

Мониторинг парниковых газов с помощью гетеродинного спектрорадиометра ближнего ИК диапазона

А. Ю. Климчук^{1,2}, А. И. Надеждинский², А.В. Родин^{1,3},
М. В. Спиридонов², Д.В. Чурбанов¹



¹Московский физико-технический институт

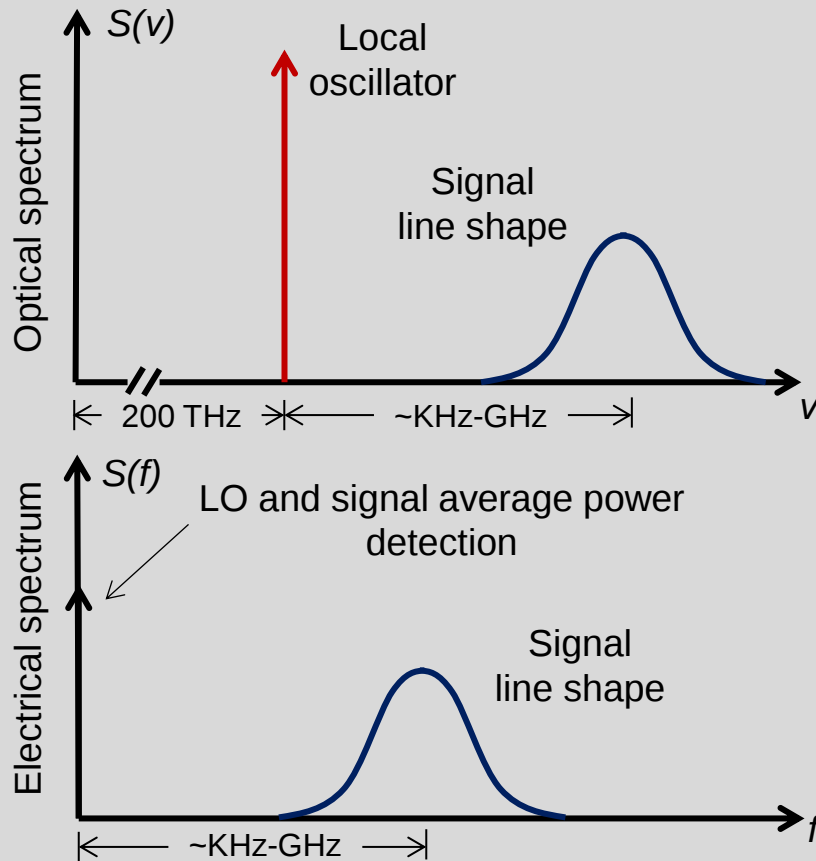


²Институт общей физики РАН им. А.М. Прохорова



³Институт космических исследований РАН

Принципы гетеродинирования:



Ширина спектра принимаемого излучения
 $\gg$ полоса фотодетектора

Жесткие условия согласования фронтов

Напряженность поля ЛО:

$$E_{lo} = E_{lo} \exp[-i\omega_{lo}t]$$

Напряженность поля
источника:

$$E_s = \int_0^{\infty} E_{\omega} \exp[-i\omega t] d\omega$$

Фототок:

$$i = K |\vec{E}_{lo} + \vec{E}_s|^2 = K [E_{lo}^2 + [E_{lo}E_s^* + E_{lo}^*E_s] + |E_s|^2]$$

$$[\vec{E}_{lo}\vec{E}_s^* + \vec{E}_{lo}^*\vec{E}_s] = \int_0^{\infty} E_{lo}E_{\omega} \exp[-i(\omega_{lo} - \omega)t] d\omega + KC$$



✓ Гетеродинный прием переносит сигнал
из высокочастотной области в
низкочастотную

✓ Электрический сигнал в стат. смысле не
отличается от собственного шума системы

$$\checkmark \Omega S \approx \lambda^2$$

Почему плохо работать в ближнем ИК

Отношение Сигнал-Шум при измерениях NADIR



Излучения
черного тела:

$$I(\lambda) = \frac{2hc}{\lambda^3 \exp \frac{hc}{\lambda kT} - 1}$$

Сигнал:

$$S(\lambda) = 1/2 I(\lambda) \lambda^2 = \frac{hc}{\lambda \exp \frac{hc}{\lambda kT} - 1}$$

Шум:

$$N(\lambda) = h \frac{c}{\lambda}$$

Сигнал/Шум:

$$SNR = \frac{1}{\exp \frac{hc}{\lambda kT} - 1}$$

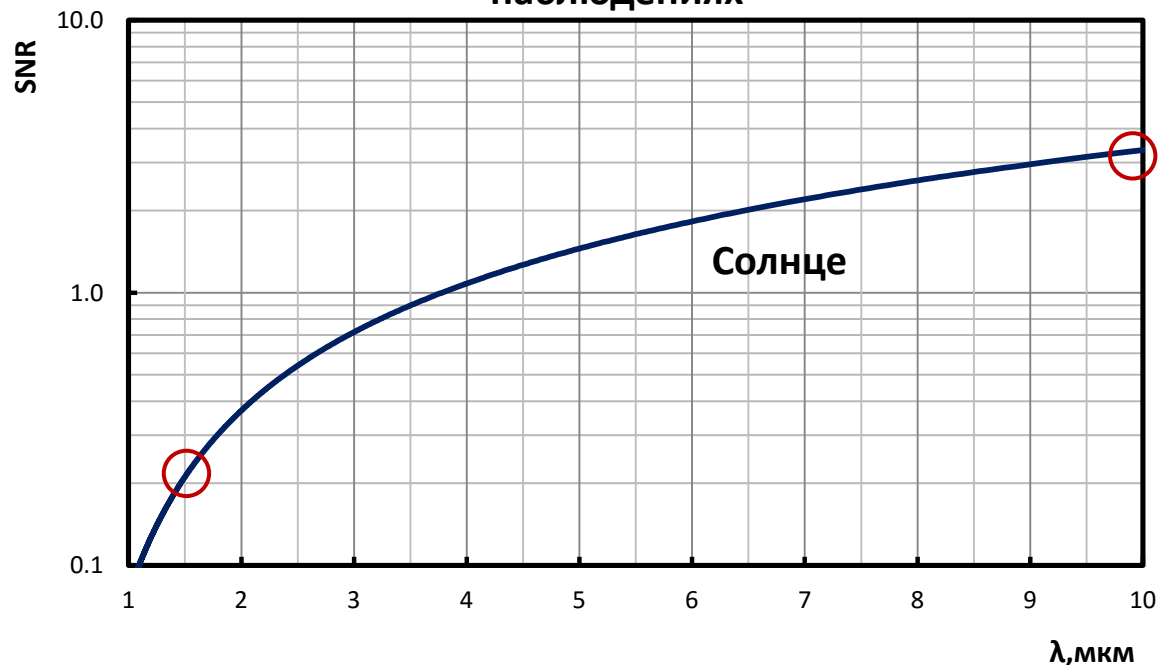
$$\frac{SNR_{10\mu}}{SNR_{1,5\mu}} \sim 6700$$

Вывод:

При астрономических наблюдениях необходимо работать в среднем ИК

Или не так плохо?

Отношение Сигнал-Шум при затменных
наблюдениях



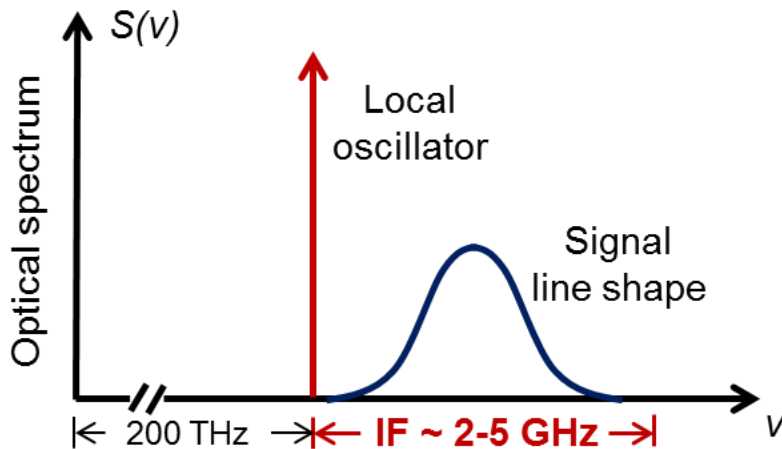
$$\frac{SNR_{10\mu}}{SNR_{1,5\mu}} \sim 15$$

Вывод:

При затменных наблюдениях достаточно удобно работать в ближнем ИК.
Проигрыш в 15 раз компенсируется другими плюсами разработанного приемника

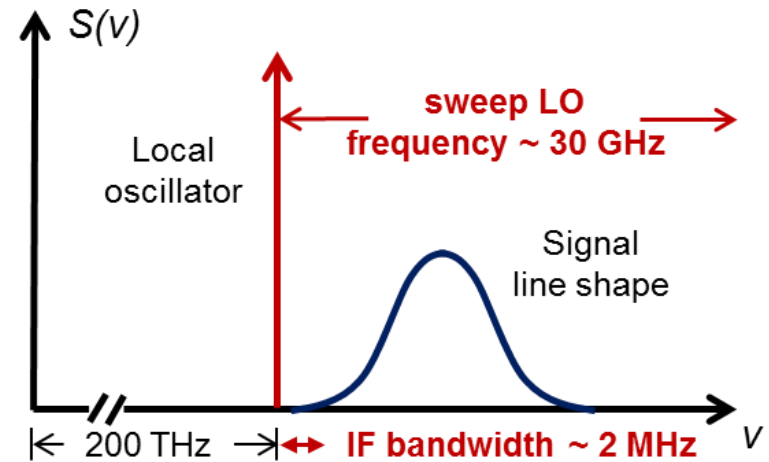
Основная идея:

Общепринятый подход:



- Постоянная частота гетеродина
- Широкая полоса ПЧ

Наш подход:

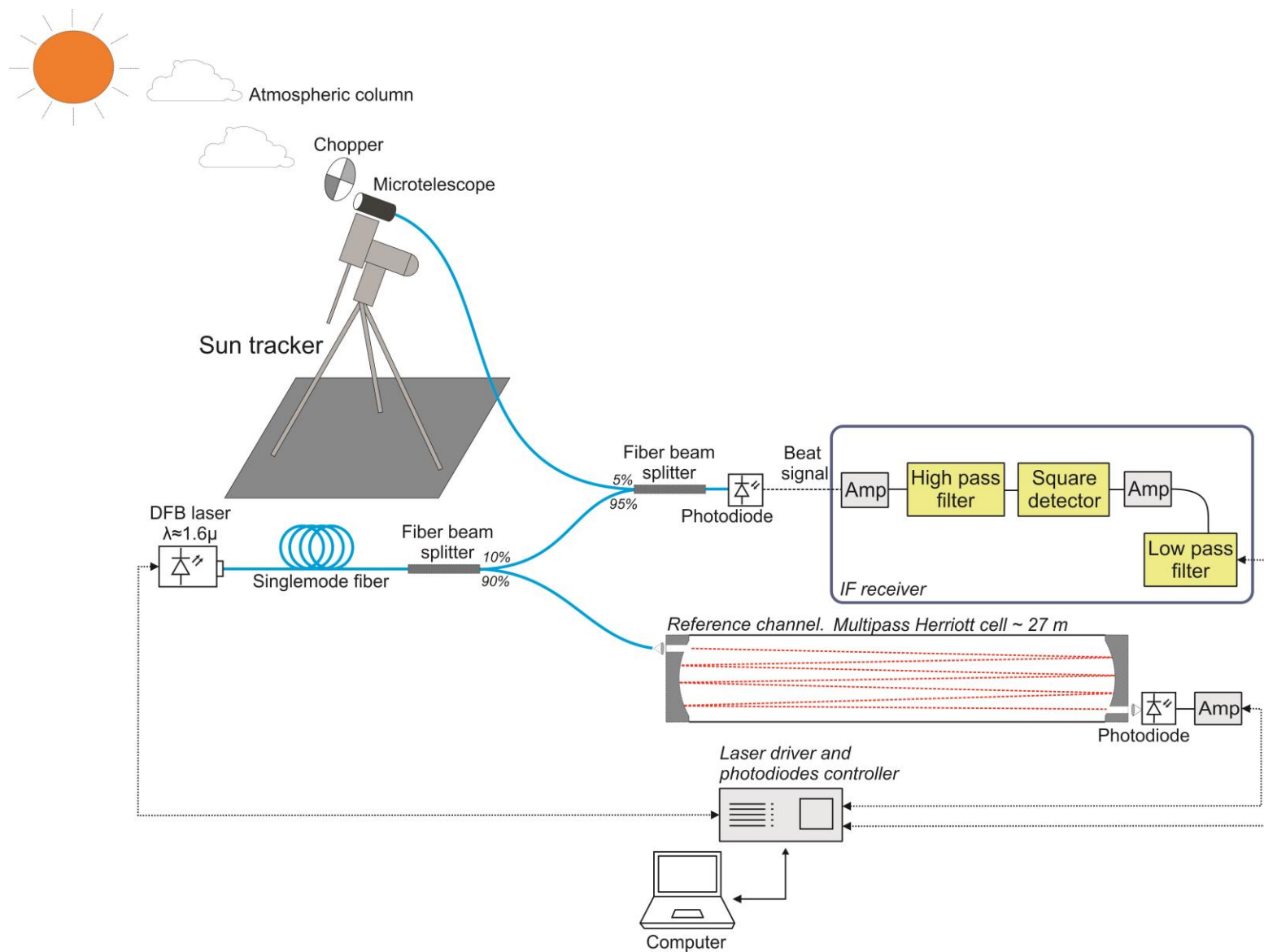


- Сканирование частоты гетеродина
- Узкая полоса ПЧ

Преимущества:

- Не требуется анализатора спектра промежуточных частот
- Широкий спектральный диапазон
- Детектирование на пределе дробового шума

Оптическая схема:

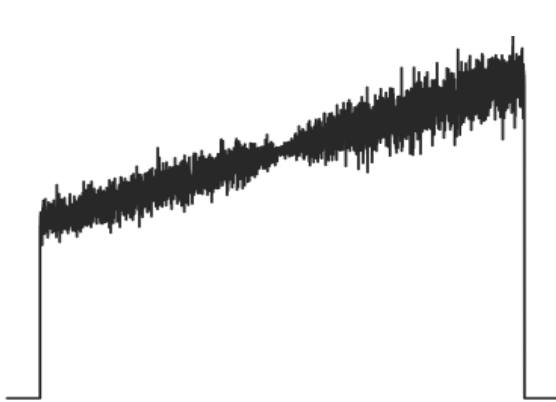


Внешний вид:

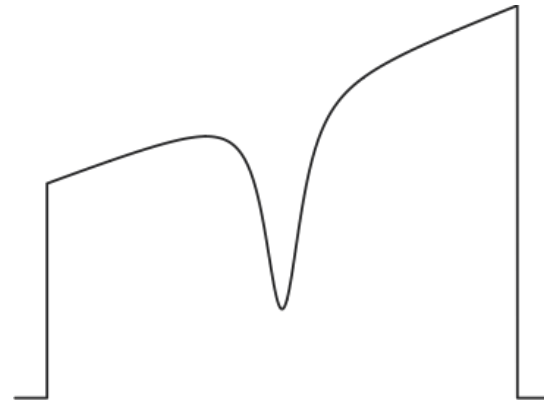


Гетеродинный сигнал:

1.

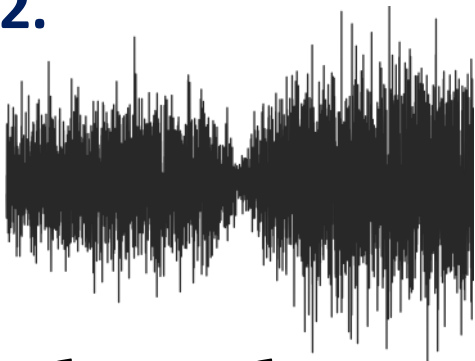


гетеродинный
спектрометр



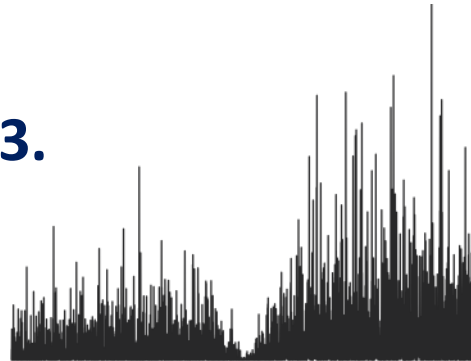
спектрометр
прямого поглощения

2.



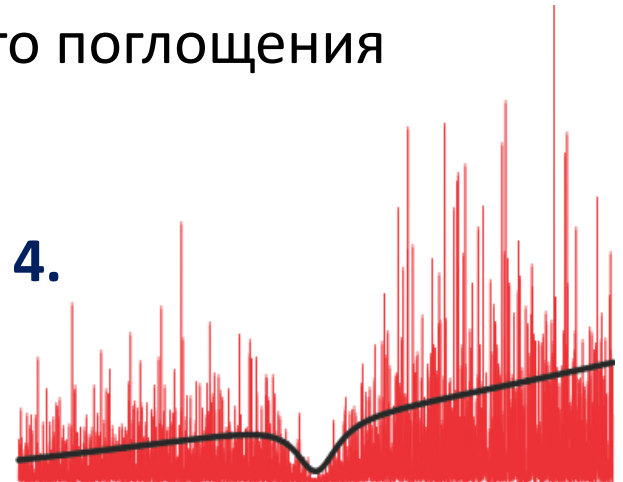
убрать «базовую
линию»

3.



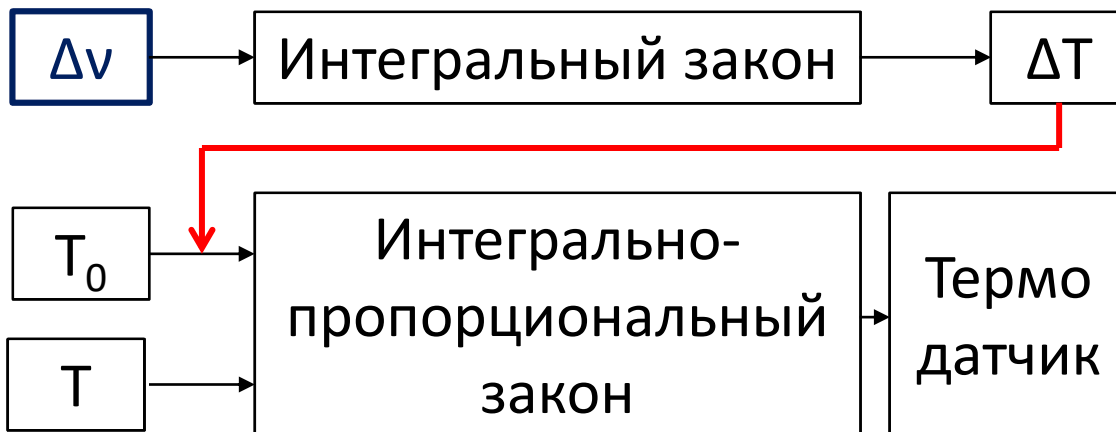
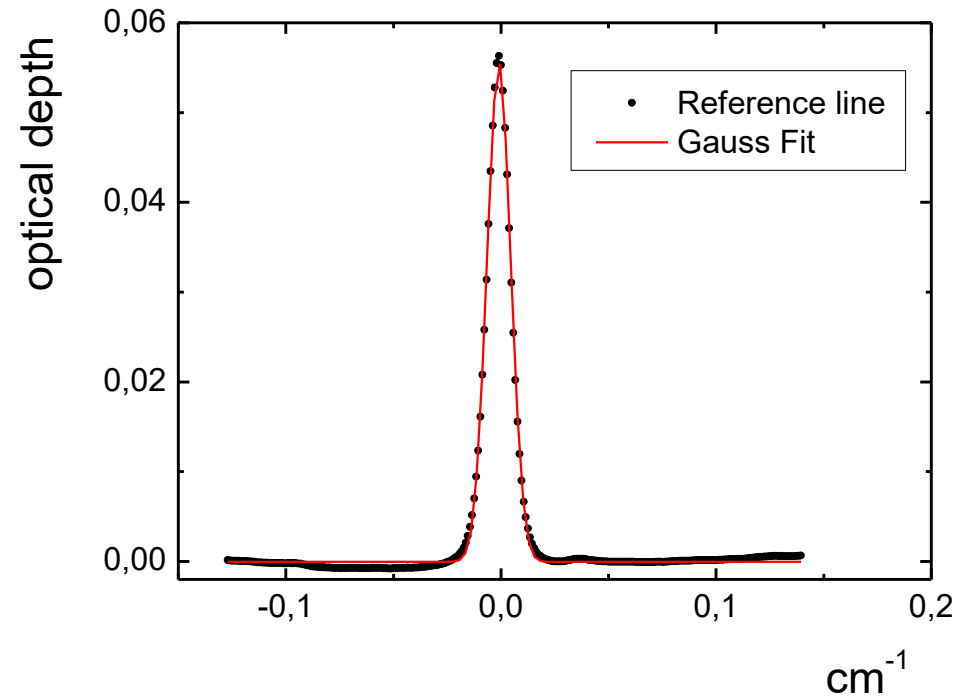
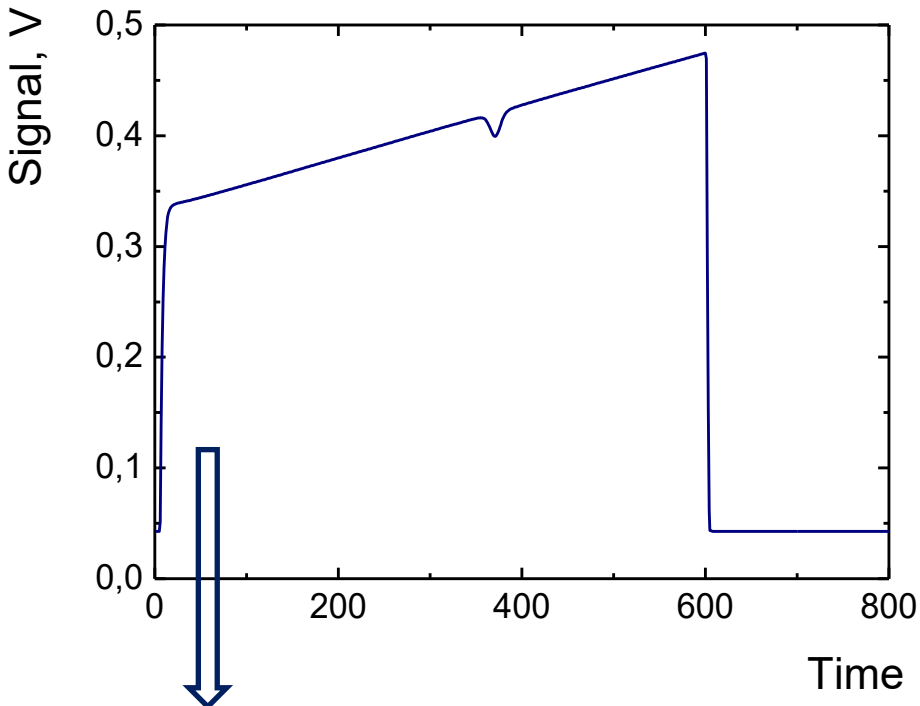
возвести в квадрат

4.



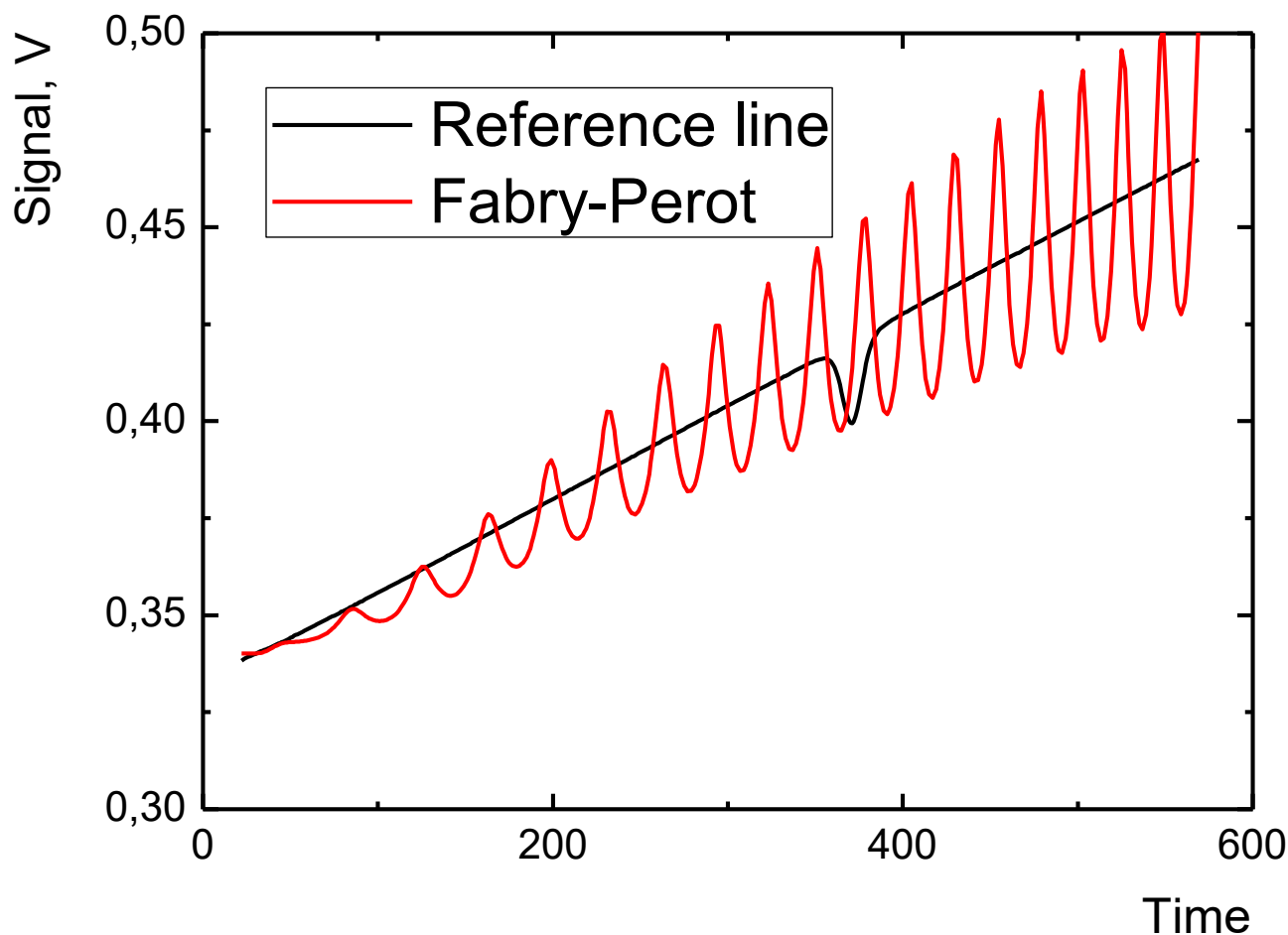
сгладить и накопить

Реперный канал:



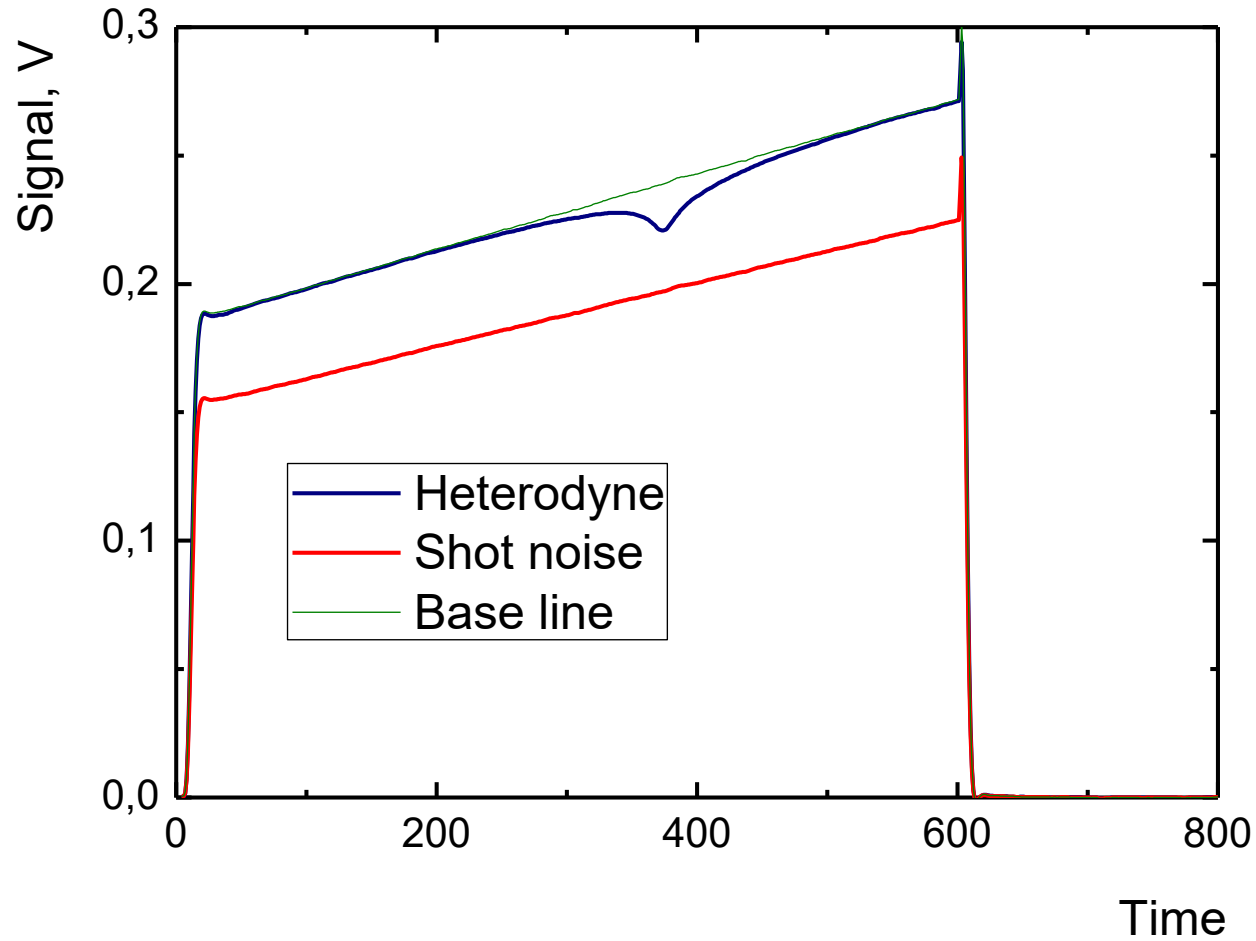
$$\nu_{center} = (1,34 * 10^{-3} \pm 0,07 * 10^{-3}) \text{ см}^{-1} \\ \sim 2,1 \text{ МГц}$$

Калибровка частоты:



- Относительная калибровка осуществляется интерференции в эталоне Фабри-Перо
- Абсолютная калибровка осуществляется по известному центру линии поглощения в реперном канале

Raw dates:



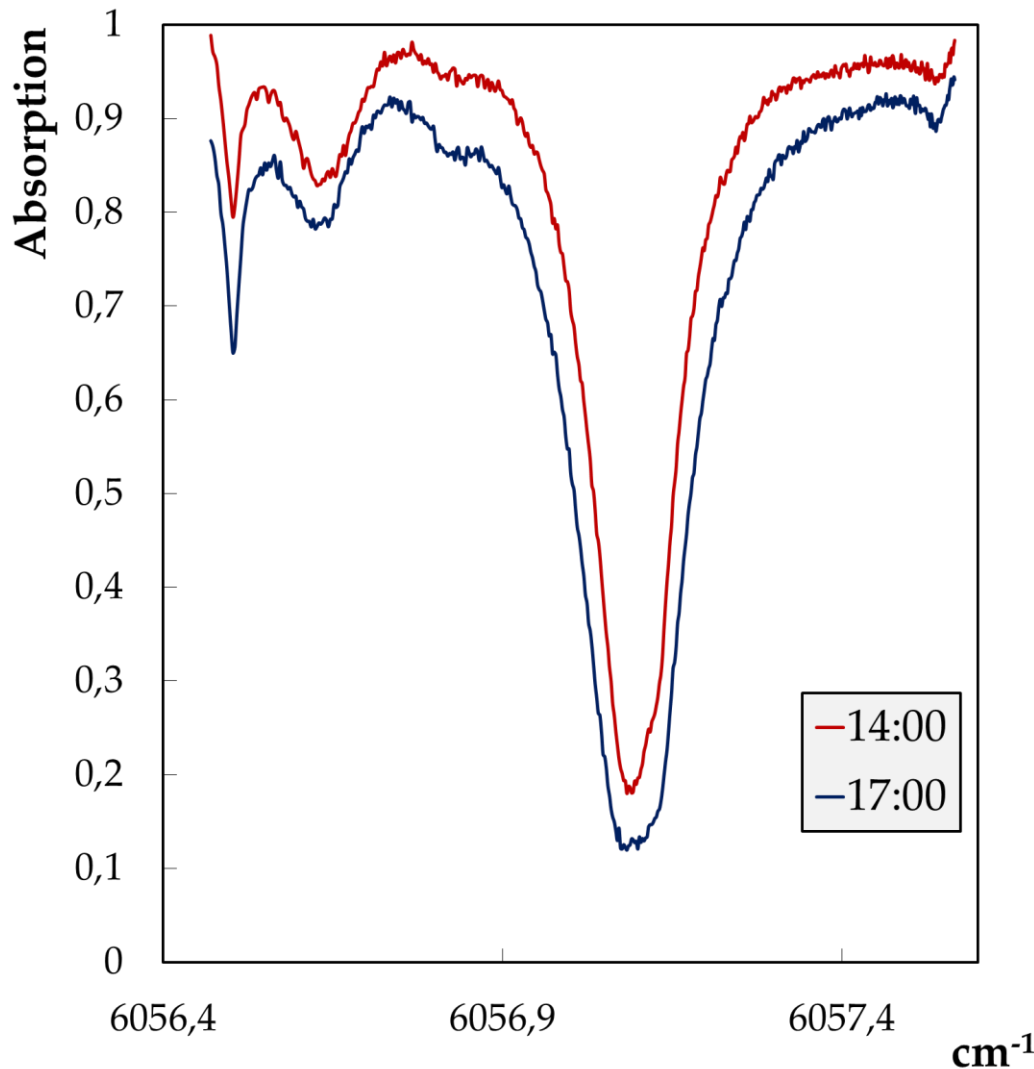
Optical zero (K)

Heterodyne signal from Sun (H)

Base line (I_0)

$$T = \frac{I_0}{H - K}$$

Измерение метана в столбе атмосферы



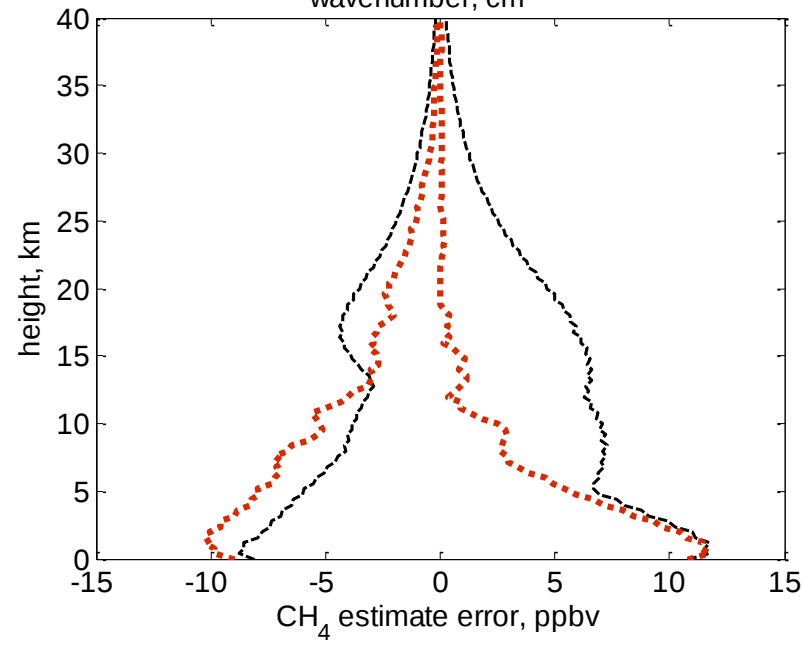
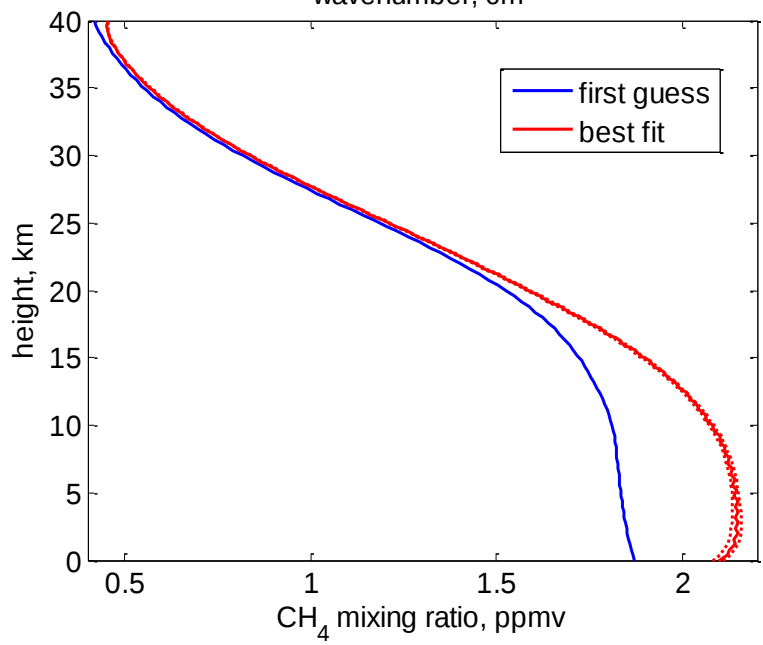
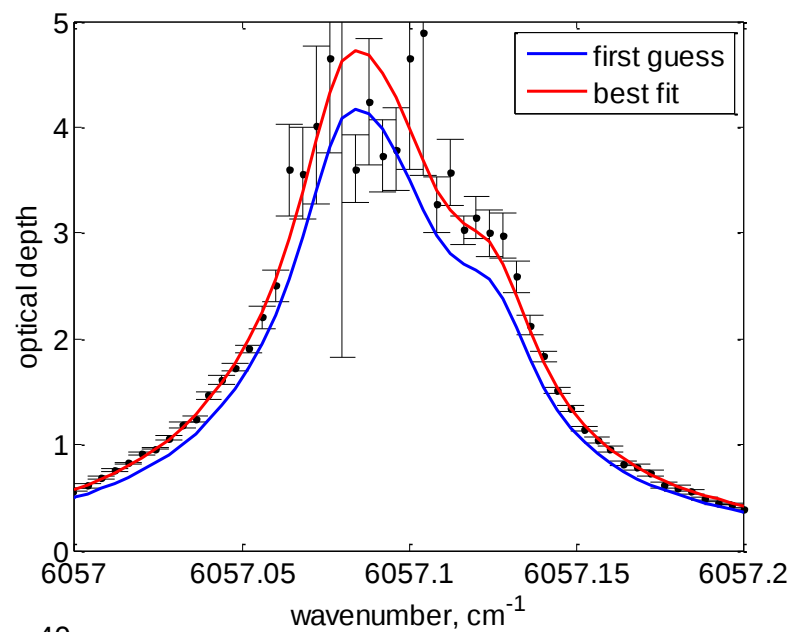
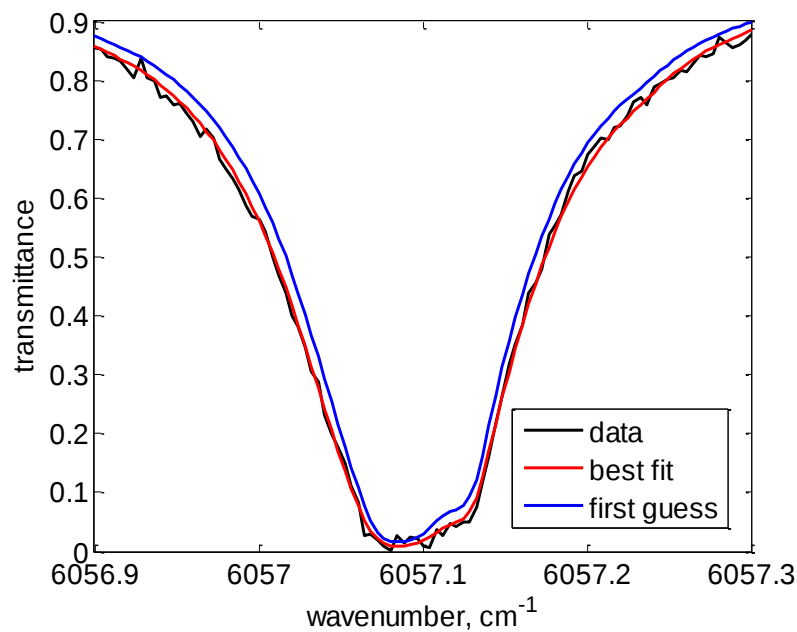
The inverse problem of methane mixing ratio profile retrieval can be expressed using the equation

$$\int_0^{z_{top}} K_h(\nu, z) \rho_{CH_4}(z) dz = \tau_\delta(\nu), \quad \nu \in [\nu_0, \nu_1]$$

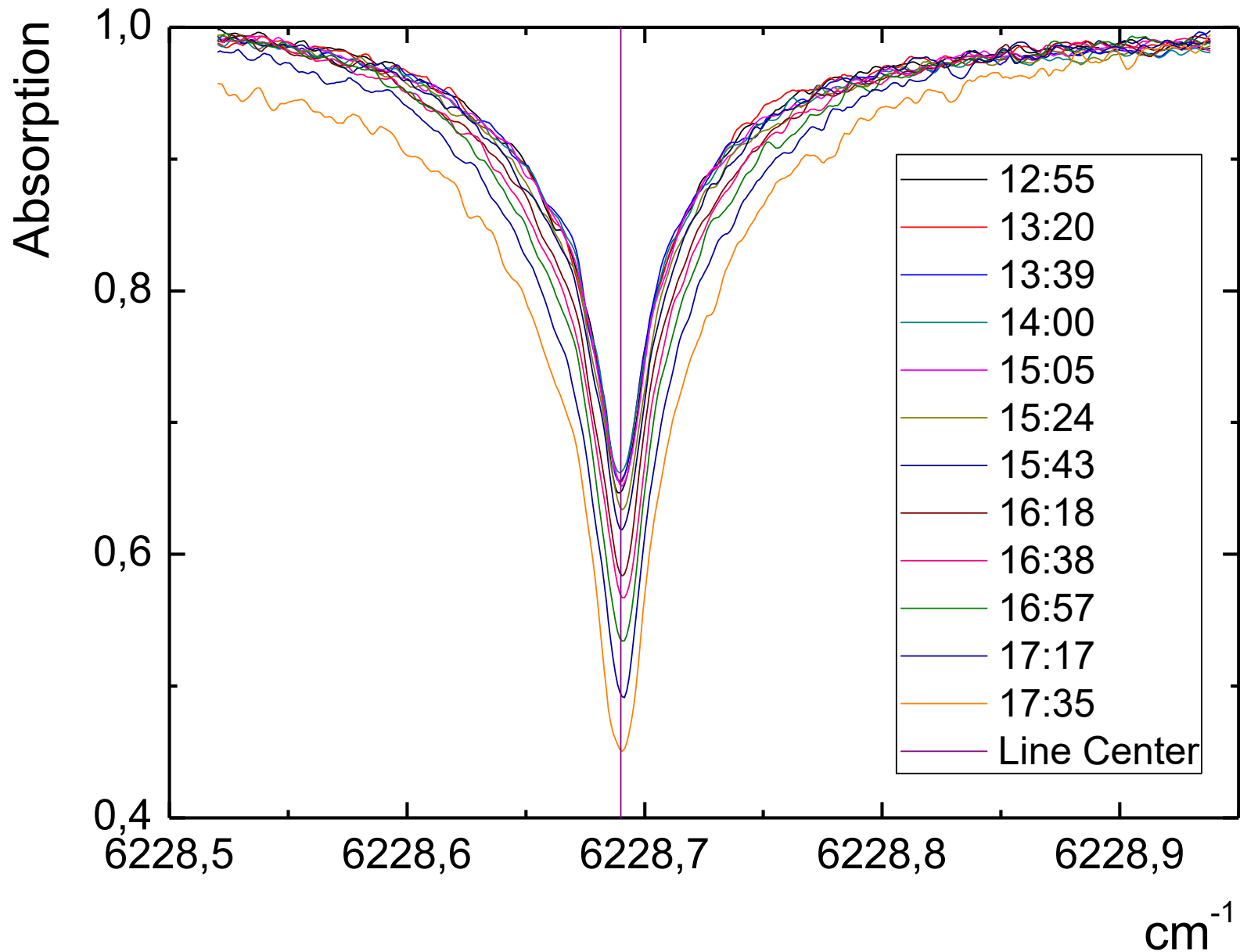
Where $\tau_\delta(\nu)$ is the optical depth calculated from the measured transmittance. $K_h(\nu, z)$ is the absorption kernel, i.e. the product of molecular absorption crosssection of methane for IR radiation frequency ν within the spectral range of the instrument $[\nu_0, \nu_1]$ and air number density at specified altitude z . The parameters h and δ refer to uncertainty of the absorption kernel K and the measured opacity τ respectively.

We retrieved methane vertical profile using Tikhonov method of smooth functional, which takes into account *a priori* information about first guess profile.

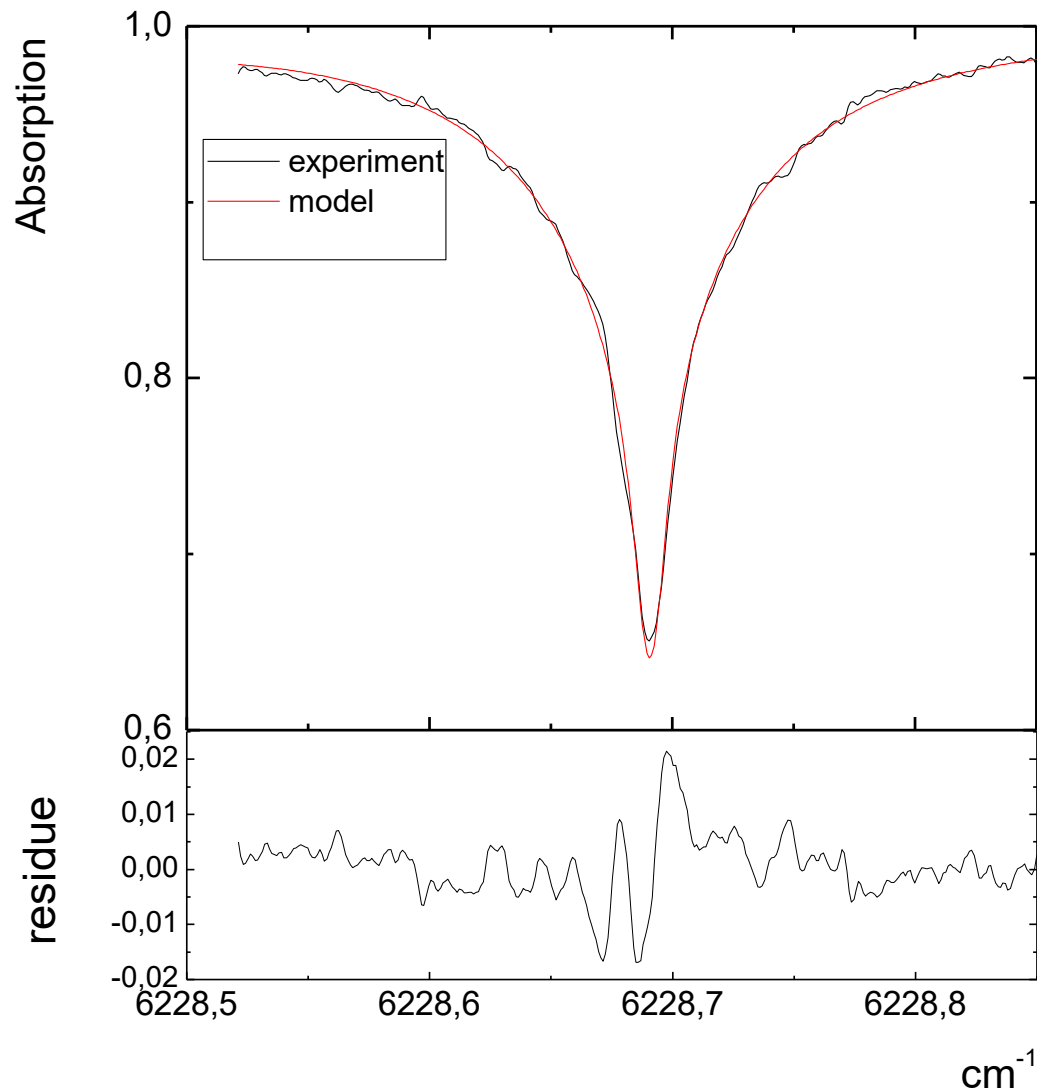
Восстановление вертикального профиля



Линия поглощения CO₂ в атмосфере:



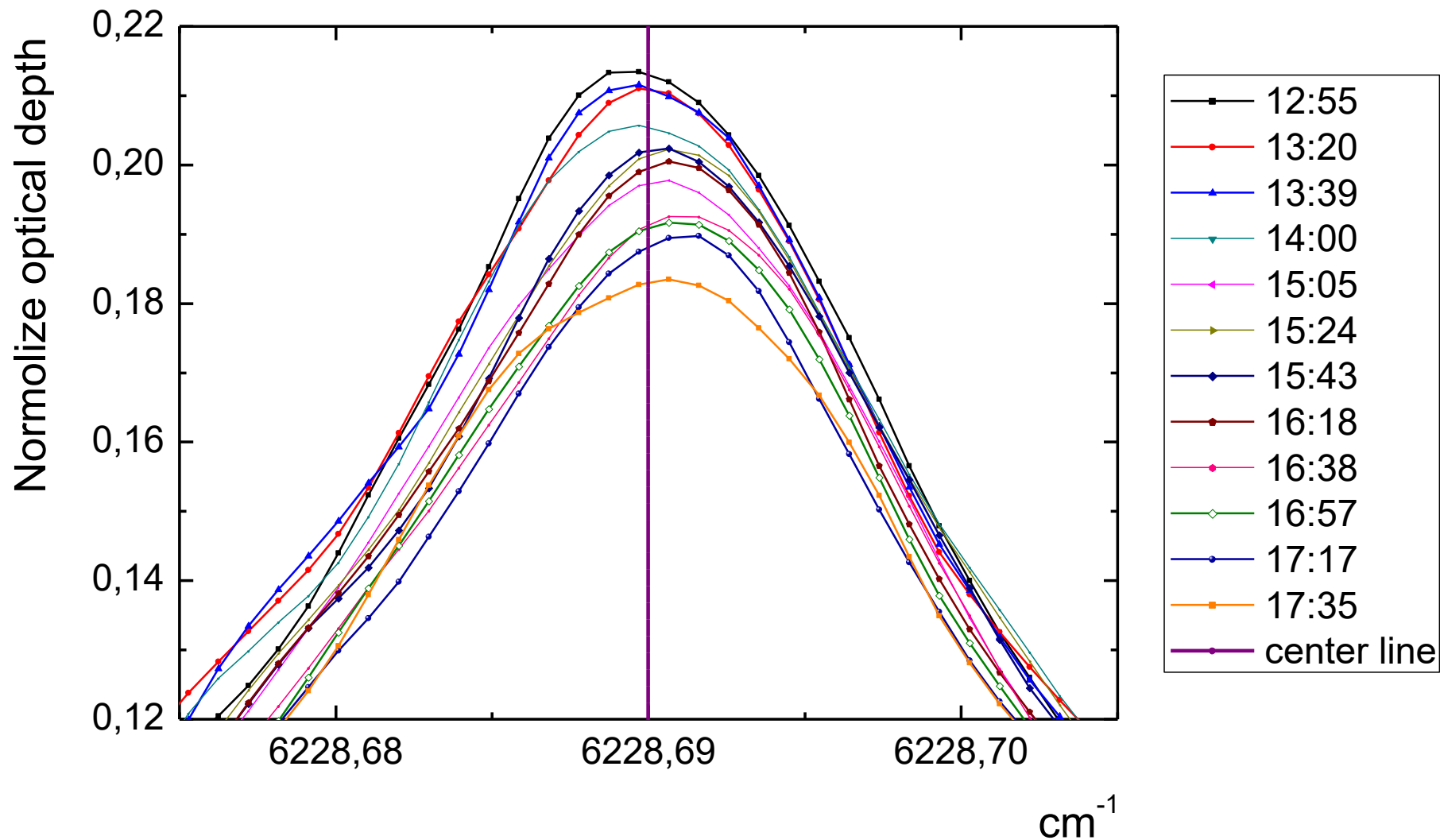
Восстановление концентрации



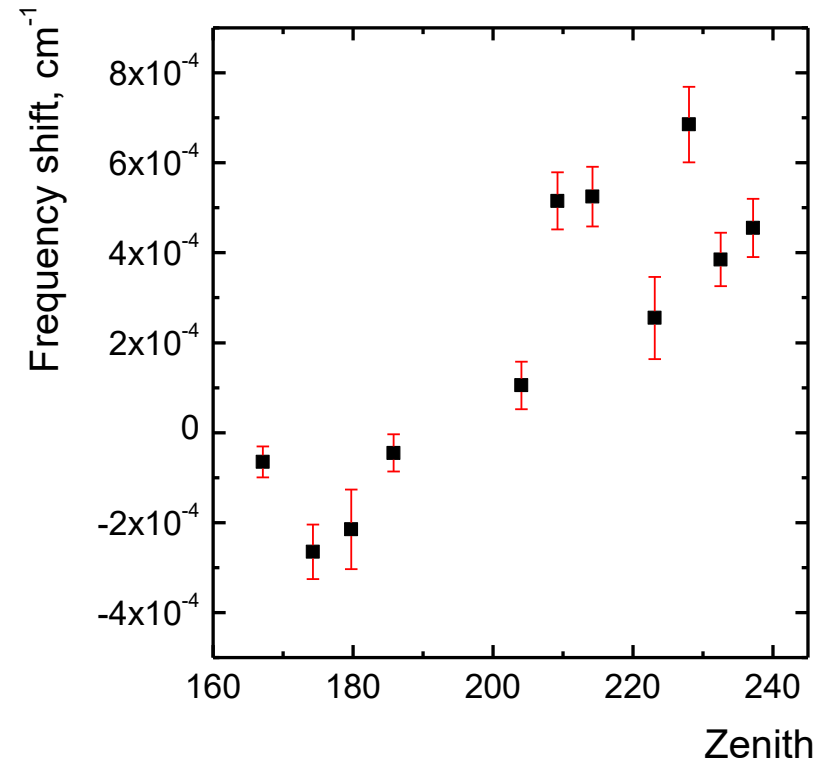
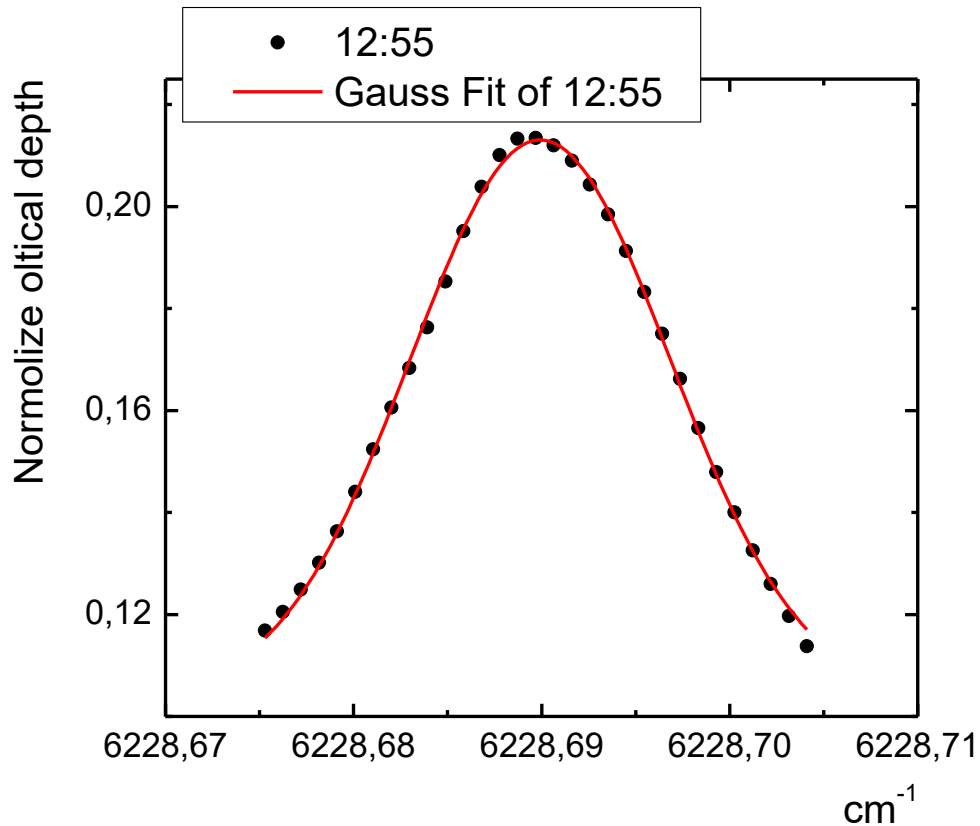
SNR~170

405,1 ppm $\pm$ 2,2 ppm

Сдвиг центра линии поглощения:



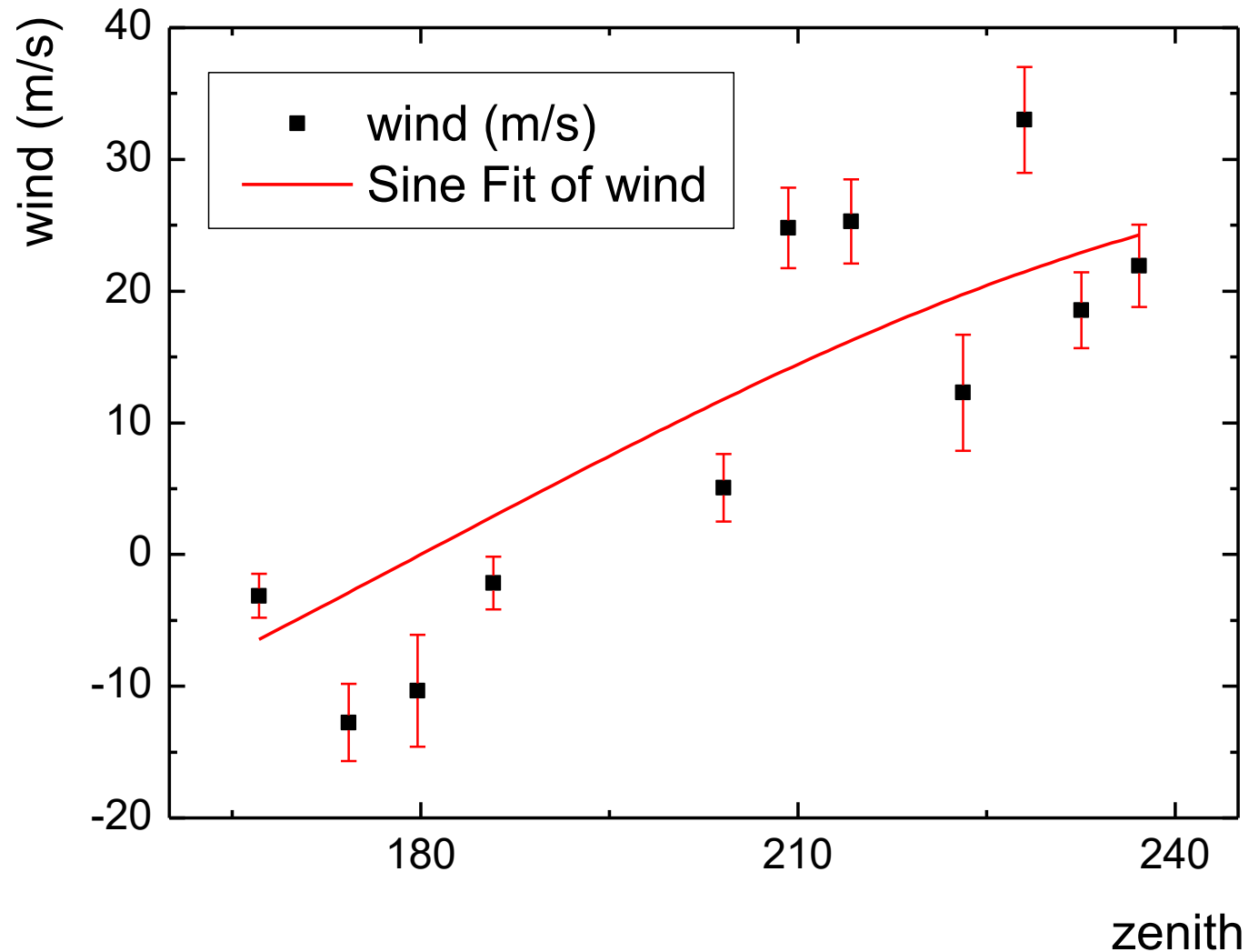
Определение центра линии:



Смещение центра линии поглощения согласно
Доплеру:

$$\Delta k = \frac{(\vec{k}, \vec{V})}{c}$$

Восстановление ветра:



$$V_{zon} = 28,9 \pm 4,7 \text{ м/с}$$

Выводы

1. Измерен метан в атмосфере
2. Восставлен вертикальный профиль метана
3. Измерен спектр поглощение углекислого газа в атмосфере
4. Определен стратосферный ветер