

**Физические основы и
результаты применения RT-
метода в задачах
инфракрасного зондирования
подстилающей поверхности из
космоса**

Институт оптики атмосферы СО РАН, Томск

Белов В.В., Афонин С.В., Соломатов Д.В.

ПРАКТИЧЕСКИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ:

- ▶ Климатология, метеорология;**
- ▶ Океанология, рыболовство;**
- ▶ Лесное и сельское хозяйство;**
- ▶ Геология, геофизика;**
- ▶ Оперативное обнаружение чрезвычайных ситуаций, прогноз пожарной опасности**

2

Требования к точности $\approx 0.5-1.5$ К

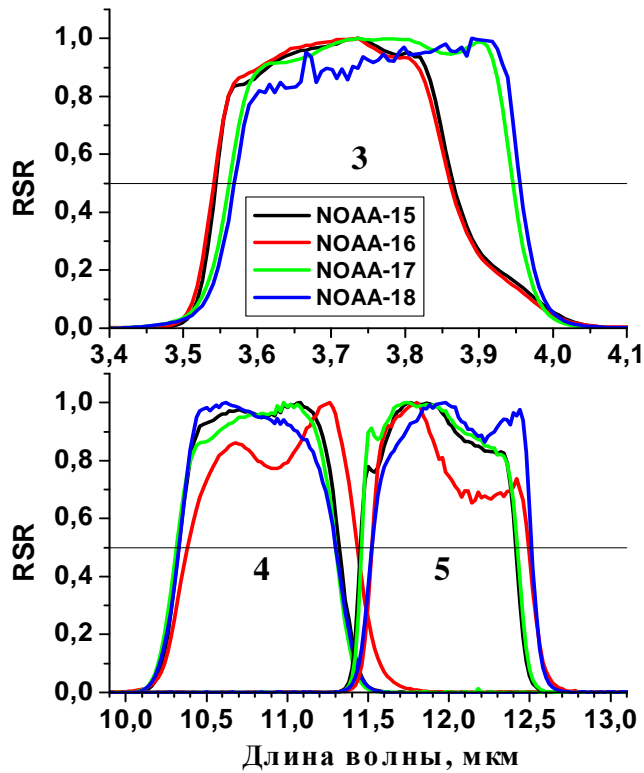
Основные тезисы работы

- 1. Существуют простые статистические методы температурного зондирования земной поверхности из космоса, эффективно работающие в стандартных ситуациях.**

2. мониторинг земной поверхности и в сложных оптико-метеорологических условиях спутниковых наблюдений (аэрозоль, полупрозрачная и перистая облачность) позволяет осуществлять RTM- подход

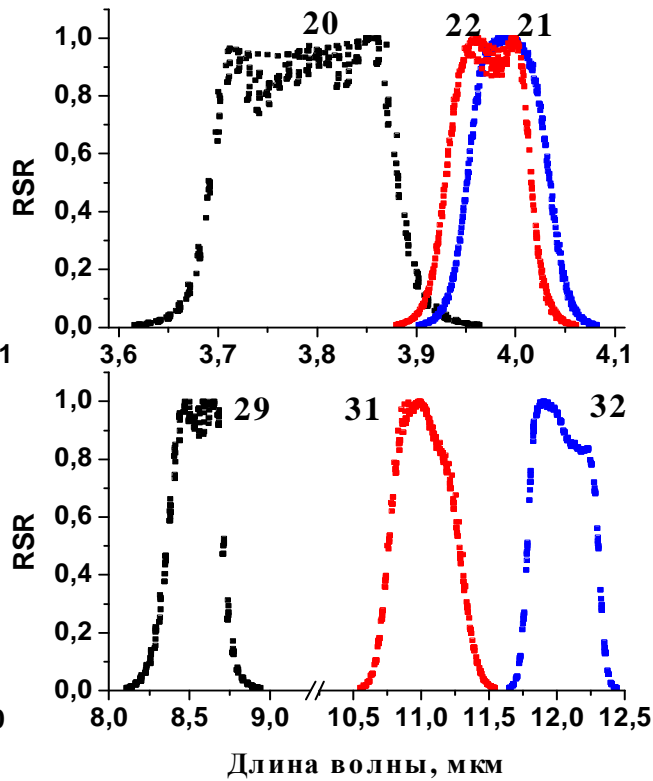
СПУТНИКОВЫЕ ИК-КАНАЛЫ ИЗМЕРЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

AVHRR (NOAA POES)



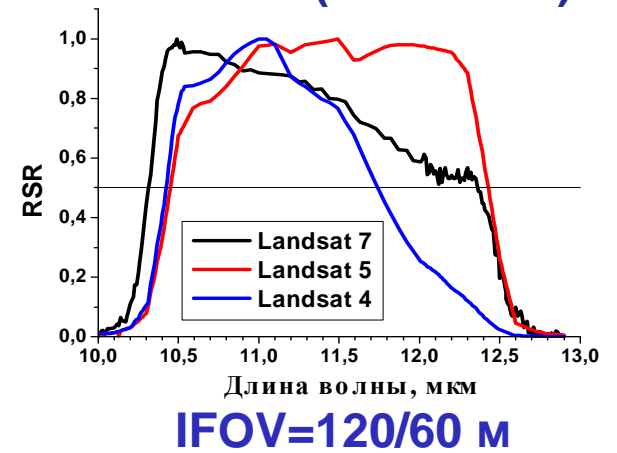
IFOV=1100 м

MODIS (EOS)

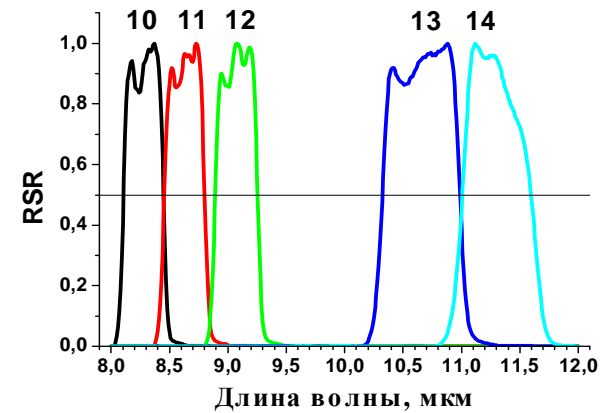


IFOV=1000 м

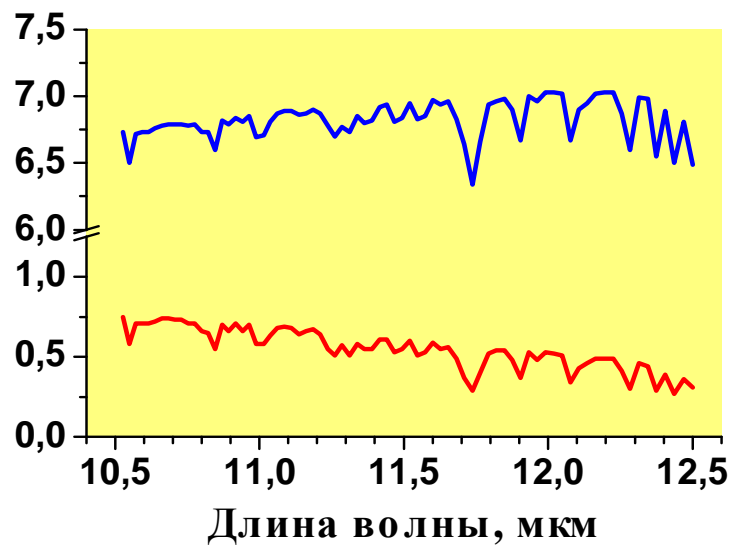
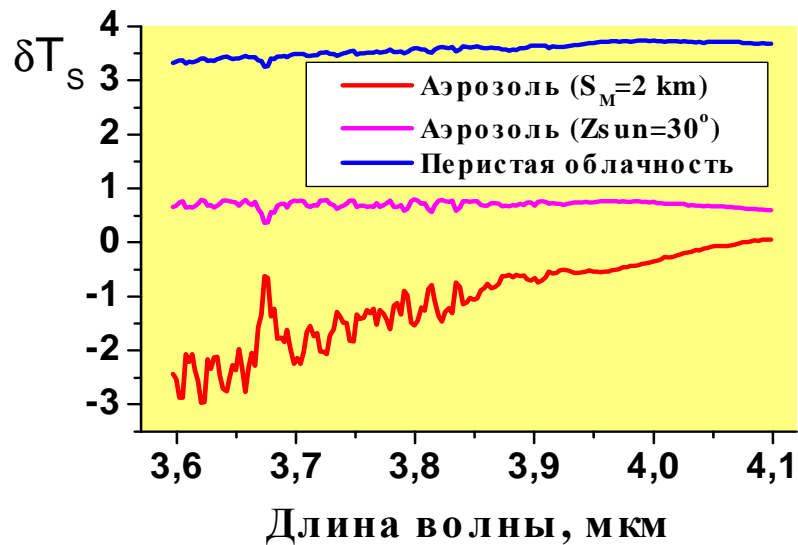
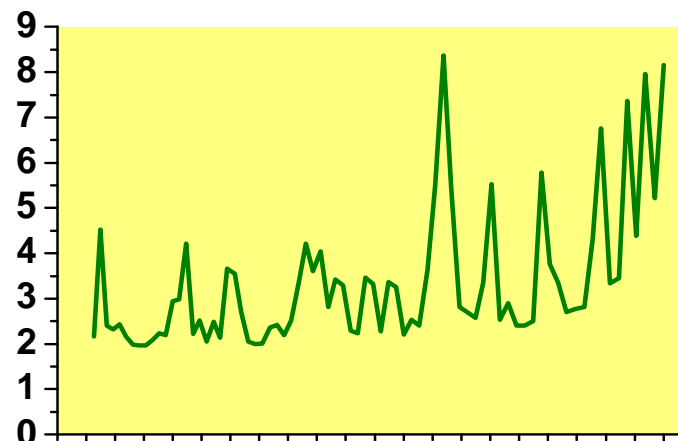
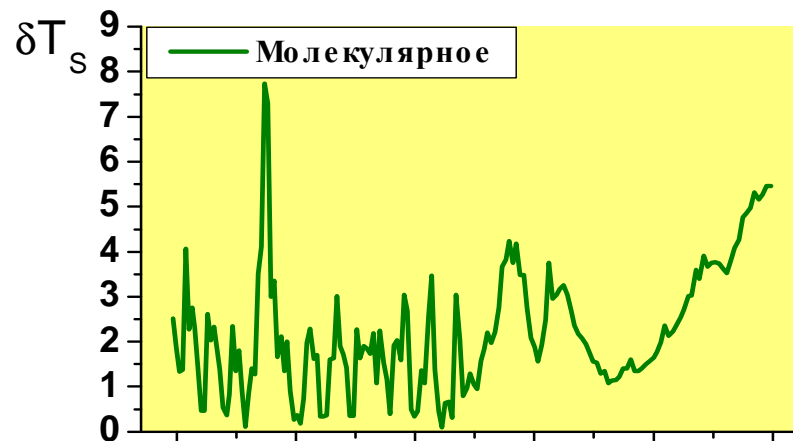
TM/ETM+ (LANDSAT)



ASTER



АТМОСФЕРНЫЕ ИСКАЖЕНИЯ СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ТПП



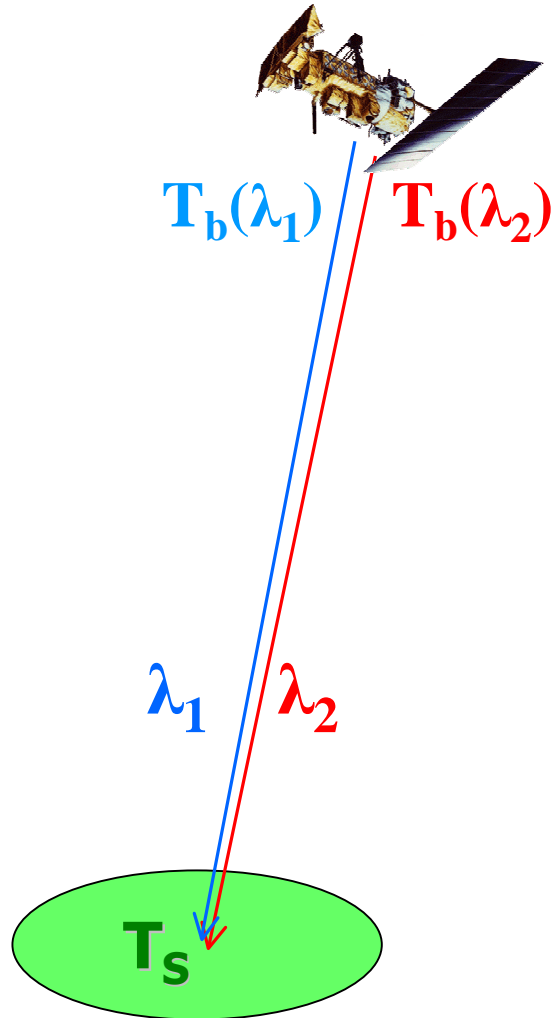
СПУТНИКОВЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ ТПП

1. Спектральный метод (две-три длины волны);

2. Угловой метод (два угла);

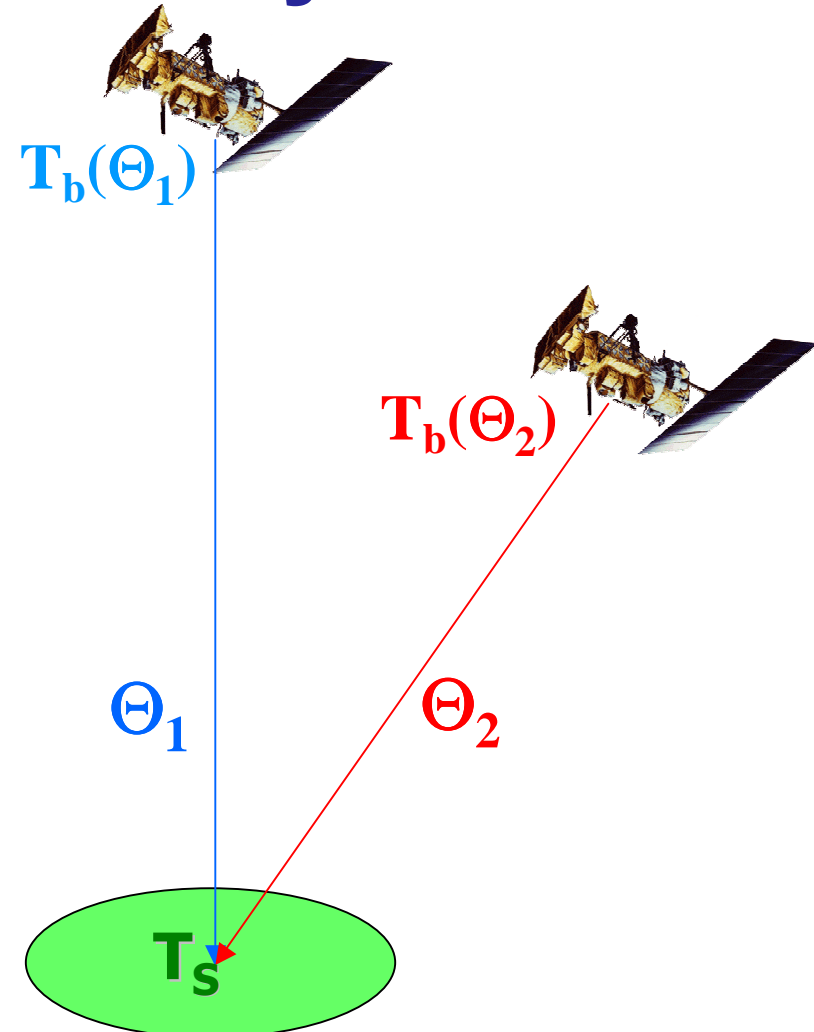
**3. Метод радиационных моделей
(RTM-метод).**

спектральный



$$\delta T_s \approx C (T_b(\lambda_1) - T_b(\lambda_2))$$

угловой



$$\delta T_s \approx C (T_b(\Theta_1) - T_b(\Theta_2))$$

Спектральный метод

$$T_s = C + \alpha (T_{11} + T_{12})/2 + \beta (T_{11} - T_{12})/2$$

$$\alpha = A_1 + A_2 (1 - \varepsilon) / \varepsilon + A_3 (\Delta\varepsilon / \varepsilon_2)$$

$$\beta = B_1 + B_2 (1 - \varepsilon) / \varepsilon + B_3 (\Delta\varepsilon / \varepsilon_2)$$

$$\varepsilon = (\varepsilon_{11} + \varepsilon_{12})/2 \text{ \& } \Delta\varepsilon = (\varepsilon_{11} - \varepsilon_{12})/2,$$

T_λ – измеряемые радиационные температуры,

ε_λ – излучательная способность поверхности,

($\lambda = 11 \text{ \& } 12 \text{ }\mu\text{m}$)

коэффициенты A_k & B_k ($k=1,3$) зависят от зенитного угла наблюдений, температуры и влагосодержания воздуха

НЕДОСТАТКИ СПЕКТРАЛЬНОГО МЕТОДА

ПОГРЕШНОСТЬ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ТПП ЗАВИСИТ ОТ ОШИБОК ИЗМЕРЕНИЙ δT_λ И $\delta T_s \approx 6.19 \cdot \delta T_\lambda$.

ОТНОСИТЕЛЬНАЯ ПОГРЕШНОСТЬ $\delta \epsilon$ ЗАДАНИЯ ϵ ДЛЯ УРОВНЯ $\delta T_s \approx 0.5$ К ДОЛЖНА БЫТЬ $\delta \epsilon \approx 0.5-1\%$,
ДЛЯ $\Delta \epsilon = \epsilon_{11} - \epsilon_{12}$ $\delta \Delta \epsilon \approx 0.25-0.5\%$.

АЛГОРИТМЫ РЕАЛИЗОВАНЫ ДЛЯ «СТАНДАРТНЫХ» СИТУАЦИЙ В БЕЗОБЛАЧНОЙ АТМОСФЕРЕ.

ОСУЩЕСТВЛЯЕТСЯ УЧЕТ ПОГЛОЩЕНИЯ ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ВОДЯНЫМ ПАРОМ, НО ОТСУТСТВУЕТ ЯВНЫЙ УЧЕТ ИСКАЖЕНИЙ, ВЫЗВАННЫХ АЭРОЗОЛЕМ И ПЕРИСТОЙ ОБЛАЧНОСТЬЮ.

RT-МЕТОД

УРАВНЕНИЕ ПЕРЕНОСА ИК-ИЗЛУЧЕНИЯ

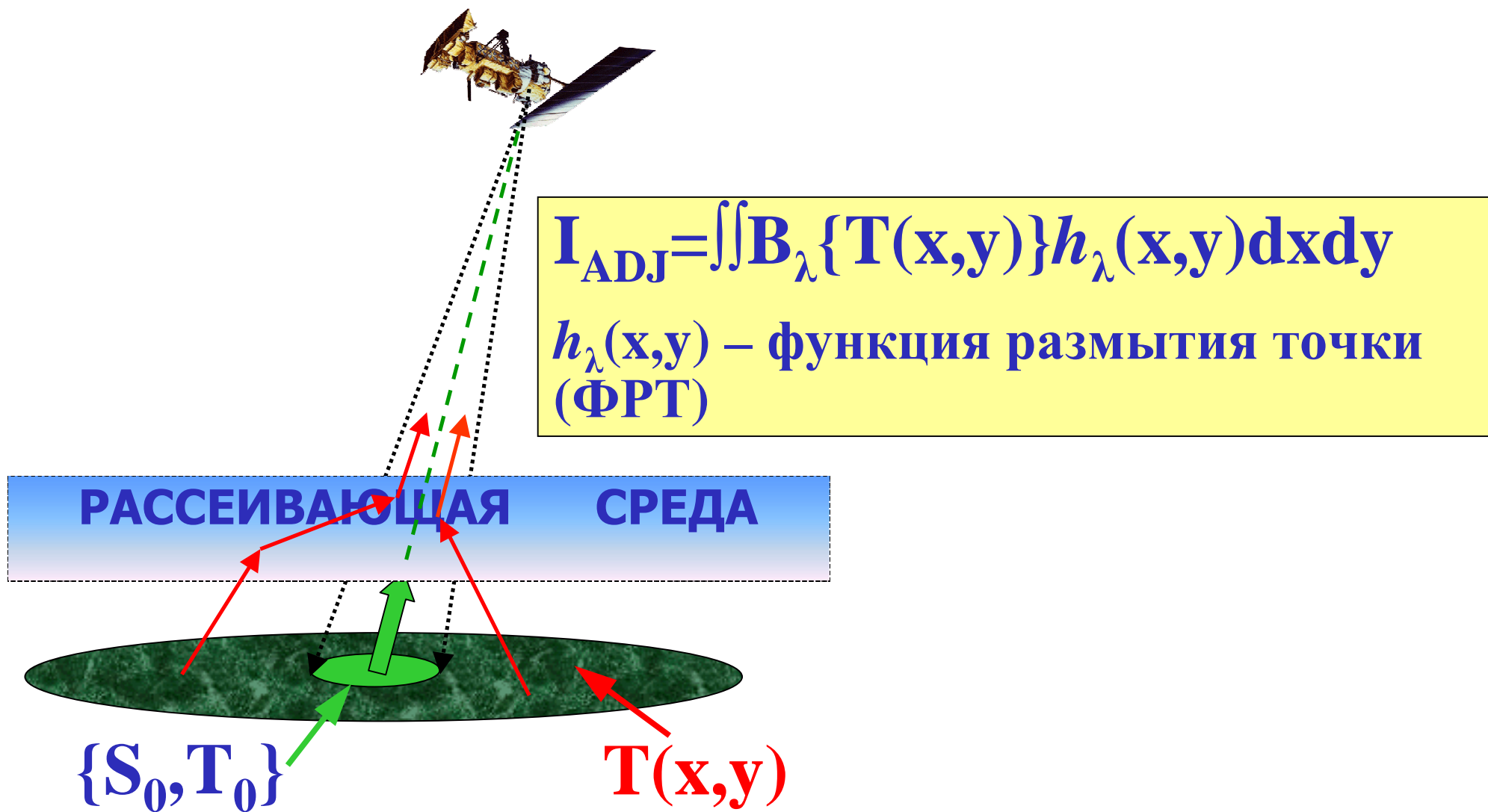
АПРИОРНАЯ ИНФОРМАЦИЯ:

КЛЮЧЕВЫЕ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ И ОПТИЧЕСКИЕ
ПАРАМЕТРЫ АТМОСФЕРЫ, ГЕОМЕТРИЯ
НАБЛЮДЕНИЙ;

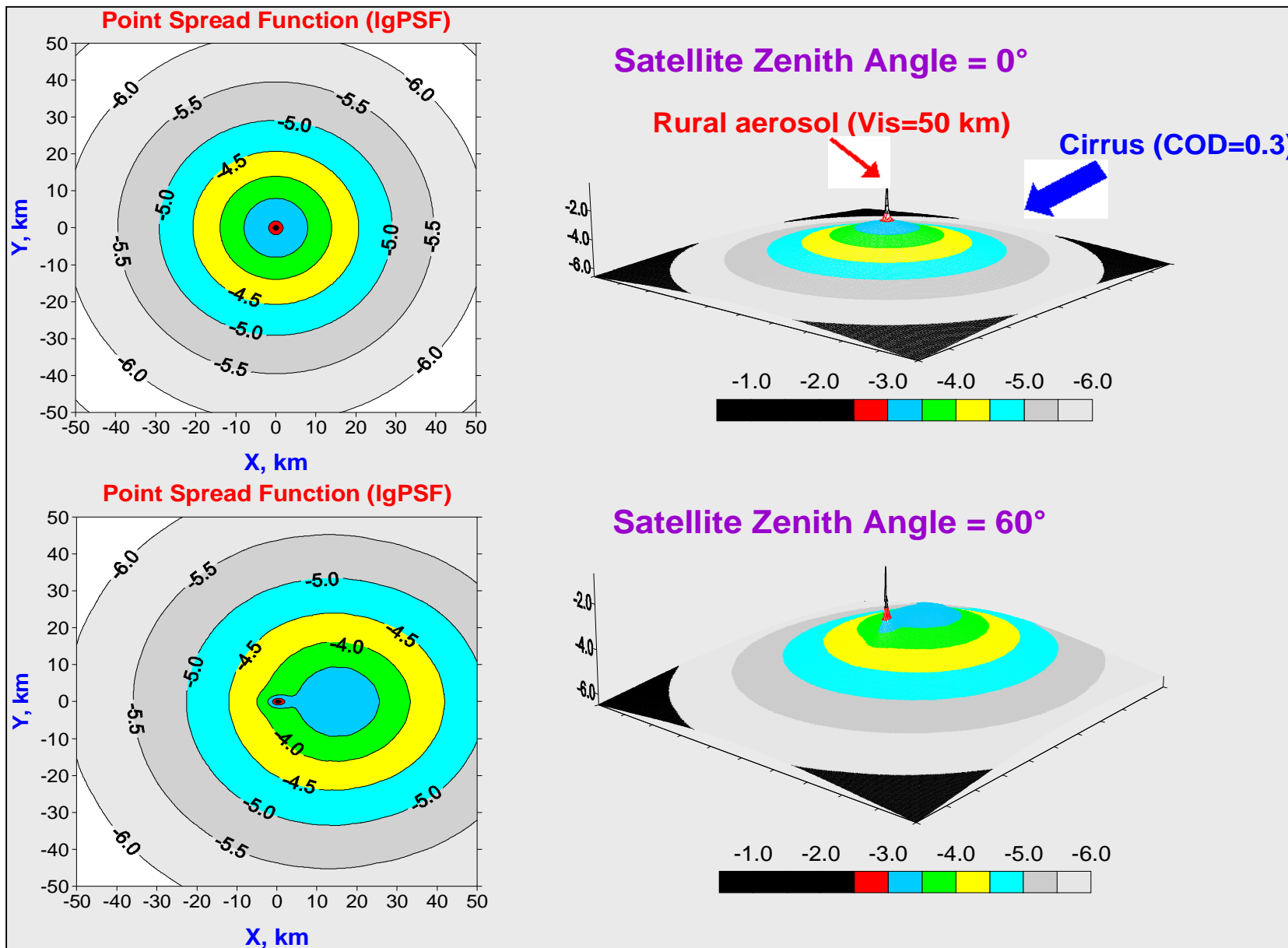
**RT - МЕТОД ОБЕСПЕЧИВАЕТ ЯВНЫЙ УЧЕТ
ВСЕХ ИСКАЖАЮЩИХ ФАКТОРОВ.**

**ЕГО РЕАЛИЗАЦИЯ ТРЕБУЕТ ПРИВЛЕЧЕНИЯ
БОЛЬШОГО ОБЪЕМА ОПЕРАТИВНОЙ
АПРИОРНОЙ ИНФОРМАЦИИ
И
ВЫСОКОЙ СКОРОСТИ ВЫЧИСЛЕНИЙ.**

«БОКОВОЙ ПОДСВЕТ»



ФУНКЦИЯ РАЗМЫТИЯ ТОЧКИ, ПЕРИСТАЯ ОБЛАЧНОСТЬ, $\lambda=3.75$ ММ



ИЗЛУЧЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ

(I_{SRF})

$$I_{\text{SRF}} = \varepsilon_{\lambda}^S B_{\lambda}[T_S] P_{\lambda},$$

$$P_{\lambda} = \exp[-\tau_{\lambda}(\Theta_v)],$$

где

$B_{\lambda}(T)$ - функция Планка,

P_{λ} - функция пропускания атмосферы,

τ_{λ} - оптическая толщина атмосферы,

Θ_v - зенитный угол наблюдения,

T_S - температура поверхности (ТПП),

ε_{λ}^S - излучательная способность ПП

АТМОСФЕРНАЯ КОРРЕКЦИЯ

ИЗМЕРЯЕМАЯ ВЕЛИЧИНА:

$$I_{\lambda}(x, y)$$

НЕОБХОДИМО НАЙТИ:

$$T_s(x, y)$$

ВЫЧИСЛЕНИЯ:

$$\Delta I_{\text{COR}}(x, y) = I_{\text{ATM}} + I_{\text{RFL}} + I_{\text{SCT}} + I_{\text{ADJ}} \quad \& \quad P_{\lambda}(x, y)$$

$$B_{\lambda}[T_s] = (I_{\lambda} - \Delta I_{\text{COR}}) / (P_{\lambda} \epsilon_{\lambda}^s) \quad \&$$

$$B_{\lambda}[T_s] \rightarrow T_s(x, y)$$

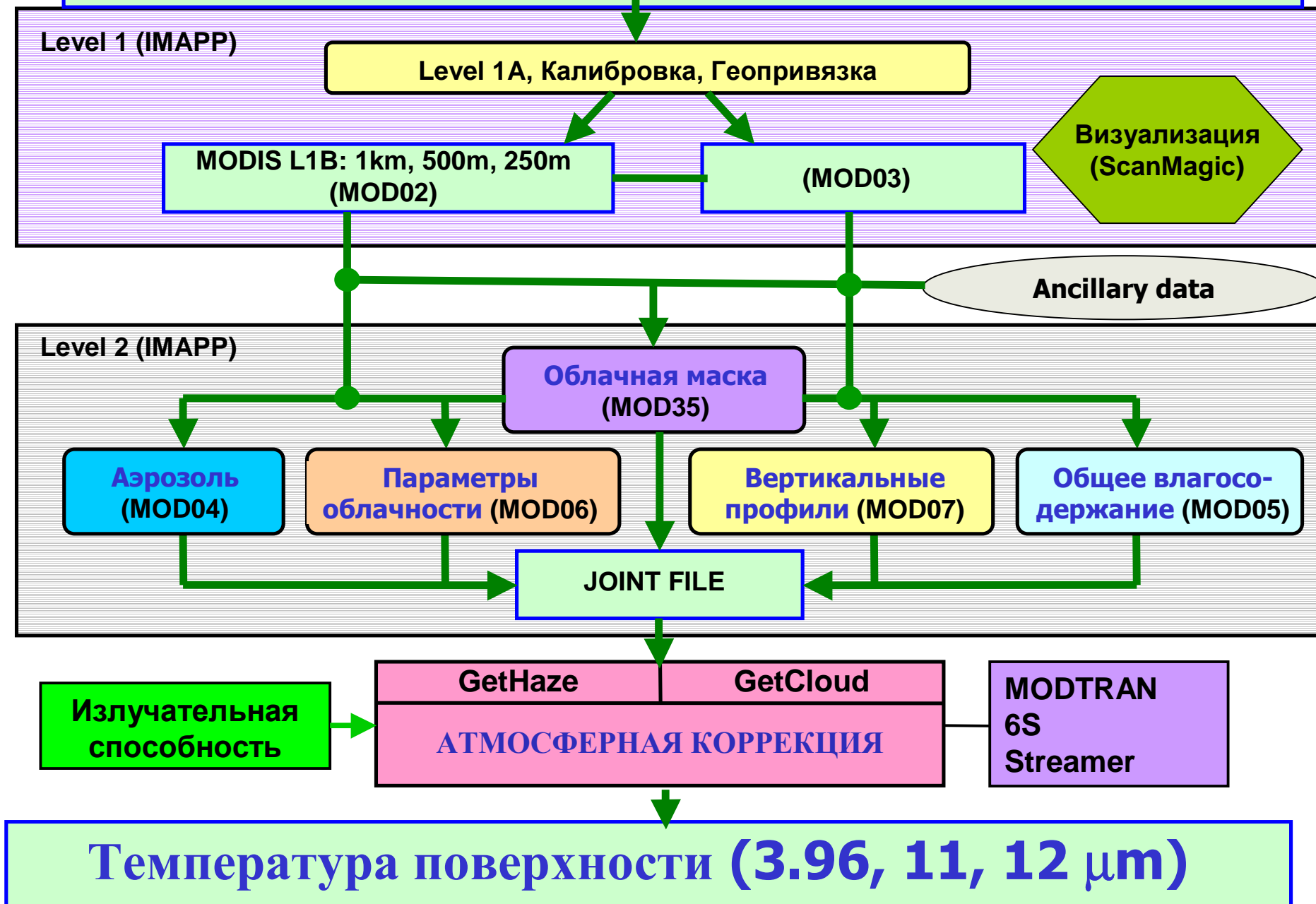
ИСТОЧНИКИ АПРИОРНОЙ ИНФОРМАЦИИ

- **сеть локальных наземных метео - и фотометрических измерений параметров атмосферы;**
- **региональные статистические и прогностические модели параметров атмосферы;**
- **спутниковые измерения метеорологических параметров атмосферы, характеристик атмосферного аэрозоля и облачности.**

ПРИМЕНЯЕМЫЕ ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА

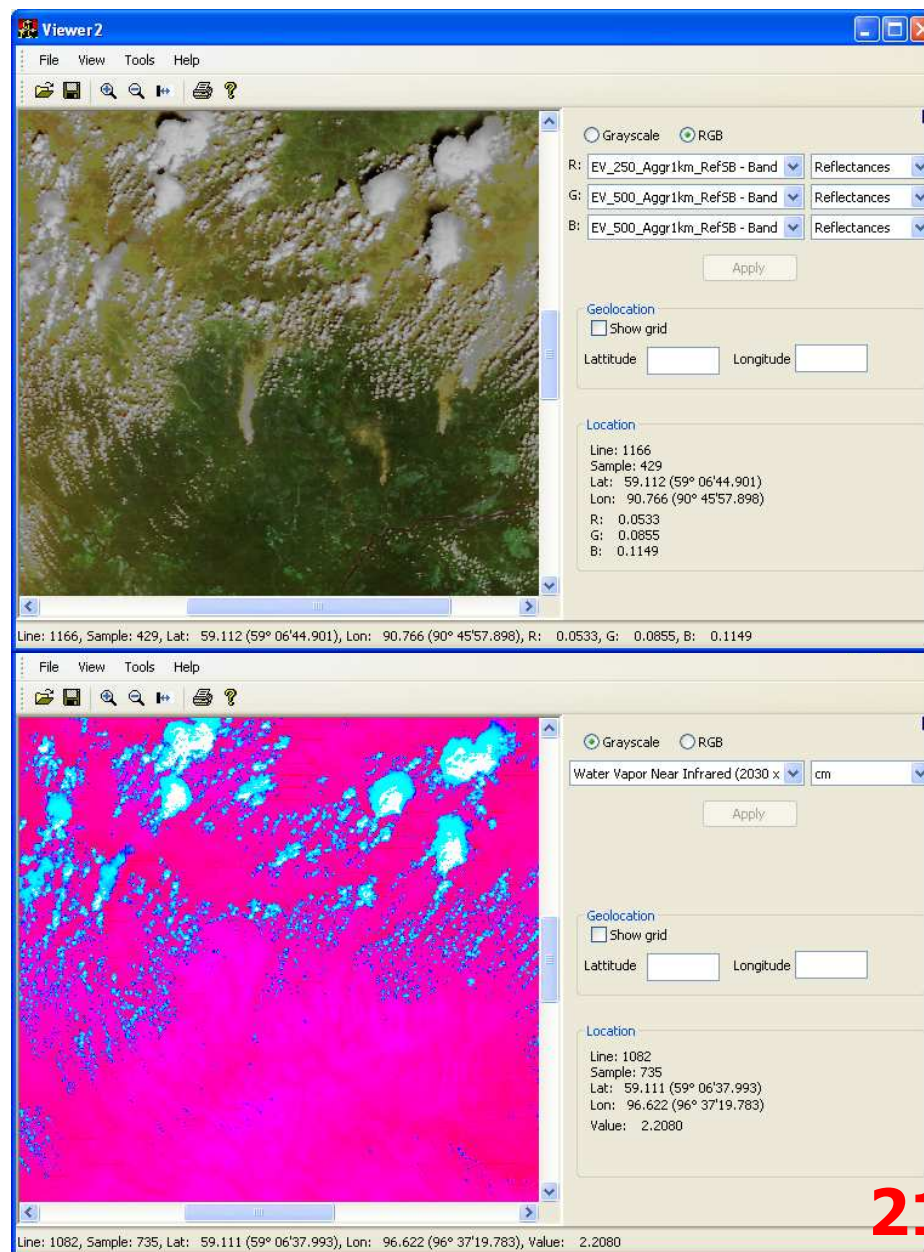
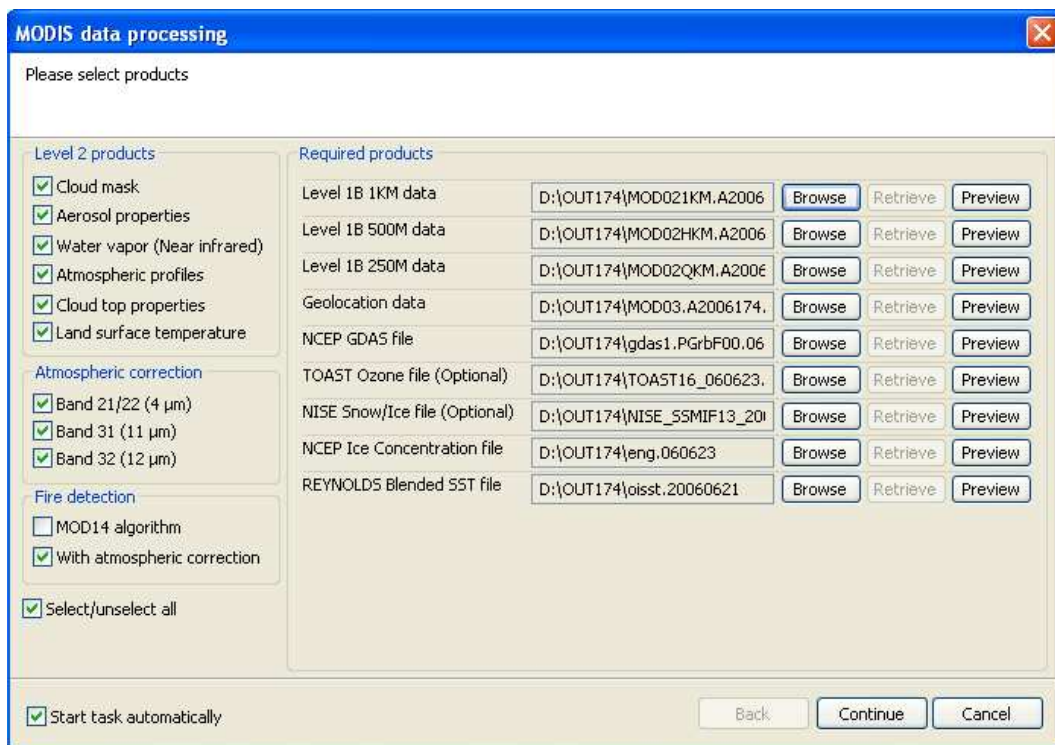
- **MODTRAN, LOWTRAN, 6S, ATCOR,
FLAASH**
- **ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ,
РАЗРАБОТАННОЕ В ИОА СО РАН**

MODIS PDS (Level 0)



ИНТЕРФЕЙС

ПРОГРАММЫ

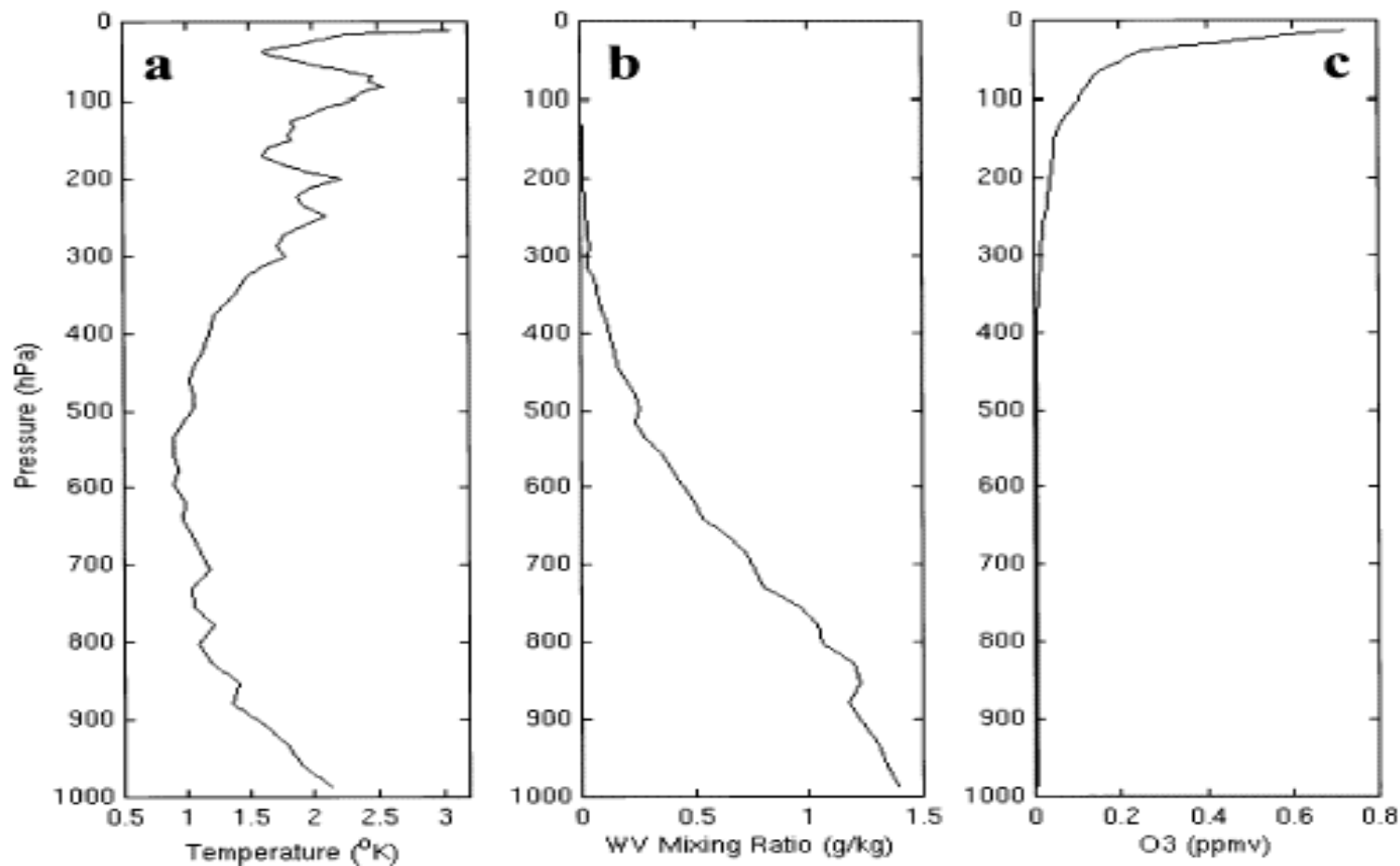


1. Восстановление параметров атмосферы.
2. Атмосферная коррекция ИК-измерений.
3. Детектирование тепловых объектов.
4. Визуализация данных.

**ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ АТМОСФЕРНОЙ
КОРРЕКЦИИ НЕОБХОДИМО В МОМЕНТ
СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ИСПОЛЬЗОВАТЬ
АПРИОРНУЮ ИНФОРМАЦИЮ О КЛЮЧЕВЫХ
ПАРАМЕТРАХ ОПТИКО-МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО
СОСТОЯНИЯ АТМОСФЕРЫ.**

**КЛЮЧЕВЫЕ ПАРАМЕТРЫ – ВЕРТИКАЛЬНЫЕ
ПРОФИЛИ ТЕМПЕРАТУРЫ И ВЛАЖНОСТИ,
ОПТИЧЕСКАЯ ТОЛЩИНА И ВЫСОТА
ПОЛУПРОЗРАЧНОЙ ОБЛАЧНОСТИ, АЭРОЗОЛЬ.**

**О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
КЛЮЧЕВЫХ ОПТИКО-
МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
АТМОСФЕРЫ, ПОЛУЧЕННЫХ НА ОСНОВЕ
СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ**



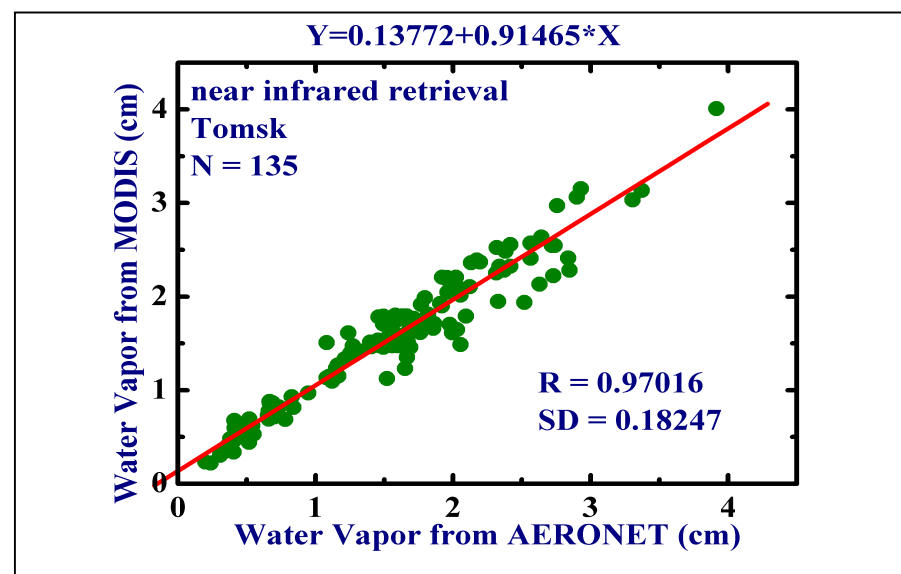
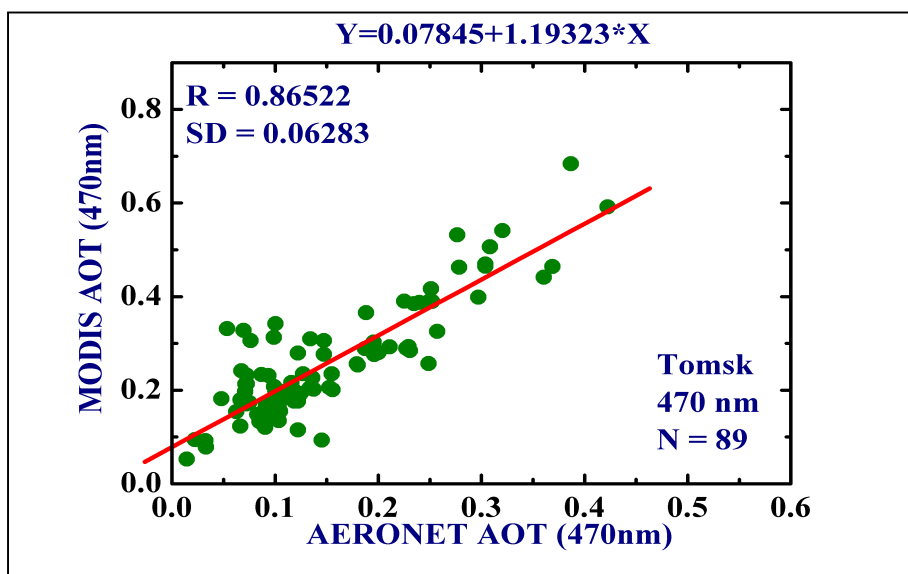
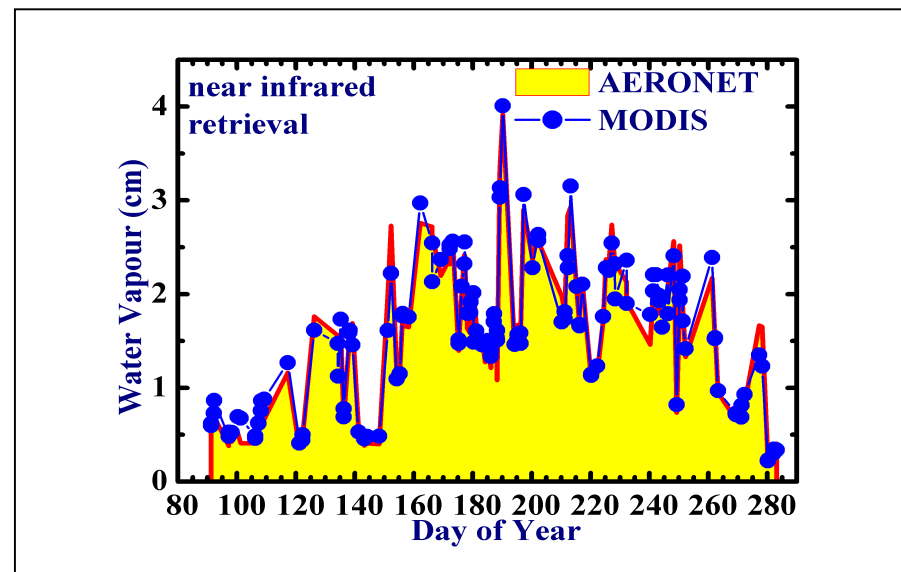
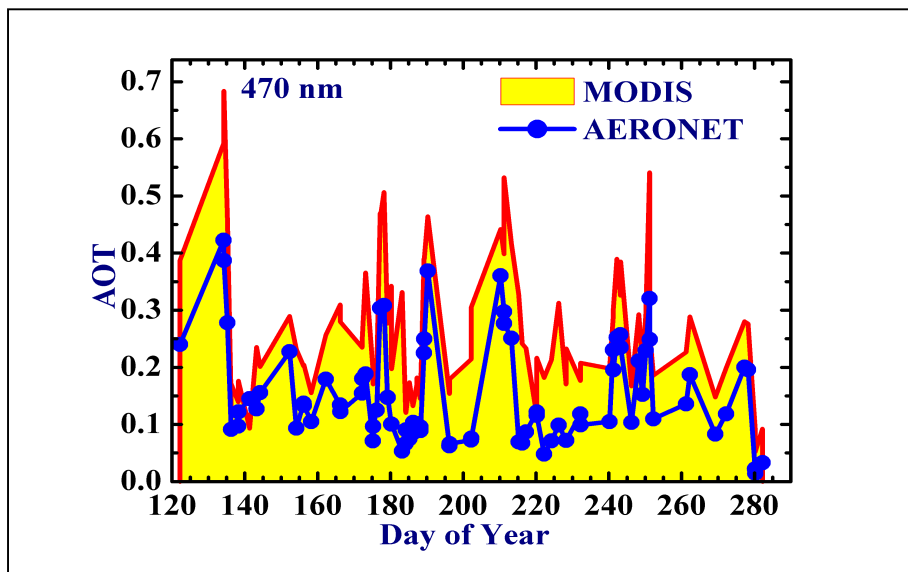
**Среднеквадратическая погрешность восстановления профилей:
 (a) температуры, (b) влажности (g/kg) и (c) озона (ppmv) по данным
 MODIS.**

Seemann, S., J. Li, W. P. Menzel, and L. Gumley, 2003: Operational Retrieval of Atmospheric Temperature, Moisture, and Ozone from MODIS Infrared Radiances. Journal of Applied Meteorology, Vol. 42, P. 1072-1091.

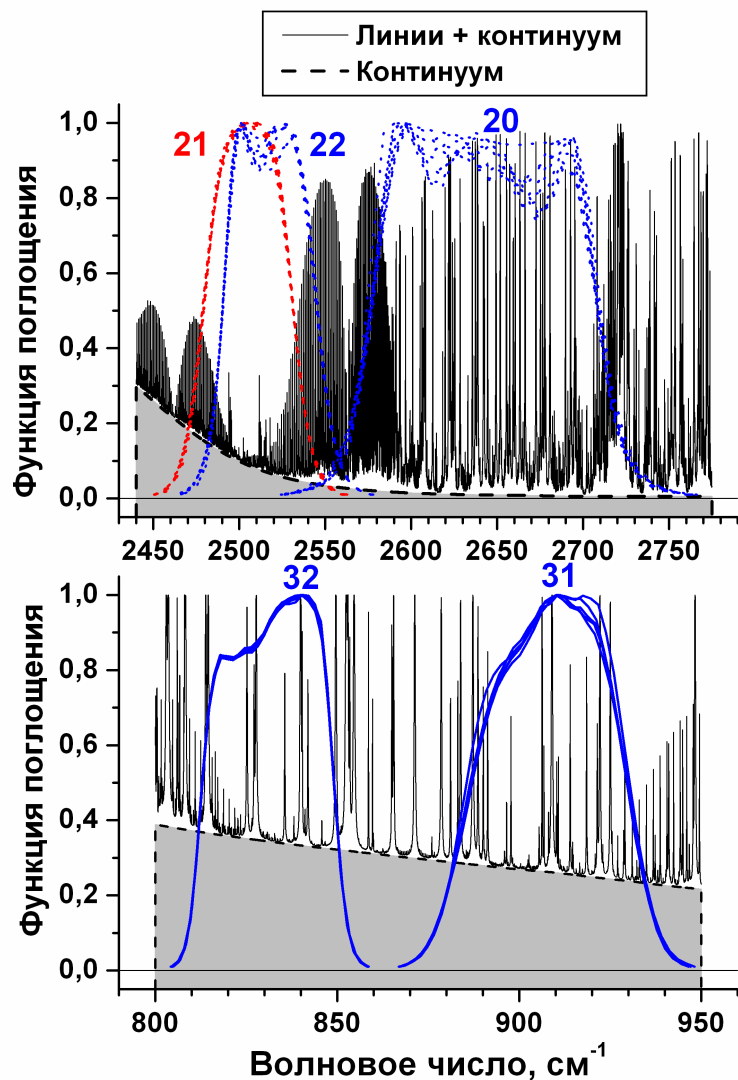
ВАЛИДАЦИЯ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ MOD04 И MOD05 (ТОМСК, 2003)

Аэрозоль: АОТ для $\lambda=470$ нм

Влагосодержание атмосферы



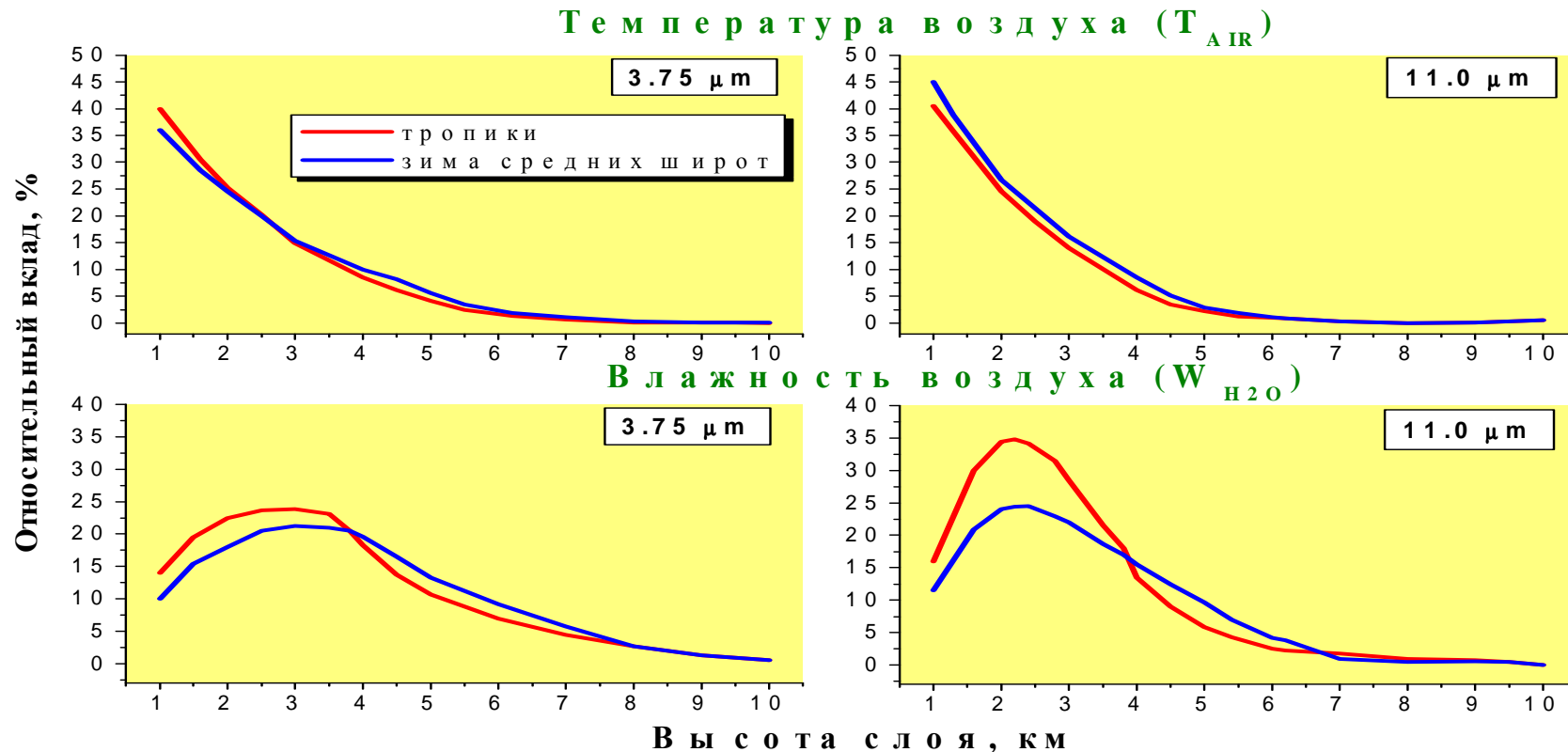
УЧЕТ ВЛИЯНИЯ МОЛЕКУЛЯРНОГО ПОГЛОЩЕНИЯ НА ИЗМЕРЯЕМОЕ ИК-ИЗЛУЧЕНИЕ



Методы расчета	Спектральные каналы MODIS			
	#20	#21	#31	#32
<i>Селективное поглощение</i>				
LBLRTM v11.3	1.42	0.38	0.86	0.77
MODTRAN v3.5	1.42	0.43	0.97	0.90
<i>Континуальное поглощение</i>				
LBLRTM v11.3	0.09	1.31	1.48	2.03
MODTRAN v3.5	0.13	1.48	1.50	2.02

Сравнение «точного» *line-by-line* метода LBLRTM и приближенного метода MODTRAN 3 говорит о том, что различия в результатах расчета атмосферной поправки не превышают 0.25 К.

ВЛИЯНИЕ ОШИБОК ЗАДАНИЯ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ПРОФИЛЕЙ МЕТЕОПАРАМЕТРОВ АТМОСФЕРЫ



- ДОМИНИРУЮЩИЙ ВКЛАД ПРИНАДЛЕЖИТ ОШИБКАМ В ПРОФИЛЯХ ТЕМПЕРАТУРЫ И ВЛАЖНОСТИ В НИЖНЕМ 5-км СЛОЕ АТМОСФЕРЫ. ВКЛАД ОШИБОК В ПРОФИЛЯХ ДРУГИХ АТМОСФЕРНЫХ ГАЗОВ СОСТАВЛЯЕТ МЕНЕЕ 0.2 К.
- ВЕРТИКАЛЬНОЕ РАЗРЕШЕНИЕ ПРОФИЛЕЙ МЕТЕОПАРАМЕТРОВ, ПОЛУЧАЕМЫХ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ ЯВЛЯЕТСЯ ДОСТАТОЧНЫМ.

ВЛИЯНИЕ ОШИБОК ЗАДАНИЯ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ПРОФИЛЕЙ МЕТЕОПАРАМЕТРОВ АТМОСФЕРЫ

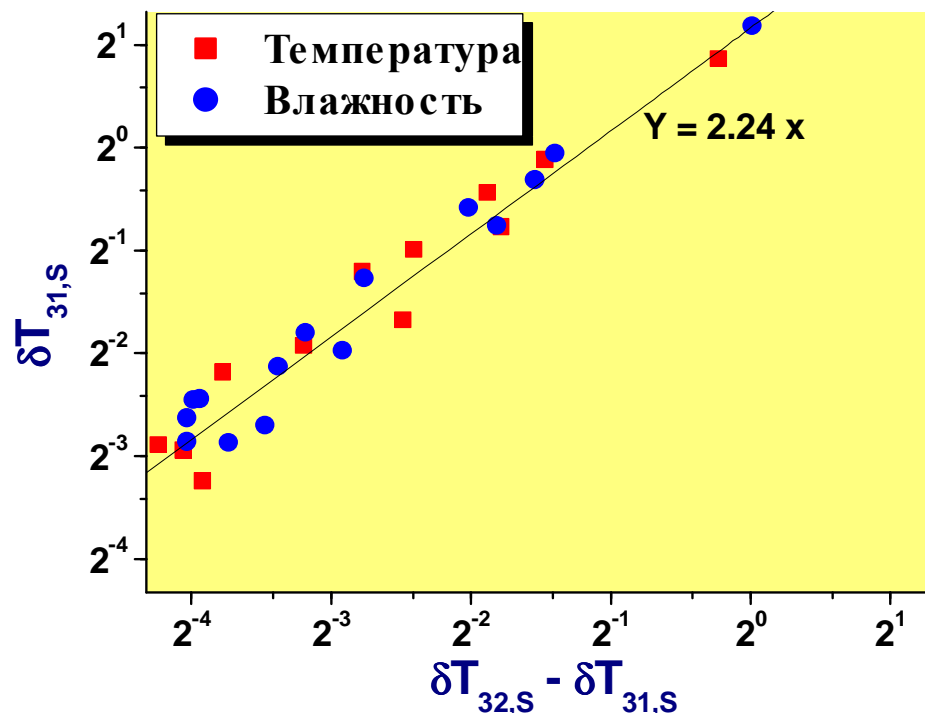
Параметр	Спектральные каналы MODIS			
	#20	#21	#31	#32
	<i>Лето средних широт</i>			
$\delta T_{AIR}=+2 \text{ К}$	+0.23	+0.16	+0.92	+1.28
$\delta W_{H_2O}=+20\%$	-0.17	-0.01	-0.96	-1.34
$\delta W_{GAS}=+40\%$	-0.19	-0.17	-0.10	-0.07
	<i>Тропики</i>			
$\delta T_{AIR}=+2 \text{ К}$	+0.28	+0.16	+1.82	+2.67
$\delta W_{H_2O}=+20\%$	-0.25	-0.02	-2.27	-3.28
$\delta W_{GAS}=+40\%$	-0.21	-0.18	-0.14	-0.10

- ЗНАЧЕНИЯ δT_s В ЗАВИСИМОСТИ ОТ δT_{AIR} И δW_{H_2O} ИМЕЮТ РАЗНЫЙ ЗНАК И ПРОИСХОДИТ ВЗАИМНАЯ КОМПЕНСАЦИЯ ВЛИЯНИЯ НА РЕЗУЛЬТАТ ОШИБОК В ЗАДАНИИ ЭТИХ МЕТЕОПАРАМЕТРОВ. АНАЛИЗ СПУТНИКОВЫХ МЕТОДОВ УКАЗЫВАЕТ ИМЕННО НА ТАКОЙ ТИП КОРРЕЛЯЦИИ МЕЖДУ δT_{AIR} И δW_{H_2O}

ВЛИЯНИЕ ОШИБОК ЗАДАНИЯ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ПРОФИЛЕЙ МЕТЕОПАРАМЕТРОВ АТМОСФЕРЫ

Существуют различия в значениях δT_S в каналах $11\mu\text{m}$ (#31) и $12\mu\text{m}$ (#32). Чтобы получить значение $\delta T_S \approx 0$, следует использовать принцип "*split-window*",

$$\text{т.е. } \delta T_S = \delta T_{S,11} - C_{\text{ERR}} \cdot (\delta T_{S,12} - \delta T_{S,11}),$$
$$C_{\text{ERR}} \approx 2.24$$



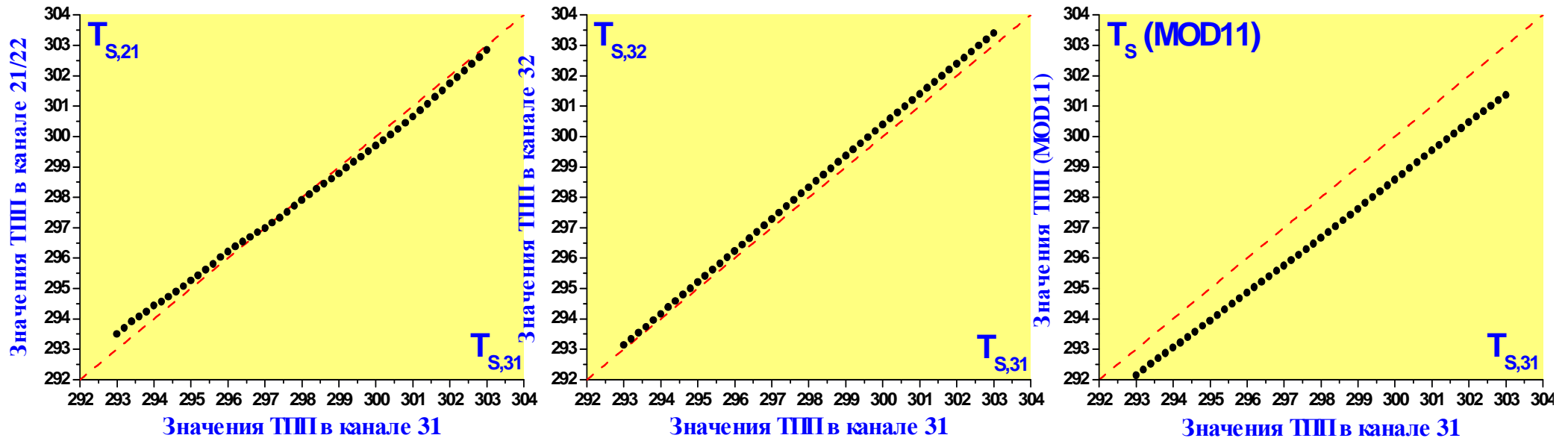
Это позволяет реализовать «спектральный» RT-подход, в котором осуществляется автоматическая компенсация ошибок задания априорной метеоинформации, если определять ТПП как

$$T_S = T_{S,11} + C_{\text{ERR}}(T_{S,12} - T_{S,11})$$

Тестирование спутниковой априорной информации: пример EOS/MODIS

30

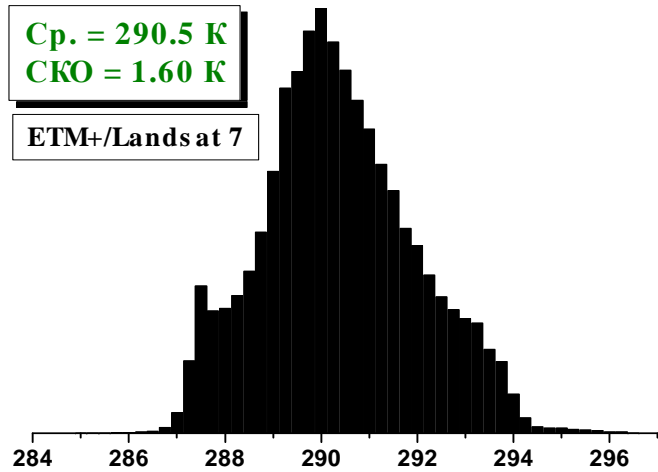
Томский регион (55-62°N, 74-90°E). Июнь 2006 г., 97 гран., 7.385.550 пикселей.



Различия восстановленных «спектральных» значений ТПП ($T_{S,\lambda}$) для трех ИК-каналов MODIS не превышают 0.5 К. Выявлены расхождения порядка 1.4 К между $T_{S,\lambda}$ и данными MOD11. Аналогичный результат представлен в работе Mao K., et al. "An RM-NN algorithm for retrieving land surface temperature and emissivity from EOS/MODIS data // J. Geophys. Res. 2007.

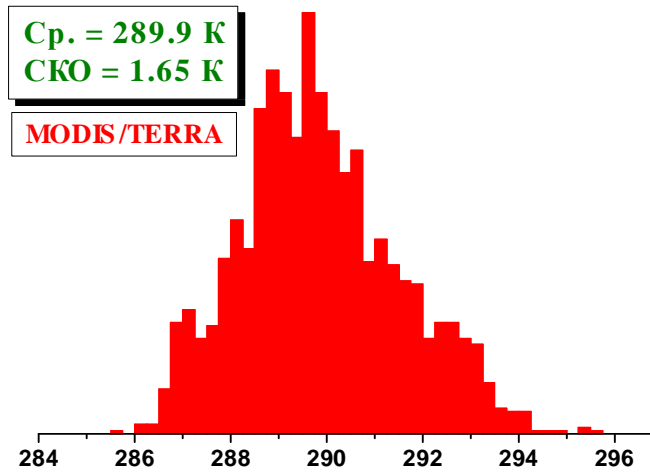
Каналы	ТПП
$\lambda=3.96 \mu\text{m}$ (21/22)	298,85
$\lambda=11,0 \mu\text{m}$ (31)	298,97
$\lambda=12,0 \mu\text{m}$ (32)	299,30
MOD11_L2	297,62

Тестирование спутниковой априорной информации: пример ETM+ /Landsat-7



ETM+/Landsat 7

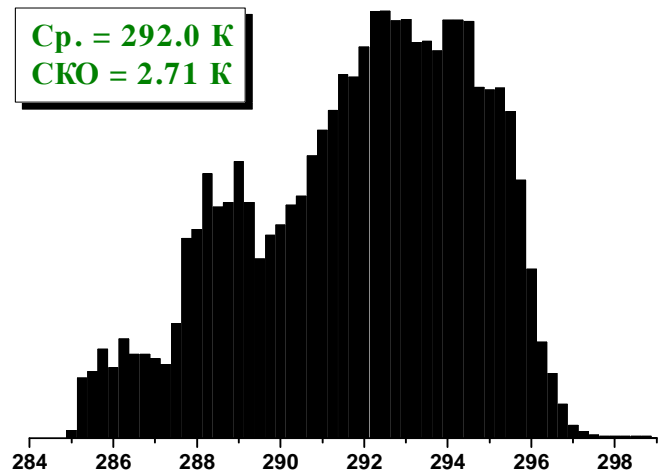
Температура поверхности, К



MODIS/TERRA

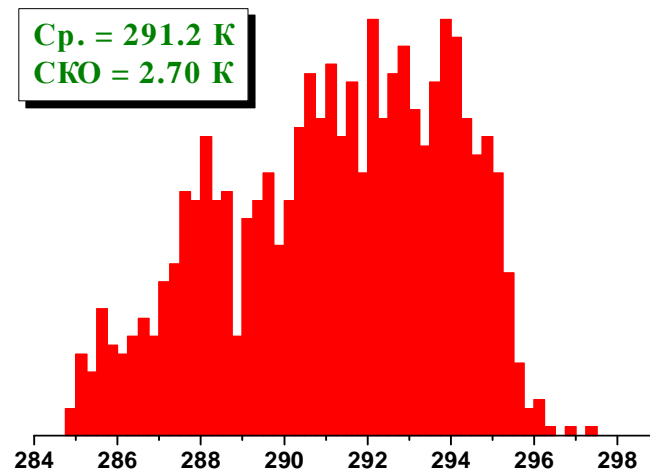
Температура поверхности, К

Участок
№ 1



Ср. = 292.0 К
СКО = 2.71 К

Температура поверхности, К



Ср. = 291.2 К
СКО = 2.70 К

Температура поверхности, К

Участок
№ 2

**СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗНАЧЕНИЙ ТП,
ВОССТАНОВЛЕННЫХ ПО ДАННЫМ ETM+/LANDSAT-7 И MODIS/TERRA**

Пример восстановления ТПП в условиях полупрозрачной облачности (1)

Спутниковые снимки (MODIS) территории Лугинецкого НГКМ.

Прозрачная атмосфера (А)

Дым, облачность (В)



ТЕСТОВЫЙ УЧАСТОК

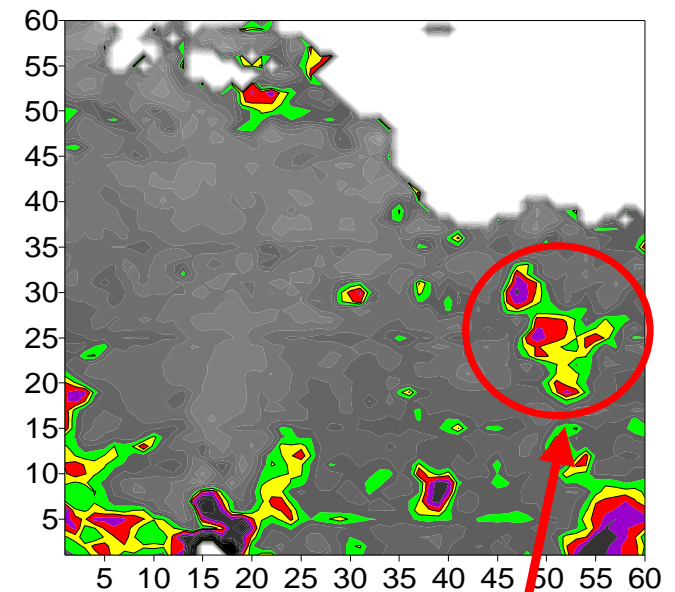
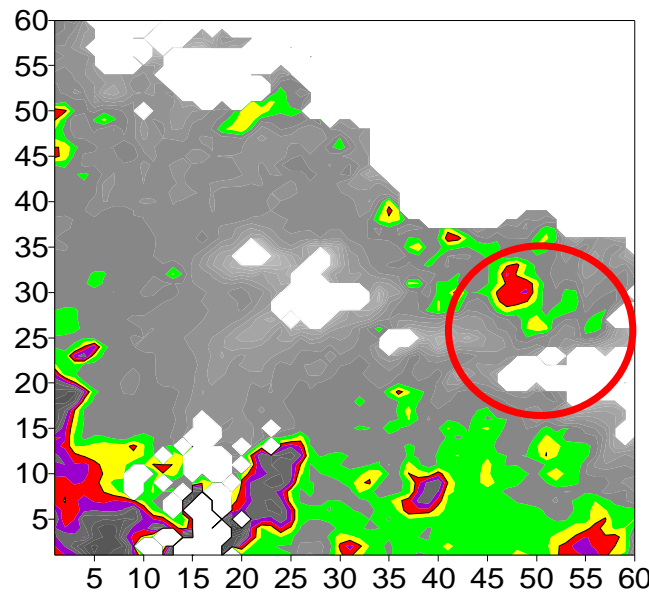
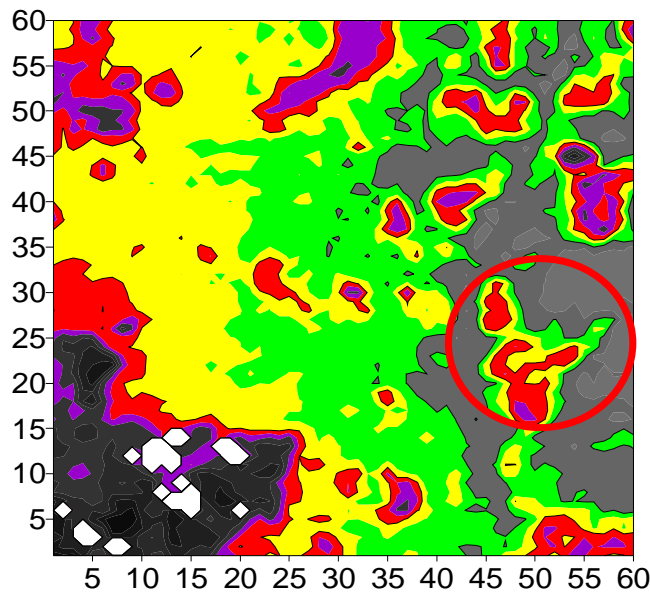
ПРИМЕР ВОССТАНОВЛЕНИЯ ТПП В УСЛОВИЯХ ПОЛУПРОЗРАЧНОЙ ОБЛАЧНОСТИ (2)

Результаты работы штатного алгоритма
MOD11_L2

MOD11 data (A)

MOD11 data (B)

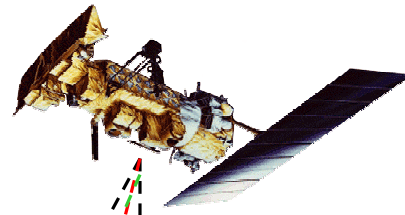
ИОА СО РАН
MODIS-ATMCOR (B)



ДЛЯ СИТУАЦИИ (B) ПРОСТРАНСТВЕННАЯ СТРУКТУРА ТПП ЗАМЕТНО И СУЩЕСТВЕННО ИСКАЖЕНА ДЫМОМ И ОБЛАЧНОСТЬЮ.

ПОСЛЕ АТМОСФЕРНОЙ КОРРЕКЦИИ ТЕМПЕРАТУРНАЯ СТРУКТУРА ТЕСТОВОГО УЧАСТКА ПОВЕРХНОСТИ ВОССТАНОВЛЕНА.

МОНИТОРИНГ ПОЖАРОВ



Площадь пиксела $S_0 = 1\text{ км}^2$

Температура фона T_0

I_{BG}

Площадь пожара $S_F \ll S_0$

Температура пожара $T_F > 600\text{ К}$

$\{S_0, T_0\}$

$\{S_F, T_F\}$

ИНТЕНСИВНОСТЬ ИК - ИЗЛУЧЕНИЯ

$$I_{\lambda} = I_{\text{F}} + I_{\text{BG}}$$

где

I_{F} & I_{BG} – излучение пожара и
окружающего его фона

$$I_F = B_F P_\lambda, \quad B_F = p(\theta) \varepsilon_\lambda^F B_\lambda(T_F),$$

$$P_\lambda = \exp\{-\tau_\lambda(\theta)\}, \quad p(\theta) = S_F / S_0(\theta)$$

$$I_{BG} = I_{SRF} + I_{ATM} + I_{RFL} + I_{SCT} + I_{ADJ}$$

РЕШАЮЩЕЕ ПРАВИЛО ДЕТЕКТИРОВАНИЯ

$$P\{x\} > dP$$

где

dP - пороговая величина функции **P{x}**,

x - спутниковые измерения в спектральных каналах видимого и инфракрасного диапазонов.

Как правило, используемые пороговые алгоритмы детектирования пожаров не учитывают влияние атмосферы на измеряемые величины

RT- МЕТОД ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ПОЖАРОВ

$$V_F = (I_\lambda - I_{BG})/P_\lambda$$
$$V_F > dV$$

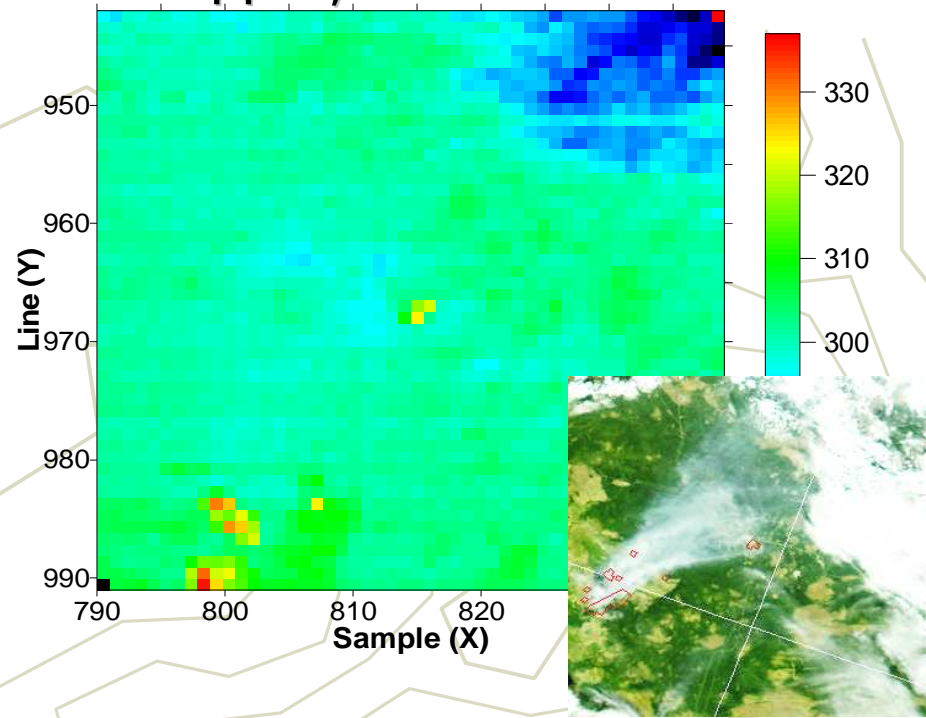
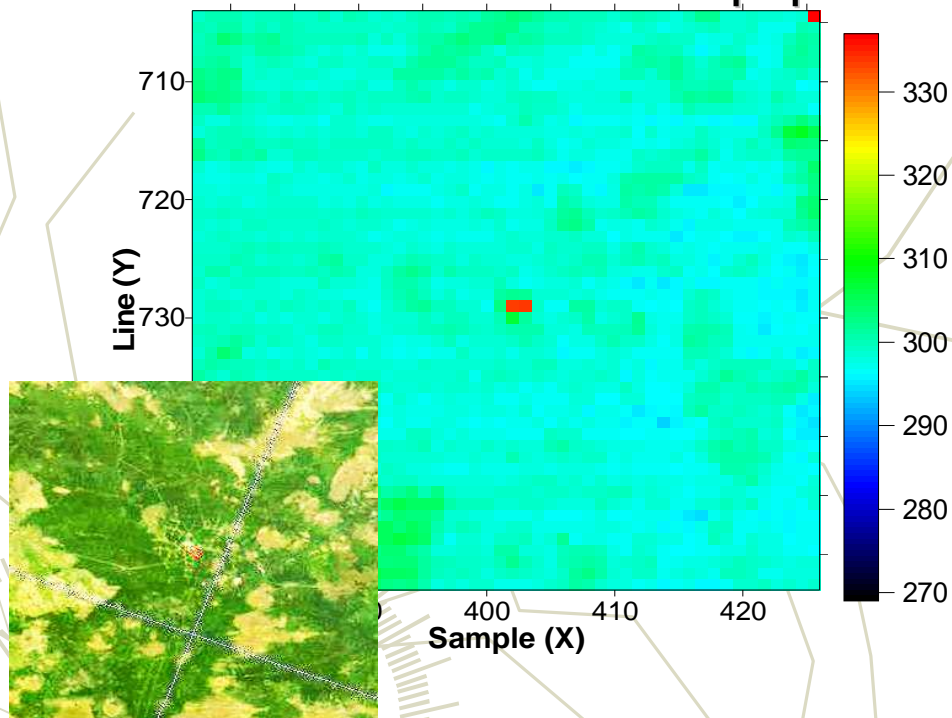
Решающее правило $V_F > dV$ не зависит от оптико-геометрических условий спутниковых наблюдений

ПРИМЕР 1. ВОССТАНОВЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЛАМЕНИ ФАКЕЛА ($\lambda=3.96 \mu\text{m}$)

39

А: Безоблачная атмосфера

В: Дым, облачность



Case	T_S, K	P_λ / τ_λ	T_{11}	$T_{3.96}$	T_F^0	T_{AC}^C
A	300.0	0.822 / 0.196	297.4	334	2180	2430
B	302.0	0.344 / 1.067	293.8	321	1410	2450

ПРИМЕР 2. ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ТЕСТОВЫХ ОБЪЕКТОВ. СРАВНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ

MOD14:

- 1) $T_{21} > 310 \text{ K}$, 2) $\Delta T > 10 \text{ K}$,
- 3) $\rho_{0.86} < 0.3$, $\Delta T = T_{21} - T_{31}$

Тест 1. $T_{21} > 360 \text{ K}$ (320 K, ночь)

Тест 2. $\Delta T > \Delta T^* + C1 \cdot \mu_{\Delta T}$

Тест 3. $\Delta T > \Delta T^* + C2$

Тест 4. $T_{21} > T_{21}^* + C3 \cdot \mu_{21}$

Тест 5. $T_{31} > T_{31}^* + \mu_{31} - C4$,

где $C1=3.5$, $C2=6$, $C3=3$, $C4=4$

MOD14^m:

- 1) $T_{21} > 302 \text{ K}$, 2) $\Delta T > 3 \text{ K}$,
- 3) $\rho_{0.86} < 0.3$, $\Delta T = T_{21} - T_{31}$

Тест 1 ... Тест 5

где $C1=2.5$, $C2=5$, $C3=2$, $C4=4$

ИОА СО РАН (для NOAA)

ATM COR

RTM-метод:

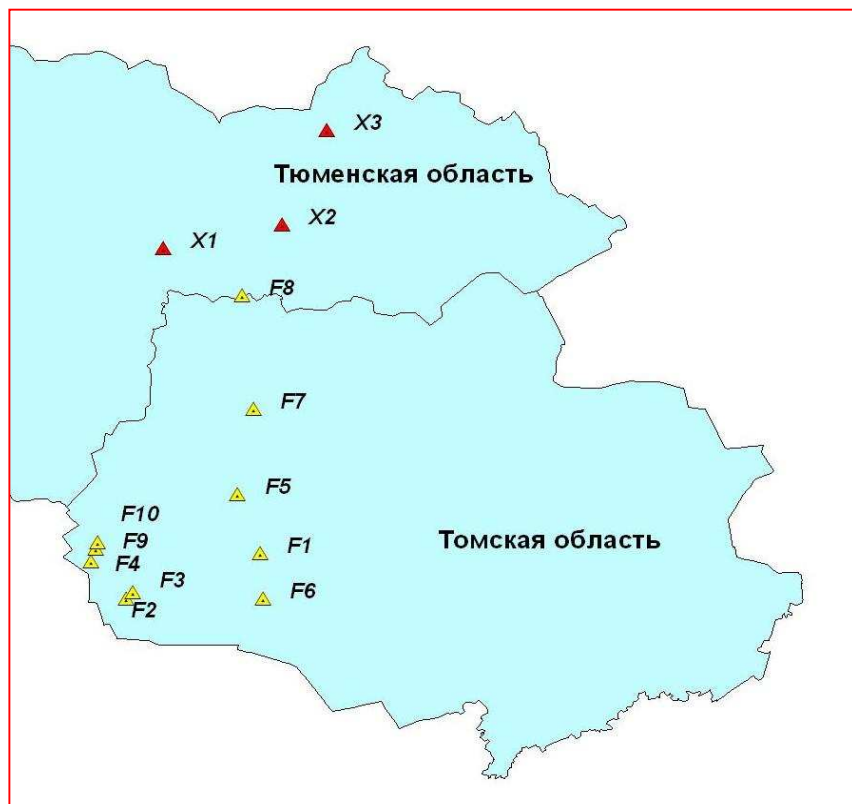
Этап 1. Получение оперативной априорной информации (профили температуры и влажности воздуха, характеристики аэрозоля и облачности).

Этап 2. Восстановление ТПП в каналах 21/22, 31, 32 ($T_{s,21}$, $T_{s,31}$, $T_{s,32}$). Учет ошибок в задании метеоданных. Отбраковка случаев плотной облачности. Учет влияния полупрозрачной облачности.

Этап 3. Детектирование тепловых объектов по признакам:

- 1) $T_{s,21} > 302 \text{ K}$
- 2) $\Delta T = T_{s,21} - T_{s,31} > 3 \text{ K}$

РЕЗУЛЬТАТЫ СРАВНЕНИЯ АЛГОРИТМОВ



Методы	Факельные установки	
	ВСЕ	F1...F10
MOD14	60	6
MOD14^m	83	21
ИОА	-	36
RTM	122	53

Методы	N _Σ	Факельные установки													
		F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	X1	X2	X3	
MOD14	60	4	—	—	—	—	—	—	—	—	1	1	14	14	26
MOD14^m	83	6	2	—	1	—	1	1	—	6	4	18	18	26	
RTM	122	13	4	3	4	2	8	1	1	8	9	21	21	27	
T_{21,CP}		309	304	306	306	305	305	308	303	307	306	314	320	329	

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

✓ МОДЕЛИ ПЕРЕНОСА ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЧЕРЕЗ АТМОСФЕРУ ЯВЛЯЮТСЯ ЭФФЕКТИВНЫМ СРЕДСТВОМ КОРРЕКТНОГО РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ИК-ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ИЗ КОСМОСА.

✓ ПРИМЕНЕНИЕ RT-МЕТОДА В ВАРИАНТЕ "*SPLIT-WINDOW*" ПОЗВОЛЯЕТ СДЕЛАТЬ ЭТО РЕШЕНИЕ УСТОЙЧИВЫМ К ОШИБКАМ ЗАДАНИЯ АПРИОРНОЙ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ.

- ✓ **Использование RTM-метода в задаче детектирования очагов пожаров может существенно повысить результативность пожарного мониторинга, особенно для слабоинтенсивных очагов или для сложных оптико-метеорологических условий наблюдений.**



Спасибо за внимание!