

ТРИНАДЦАТАЯ ВСЕРОССИЙСКАЯ ОТКРЫТАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА

Моделирование атмосферной радиации для дистанционного зондирования атмосферы, теории климата и других разделов геофизики

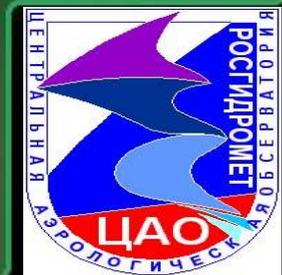
Лекция Школы молодых учёных



Фомин Борис Алексеевич
(b.fomin@mail.ru)

Центральная аэрологическая
обсерватория

РФФИ 15-01-00783 и 14-01-00197



“Введение”

климат

Увеличение среднеглобальной приповерхностной температуры при удвоении концентрации CO_2 280->560 ppmv

(2 – 4.5) °C =>IPCC, **2007** (Summary for Policymakers p.12)

(1.5 – 4.5) °C =>IPCC, **1990**

Carbon Dioxide , Ed. by *W.Bach* et al.
2nd Course of the International School
of Climatology, Erice,Italy, **1982**

(1.5 – 4.5) °C =>IPCC, **2013** (Summary for Policymakers p.16)

**Изменение в потоках уходящей в космос
тепловой радиации всего ~ 3 Вт/м² или ~ 1% !**

⇒**ТОЧНОСТЬ** измерения и моделирования радиации
ключевая проблема в теории климата и **ДДЗ !!!**



Основные разделы лекции

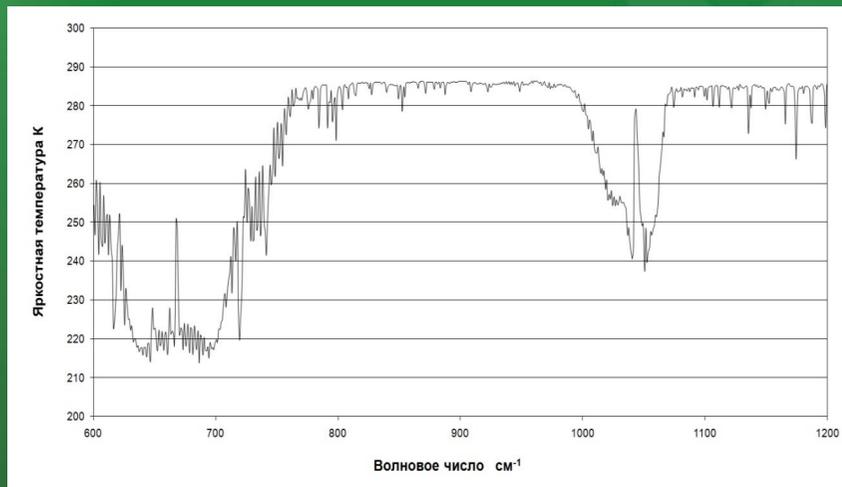
1. Атмосферная спектроскопия
2. Моделирование атмосферной радиации
3. Заключение



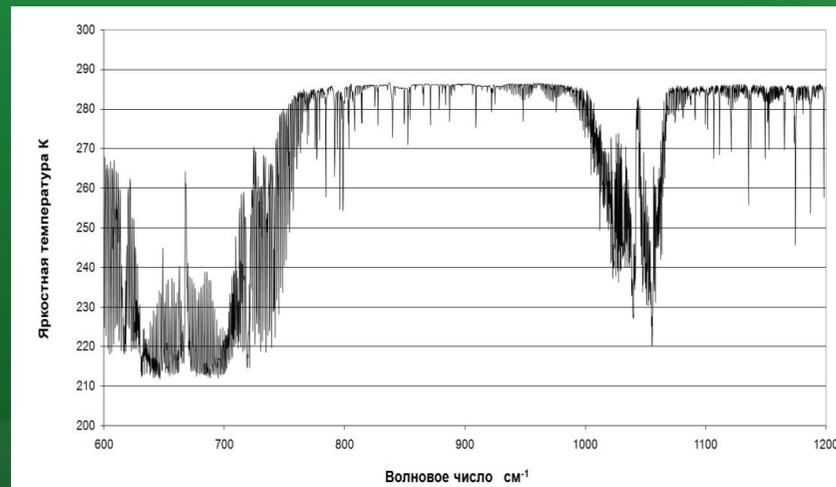
Спектральное разрешение и ДЗЗ

Уходящее ИК излучение (надир)

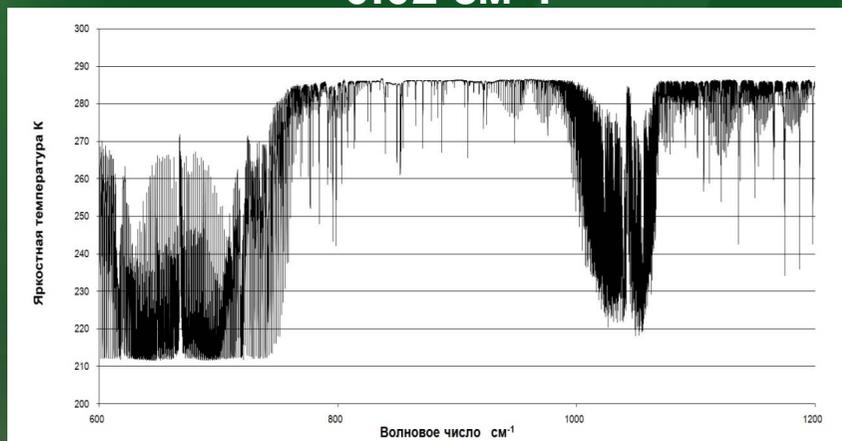
1 см⁻¹



0.2 см⁻¹



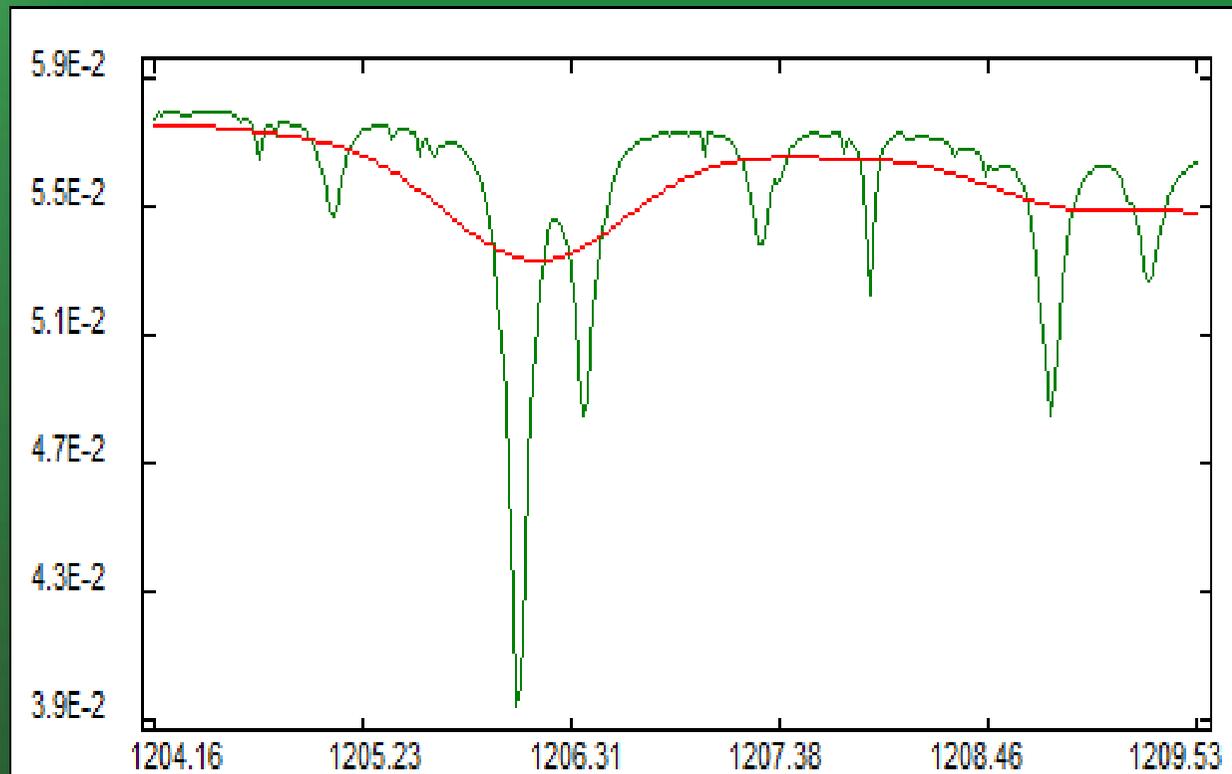
0.02 см⁻¹



Какую информацию теряем?



Спектральное разрешение и ДЗЗ («ХИМИЯ»)



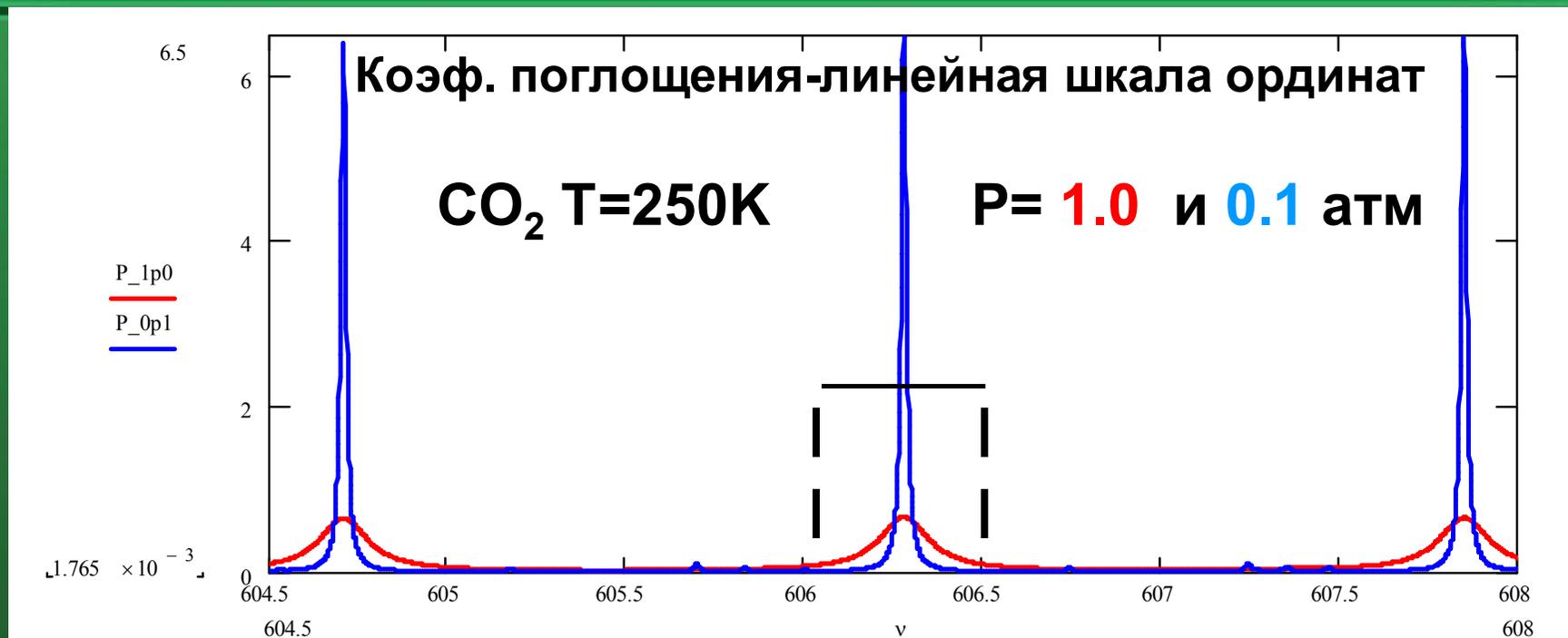
Образец спектра
уходящего в космос
теплового
излучения. Зеленым
— разреш. 0.02 см^{-1} .
Красным —
разрешен. 1 см^{-1}
(HDO, $1205\text{-}1207 \text{ см}^{-1}$)

ATMOS (Atmospheric Trace Molecule Experiment
1985, 1991, 1993, 1994) Химия фреонов (CFC-11, CFC-12)
в стратосфере. Распределение COF_2 , CF_4 и др.

Диапазон 2-16 мкм, разрешение 0.01 см^{-1} .



Спектральное разрешение и ДЗЗ (вертикальное разрешение)

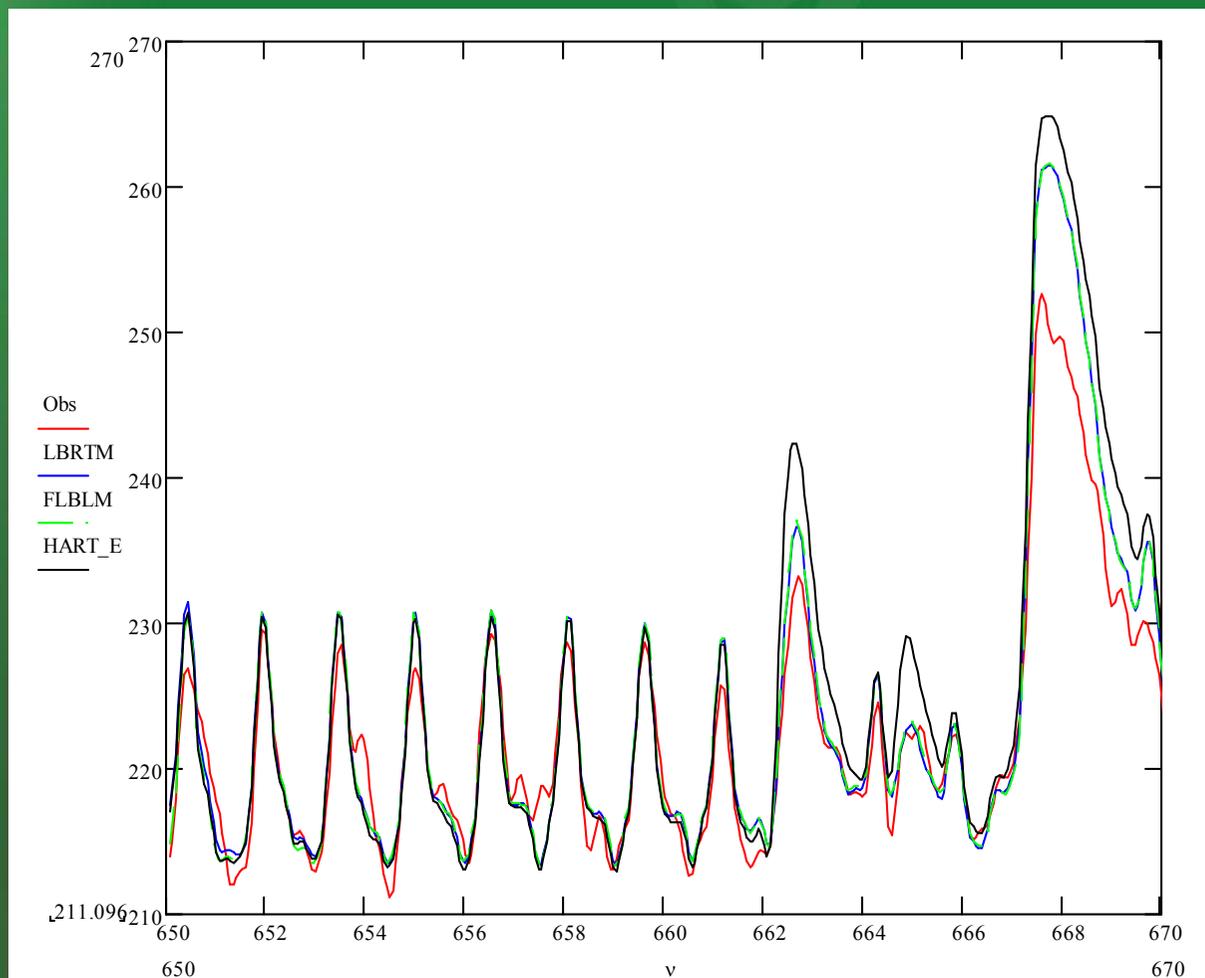


Для получения «полной» информации о слое атмосферы 0-20 км требуется спектральное разрешение $\sim 1/100 \text{ см}^{-1}$!

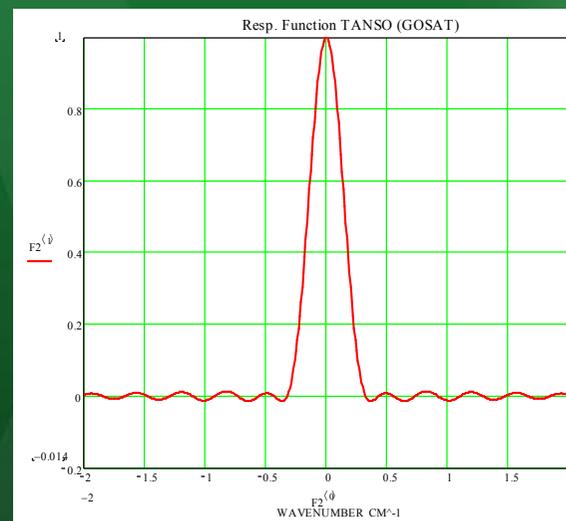


Измерения и расчёты ИК спектров

По материалам валидации "TANSO-FTS" (GOSAT, Япония)
Obs-набл., LBRTM (США), FLBLM (РФ), HART (Франция, «Фойгт»)



Аппаратная функция



«Классическая» теория спектров

Тимофеев Ю.М., Васильев А.В. Теор. основы атм. оптики. С.-П., «Наука», 2003.

Кэфф. погл., ν - волнов. число см^{-1} ($\nu=1/\lambda$)

Контур Лоренца

$$K(\nu) = \sum_i k_i(\nu)$$

$$k_i(\nu) = S_i(T) * f_i(\nu)$$

$$f_i(\nu) = \frac{\alpha_i}{\pi[(\nu - \nu_i)^2 + \alpha_i^2]}$$

Базы данных: **HITRAN** (<https://www.cfa.harvard.edu/hitran/>),
GEISA (<https://www.pole-ether.fr>) и др.

GOSAT-CH₄ (Nikitin A.V., Lyulin O.M., Mikhailenko S.N., Perevalov V.I., Filippov N.N., Grigoriev I.M., Morino I., Yoshida Y., Matsunaga T., JQSRT, 154, 63-71, 2015).

Пример из HITRAN-2012

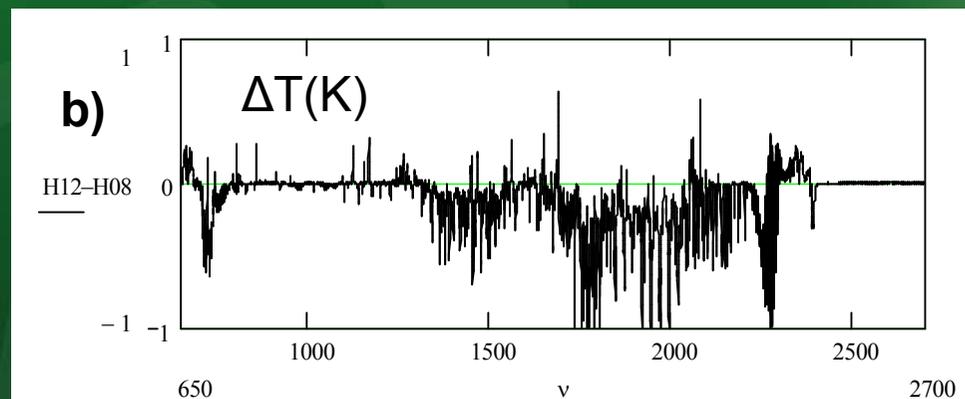
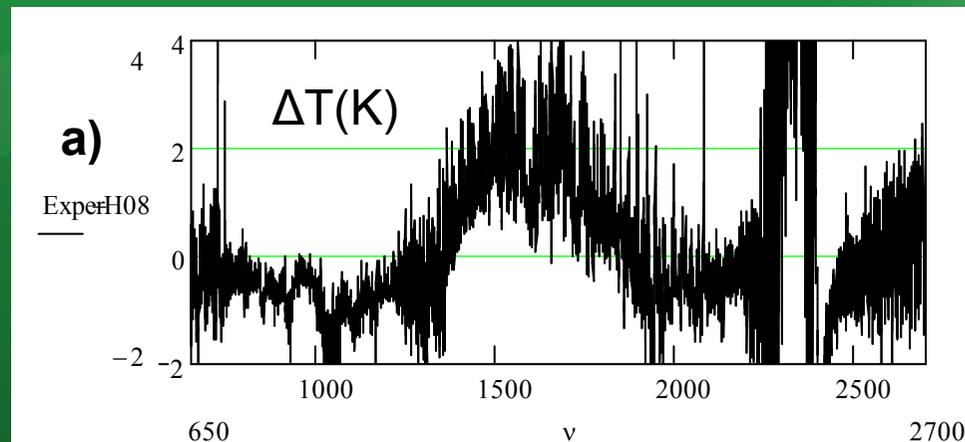
23	663.568325	1.065E-24	2.136E+00	0.07030.096	1546.83870.73-.000678	0 3 3 01
	0 2 2 01		Q 24e	3377641927 5 4 5 7	49.0 49.0	
21	663.579410	4.394E-22	1.181E+00	0.07190.099	1449.38310.71-.000649	1 1 1 02
	1 0 0 02		R 20e	5377641827 5 4 5 7	43.0 41.0	

7 параметров для расчёта $S(T)$ и $\alpha(T, P)$. Эта информация только для расчёта контура Лоренца !!!



Прогресс в базах данных и ДЗЗ

Молекула	База	Число линий
H_2O	HITRAN-08	69201
	GEISA-11	67504
	HITRAN-12	224515
CO_2	HITRAN-08	314919
	GEISA-11	413524
	HITRAN-12	471847
O_3	HITRAN-08	409686
	GEISA-11	389378
	HITRAN-12	422116
CH_4	HITRAN-08	290091
	GEISA-11	240858
	HITRAN-12	468013



a) $\Delta T = T(\text{GOSAT}) - T(\text{HITRAN2008})$
 b) $\Delta T = T(\text{HITRAN2012}) - T(\text{HITRAN2008})$
 В расчётах использован контур
 Лоренца (Фойгта)



Форма спектральных линий

«классика»

Уровни CO₂, образ.
15 мкм полосы

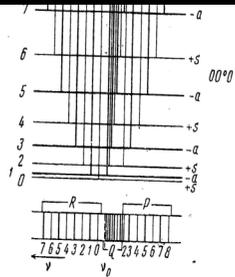
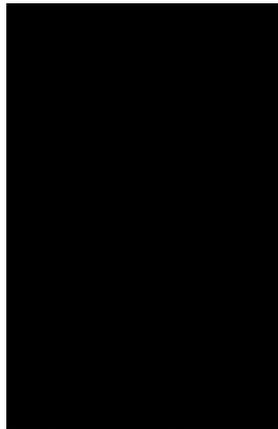
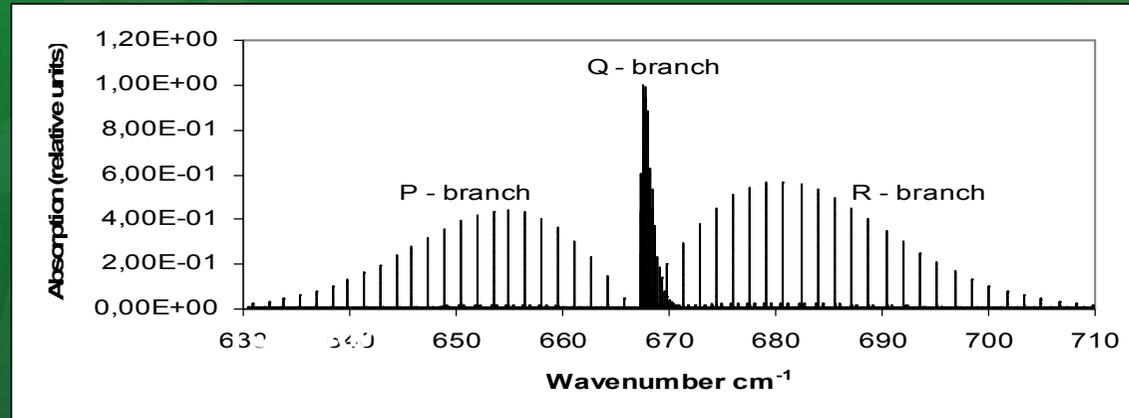


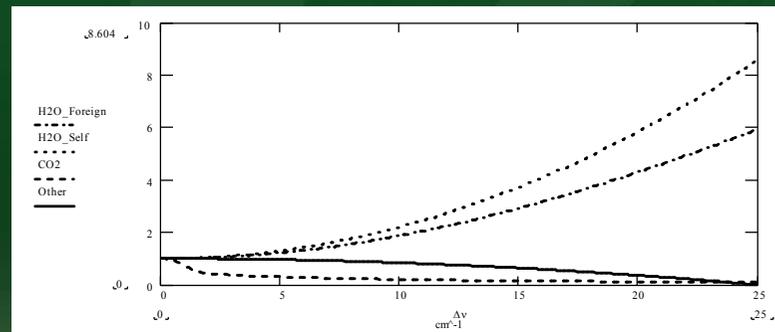
Схема уровней энергии для перехода (01¹₀) → (00⁰₀) линейной молекулы, по Герцбергу (1945).

15 мкм полоса CO₂ при низком давлении



Линия: (контур Лоренца, ±25 см⁻¹) × «форм-фактор»

Форм-факторы H₂O, CO₂ и др. в LBRTM (США)

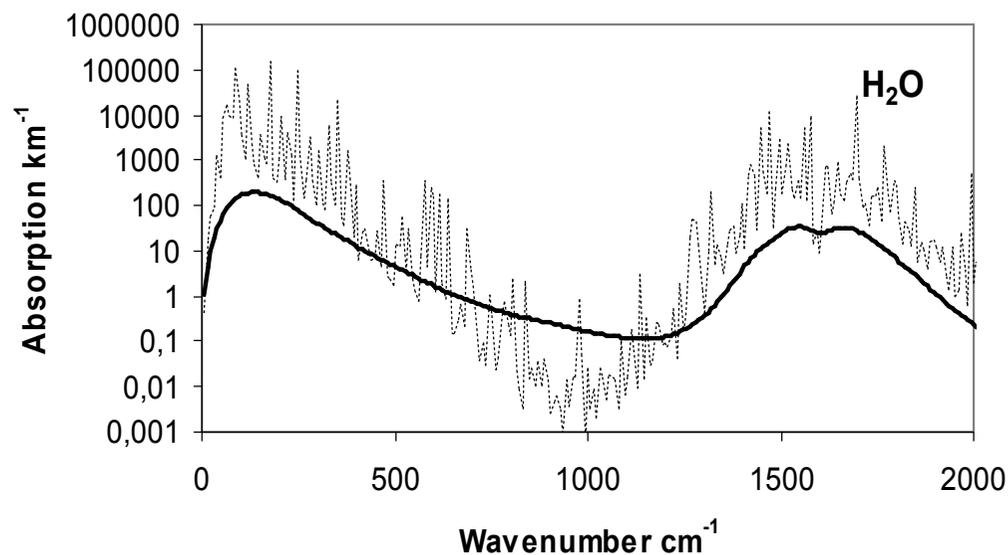


Линии и континуум

LBRTM (США)

Спектр=>Линии(ф.-ф., обрыв $\pm 25 \text{ cm}^{-1}$) + континуум.

$P=1.0 \text{ атм}$, $T=294.0 \text{ К}$, $\text{H}_2\text{O} = 4.7 \cdot 10^{17} \text{ мол}/(\text{см}^3)$



H_2O , MTCCKD model, (0-20000) cm^{-1} ;

CO_2 , (0-10000) cm^{-1} ;

N_2 , (0-350), (2085-2670) cm^{-1} ;

O_2 , (1340-1850), (7550-8486), (9100-11000),
(Herzberg, 35000-55000) cm^{-1} ;

O_3 , (Chappius-Wulf, 9000-25000),
(Hartley-Huggins, 30000-55000) cm^{-1} .

Таблицы:

H_2O , CO_2 - $\Delta\nu=10 \text{ cm}^{-1}$

=> Удовлетв. точность для теории климата и т.п., но для ДЗЗ...



Интерференция линий

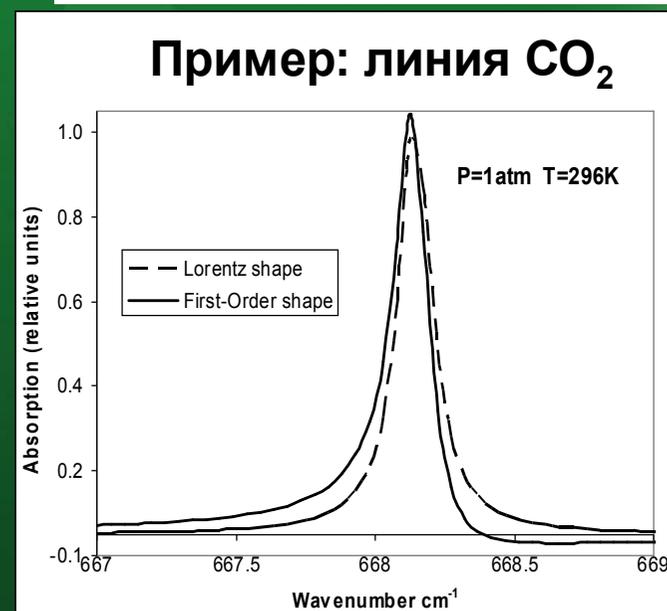
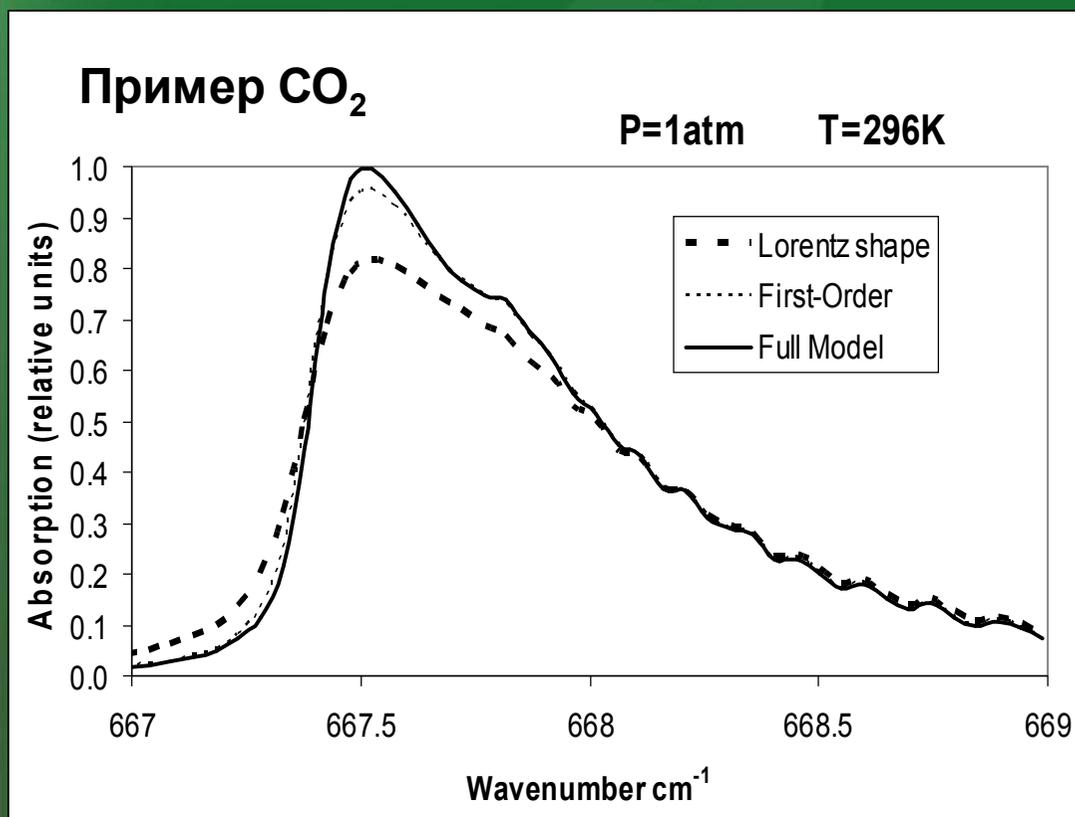
Hartmann J.M., Boulet C., Robert D. Collisional effects on molecular spectra: Laboratory experiments and models, consequence for applications. Elsevier, 2008

А) Квантовомеханическая модель (наиболее точно).

Контур =>
Розенкранца

$$f_R(\nu) = \frac{\alpha + \beta(\nu - \nu^*)}{\pi[(\nu - \nu^*)^2 + \alpha_i^2]}$$

Б) Модели 1-го приближения (быстро).



β – ещё один параметр!



Эффект Допплера

$$\alpha_D = 4.29 * 10^{-7} v^* \sqrt{\frac{T}{M}}$$

$V^* \text{ см}^{-1}$	100	1000	10000
$\alpha_D \text{ см}^{-1}$	$\sim 10^{-4}$	$\sim 10^{-3}$	~ 0.01

Но распределение молекул по скоростям не совсем максвелловское =>
Линии уже!!! (эффект Дике).

- Контур Фойгта →
- Галатри (Galatry)
 - Раутиана (Rautian)
 - Буне (Speed Dependent, Voone)

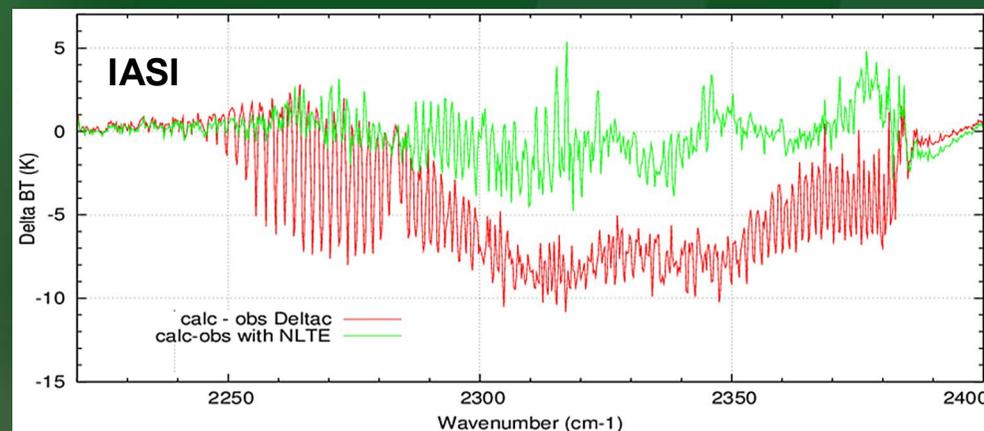
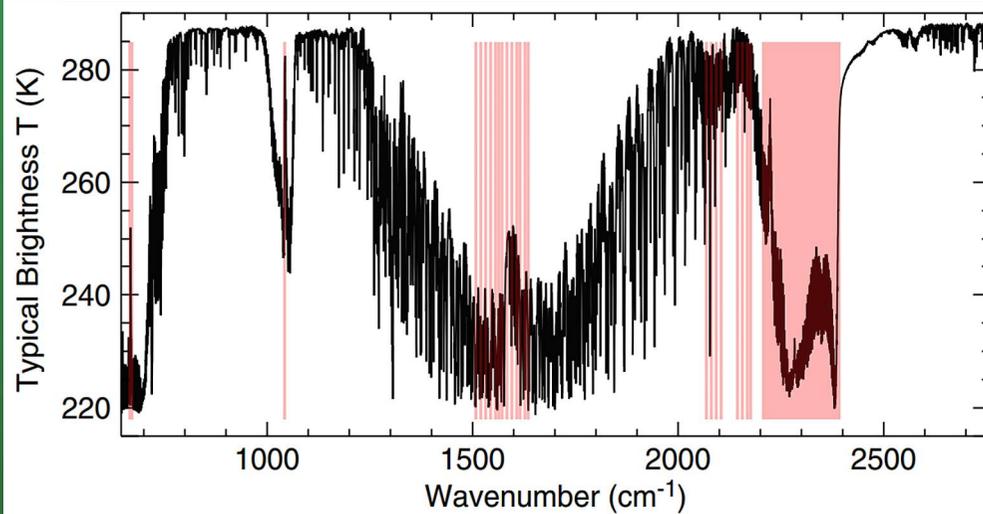
Ещё несколько
←
параметров

**В ближайшем будущем ожидается
качественное улучшение в моделировании мол. спектров!**
(Контур Фойгта)*(форм-фактор)+континуум =>
(NITRAN-201? г. и др.)
=>(Контур с учётом интерф.линий и Дике)+континуум



Нарушение ЛТР

A. Feofilov, L. Rezac, A. Kutevov and V. Capelle. Non-LTE radiative transfer in the context of infrared satellite observations of the lower atmosphere. *ISARD-2015, St. Petersburg, June 25, 2015.*



1. Примерно в 1/3 каналов IASI наблюдается нонЛТР (погрешность до 30%).
2. В оперативных целях могут быть использованы вычисления интенсивности теплового излучения программами на основе ЛТР, но с заменой $T_{кин}$ на $T_{виб}$.



Аппаратура высокого спектр. разрешения

ACE-FTS (2003-2011 г, лимб), $\sim 0,02 \text{ см}^{-1}$ (~проект «Климат» ~2019г)
 $\sim 10^{-5}$ каналов

IASI(2006-2021, надир), $\sim 0.25 \text{ см}^{-1}$, горизонтальное разрешение $\sim 25 \text{ км}$, захват 2130 км, вертикальное разрешение в профилях газов 1-30 км, точность 10%.
 $\sim 10^{-4}$ каналов

AIRS(2002-2011, надир), $\sim 0,5 \text{ см}^{-1}$, $\sim 13 \text{ км} \times 13 \text{ км}$, захват 1650 км
 $\sim 3\,000\,000$ спектров/день, каждый из которых состоял из 2 378 точек (каналов). По мнению NASA AIRS оказался одним из его наиболее успешных проектов.

(Проект AIRS + MODIS $\rightarrow 0,5 \text{ см}^{-1}$ и пиксел $1 \text{ км} \times 1 \text{ км}$)

\Rightarrow Вычислительные проблемы!!!



«Нейронные сети»

Хайкин С. Нейронные сети: полный курс. 2-е издание. Пер. с англ.-М. 2006.

Пример: Turquety S., et al. Operational ...algorithm for IASI.
J.Geoph.Res., V.109,D21301, doi:10.1029/2004JD004821,2004.

Персептрон с двумя скрытыми слоями, в каждом из которых по 8 нейронов с одинаковой передаточной функцией активации.

$$c_p = \sum_{k=1}^8 w_{pk}^3 f \left[\sum_{j=1}^8 w_{kj}^2 f \left(\sum_{i=1}^m w_{ji}^1 y_i + \sum_{i=m+1}^{i=m+l} w_{ji}^1 b_{(i-m)} + \beta_j \right) + \beta_k \right] + \beta_p^3$$

c_p – искомые концентрации озона на заданных уровнях;
 y_1, y_2, \dots, y_m -измерения в спектральных каналах IASI;
 b_1, b_2, \dots, b_l – температуры, $f(x) = \tanh(x)$.

w и β так называемые «веса» и «поправки»- более 500 чисел получаемых «тренировкой персептрона»!!!



CUDA (Comp. Unified Device Architecture)

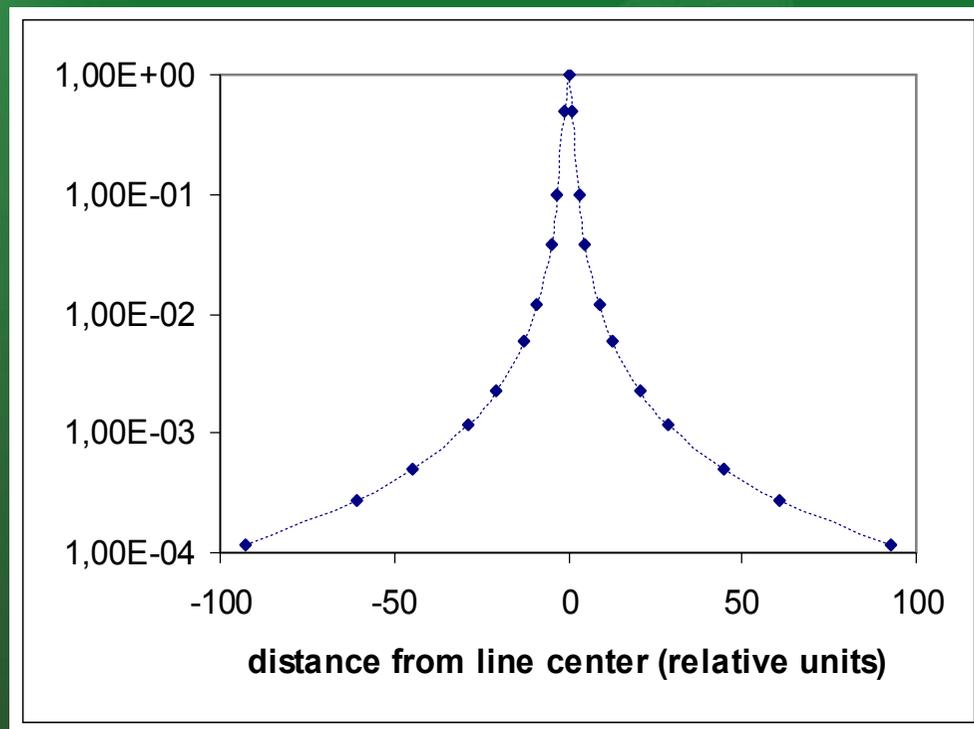
Технология CUDA разработана для программирования на современных графических процессорах GPU (Graphic Processing Units, «видеокарты»). Это позволяет на порядки увеличивать быстродействие вычислений за счёт их распараллеливания (решение уравнений переноса методами Line-by-Line, Монте-Карло, «нейронные сети» и т.п.). **Например NVIDIA Tesla K20X содержит 2688 ядер** (техника достаточно дешёвая ~100000р.).

(Рутм Г., Фатика М. CUDA Fortran для инженеров и научных работников. Москва. 2014)



«Эталонные» (line-by-line) модели

Суммирование линий : $10^5 - 10^6$ линий на сетке из $\sim 10^6$ точек!



$$K(\nu) = \sum_i k_i(\nu)$$

Fomin, B.A., Effective interpolation technique for line-by-line calculations of radiation absorption in gases, *J. Quant. Spectrosc. Rad. Transfer* 1995, 53, 663-669.

Выигрыш – 2 порядка по быстродействию!



Учёт рассеяния

Описание процесса рассеяния

Скалярная модель

$$f(\vartheta) = P_1(\vartheta)$$
$$I(\vartheta) \Delta\omega = \frac{\sigma_s}{4\pi} f(\vartheta) I_0 \Delta\omega \Delta\omega_0$$

$$\begin{pmatrix} I(\vartheta) \\ Q(\vartheta) \\ U(\vartheta) \\ V(\vartheta) \end{pmatrix} \Delta\omega = \frac{\sigma_s}{4\pi} \begin{pmatrix} P_{11}(\vartheta) & P_{12}(\vartheta) & 0 & 0 \\ P_{12}(\vartheta) & P_{22}(\vartheta) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & P_{33}(\vartheta) & P_{34}(\vartheta) \\ 0 & 0 & -P_{34}(\vartheta) & P_{44}(\vartheta) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I^0 \\ Q^0 \\ U^0 \\ V^0 \end{pmatrix} \Delta\omega \cdot \Delta\omega_0$$

Векторная модель

Yang P., et al. Spectrally Consistent Scattering, Absorption, and Polarization ... Ice Crystals...0.2 to 100 μm , J. Atm. Sciences, 70(1), 330-347, 2013.

Рекомендую метод Монте-Карло:

универсален (1D,3D) и хорошо сочетается с методом Line-by-Line!

Хорош для «ЭТАЛОННЫХ» расчётов!

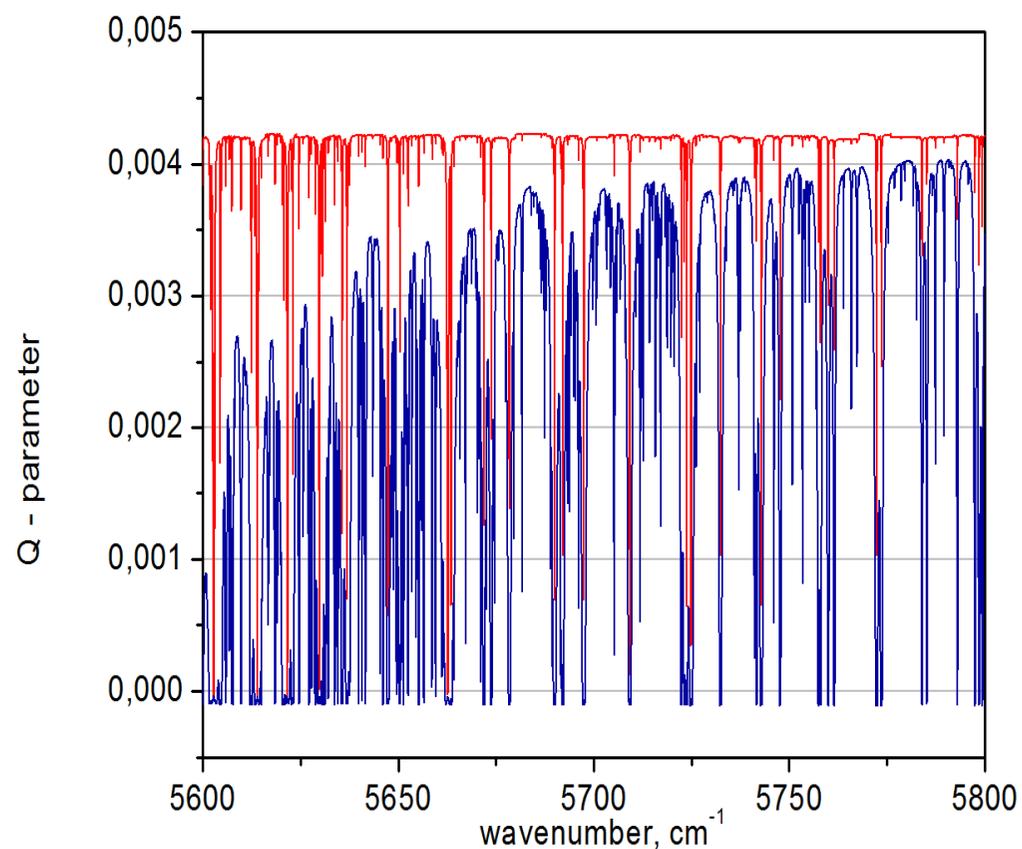
Статистические погрешности интегральных величин (e.g. потоков) почти не зависят от ширины спектр. интервала (e.g. 1 cm^{-1} или 10000 cm^{-1}) и разрешения!



Поляризация солнечной радиации

Cornet, C., C-Labonnote, L., & Szczap, F. (2010). Three-dimensional polarized Monte Carlo atmospheric radiative transfer model (3DMCPOL): 3D effects on polarized visible reflectances of a cirrus cloud. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 111(1), 174–186. doi:10.1016/j.jqsrt.2009.06.013

Fomin, B., & Falaleeva, V. (2012). A polarized atmospheric radiative transfer model for calculations of spectra of the Stokes parameters of shortwave radiation based on the Line-by-Line and Monte Carlo methods. *Atmosphere*, 3(4), 451–467. doi:10.3390/atmos3040451



Уходящая солнечная радиация (надир) -
Атмосфера + АЭРОЗОЛЬ
(0-1 km, оптич.толща
0.3262).

Красным-однородный слой;
Голубым- линейное
убывание с высотой.

Реально определять 3-4
параметра вертикальной
структуры аэрозоля если
сигнал/шум > 300 и
каналов ~100-1000
(как TANSO-FTS).

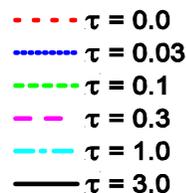
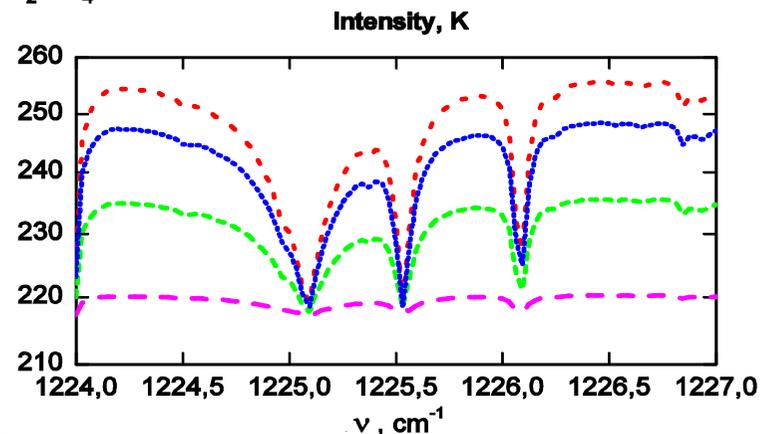


Поляризация тепловой радиации

Faucheux, T., Cornet, C., Szczap, F., Duduissou, P., 2013, Assessment of cloud heterogeneities effects on brightness temperatures simulated with a 3D Monte Carlo code in the thermal infrared, *AIP Conf. Proc.* 1531, 75; doi: 10.1063/1.4804711.

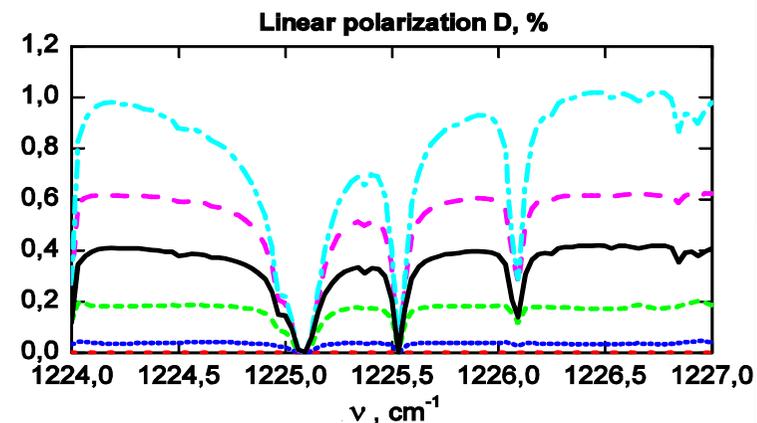
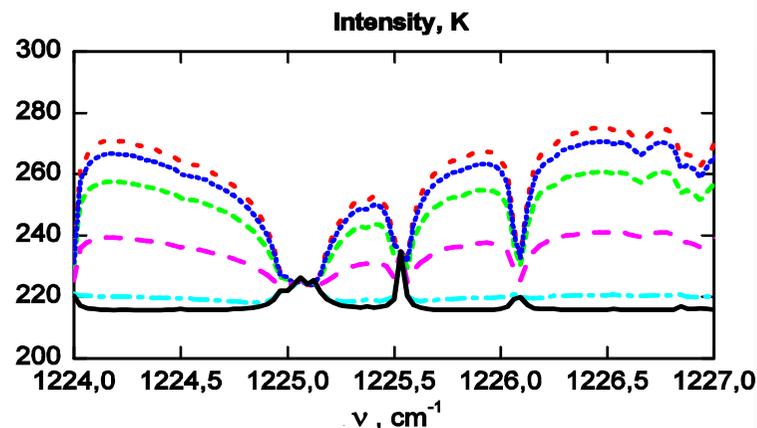
Зенитный угол 84.26°. Интенсивность I и лин. поляр. $D=Q/I$ %. (F&F,2015)

H_2SO_4 droplet cloud at 9-10 km, SAW atmosphere



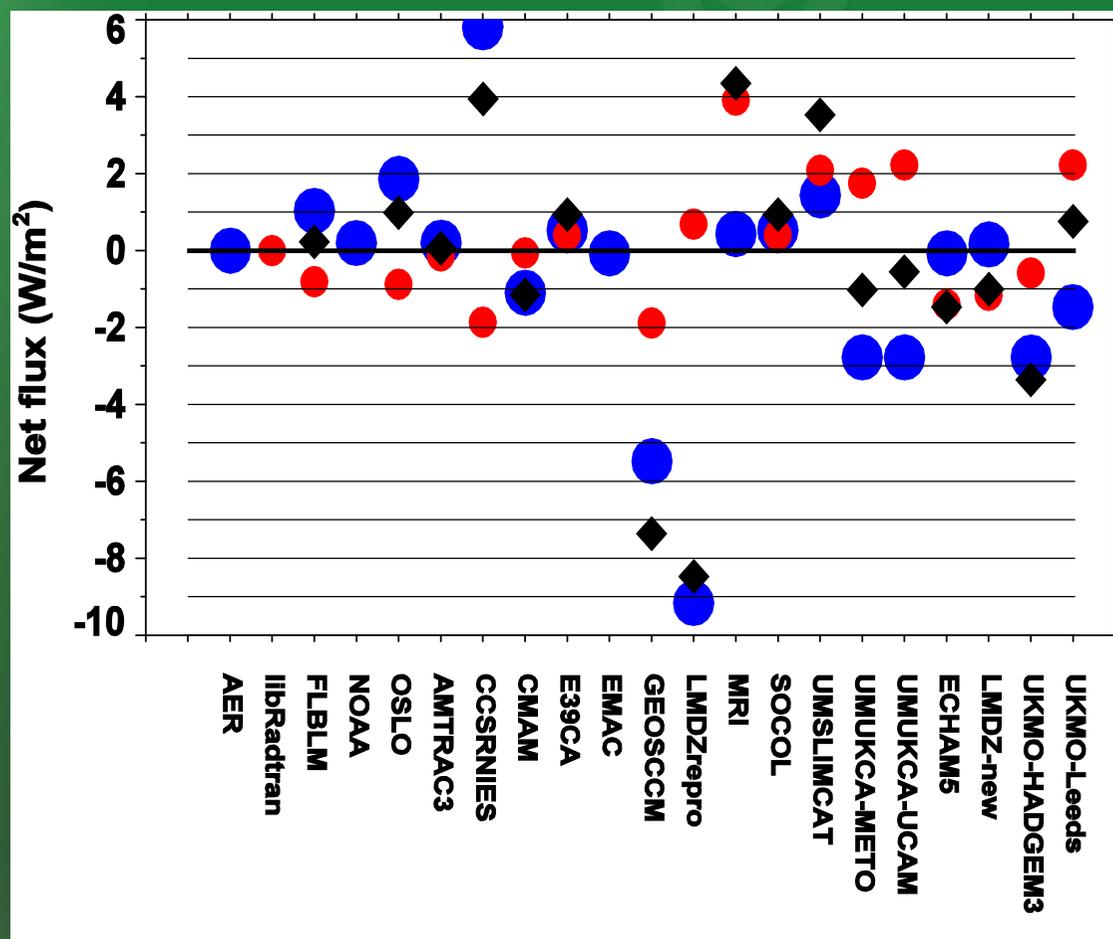
For the droplet cloud $D < 0.03\%$

Ci_{010} crystal cloud at 9-10 km, MLS atmosphere



Расчёты радиации в МОЦА

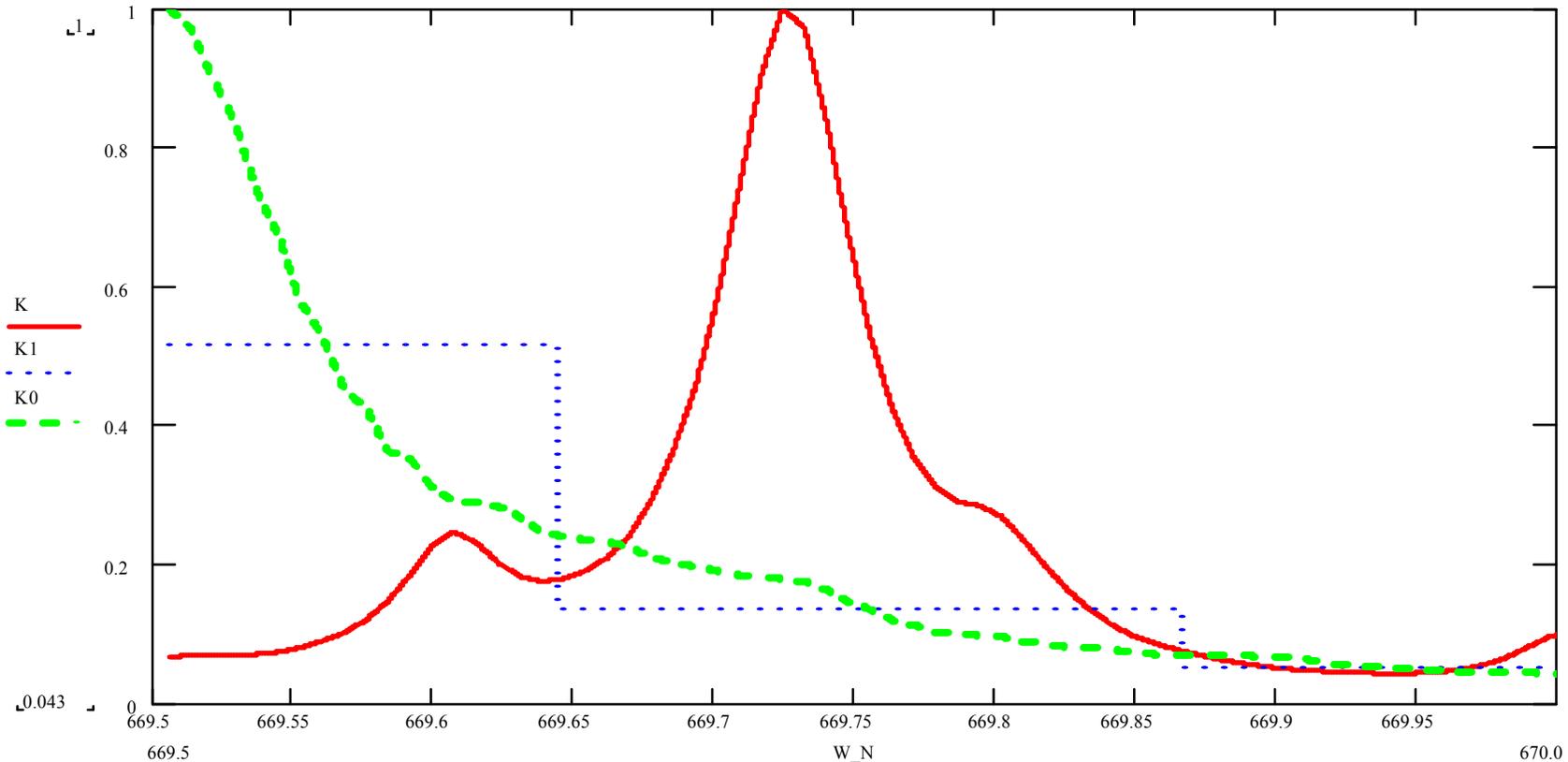
(Forster et al., Evaluation of radiation scheme performance within chemistry climate models, J.Geophys. Res.,116,D10302, doi:10.1029/2010JD015361, 2011)



Разброс в глобальных (дневных) потоках радиации: **солнечной** (красные кружки), **тепловой** (синие кружки) и **полной** (чёрные ромбики) на тропопаузе. По оси X отложены названия моделей. (Чистая, безоблачная атмосфера).



К-Метод (k-distribution)



Сглаживание спектра (sorting procedure) ведёт к потере информации о перекрывании спектров оптически активных компонентов атмосферы (газы, облачные частицы, аэрозоли)!

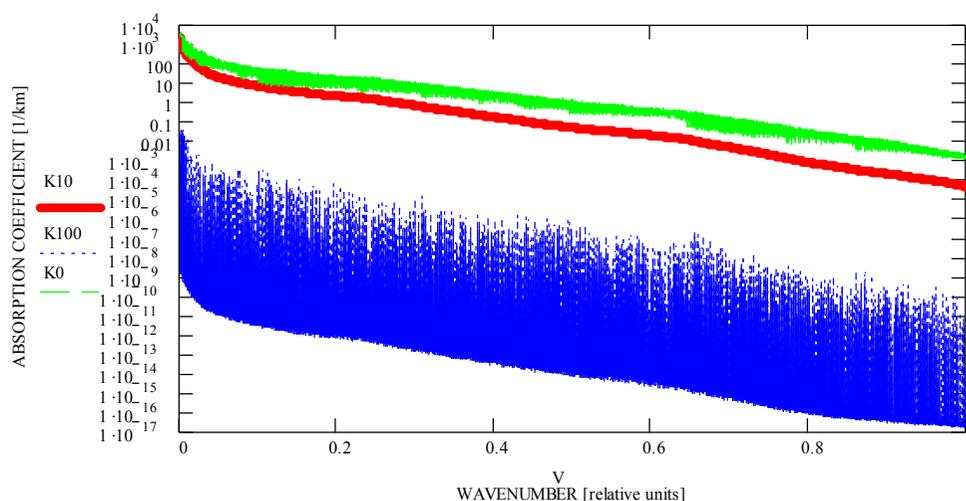


К-Метод (correlation-k)

2. Inhomogeneous atmosphere: CORRELATED-K method

[Lacis and Hansen, 1974; Wiscombe and Evans, 1977;
Lacis and Oinas, 1991]

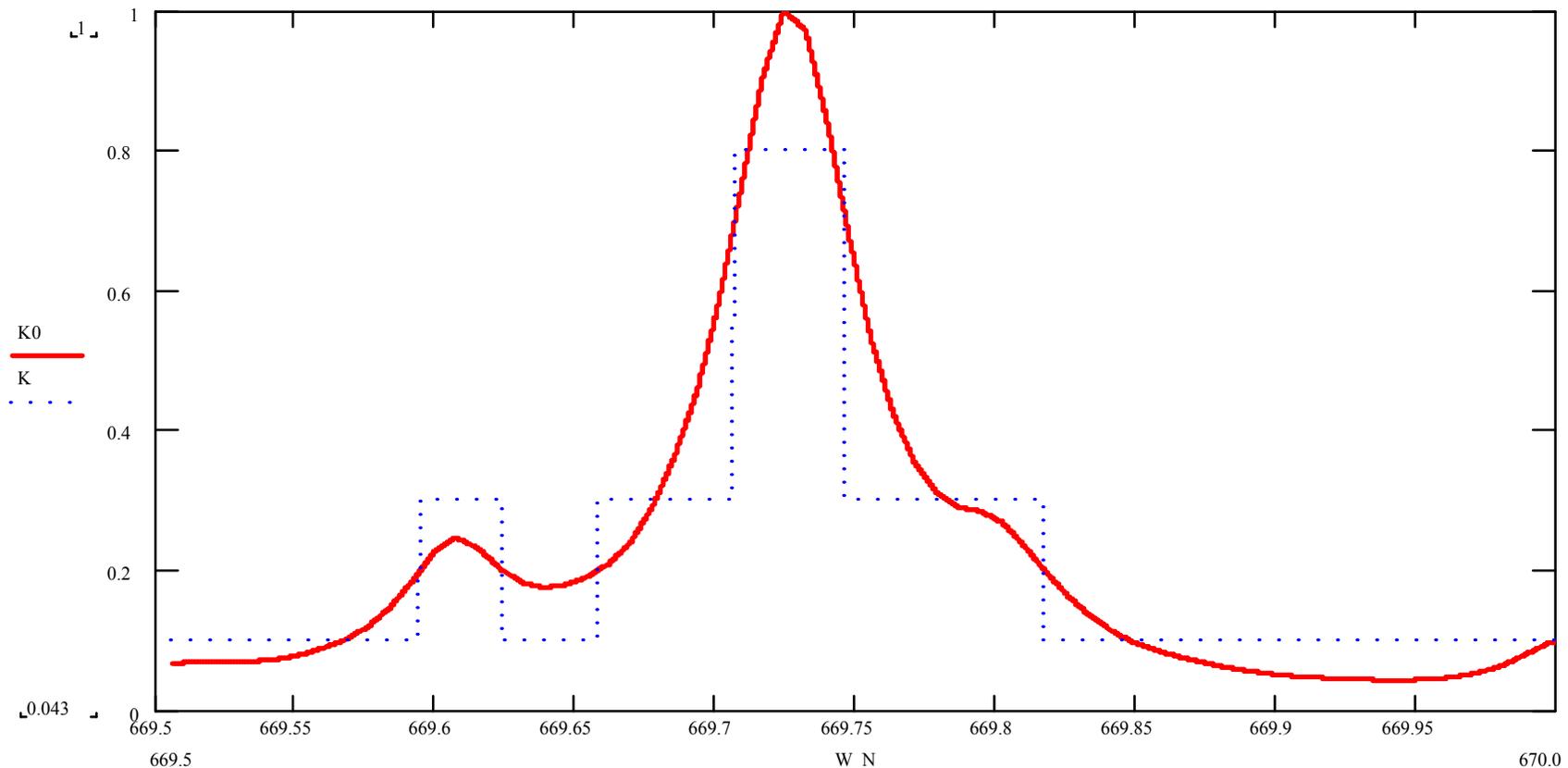
Sorting: CO₂, 550-800 cm⁻¹; Midlatitude Summer;
10 km ("base", red), 0 km (green), 100 km (blue)



“Sorting procedure” не может сгладить спектр в тропосфере и верхней атмосфере одновременно- отсюда ошибки метода К-корреляций в верхней атмосфере !



Альтернативный метод



Fomin, B.A., A k-distribution technique... for the longwave.//

J.Geophys.Res.,109, D02110, doi:10.1029/2003JD003802, 2004.

Fomin, B.A. and M.P. Correa, A k-distribution technique... for the shortwave.//

J.Geophys. Res., V. 110, D02106, doi:10.1029/2004JD005163, 2005.



Заключение

Актуальные проблемы:

1. Теория молекулярных спектров поглощения/эмиссии («интерференция линий», континуум, нон-ЛТЕ и т.п.);
2. Моделирование атмосферной радиации («Line-by-Line» и «k-distribution», рассеяние частицами, 3D, поляризация);
3. Нейронные сети, CUDA.

В настоящее время начинается реализация проекта «Климат»-установка на МКС ИК спектрометра с разрешением 0.02 см^{-1} . Участники проекта крайне заинтересованы в сотрудничестве!!!

! ----- Start of a new trajectory -----