Чувствительность уходящего длинноволнового потока к вариациям характеристик подстилающей поверхности

выполнила студентка 551 гр.
Кравченко Р.В.
Научный руководитель
д.ф.-м.н., проф. Лагутин А.А.

Актуальность работы

В связи с антропогенными факторами на планете Земля, в последние годы наблюдается дисбаланс между приходящим и уходящим потоками. И для дальнейшего прогнозирования поведения системы <<подстилающая поверхность - атмосфера>> необходимо знать и наблюдать за вариацией основных параметров подстилающей поверхности и атмосферы.

Цели и задачи

Цель

- Исследование чувствительности потока уходящего длинноволнового излучения к вариациям температуры и коэффициента излучения подстилающей поверхности (ПП) с использованием данных спутниковых наблюдений.

Задачи

- Определить, как влияют на поток вариации температуры и коэффициента излучения ПП.
- Поиск наиболее чувствительных частотных интервалов.

Распространение электромагнитного излучения в атмосфере Земли

Безоблачная атмосфера

$$L_{CLR}(\nu,\Theta) = \varepsilon_s(\nu)B(\nu,T_s)\tau(\nu,p_s \to 0,\Theta) + \int_{p_s}^{0} B(\nu,T(p))\,\frac{d\tau(\nu,p \to 0,\Theta)}{d\ln p}\,d\ln p,$$

где $\varepsilon_s(\nu)$ – коэффициент излучения подстилающей поверхности (ПП);

$B(\nu,T_s)$ – функция Планка;

T_s и p_s – температура и давление ПП;

$\tau(\nu,p \to 0,\Theta)$ – функция пропускания атмосферного слоя.

Функция пропускания атмосферы

$$\tau(\nu, p \to 0, \Theta) = \prod_{l} exp\left(-sec\Theta \int_{p}^{0} k_l(\nu, p) c_l(p) dp\right),$$

где

$k_l(\nu, p)$ **является коэффициентом поглощения газовой компонентой** l;

$c_l(p)$ **– это отношение смеси компоненты** l **на уровне с давлением** p**.**

Поток уходящего излучения

Поток уходящего длинноволнового излучения дается выражением:

$$F = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} L_{\nu}(\theta) \sin\theta \cos\theta \, d\theta d\varphi d\nu .$$

В которой L_{ν} – интенсивность излучения.

Данный поток, который характеризует состояние системы “Земля-атмосфера-спутник”, является функционалом температуры ПП, профиля всех газовых компонент, функционалом коэффициента излучения ПП и т.д.

Новый метод

Благодаря методу [1] <<эффективного угла>>

формула для потока будет иметь более простой вид:

$$F = \pi \int_0^\infty L_\nu(\theta_{ef})d\nu \,.$$

[1]A.V.Metha and J. Susskind // Outgoing longwave radiation from the TOVS Pathfinder Path A data set.

Вариационная производная

Вариация системы– переход от состояния $\varepsilon_s(\nu)$ к состоянию $\varepsilon'_s(\nu)$

Вариация функционала: $\Delta F(\varepsilon_s(\cdot) \to \varepsilon'_s(\cdot)) = F(\varepsilon'_s(\cdot)) - F(\varepsilon_s(\cdot))$,

$\varepsilon_s(\nu_0)$ – коэффициент излучения, характеризующий состояние атмосферы.

Полагаем, что $\varepsilon'_s(\nu_0) = \varepsilon_s(\nu_0) + \Delta\varepsilon_s(\nu_0)$, следовательно

$$\Delta F(\varepsilon_s(\cdot) \to \varepsilon_s(\cdot) + \Delta\varepsilon_s(\cdot))$$

$$= \int \frac{\delta F(\varepsilon_s(\cdot))}{\delta\varepsilon_s(\nu_0)d\nu_0} \delta\varepsilon_s(\nu_0)d\nu_0 + \sum_{k=2}^{\infty} \frac{1}{k!} \int \dots \int \left(\frac{\delta^k F(\varepsilon_s(\cdot))}{\delta\varepsilon_s(\nu_1)d\nu_1 \dots \delta\varepsilon_s(\nu_k)d\nu_k} \right) \delta\varepsilon_s(\nu_1)d\nu_1 \dots \times$$
$$\times \ \delta\varepsilon_s(\nu_k)d\nu_k$$

Коэффициент дифференциальной чувствительности

Если F линейно зависит от $\varepsilon_s(\nu_0)$, то

$$\Delta F(\varepsilon_s(\cdot) \to \varepsilon_s(\cdot) + \Delta\varepsilon_s(\cdot)) = \int \underbrace{\frac{\delta F(\varepsilon_s(\cdot))}{\delta\varepsilon_s(\nu_0)d\nu_0}}_{\text{коэффициент дифференциальной чувствительности}} \delta\varepsilon_s(\nu_0)d\nu_0.$$

$$\frac{\delta F(\varepsilon_s(\cdot))}{\delta\varepsilon_s(\nu_0)d\nu_0} = \pi\int_0^\infty \frac{\delta L(\Theta_{ef})}{\delta\varepsilon_s(\nu_0)d\nu_0}d\nu,$$

где
$$\frac{\delta L(\Theta_{ef})}{\delta\varepsilon_s(\nu_0)d\nu_0} = B(\nu, T_s)\tau(\nu, p_s \to 0, \Theta_{ef})\underbrace{\frac{\delta\varepsilon_s(\nu)}{\delta\varepsilon_s(\nu_0)d\nu_0}}_{=\delta(\nu-\nu_0)}.$$

Использовали интенсивность при безоблачной атмосфере.

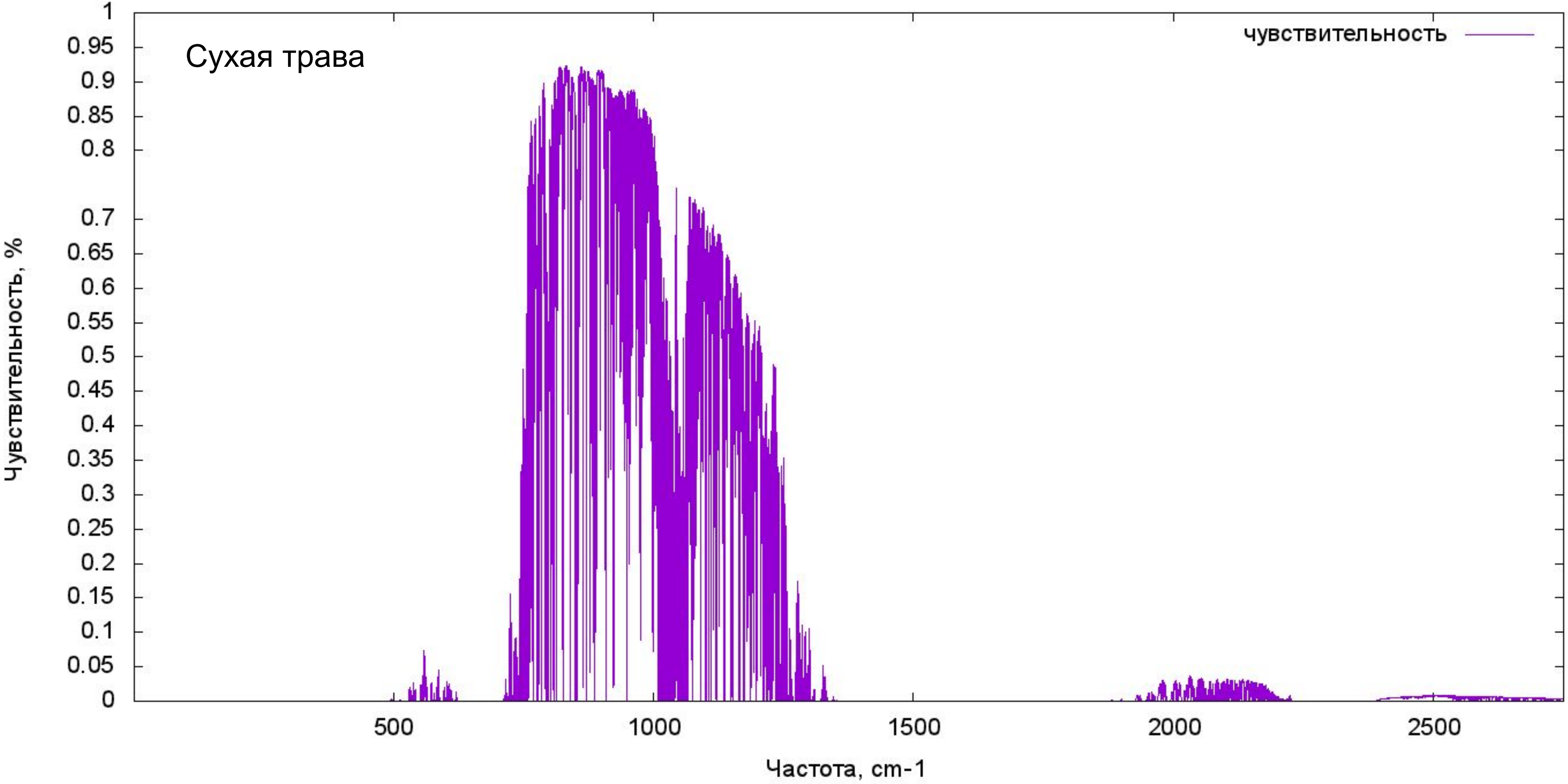
Чувствительность уходящего длинноволнового потока к вариации коэффициента излучения ПП

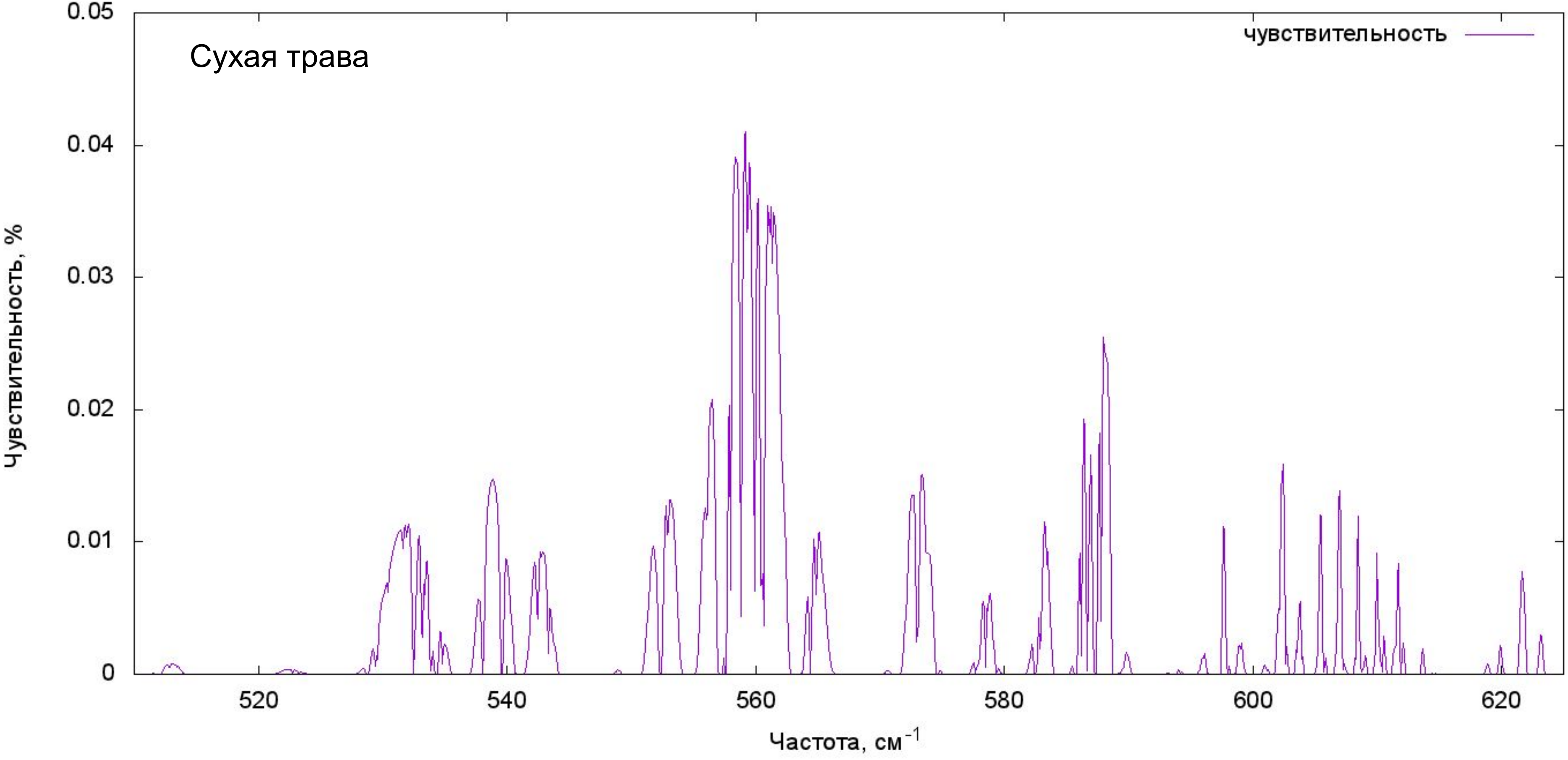
$$\boxed{\Delta \mathrm{F} = \pi B(\nu_0, T_s)\tau(\nu_0, p_s \to 0, \Theta_{ef})\Delta\varepsilon_s(\nu_0)\Delta\nu_0} \times 100\% \text{ и } \frac{\varepsilon_s(\nu_0)}{\varepsilon_s(\nu_0)}.$$

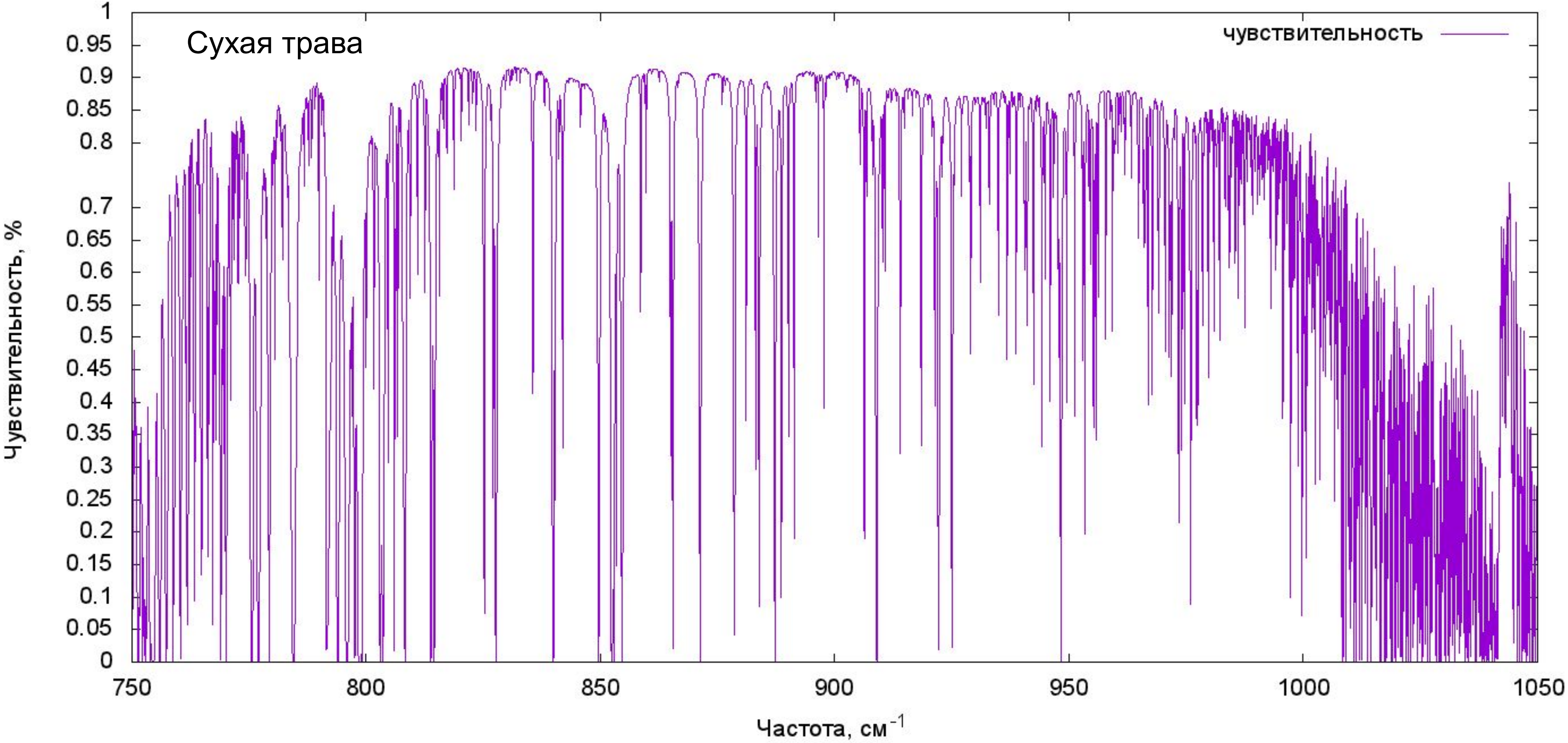
$$\frac{\Delta F}{F}100\% = \pi B(\nu_0, T_s)\tau(\nu_0, p_s \to 0, \theta_{ef})\frac{\varepsilon_s(\nu_0)}{F}\left(\frac{\Delta\varepsilon_s(\nu_0)}{\varepsilon_s(\nu_0)}100\%\right)\Delta\nu_0,$$

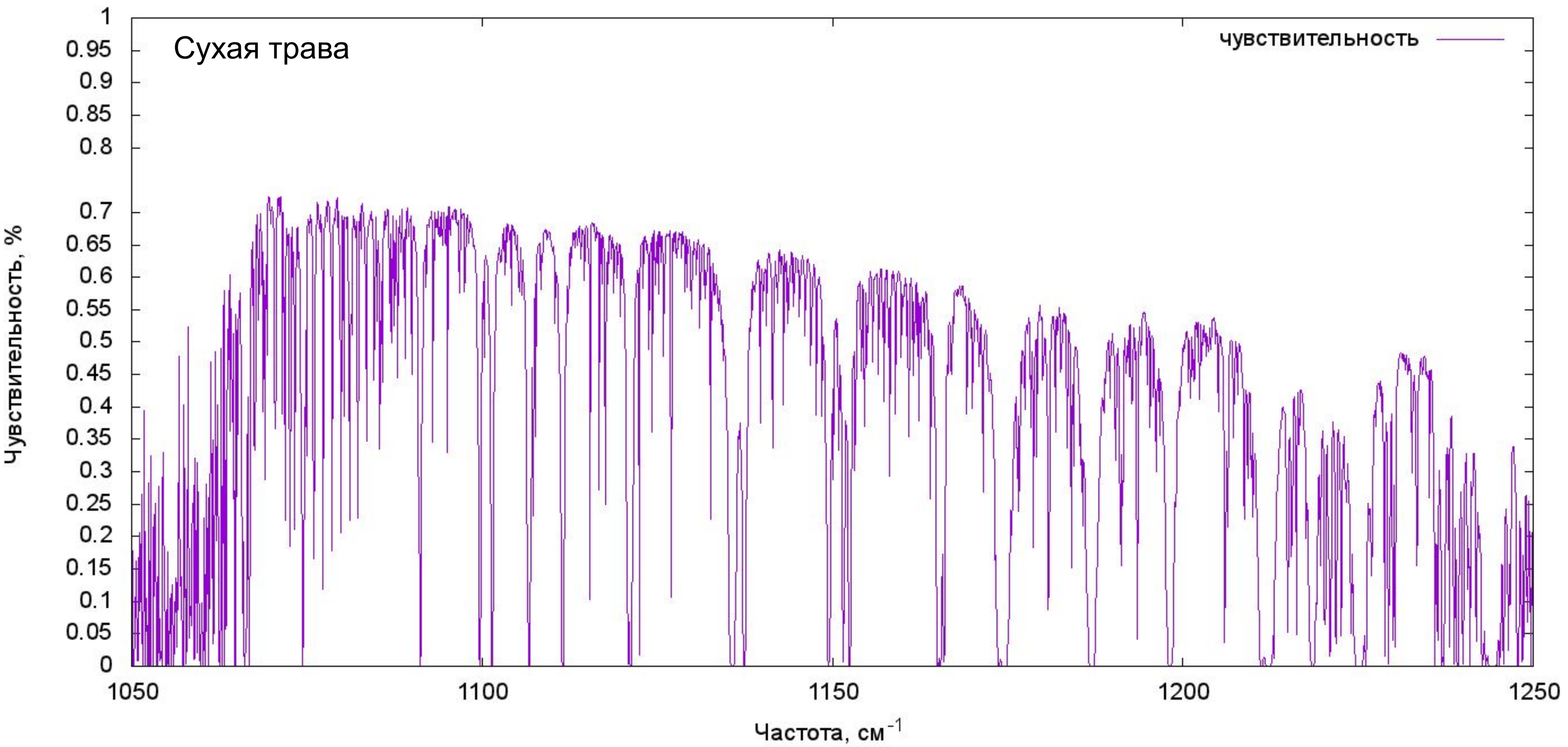
функция чувствительности:

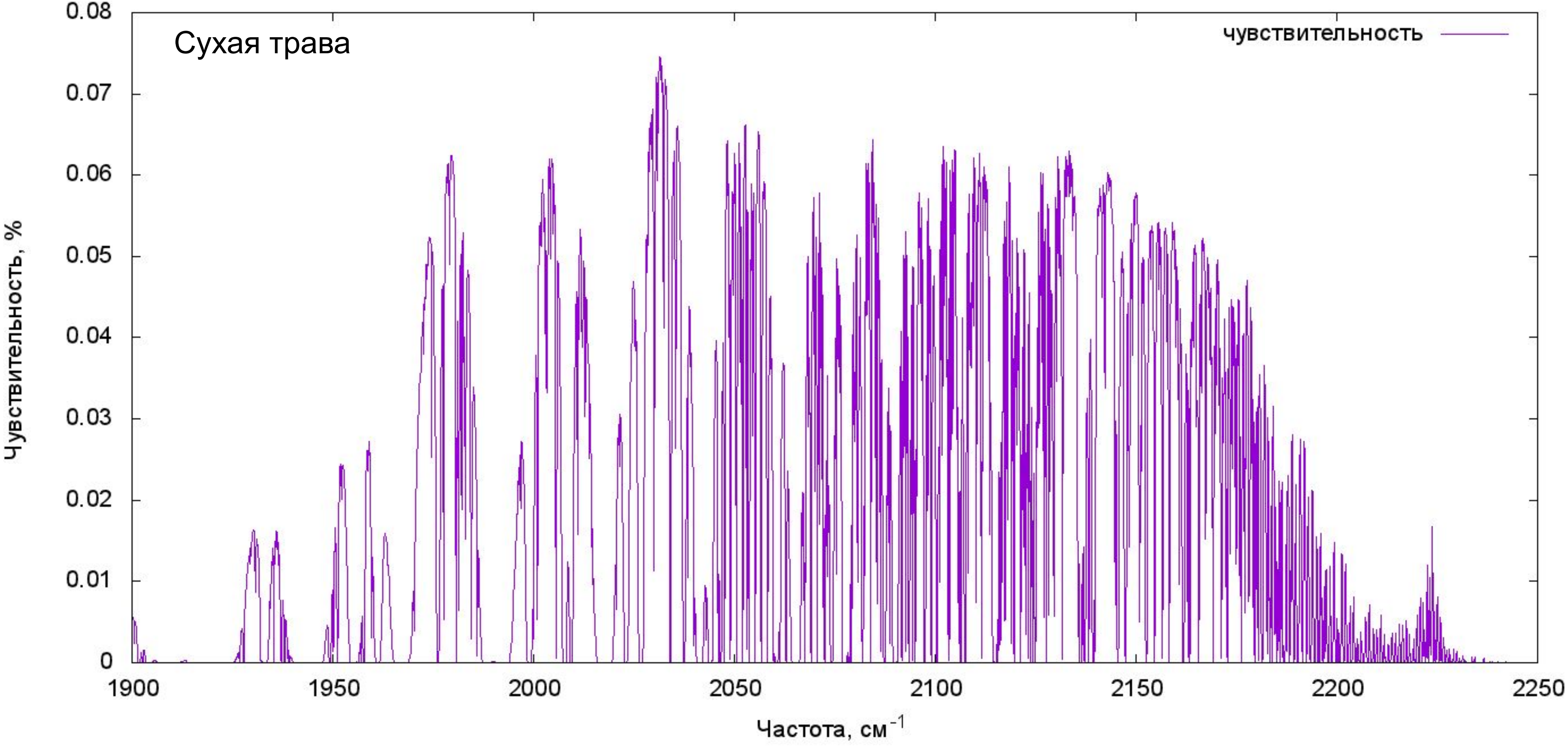
$$S(\nu_0) = \pi B(\nu_0, T_s)\tau(\nu_0, p_s \to 0, \theta_{ef})\frac{\varepsilon_s(\nu_0)}{F}1\%.$$


Сухая трава
чувствительность
Чувствительность, %
Частота, cm-1
0
0.05
0.1
0.15
0.2
0.25
0.3
0.35
0.4
0.45
0.5
0.55
0.6
0.65
0.7
0.8
0.85
0.9
0.95
1
500
1000
1500
2000
2500

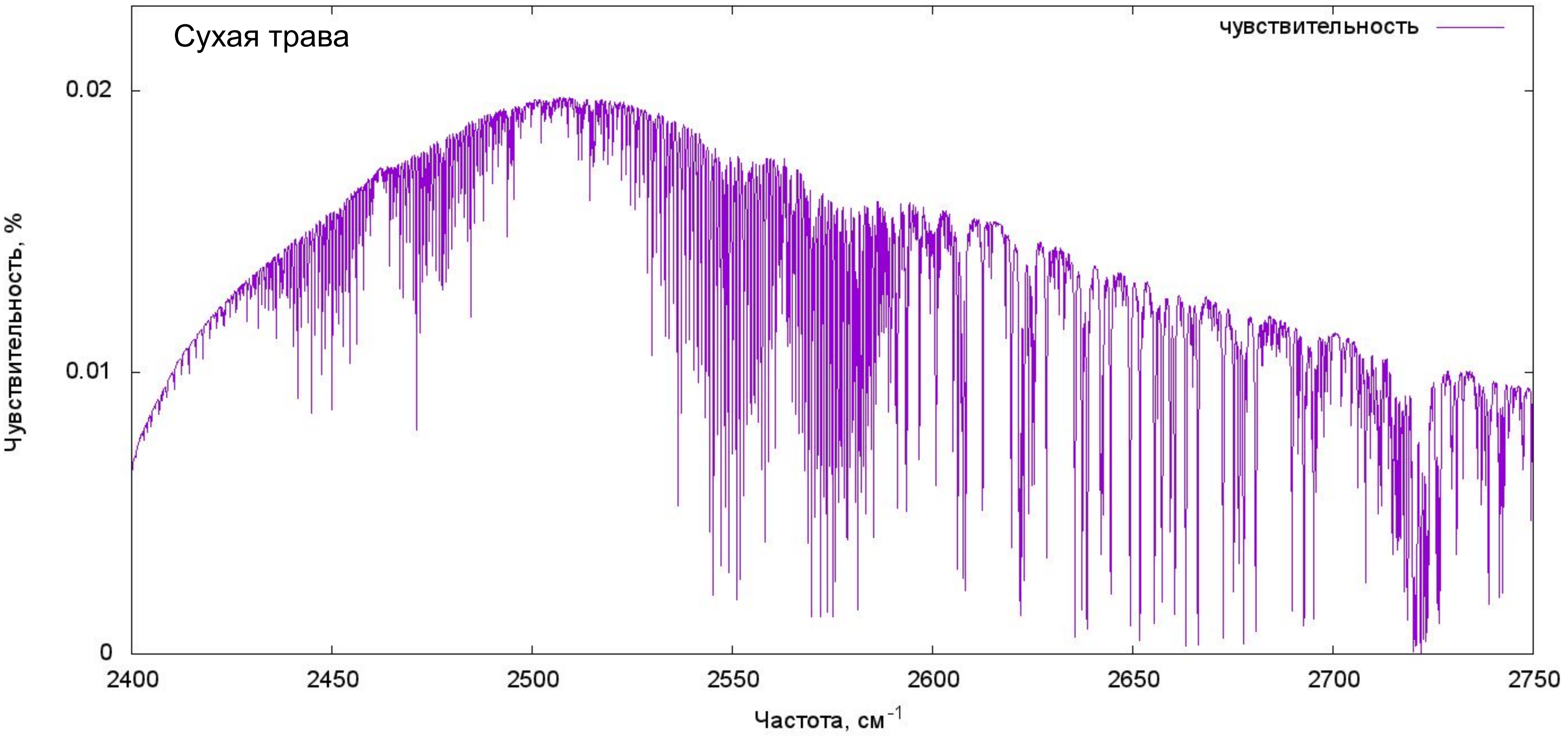

Сухая трава
чувствительность
Чувствительность, %
0.05
0.04
0.03
0.02
0.01
0
520
540
560
580
600
620
Частота, см⁻¹

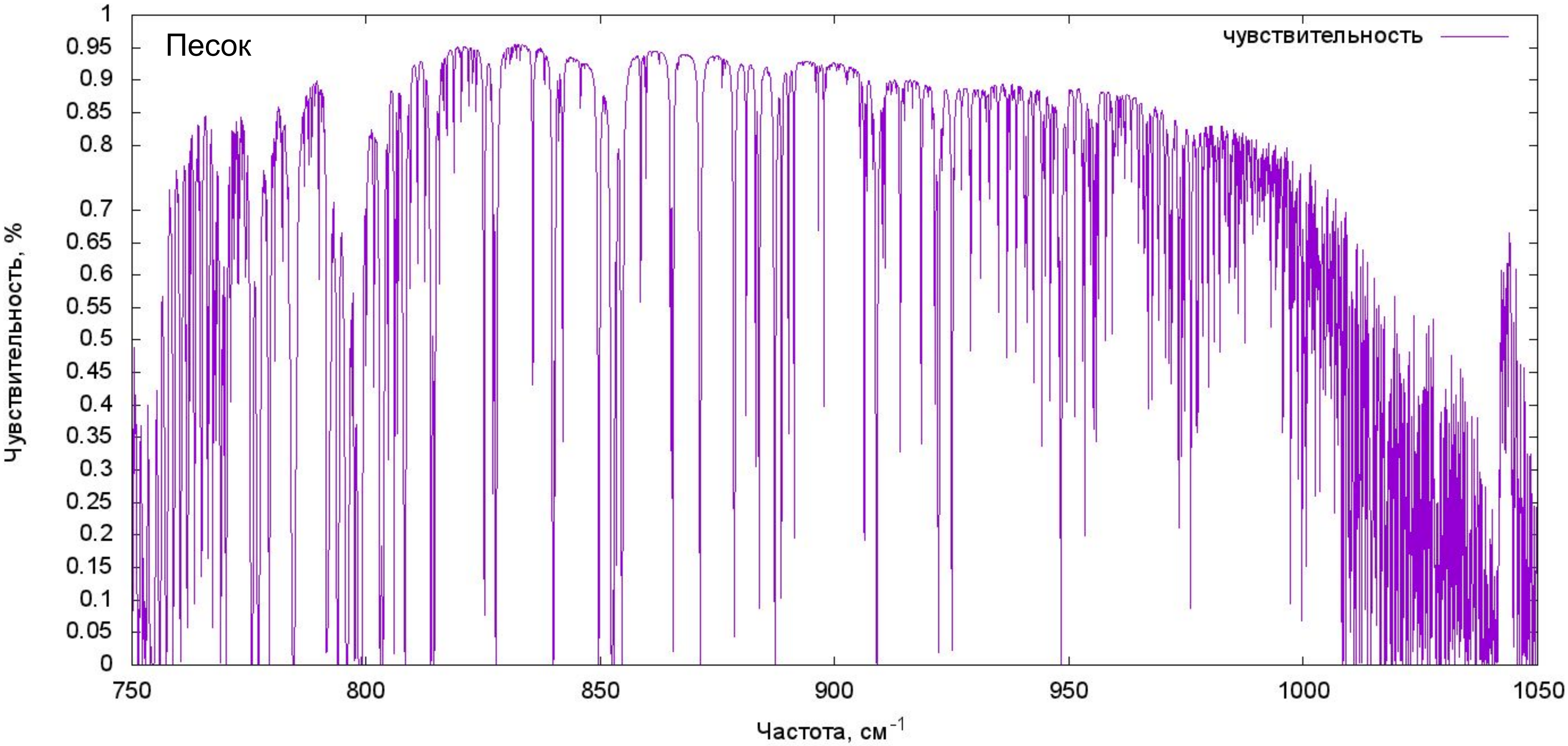

Сухая трава
чувствительность
Чувствительность, %
Частота, $см^{-1}$
0
0.05
0.1
0.15
0.2
0.25
0.3
0.35
0.4
0.45
0.5
0.55
0.6
0.65
0.7
0.8
0.85
0.9
0.95
1
750
800
850
900
950
1000
1050


Сухая трава
чувствительность
Чувствительность, %
Частота, см$^{-1}$
1
0.95
0.9
0.85
0.8
0.7
0.65
0.6
0.55
0.5
0.45
0.4
0.35
0.3
0.25
0.2
0.15
0.1
0.05
0
1050
1100
1150
1200
1250



Сухая трава
чувствительность
Чувствительность, %
Частота, см$^{-1}$
0.08
0.07
0.06
0.05
0.04
0.03
0.02
0.01
0
1900
1950
2000
2050
2100
2150
2200
2250


Сухая трава
чувствительность
Чувствительность, %
0.02
0.01
0
2400
2450
2500
2550
2600
2650
2700
2750
Частота, см-1


Песок
чувствительность
Чувствительность, %
Частота, см$^{-1}$
0
0.05
0.1
0.15
0.2
0.25
0.3
0.35
0.4
0.45
0.5
0.55
0.6
0.65
0.7
0.8
0.85
0.9
0.95
1
750
800
850
900
950
1000
1050

Коэффициент дифференциальной **чувствительности к вариации температуры ПП**

Если F нелинейно зависит от T_s, то

$$\Delta F(T_s \to T_s + \Delta T_s) \approx \sum_i \left(\frac{\partial F}{\partial T_{si}}\right) \Delta T_{si},$$

где

$$\frac{\partial F}{\partial T_s} = \pi \int_0^\infty \frac{\partial L(\Theta_{ef})}{\partial T_s} d\nu,$$

$$\frac{\partial L_\nu}{\partial T_s} = \varepsilon_s(\nu)\tau(\nu, p_s \to 0, \Theta_{ef}) \frac{\partial B(\nu, T_s)}{\partial T_s}$$

$$= \varepsilon_s(\nu)\tau(\nu, p_s \to 0, \Theta_{ef}) \frac{2h^2\nu^4 e^{\frac{h\nu}{kT_s}}}{kc^2 T_s{}^2 \left(e^{\frac{h\nu}{kT_s}} - 1\right)^2}.$$

Чувствительность уходящего **длинноволнового потока к вариации температуры ПП**

$$\Delta F = \sum_i \left(\pi \int_0^{\infty} \varepsilon_s(\nu)\tau(\nu, p_s \to 0, \Theta_{ef}) \frac{2h^2\nu^4 e^{\frac{h\nu}{kT_s}}}{kc^2 {T_s}^2 \left(e^{\frac{h\nu}{kT_s}} - 1\right)^2} d\nu \right) \Delta T_{si}. \quad \times 100\% \text{ и } \frac{T_S}{T_S}$$

$$\frac{\Delta F}{F} 100\% = \frac{T_S}{F} \sum_i \left(\pi \int_0^{\infty} \varepsilon_s(\nu)\tau(\nu, p_s \to 0, \Theta_{ef}) \frac{2h^2\nu^4 e^{\frac{h\nu}{kT_s}}}{kc^2 {T_s}^2 \left(e^{\frac{h\nu}{kT_s}} - 1\right)^2} d\nu \right) \frac{\Delta T_{si}}{T_S} 100\%.$$

Функция чувствительности:

$$S = \frac{T_S}{F} \sum_i \left(\pi \int_0^{\infty} \varepsilon_s(\nu)\tau(\nu, p_s \to 0, \Theta_{ef}) \frac{2h^2\nu^4 e^{\frac{h\nu}{kT_s}}}{kc^2 {T_s}^2 \left(e^{\frac{h\nu}{kT_s}} - 1\right)^2} d\nu \right) 1\%.$$

Выводы

1. Предложен новый подход расчета коэффициентов дифференциальной чувствительности уходящего потока к вариациям характеристик ПП.

2. Получены коэффициенты дифференциальной чувствительности уходящего потока к вариациям характеристик ПП

3. С использованием данных спектрорадиометра AIRS установлена чувствительность уходящего длинноволнового потока к вариациям коэффициентов излучения ряда типов ПП.

Исследования проводились при поддержке стипендии Губернатора Алтайского края имени летчика-космонавта Г.С. Титова.

Благодарю за внимание!