пожара



Наземная верификация детектируемости пожаров с помощью BIRD

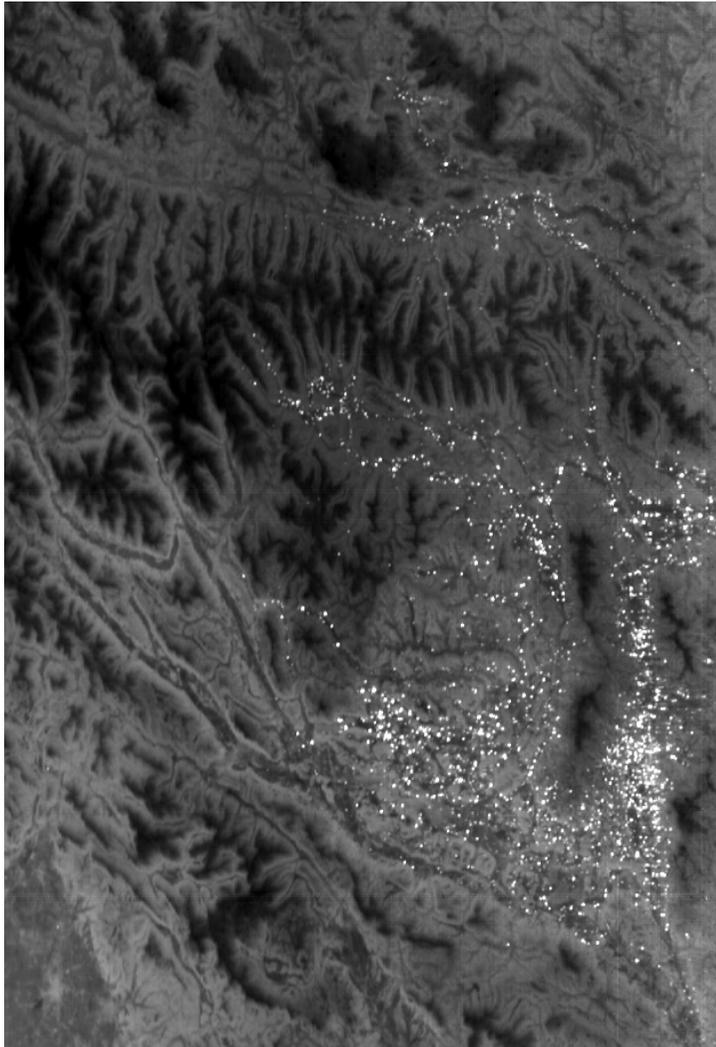


Дневное детектирование :
площадь костра = 12 м²

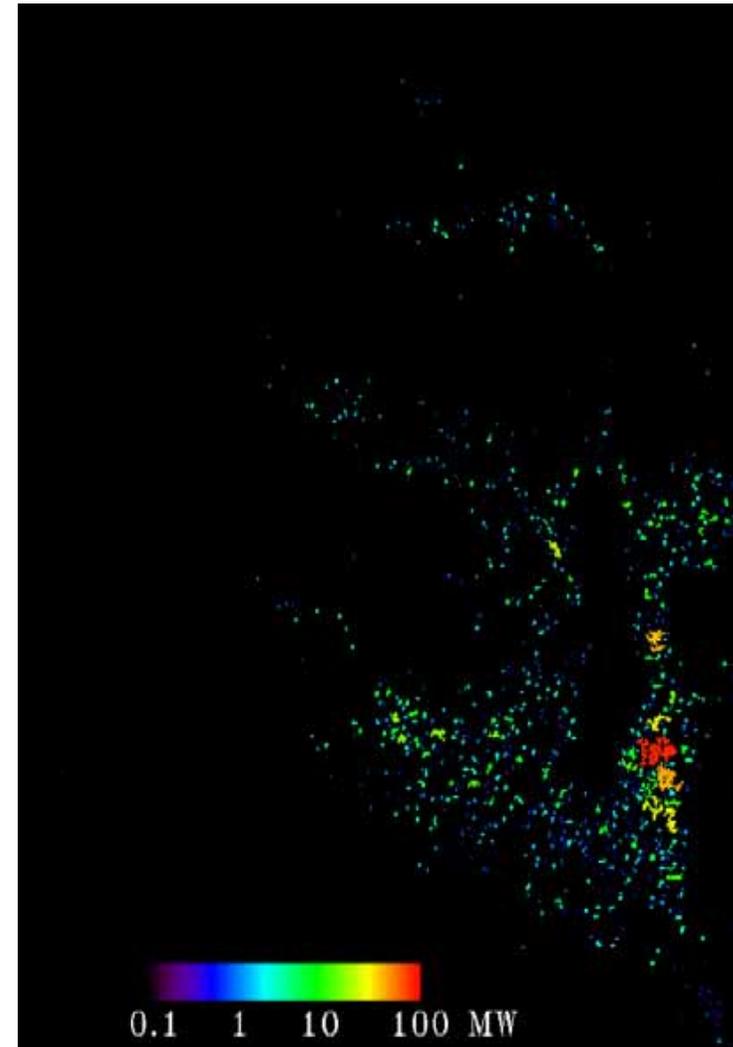


Ночное детектирование :
площадь костра = 4 м²

Пасхальные костры (BIRD, Австрия, 30 марта 2002)

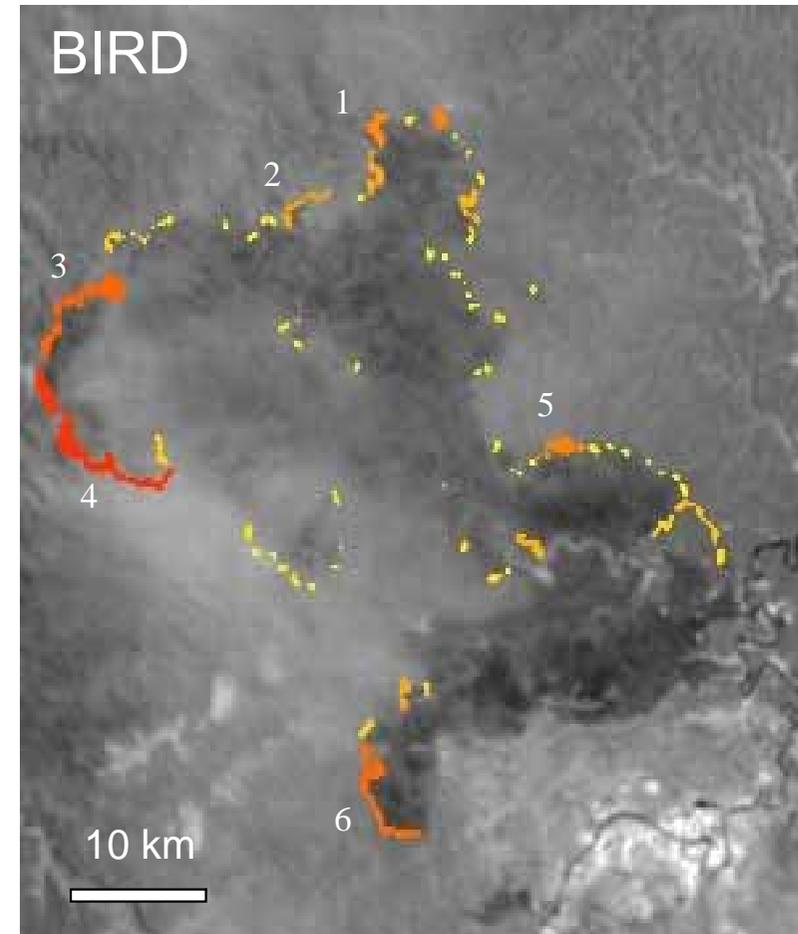
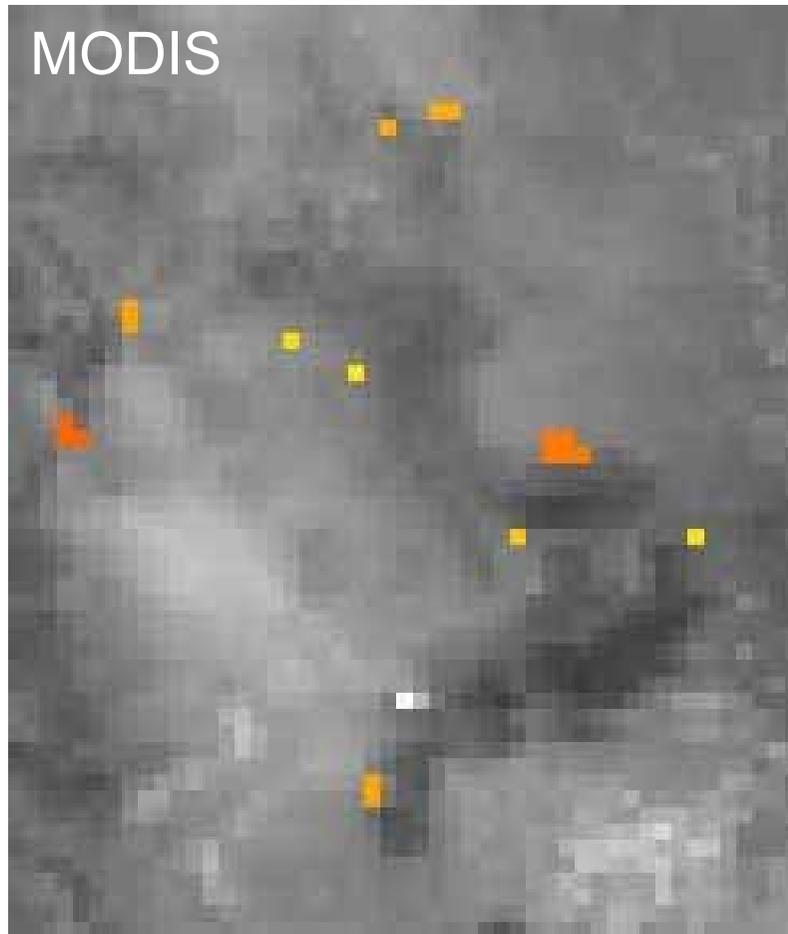


MIR: 3.4-4.2 мкм

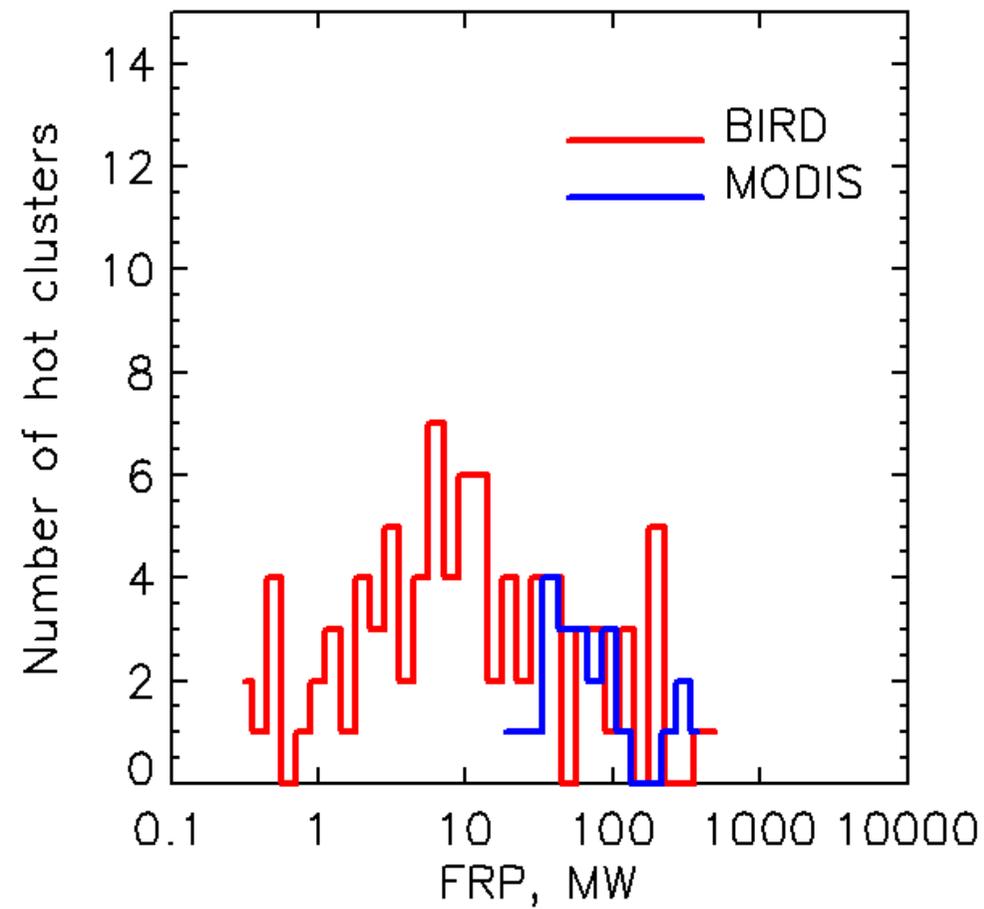
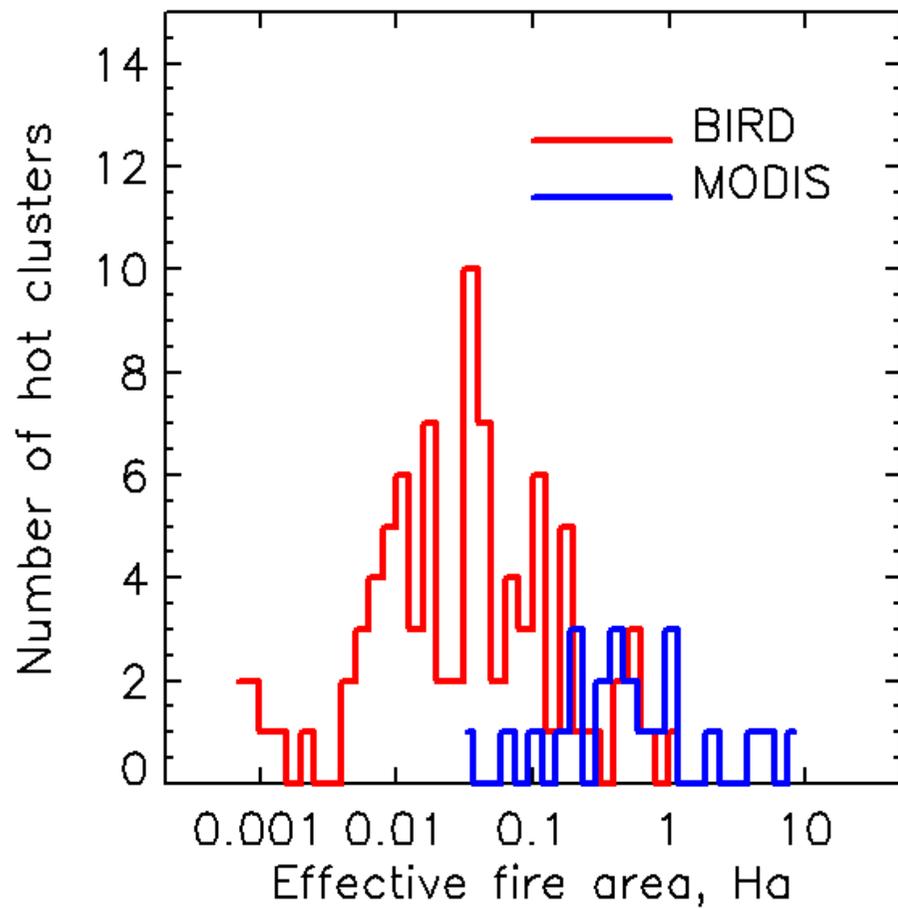


Детектированные костры
и их энергия излучения

Пожары в Австралии по данным MODIS и BIRD (5 января 2002 г.)

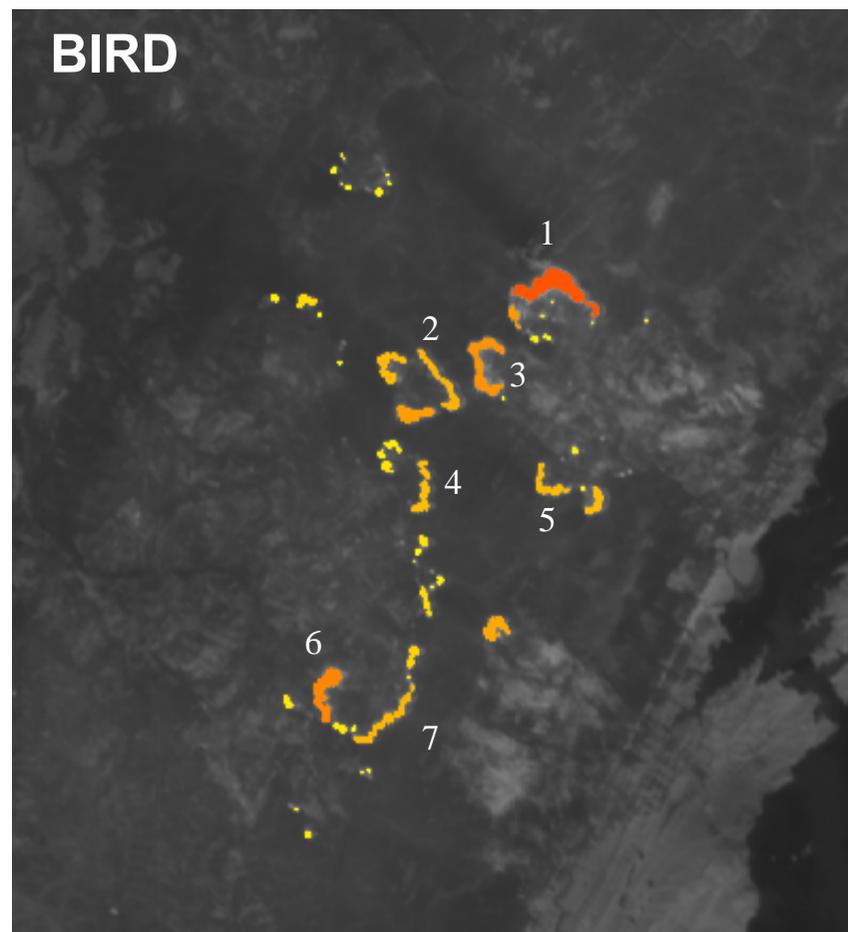
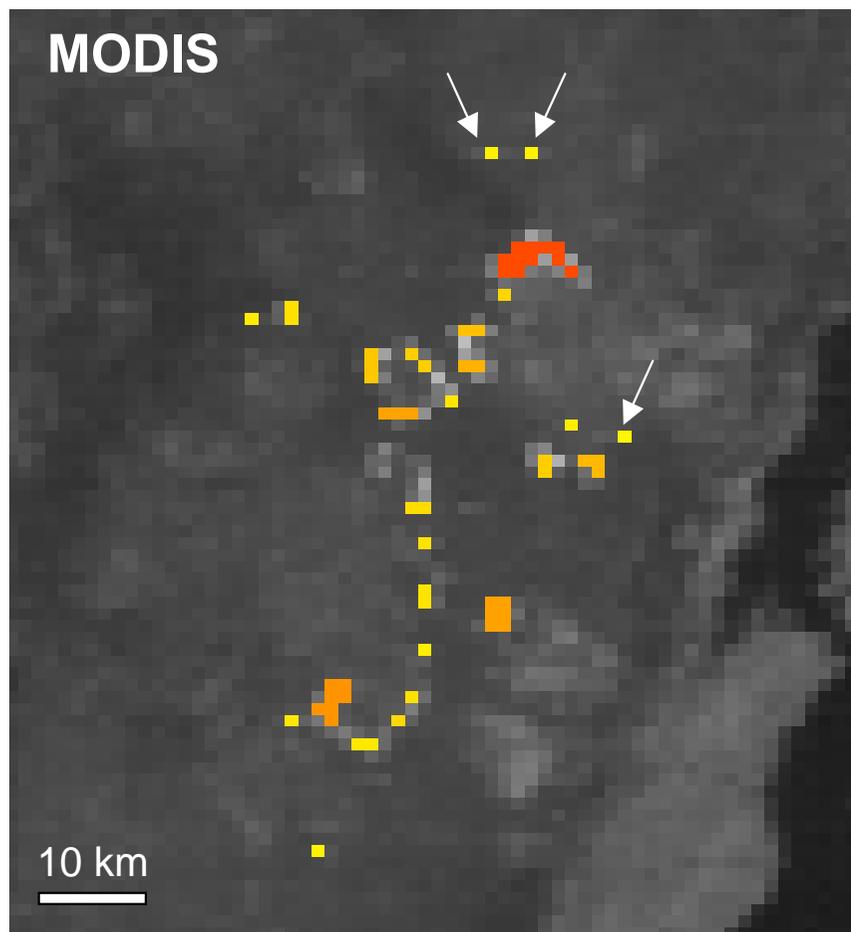


Детектированные пожары в проекции на изображение в канале NIR



Распределение эффективной площади и энергии излучения пожаров в Австралии по данным MODIS и BIRD (5 января 2002 г.)

Пожары в районе Байкала по данным MODIS и BIRD (16 июля 2003 г.)

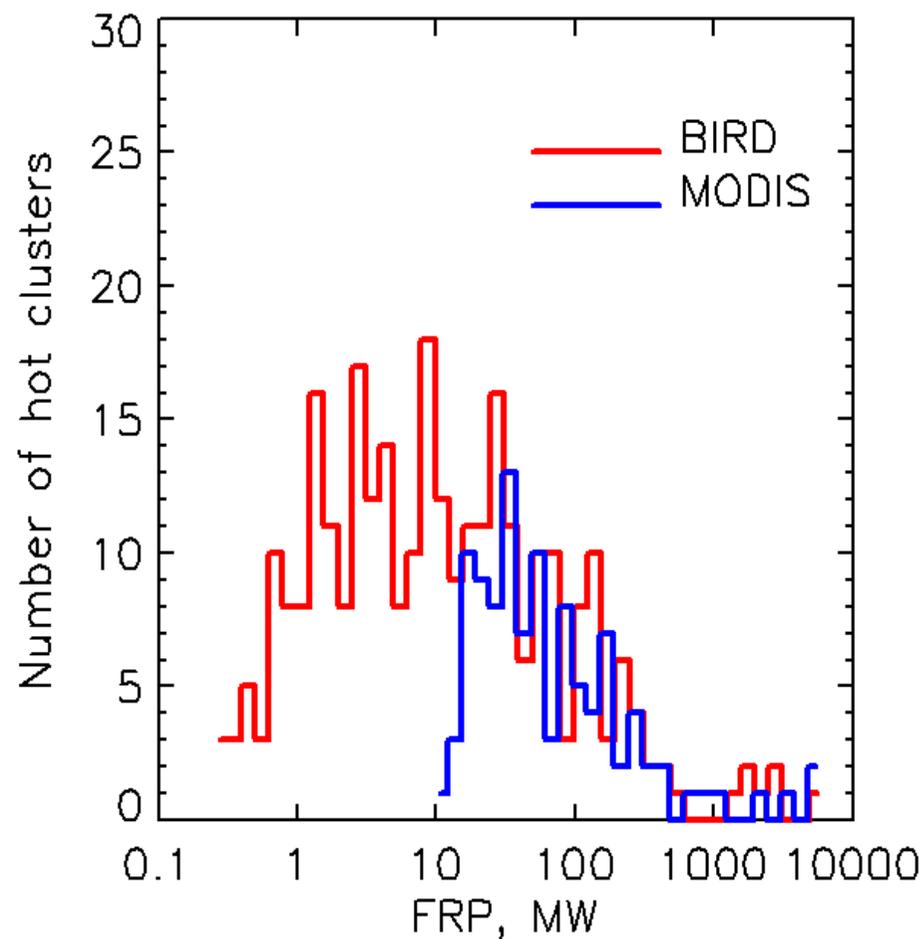
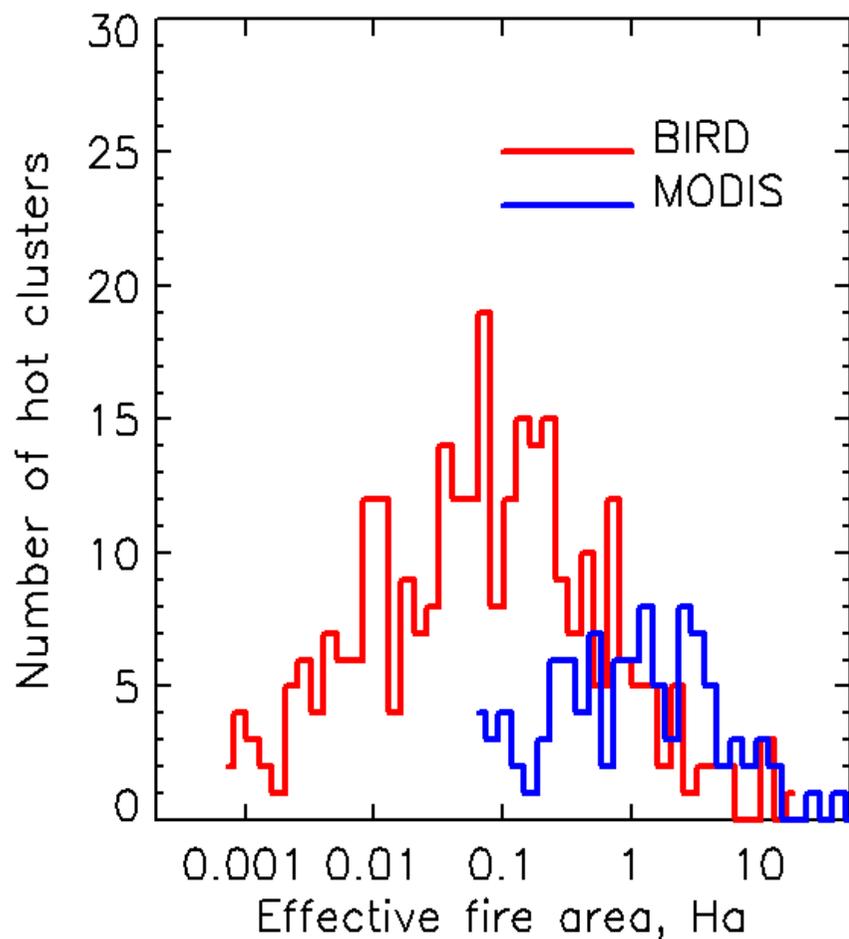


1 100 10000 MW

Детектированные пожары в проекции на изображение в канале MIR

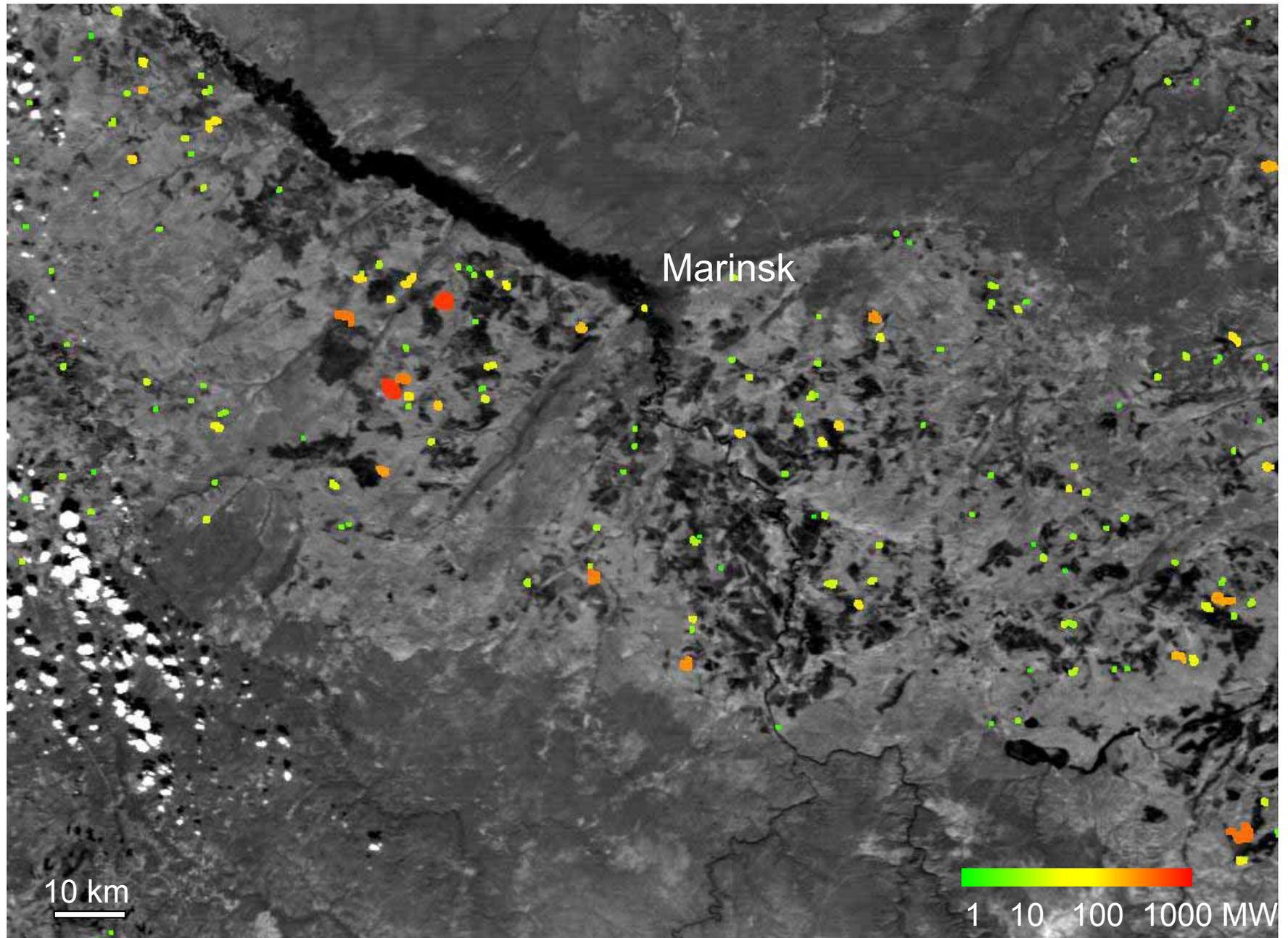
Характеристики пожарных фронтов в районе Байкала по данным BIRD (16 июля 2003 г.)

№	Эфф. температура, К	Пропорция пламенного горения	Эфф. площадь, Га	Мощность излучения, МВт	Длина км	Радиацион. интенсивность, кВт/м	Эфф. глубина м
1	851 (800-920)	0.30 (0.20-0.51)	6.3 (4.4-8.4)	1829 (1771-1829)	8.2	223	7.7
2	711 (668-771)	0.08 (0.05-0.15)	1.1 (0.7-1.5)	150 (136-150)	5.8	26	1.9
3	775 (716-868)	0.16 (0.09-0.34)	2.1 (1.2-3.1)	409 (377-409)	6.5	63	3,2
4	783 (740-839)	0.17 (0.12-0.27)	0.53 (0.38-0.71)	111 (105-111)	4.8	23	1.1
5	850 (771-988)	0.30 (0.15-0.89)	0.43 (0.23-0.70)	126 (121-126)	3.4	37	1.3
6	860 (819-913)	0.32 (0.23-0.48)	1.9 (1.4-2.3)	568 (554-568)	5.0	114	3,8
7	763 (694-882)	0.14 (0.07-0.38)	0.73 (1.21-0.36)	136 (123-136)	6.3	22	1,2

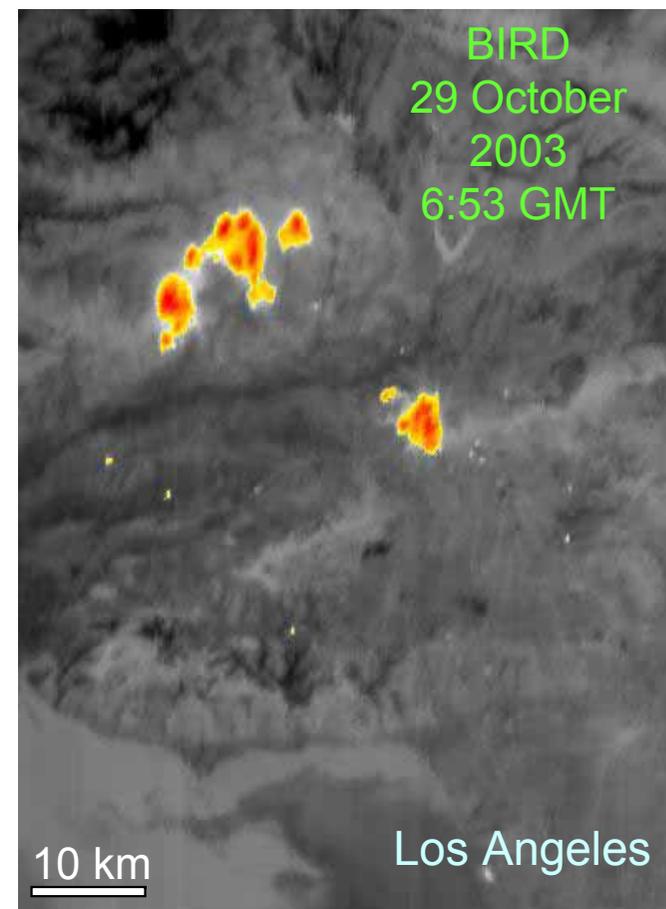
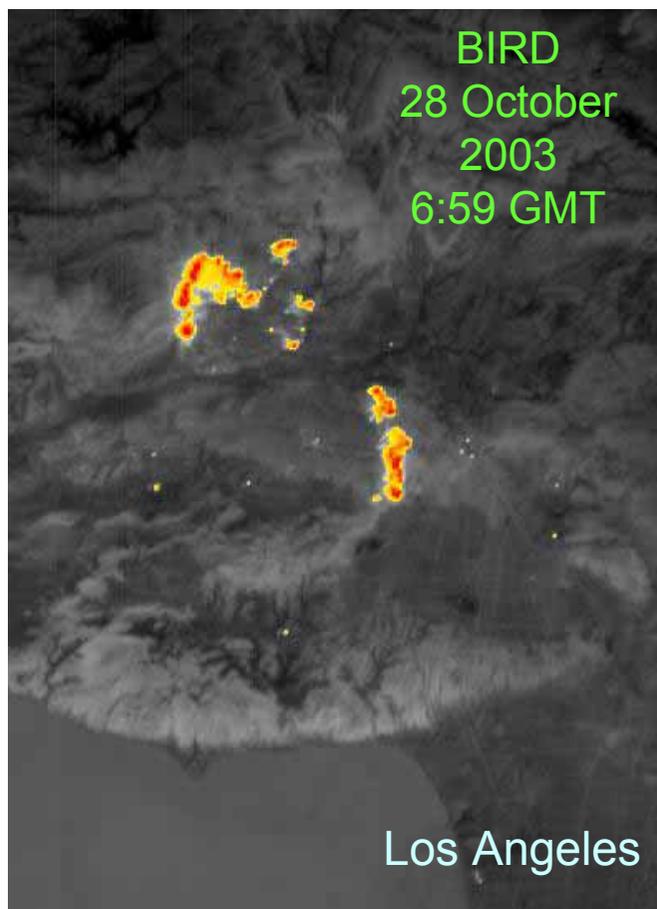
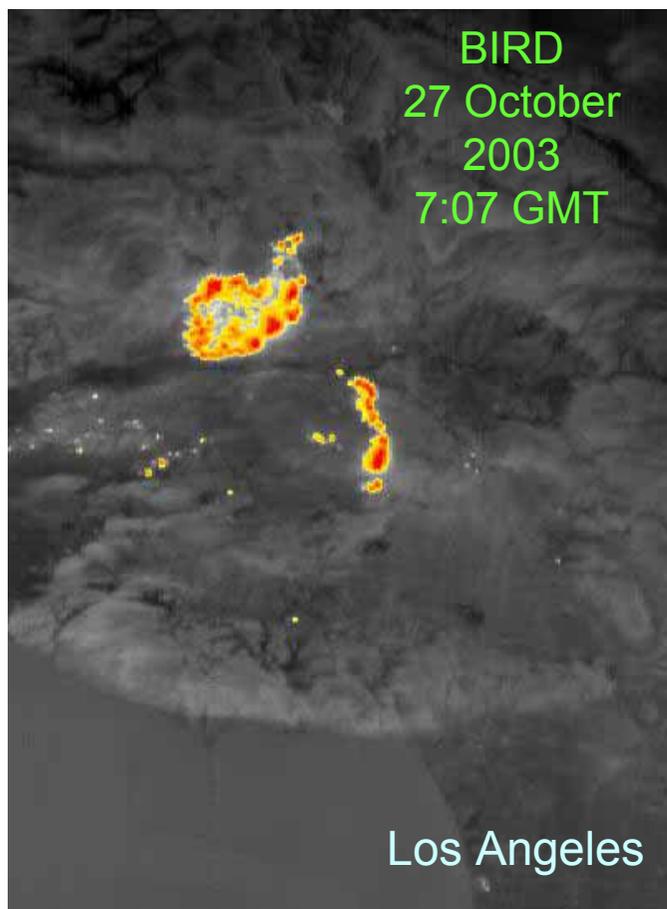


Распределение эффективной площади и энергии излучения пожаров в районе Байкала по данным MODIS и BIRD (16 июля 2003 г)

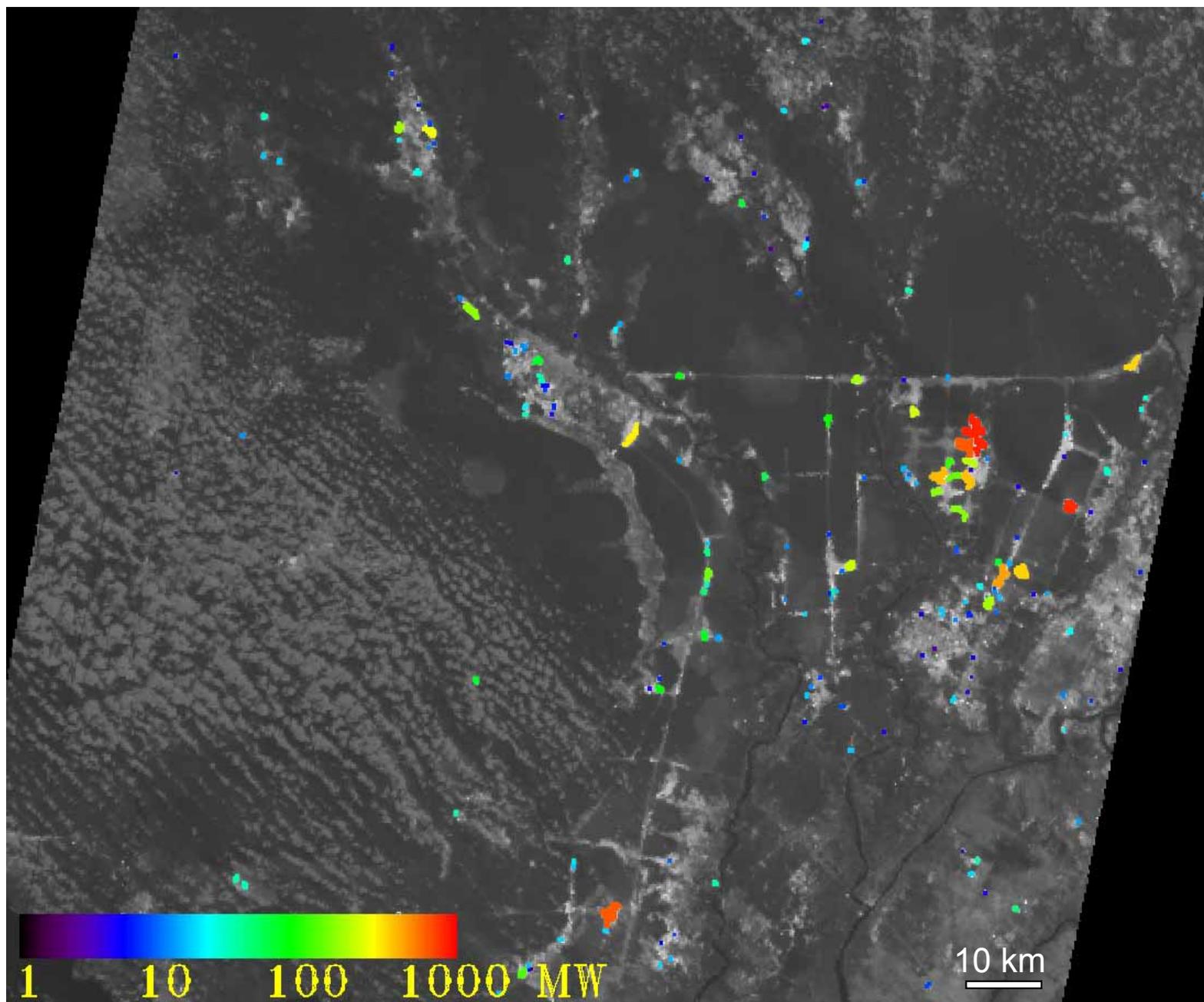
Пожары в Сибири к западу от Байкала (BIRD, 14 мая 2003)



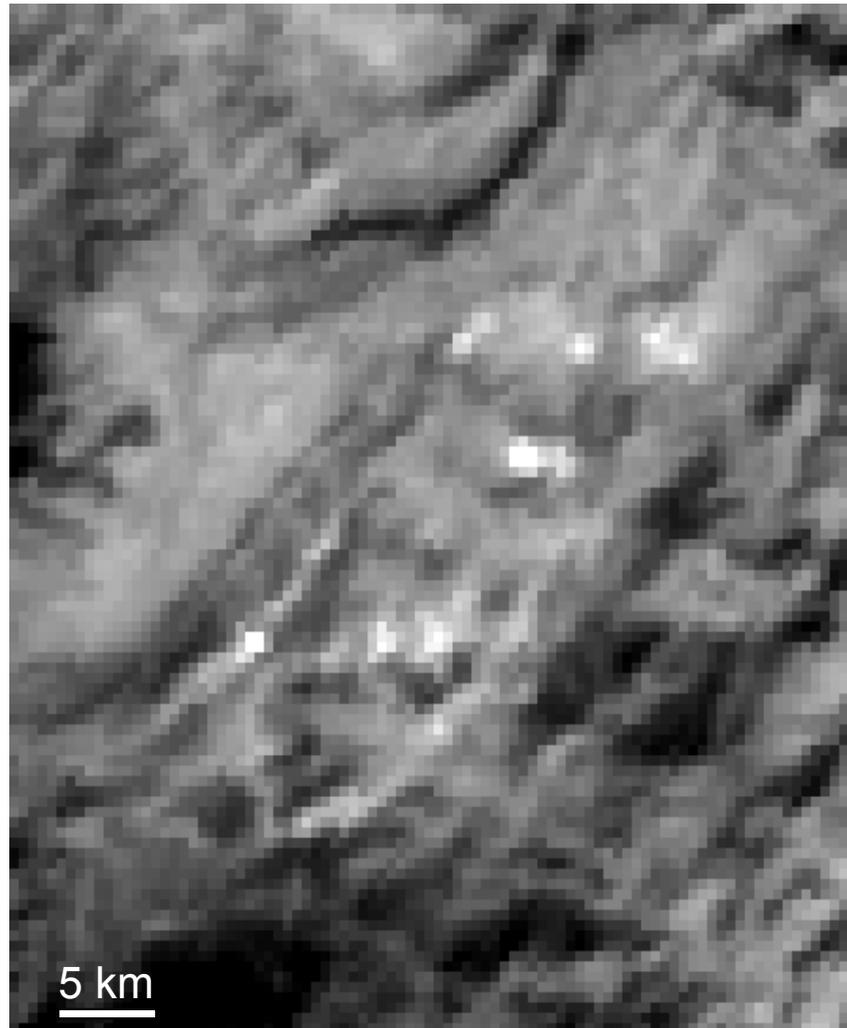
Развитие пожаров в районе Лос-Анжелеса по данным ночных съемок BIRD



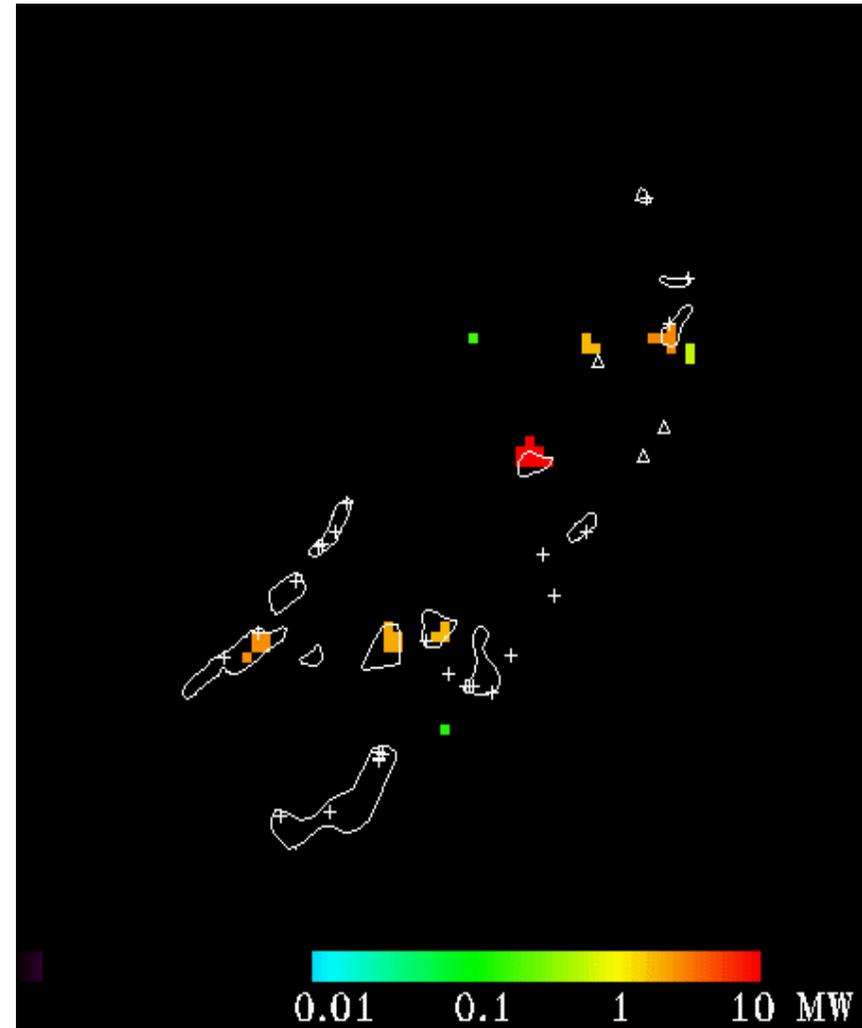
Пожары торфянников на Калимантане (BIRD, 24 августа 2003)



Дневное детектирование пожаров угольных пластов, Нингся, Китай (BIRD, 21 сентября 2002)

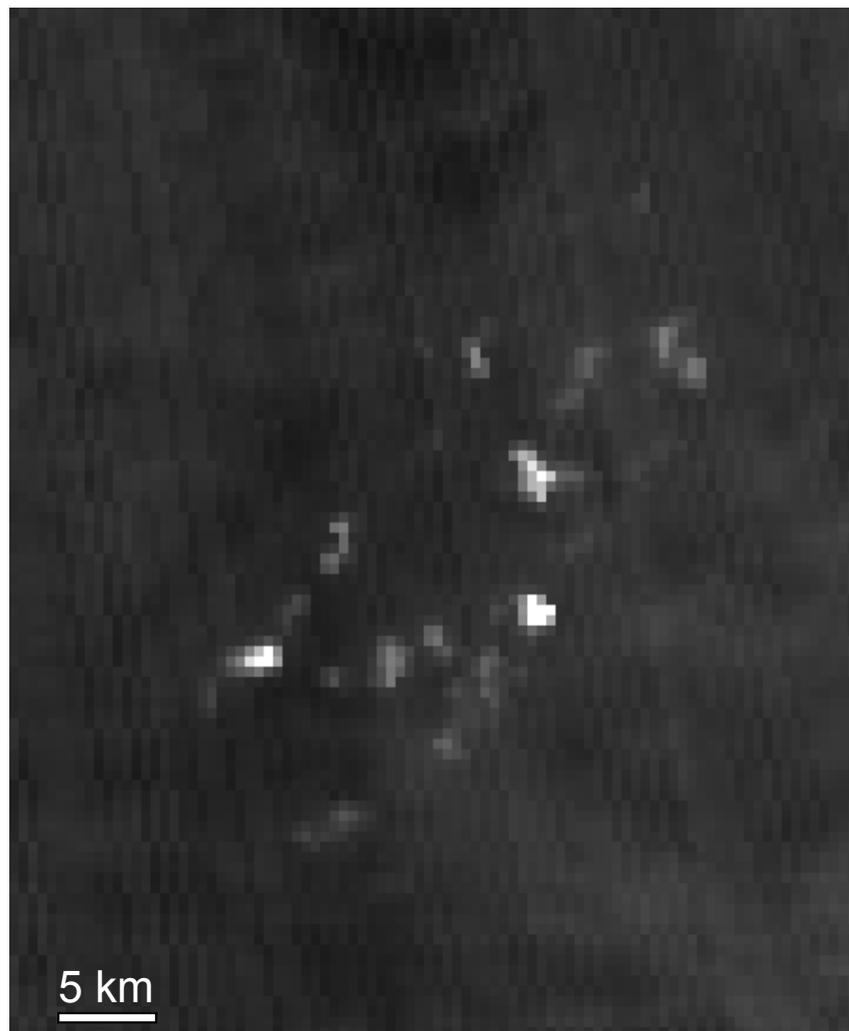


MIR: 3.4-4.2 мкм

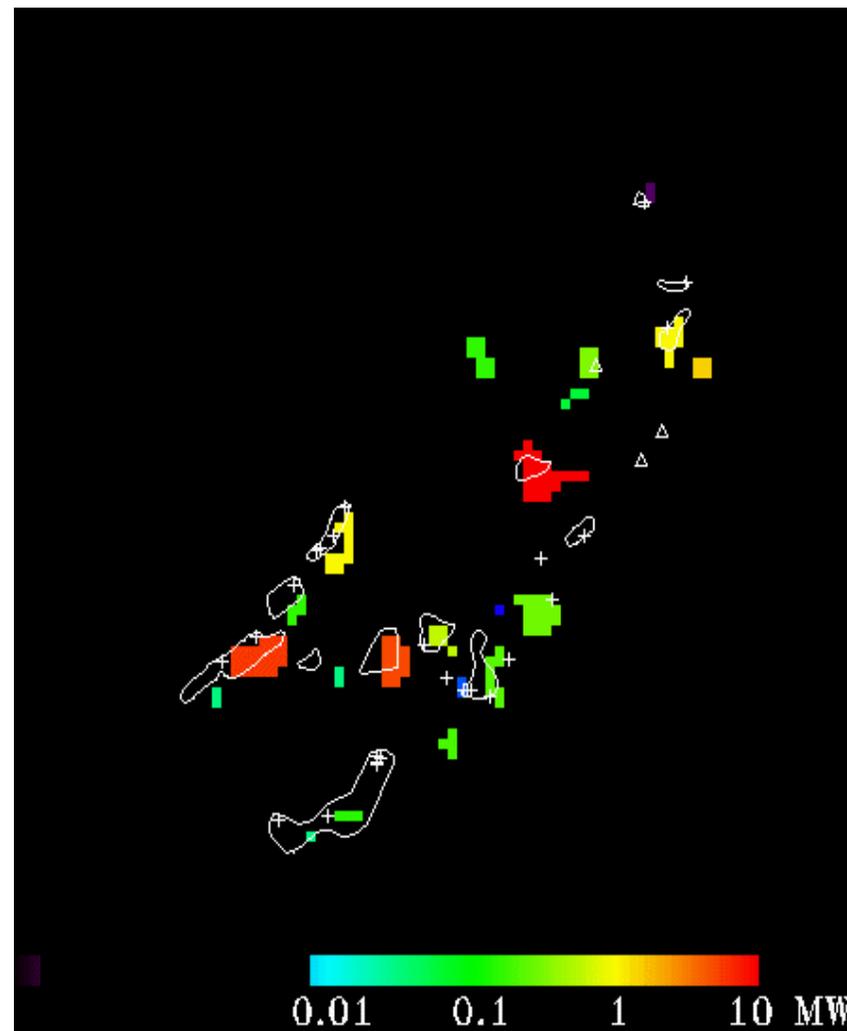


Детектированные пожары и данные наземных обследований: пожары (крестики) и котельные (треугольники)

Ночное детектирование пожаров угольных пластов, Нингся, Китай (BIRD, 21 сентября 2002)

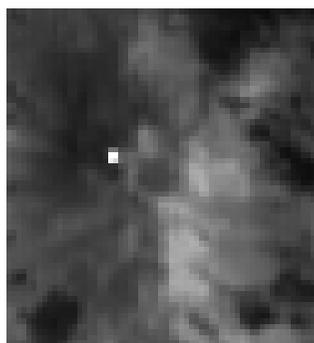


MIR: 3.4-4.2 мкм



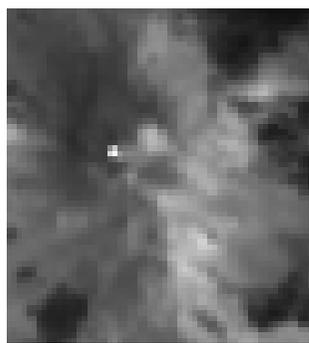
Детектированные пожары и данные наземных обследований: пожары (крестики) и котельные (треугольники)

Наблюдения в. Этна, Сицилия (BIRD, 18-20 июля 2002, канал MIR)



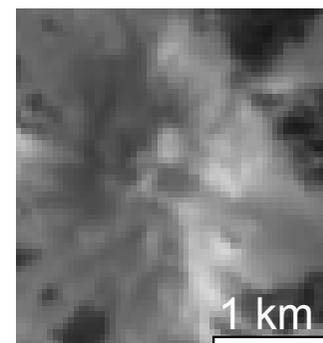
$T > 449 \text{ K}$
 $A < 0.87 \text{ Ha}$
 $E = 10 \text{ MW}$

18 июля
2002



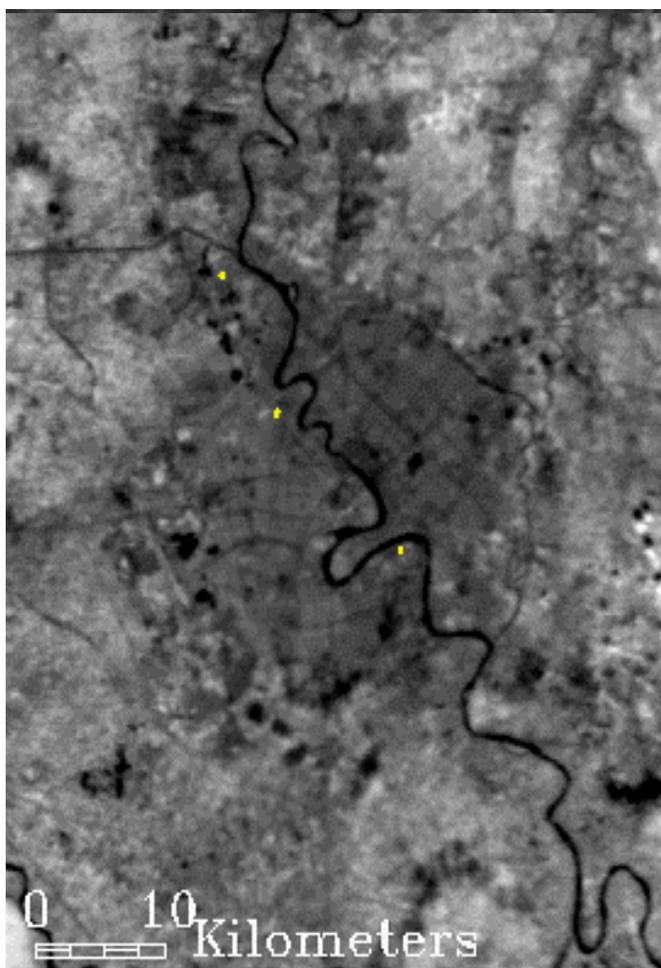
$T > 406 \text{ K}$
 $A < 1.4 \text{ Ha}$
 $E = 8.5 \text{ MW}$

19 июля
2002

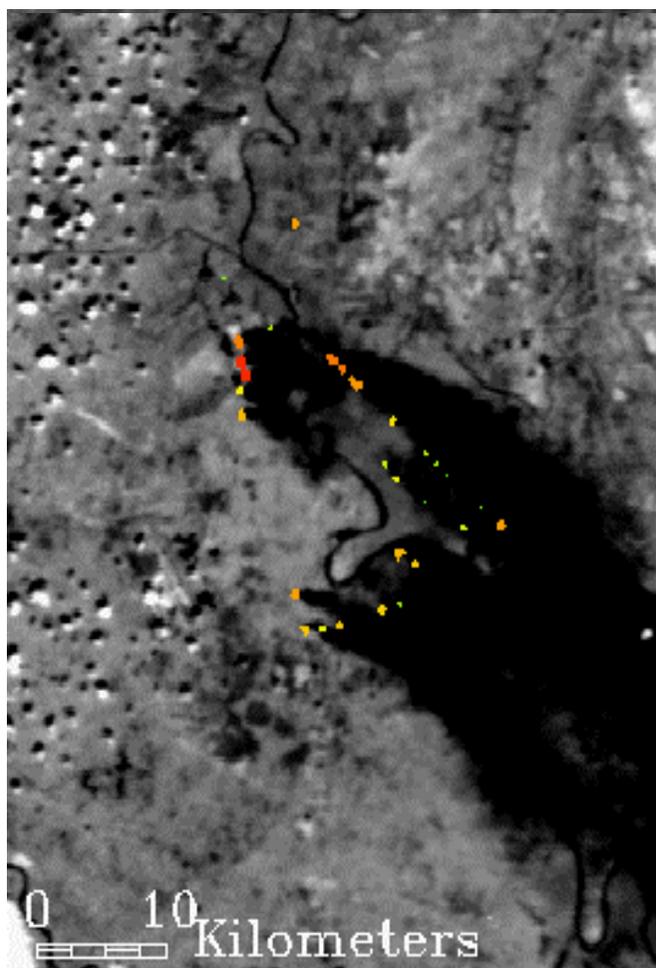


20 июля
2002

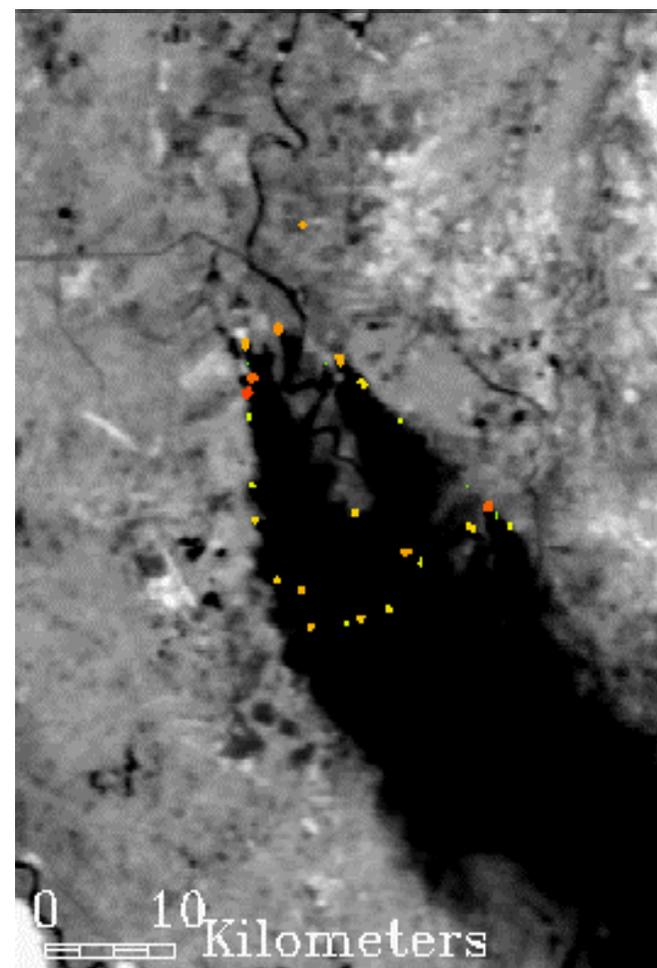
Пожары в Багдаде (BIRD, Март 2003)



13 марта 2003, 8:24 GMT



27 марта 2003, 8:29 GMT



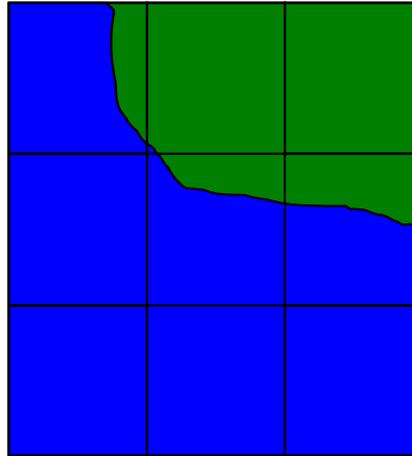
28 марта 2003, 8:23 GMT

Детектированные пожары в проекции на изображение в канале NIR (0.84-0.9 мкм)



Спасибо за внимание!

Threshold filtration

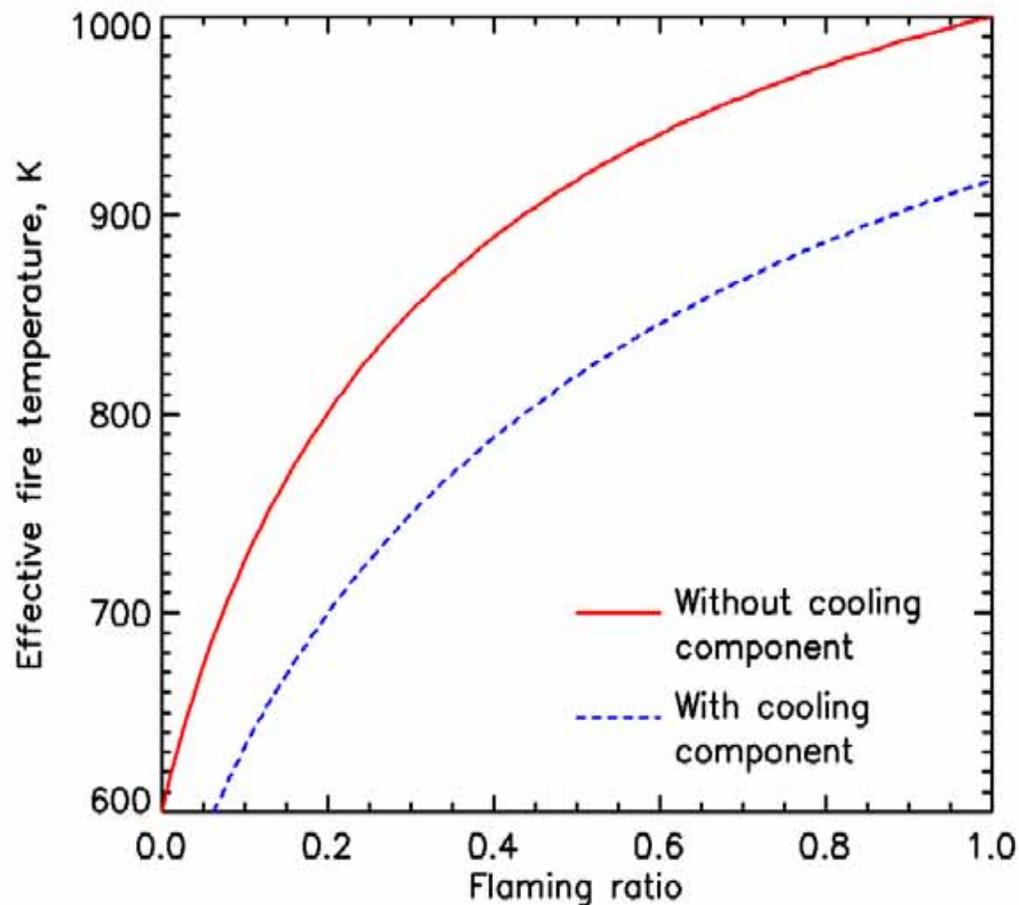


Threshold filtration is used to avoid false alarms in transition zones:

the thresholds in each windows are substituted by the maximal thresholds in the 3 x 3 group of windows centered at the current window

Relation between the effective fire temperature and the flaming proportion

$$\text{Flaming ratio} = \frac{\text{Area of flaming component}}{\text{Area of flaming component} + \text{Area of smouldering}}$$



The flaming ratio:

- affects the amount of gaseous and aerosol emissions by fire,
- is an essential parameter for imaging & spectrometric fire data

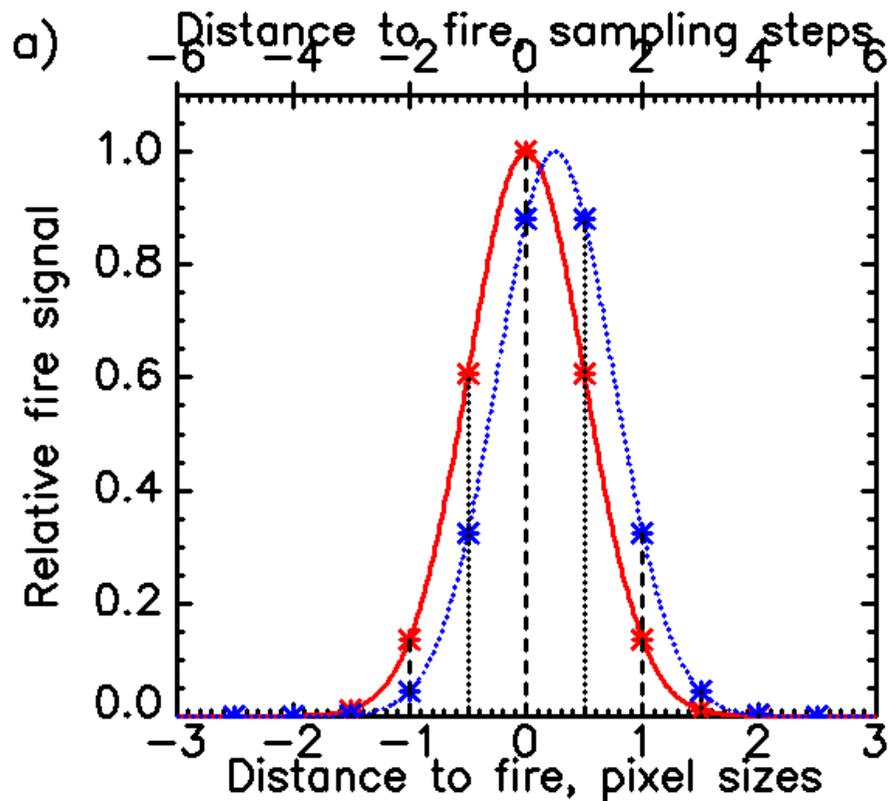
fusion

Assumed component temperatures:

- flaming component – 1000 K,
- smouldering component – 600 K,

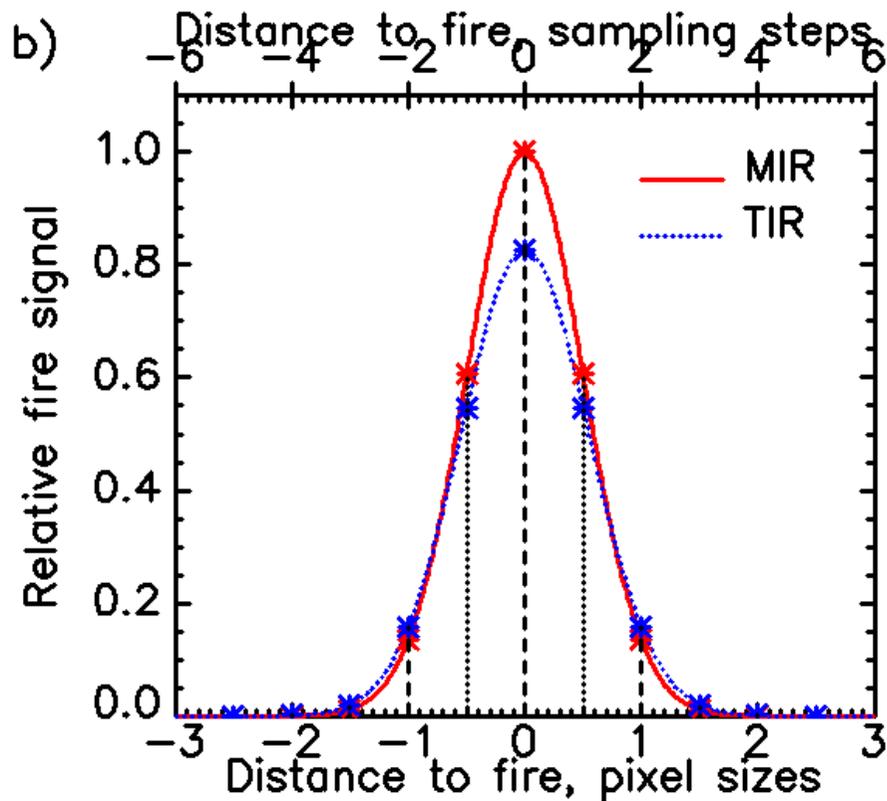
– additional cooling component (90% of the fire area) – 350 K

The "cooling component" is burned out, but still warm parts of a fire place located among the flaming and smouldering patches



Кластер «горячих пикселей»

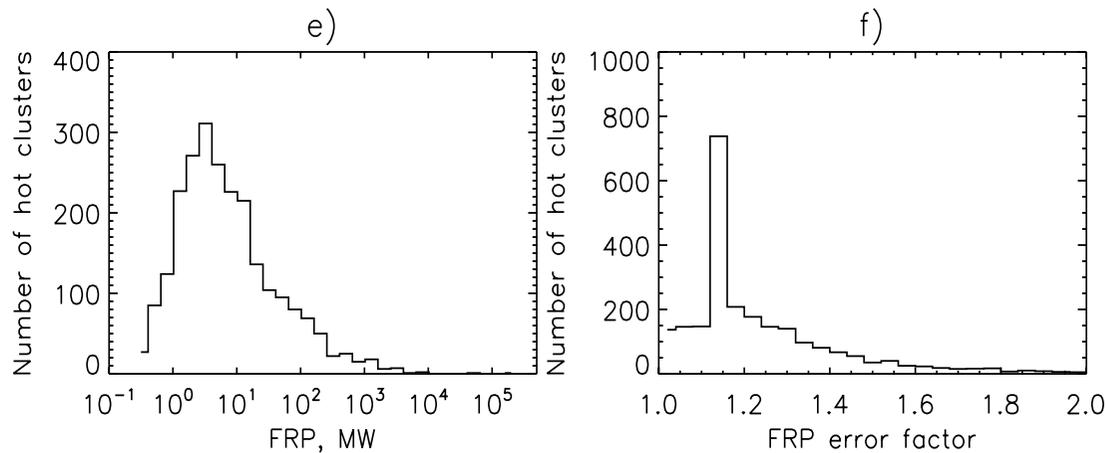
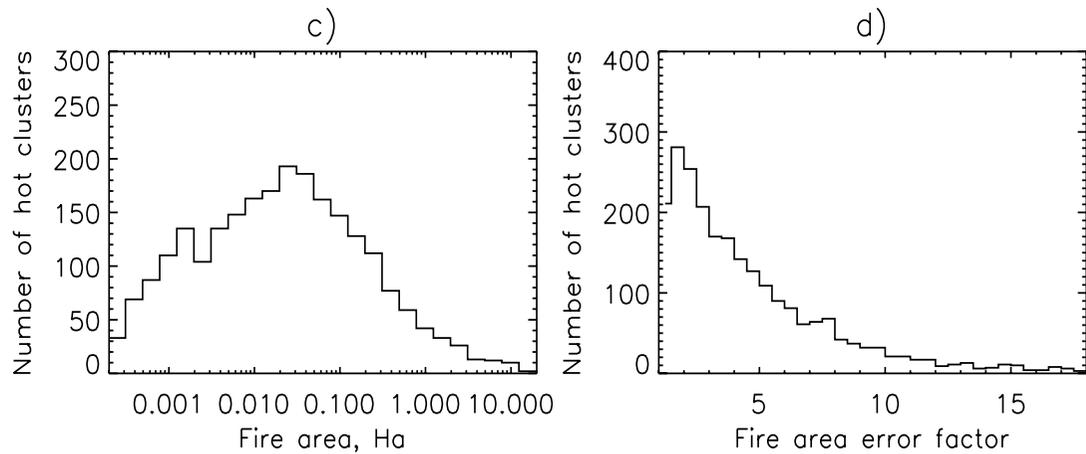
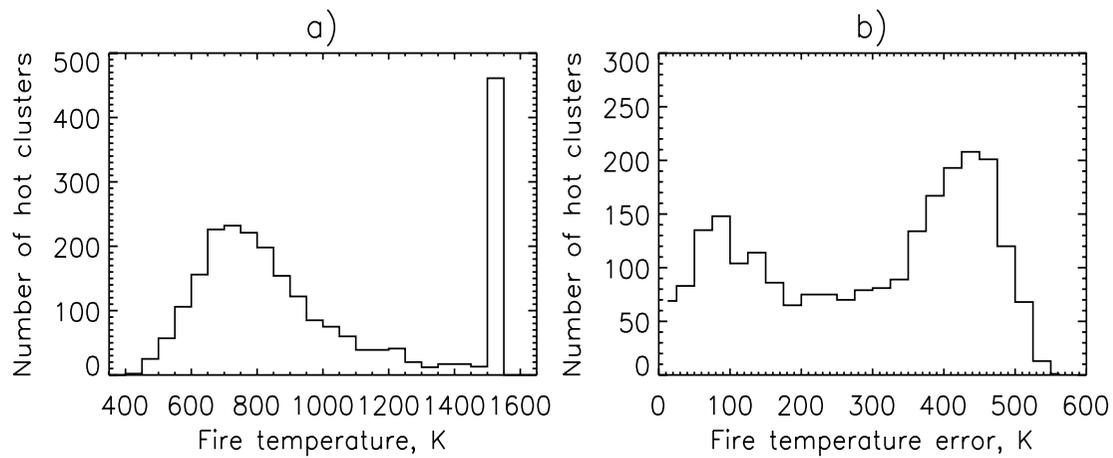
*Влияние ошибки совмещения каналов
MIR и TIR в 0.2 размера пиксела*



Кластер «горячих пикселей»

*Влияние различия ширины ФРТ
каналов MIR и TIR в 10%*

Применение биспектрального метода к кластерам «горячих» пикселей» позволяет исключить влияние ошибок совмещения каналов и различия их ФРТ



Histograms of the retrieved hot cluster characteristics from BIRD daytime fire scenes in Australia, Benin, Borneo, Brazil, Canada-US, Portugal, and Siberia