

Четырнадцатая Всероссийская открытая конференция
"Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса"
ИКИ РАН, Москва, 14-18 ноября 2016 года

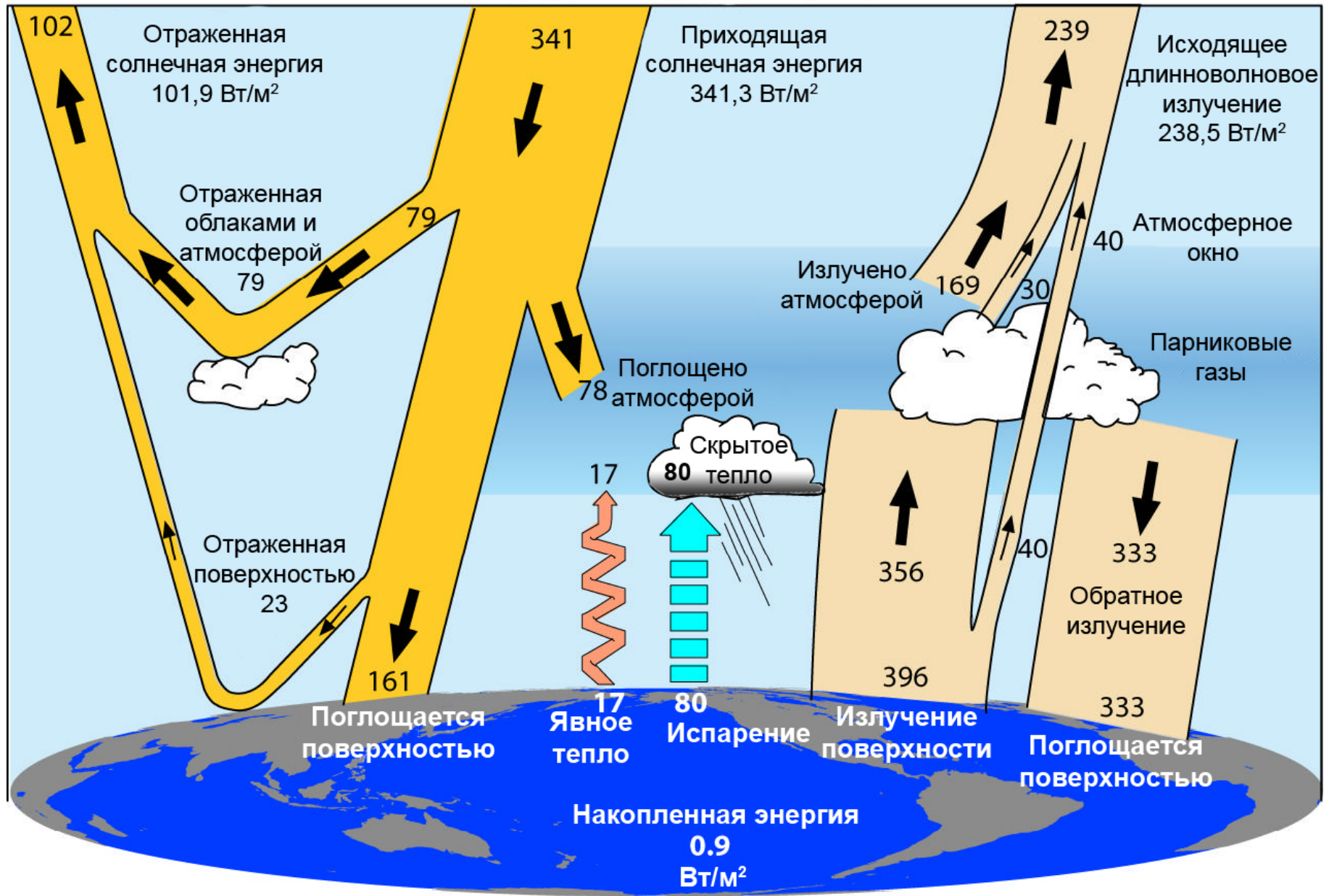
**Моделирование
поляризационных характеристик
уходящего солнечного излучения
для исследования полярных облаков**

Фалалеева В.А., Чернокульский А.В., Мамонтов А.Е.

Институт физики атмосферы им.А.М.Обухова РАН, Москва, Россия

victory@phystech.edu

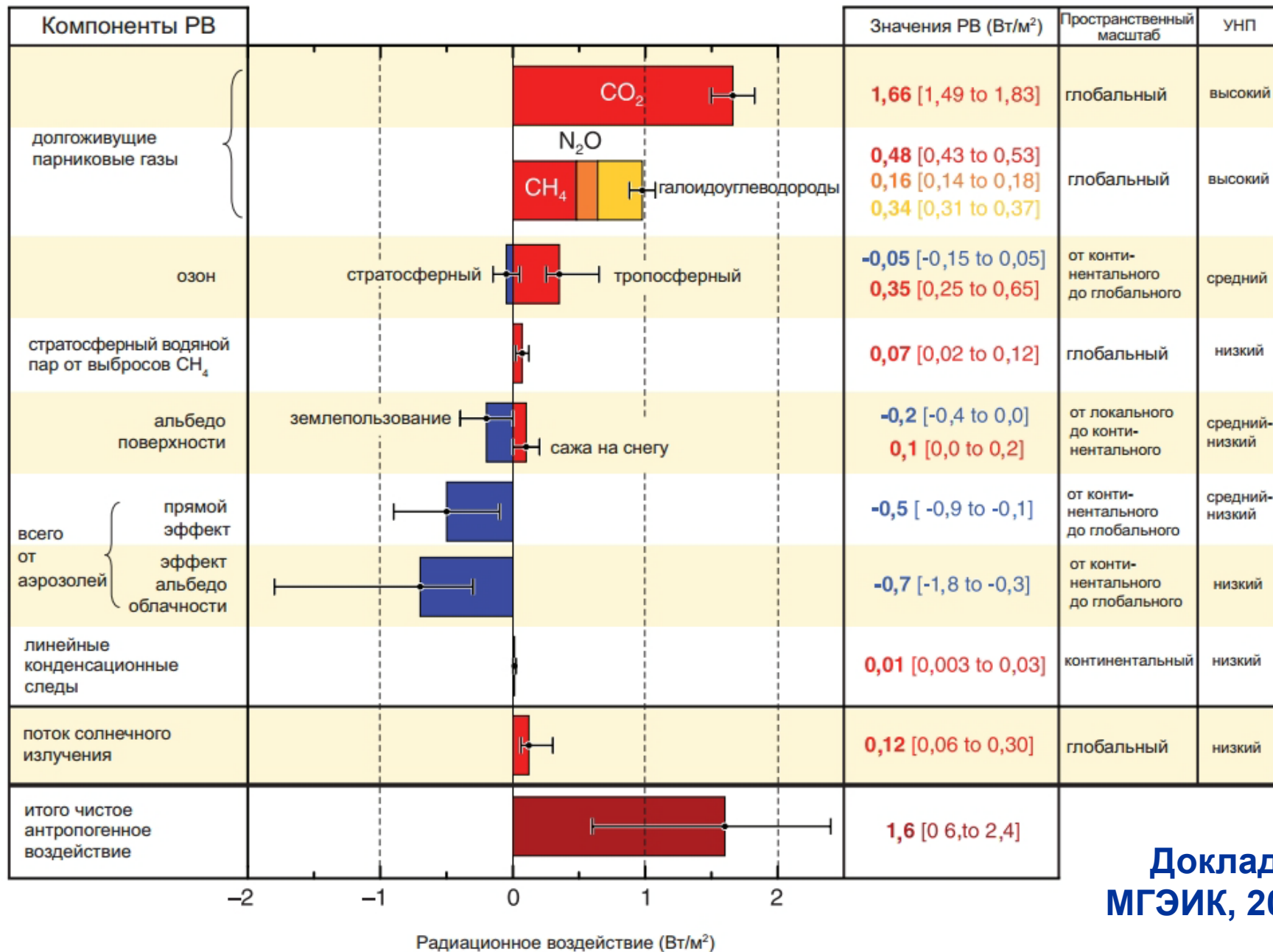
Глобальные потоки энергии Вт/м²



[Trenberth, 2009, Earth's Global Energy Budget, AMS]

Аэрозоли и облака – самые неопределённые факторы в радиационном форсинге на климат

Компоненты радиационного воздействия



Зондирование в полосах поглощения атмосферных газов

идея хорошо известна (Yamamoto and Wark, 1991)

Примеры:

1. Ψ -полоса H_2O (1.38 мкм) => обнаружение перистых облаков (Ci), состав и структура облаков

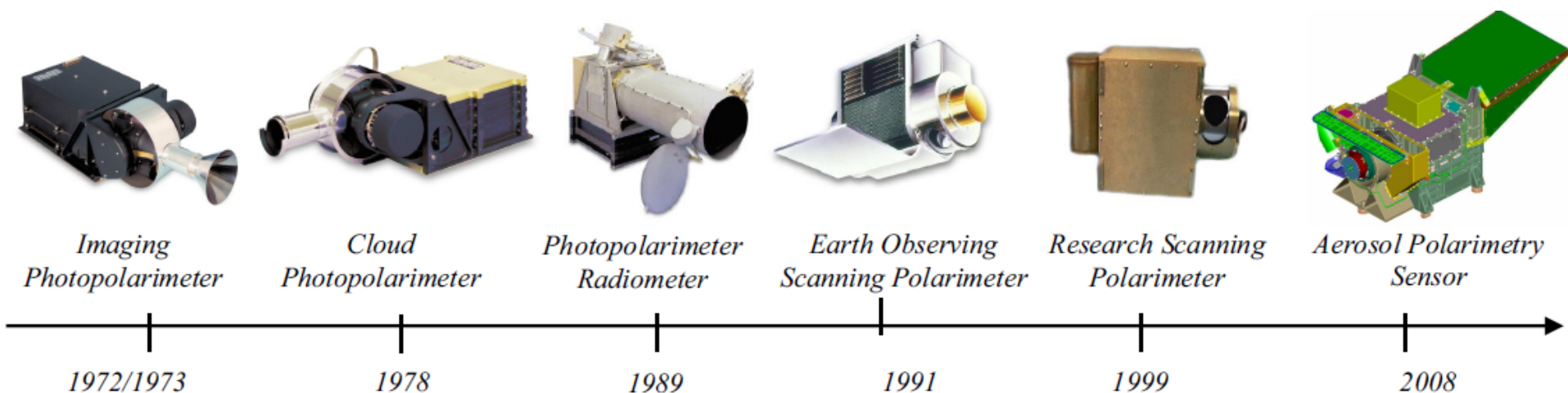
[Gao B.-C. & Kaufman Y.J., 1995; Liou K.N., Goody R.M., West R., 1996; Mishchenko M.I et al., 2000]

спектральное разрешение 1 см^{-1} , метод К-распределений

2. А-полоса O_2 (0.762 мкм) => верхняя граница облаков и др.

[Fisher, J. & Grassl H. Grassl, 1991; Kokhanovsky, A.A., 2006]

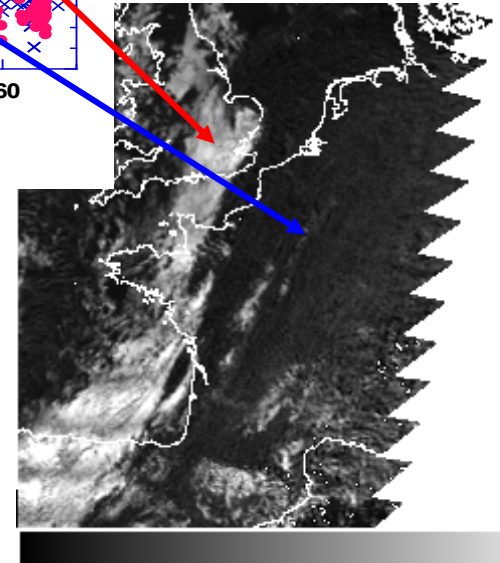
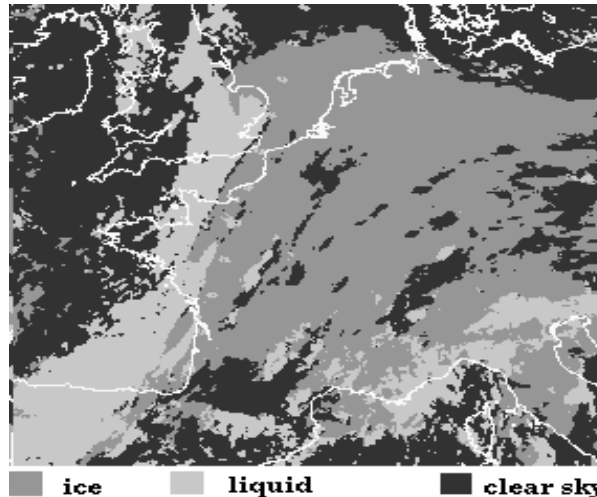
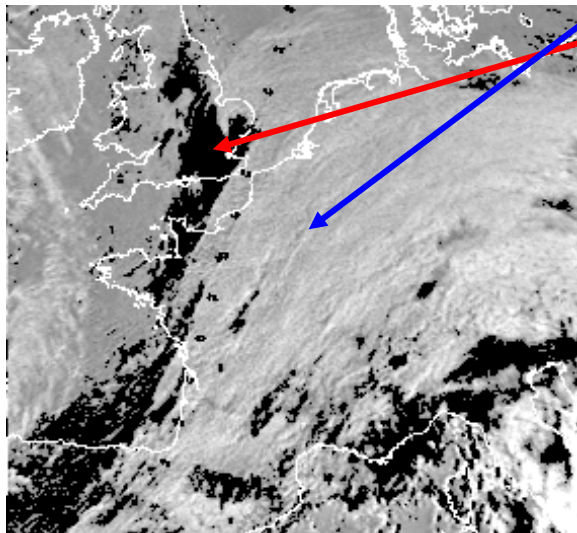
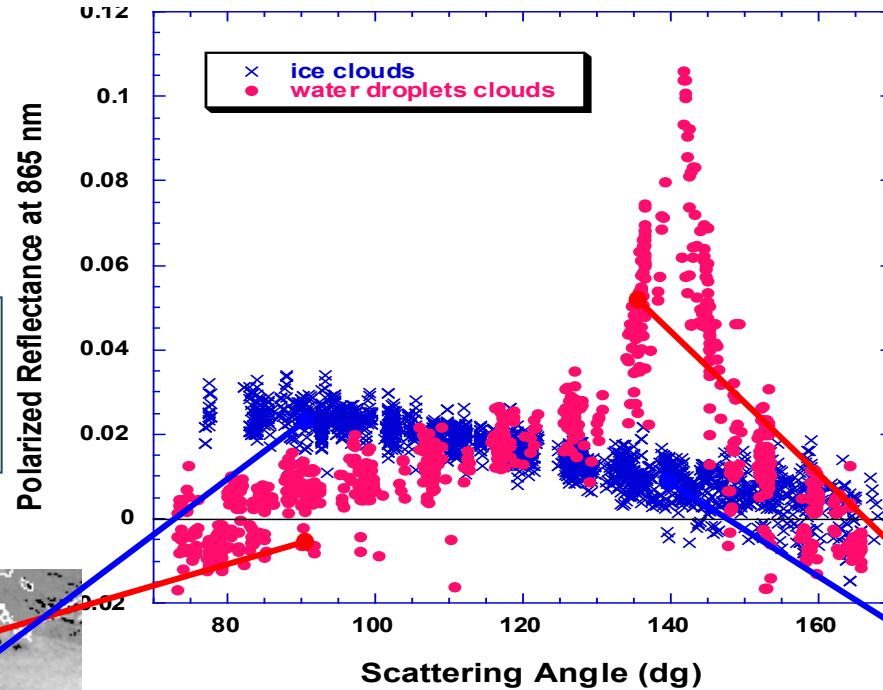
для SCIAMACHY: спектральное разрешение 8.3 см^{-1}



Измерения POLDER: определение фазового состава облаков

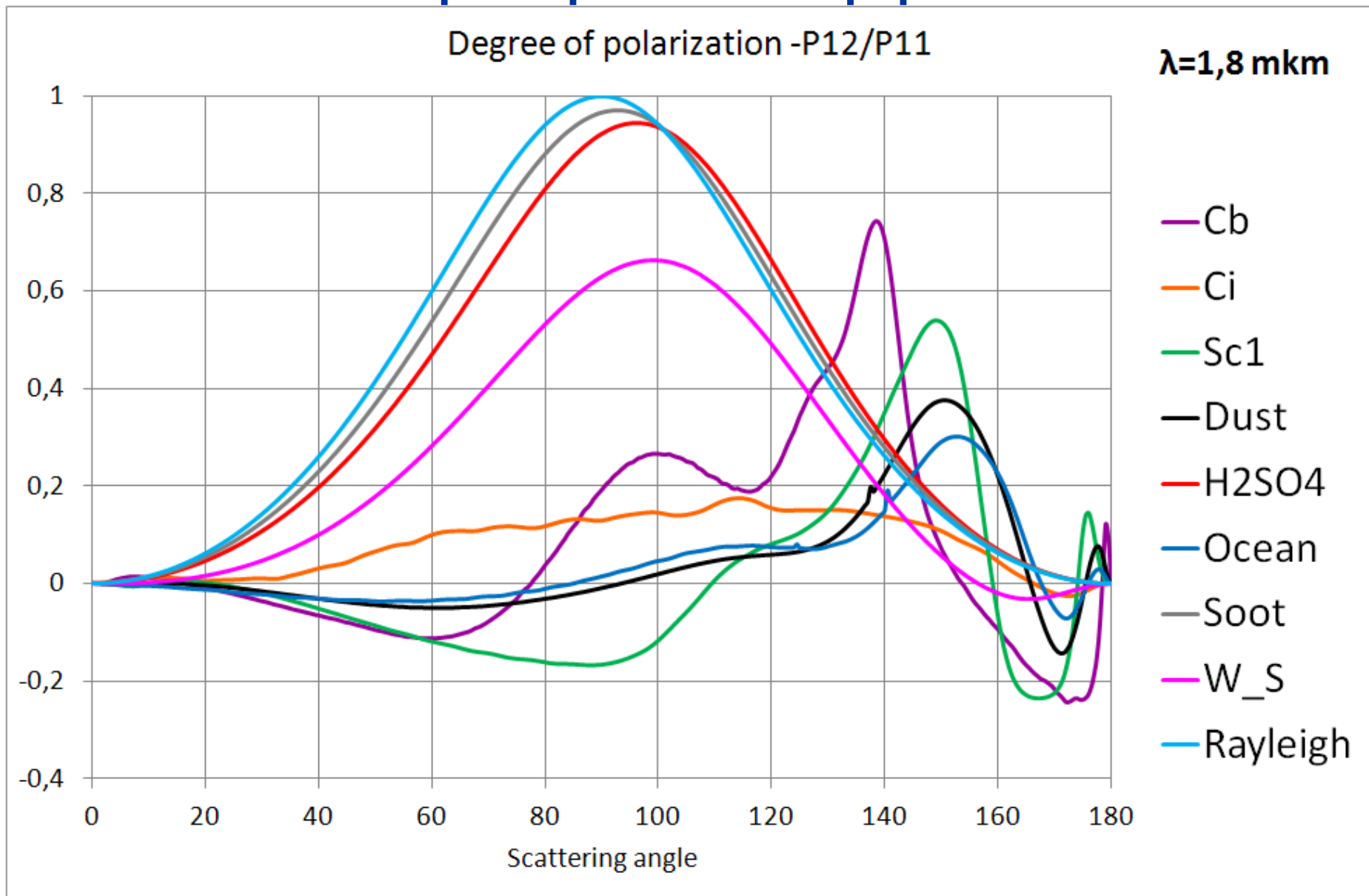
Polarization at 90°
Black = negative polarization

Polarization at 140°



(Parol et al. IEEE, 1999; Goloub et al. JGR, 2000)

Аэрозоли и облака – основные поляризующие факторы в атмосфере



Модели аэрозолей и облаков

Abbr.	Name	Source	Details
Cb	Cumulonimbus cloud	Stephens, 1979	$N = 72 \text{ cm}^{-3}$, $LWC = 2.5 \text{ g m}^{-3}$, $r = 5.5, 6.5 \text{ }\mu\text{m}$
Ci	Cirrus cloud	Yang, Baum, 2013	averaged various particle size distributions with an assumed habit prescription ADDA + T-matrix method + IGOM database for different effective diameters, In this work we used model with $D=10 \text{ }\mu\text{m}$
Sc1	Stratocumulus cloud	Stephens, 1979	$N = 440 \text{ cm}^{-3}$, $LWC = 0.22 \text{ g m}^{-3}$, $r = 3.5 \text{ }\mu\text{m}$
Dust	Dust-like aerosol	WCP-112	Log-normal distribution $r = 0.5 \text{ }\mu\text{m}$, $\sigma = 2.99$
H2SO4	75% H ₂ SO ₄ aerosol	WCP-112	Modified gamma distribution $A = 324$, $\alpha = 1$, $\gamma = 1$, $\beta = 18$
Ocean	Ocean aerosol	WCP-112	Log-normal distribution $r = 0.3 \text{ }\mu\text{m}$, $\sigma = 2.51$
Soot	Soot aerosol	WCP-112	Log-normal distribution $r = 0.0118 \text{ }\mu\text{m}$, $\sigma = 2$
W_S	Water-soluble aerosol	WCP-112	Log-normal distribution $r = 0.005 \text{ }\mu\text{m}$, $\sigma = 2.99$

Совмещение теории Ми и геометрической оптики (Fomin, Mazin, 1998)

Рэлеевское рассеяние:

$$P_{ray}(\Theta) = \frac{3}{4} \begin{pmatrix} 1 + \cos^2 \Theta & -\sin^2 \Theta & 0 & 0 \\ -\sin^2 \Theta & 1 + \cos^2 \Theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \cos \Theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 \cos \Theta \end{pmatrix}$$

$$D_p = -\frac{P_{12}(\theta)}{P_{11}(\theta)} = \frac{\sin^2 \theta}{1 + \cos^2 \theta}$$

Модели аэрозолей и облаков

[Stephens G.L. Optical properties of eight water cloud types.// Div.Atmos. Phys.Tech.Pap.Aust. : CSIRO, Australia. 1979. V.36. pp. 35]

[Yang P., Bi L., Baum B. A., Liou K. N., Kattawar G. W., Mishchenko M. I., Cole B. Spectrally Consistent Scattering, Absorption, and Polarization Properties of Atmospheric Ice Crystals at Wavelengths from 0.2 to 100 μm . Journal of the Atmospheric Sciences, 2013, 70(1), 330-347]

Для исследования облаков и аэрозолей

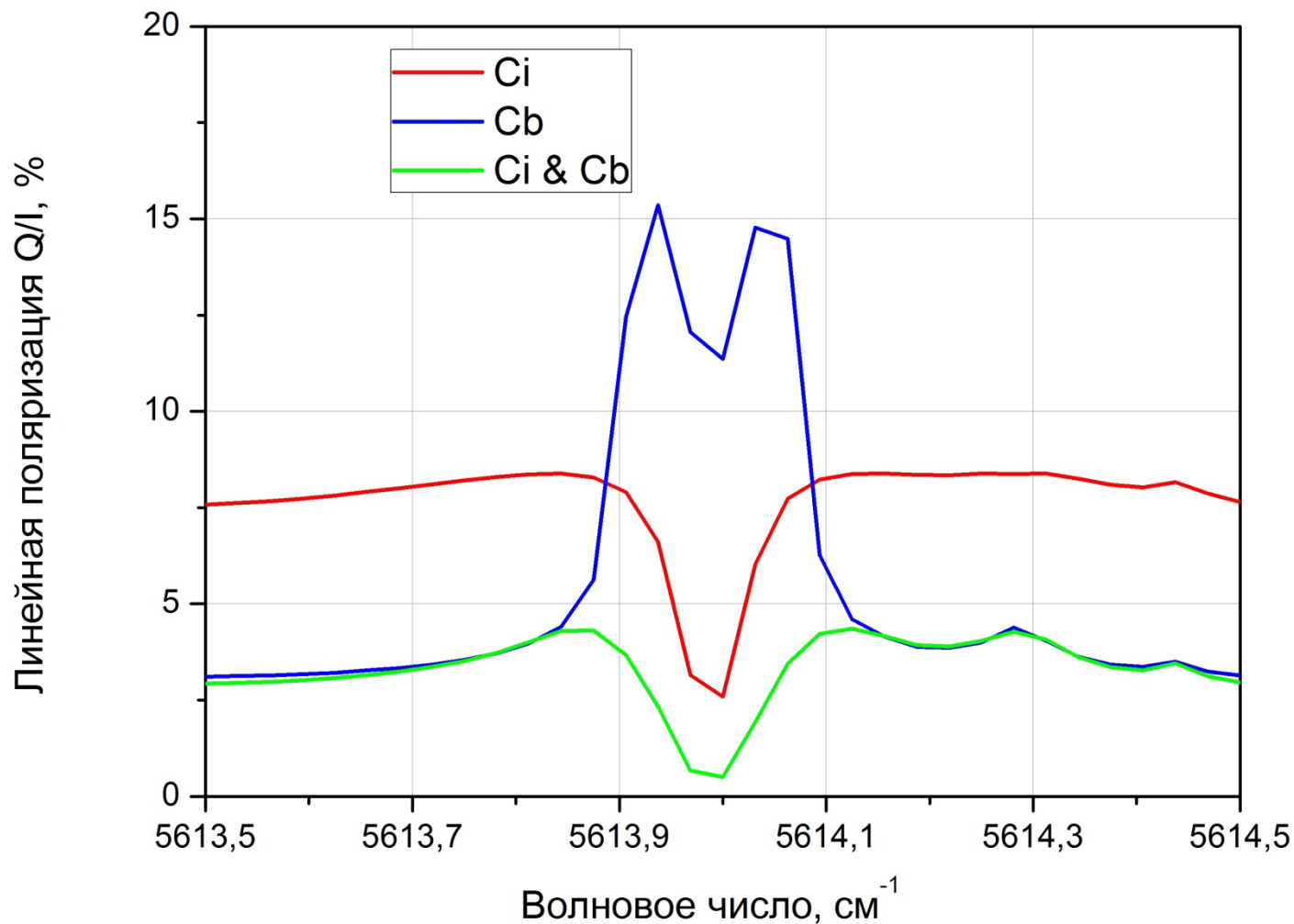
мы развиваем быструю модель переноса излучения

Fast Line-by-Line Model (FLBLM), которая:

- + основана на полинейных (Line-by-Line) алгоритмах с использованием спектроскопической базы HITRAN и «локальных оценок» метода Монте-Карло**
- + наряду с поглощением строго учитывает молекулярное рассеяние и рассеяние на частицах**
- + с высоким спектральным разрешением моделирует спектры параметров Стокса уходящего излучения в вертикально неоднородной атмосфере**
- + была успешно провалидирована с помощью сравнений с эталонными расчётами**

Опубликованы численные эксперименты с моделью FLBLM для условий атмосферы лета средних широт (MLS) и суб-арктической атмосферы для зимнего периода (SAW):

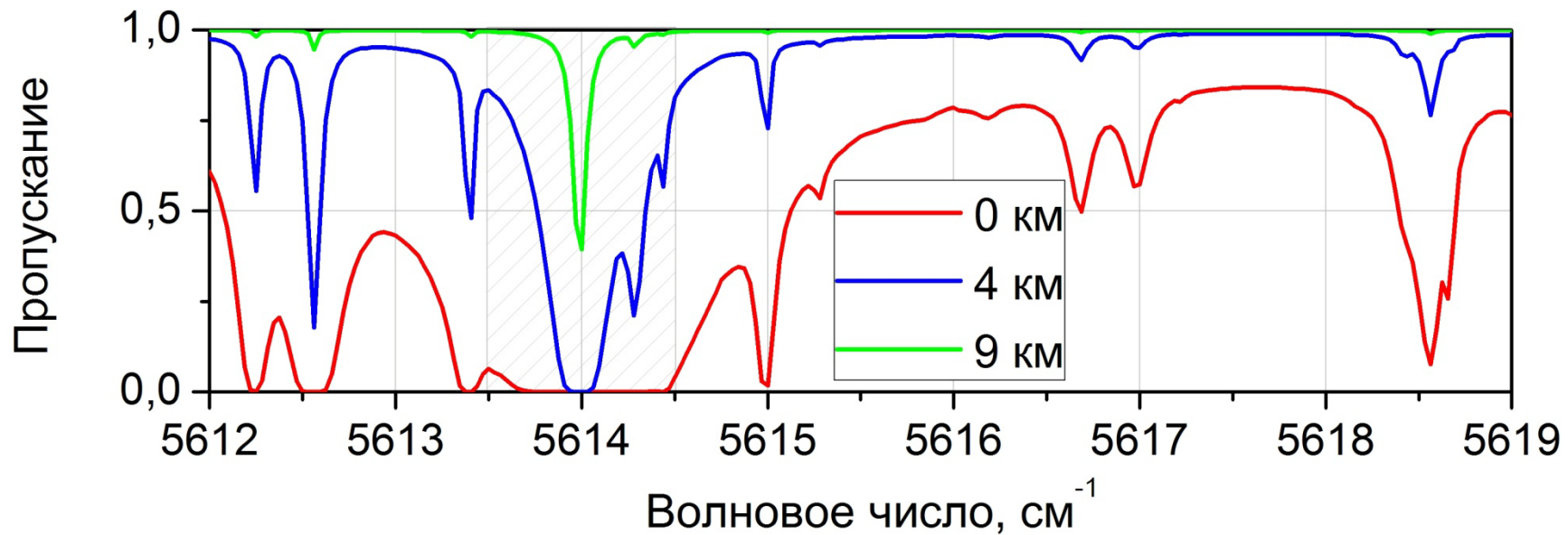
- **Fomin B., Falaleeva V. A polarized atmospheric radiative transfer model for calculations of spectra of the Stokes parameters of shortwave radiation based on the line-by-line and Monte Carlo methods. *Atmosphere*, 3(4), 451-467, 2012**
- **Fomin B. A., Falaleeva V. A. The vertical structure of aerosols and clouds derived from satellites equipped with high-resolution polarization sensors. *International Journal of Remote Sensing*, 35(15), 5800-5811, 2014**
- **Fomin B., Falaleeva V. Spectra of polarized thermal radiation in a cloudy atmosphere: Line-by-Line and Monte Carlo model for passive remote sensing of cirrus and polar clouds. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 177, 301-317, 2016**



Линейная поляризация Q/I (%) уходящего солнечного излучения кучево-дождевыми (H=4-5 км, τ=10) и перистыми (H=8-9 км, τ=0.1) облаками. Линия визирования фиксирована (θ=30°, φ=180°)

[Fomin, Falaleeva, 2014]

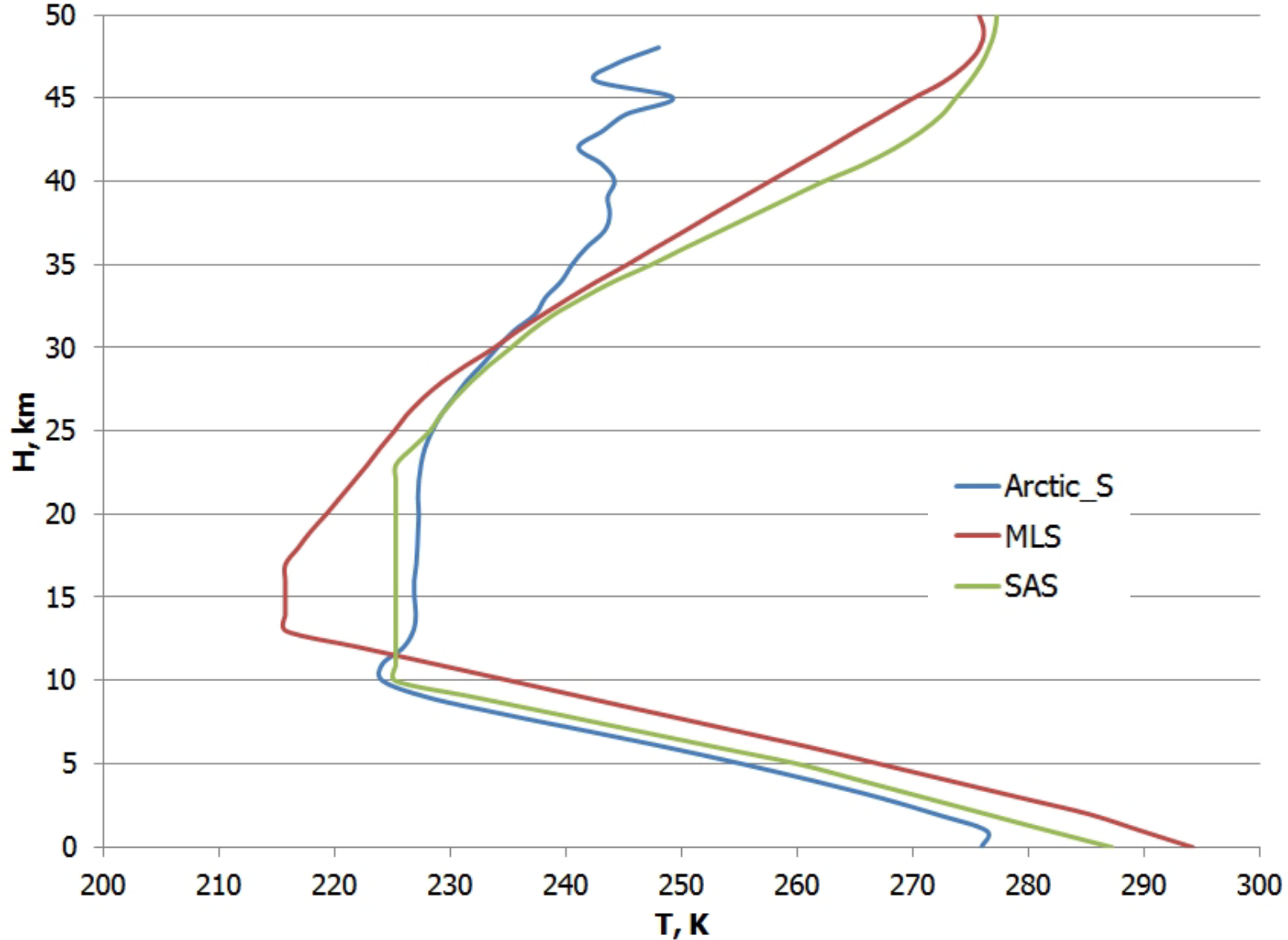
Пропускание атмосферы на уровнях 0, 4 и 9 км для лета средних широт (Mid-Latitude Summer) с информацией о профилях H_2O , CO_2 , O_3 и O_2



Модель арктической атмосферы и характерные облака

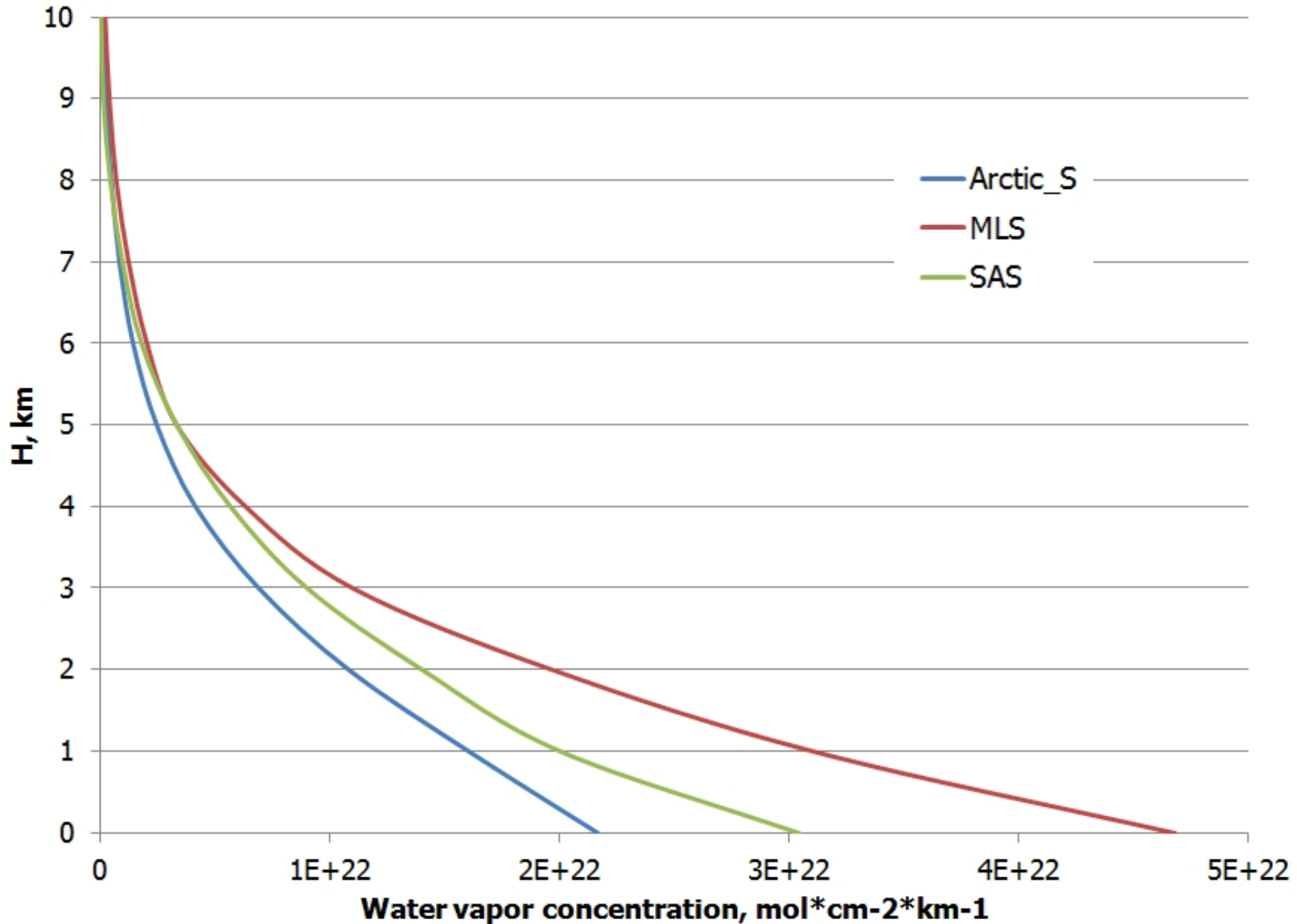
Модель атмосферы для полярного дня в августе, усреднённая для широт 65-90° LAT за 1948-1996 гг.

[Jonathan D. Kahl, Mark C. Serreze et al., BAMS, 1992]



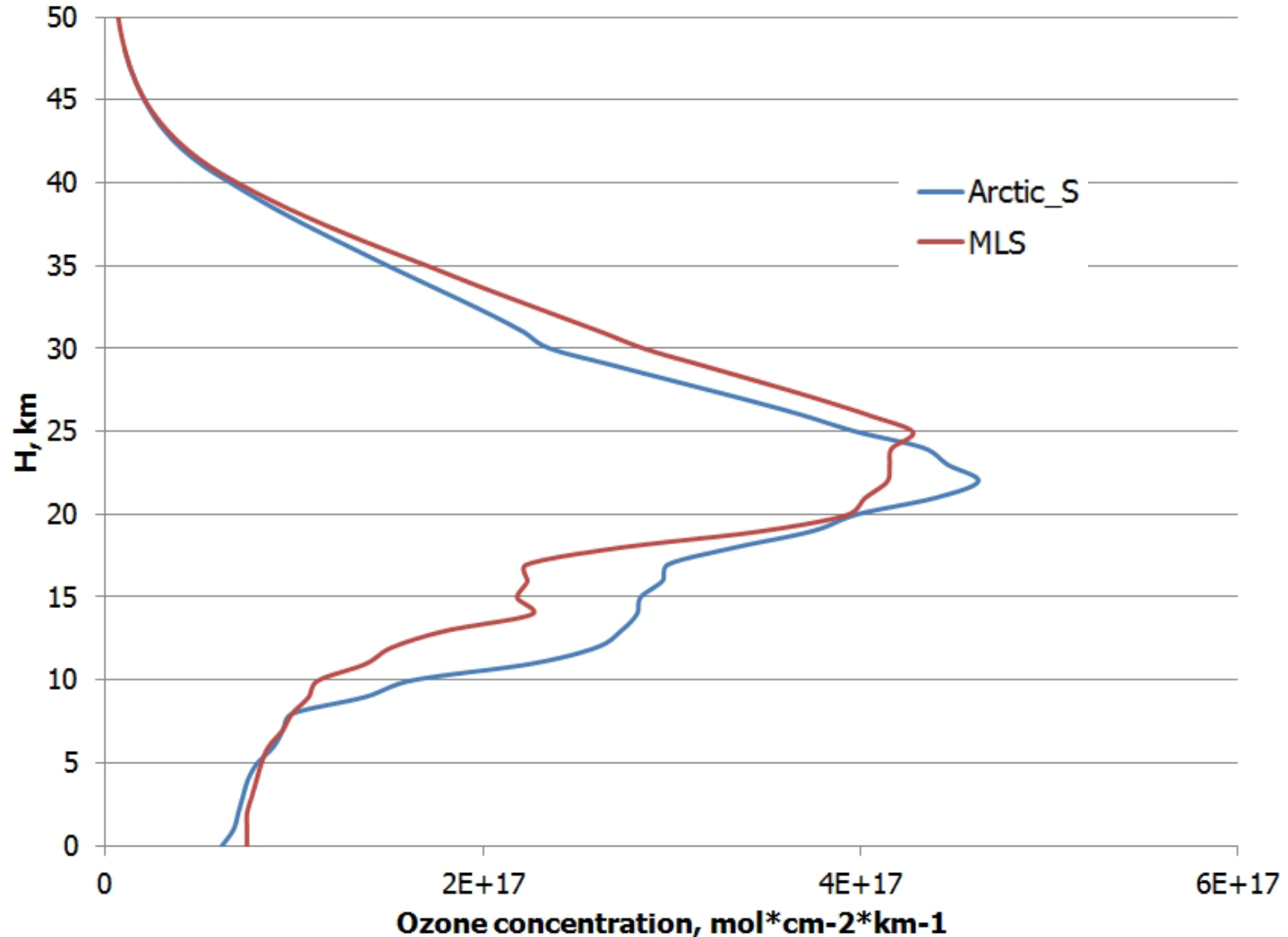
Модель атмосферы для полярного дня в августе, усреднённая для широт 65-90° LAT за 1948-1996 гг.

[Jonathan D. Kahl, Mark C. Serreze et al., BAMS, 1992]



Модель атмосферы для полярного дня в августе, усреднённая для широт 65-90° LAT за 1948-1996 гг.

[Jonathan D. Kahl, Mark C. Serreze et al., BAMS, 1992]



Малые газовые составляющие

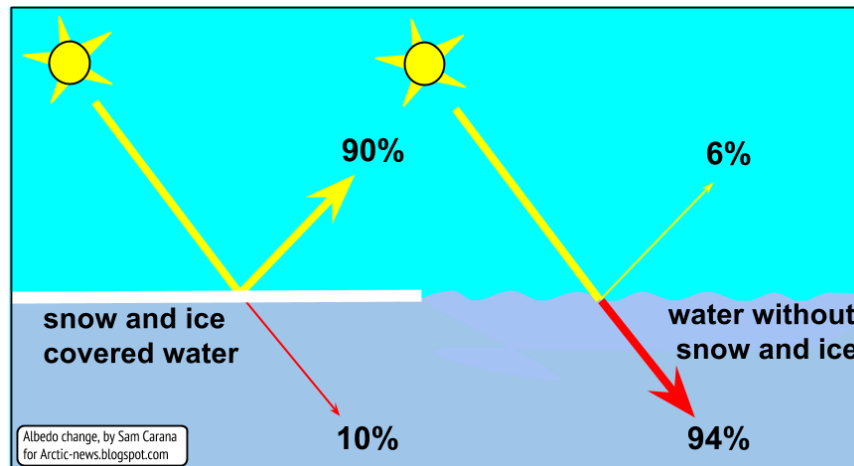
Концентрации хорошо перемешанных парниковых газов:

CO ₂	396 ppm
CH ₄	1,8 ppb
N ₂ O	3,2 ppb

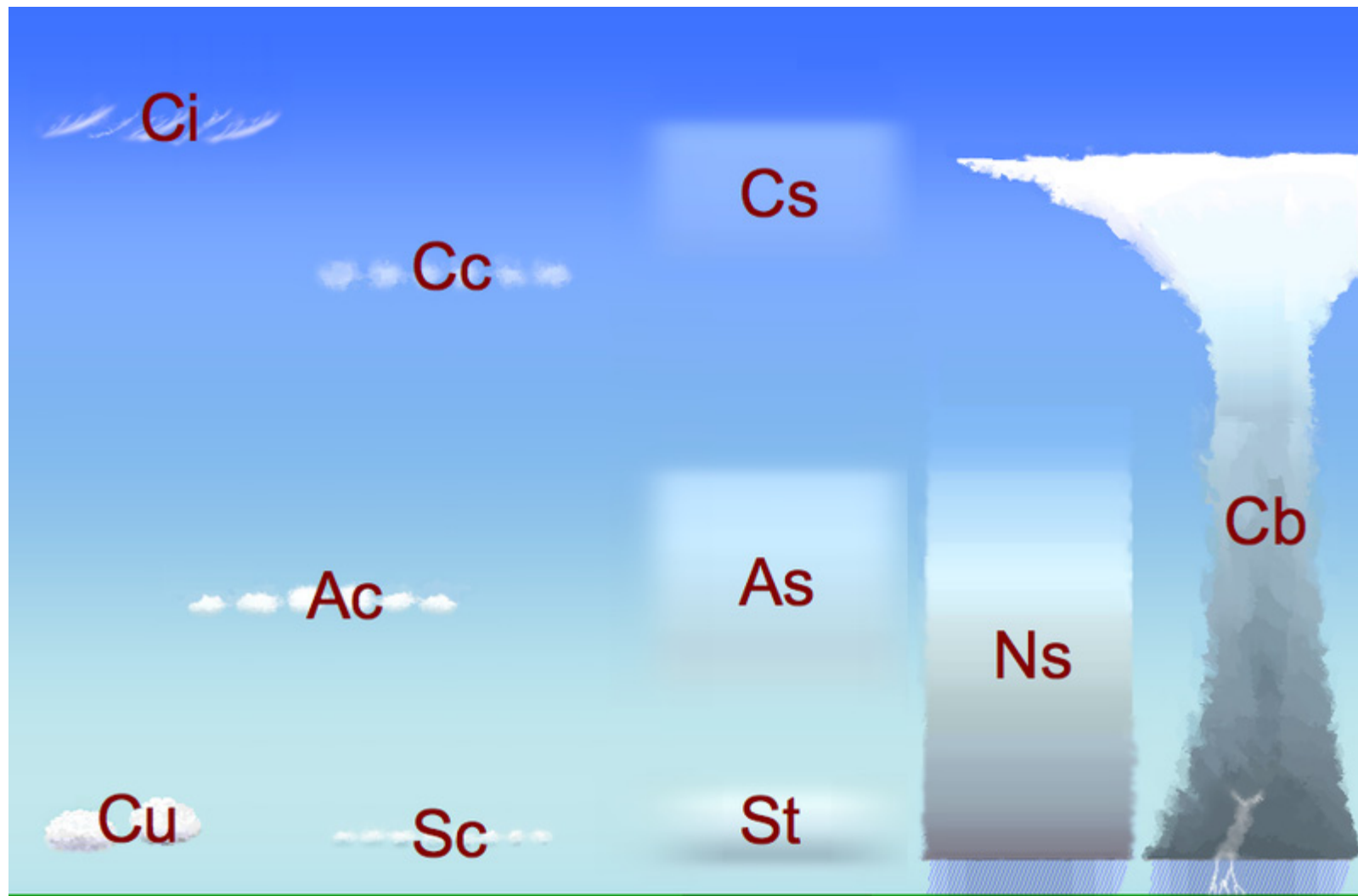
Другие параметры

Зенитный угол Солнца (SZA) 70°

Альбедо 0.9 (лёд), 0.06 (открытая вода)



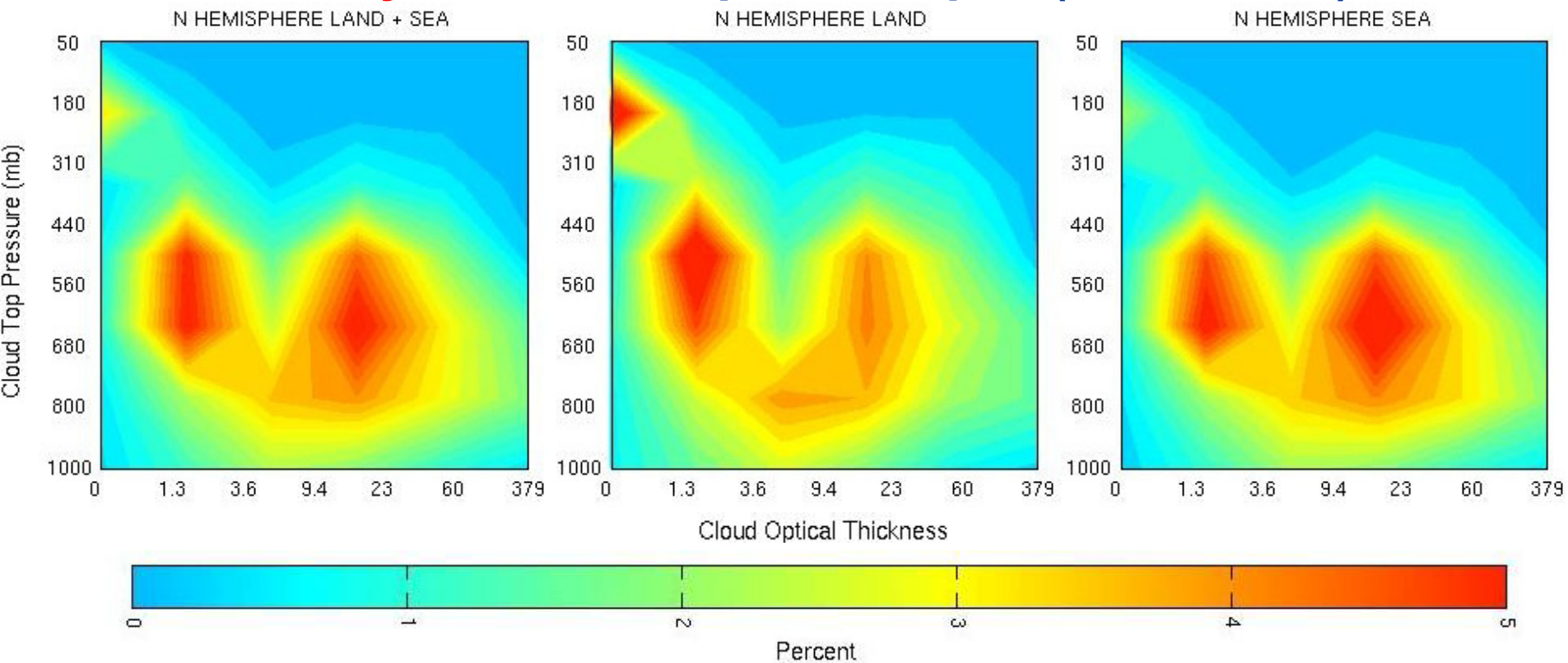
Облака



Классификация облаков в ICSRP

давление на ВГО, гПа	50	перистые (cirrus)	перисто-слоистые (cirrostratus)	облака глубокой конвекции (deep convection)	ярус верхний средний нижний
	440	высоко-кучевые (altocumulus)	высоко-слоистые (altostratus)	слоисто-дождевые (nimbostratus)	
	680	кучевые (cumulus)	слоисто-кучевые (stratocumulus)	слоистые (stratus)	
1000	0	3,6	23	379	ОПТИЧЕСКАЯ ТОЛЩИНА

ISCCP D1 1983-2004 усреднённая статистика облачности за август для полярных широт (65-90° LAT)



Перистое облако Ci:

H = 12-13 км, τ = 0.1

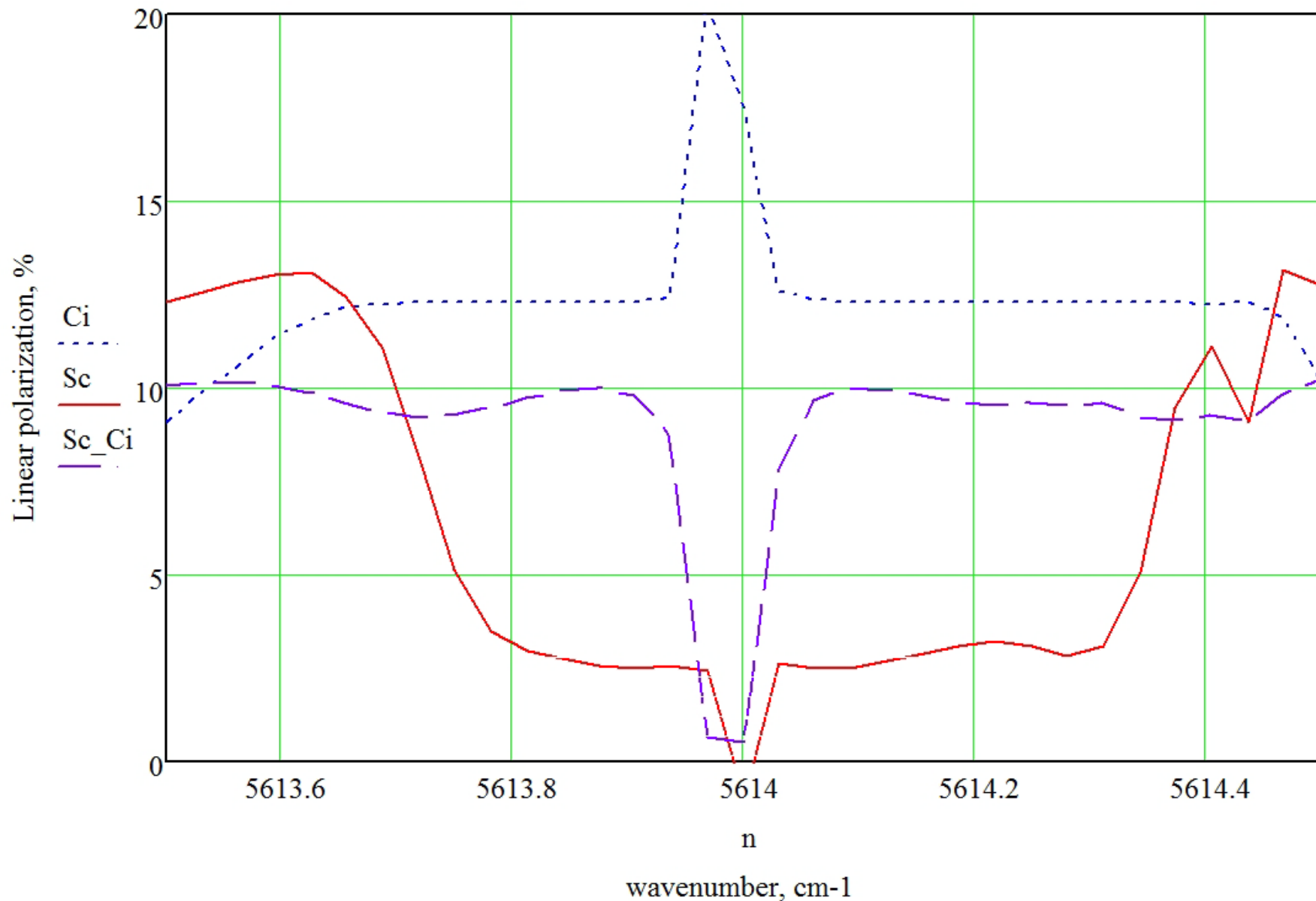
Слоисто-кучевое облако Sc1:

H = 1.5-2 км, τ = 4.0

Численные эксперименты

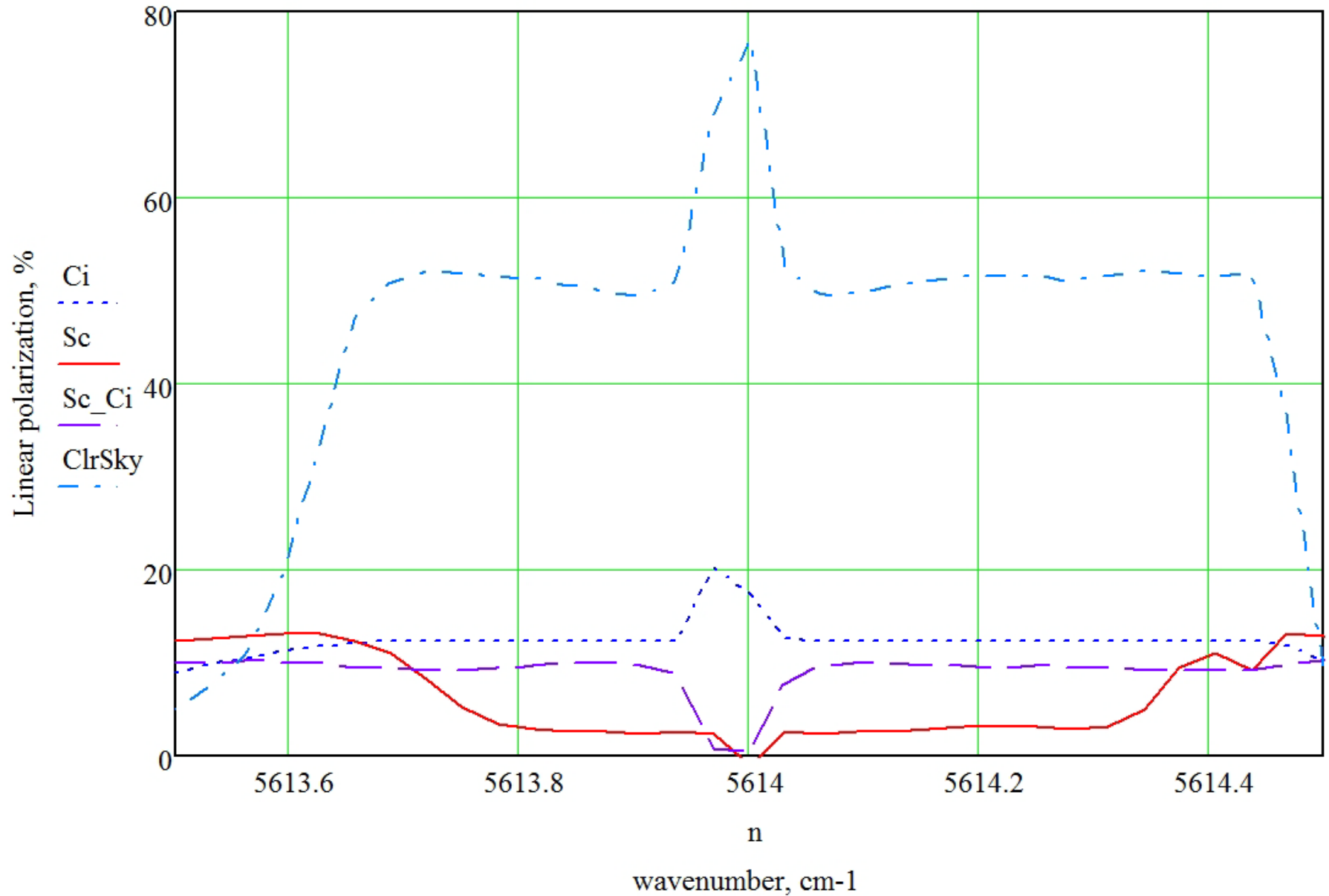
1. Важность высокого спектрального разрешения

Линейная поляризация для 3х случаев с облаками



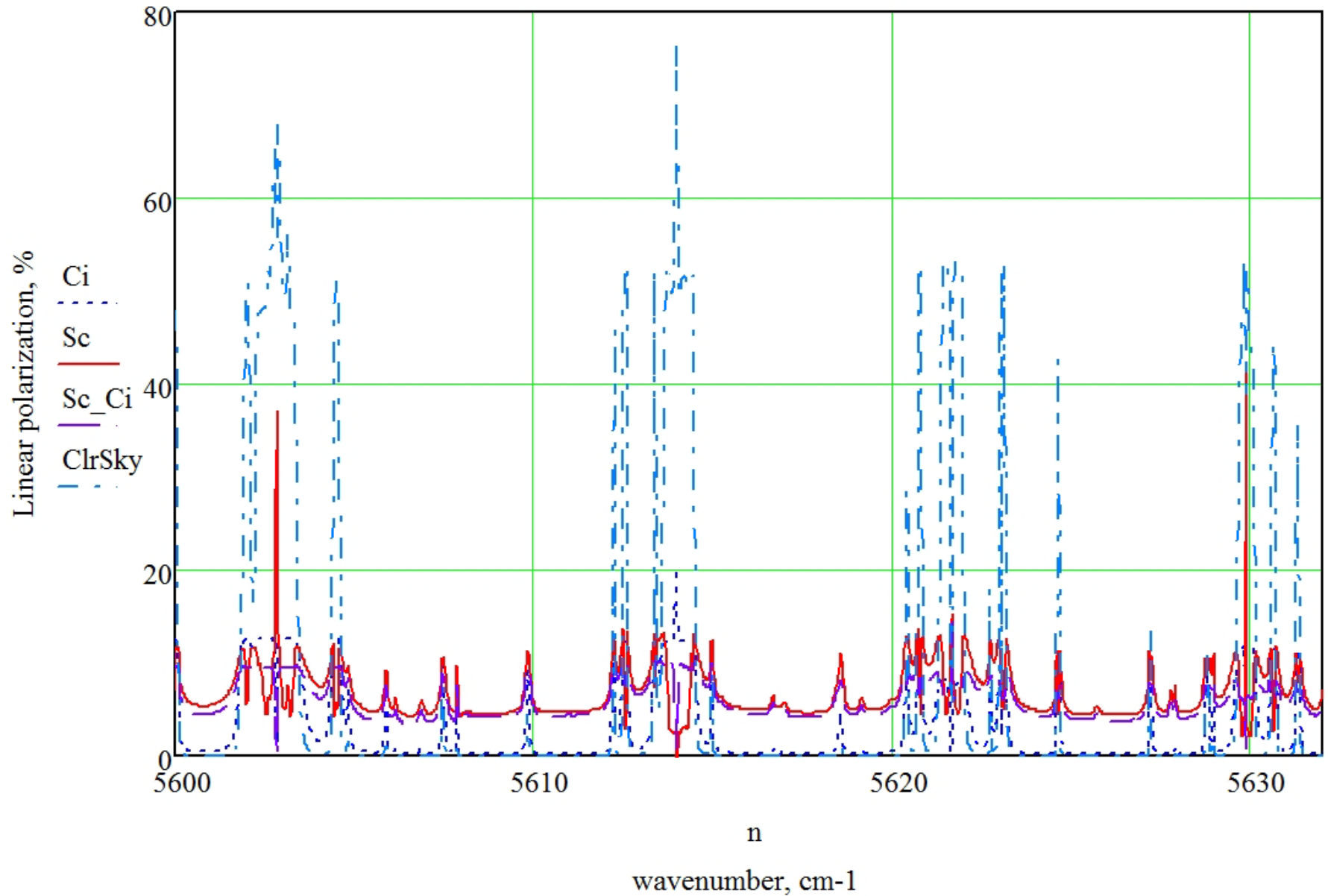
Фиксированный угол визирования: $\vartheta = 30^\circ$ $\varphi = 180^\circ$

Линейная поляризация для ясного неба и 3х случаев с облаками



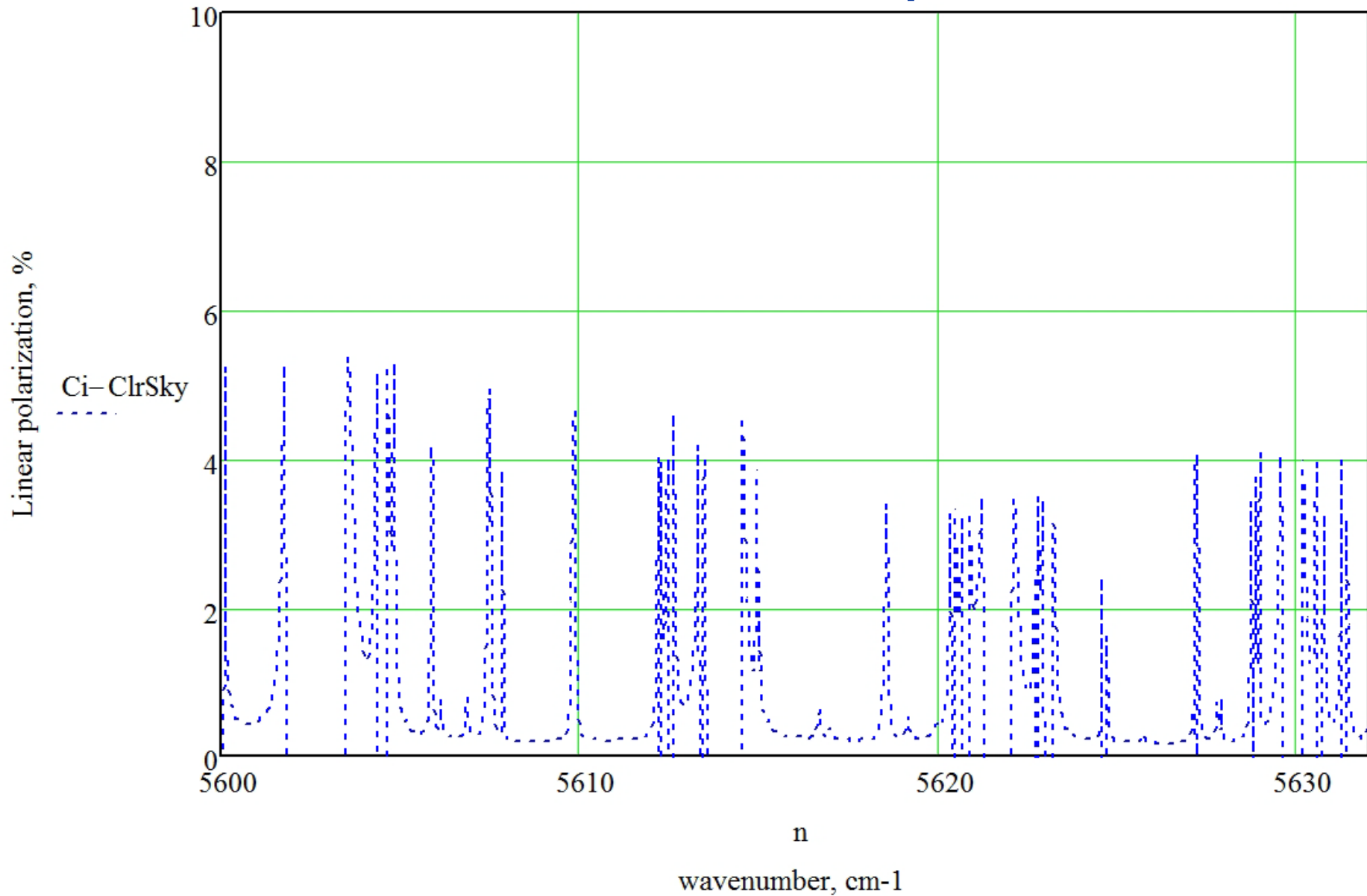
Фиксированный угол визирования: $\vartheta = 30^\circ$ $\varphi = 180^\circ$

Линейная поляризация для ясного неба и 3х случаев с облаками



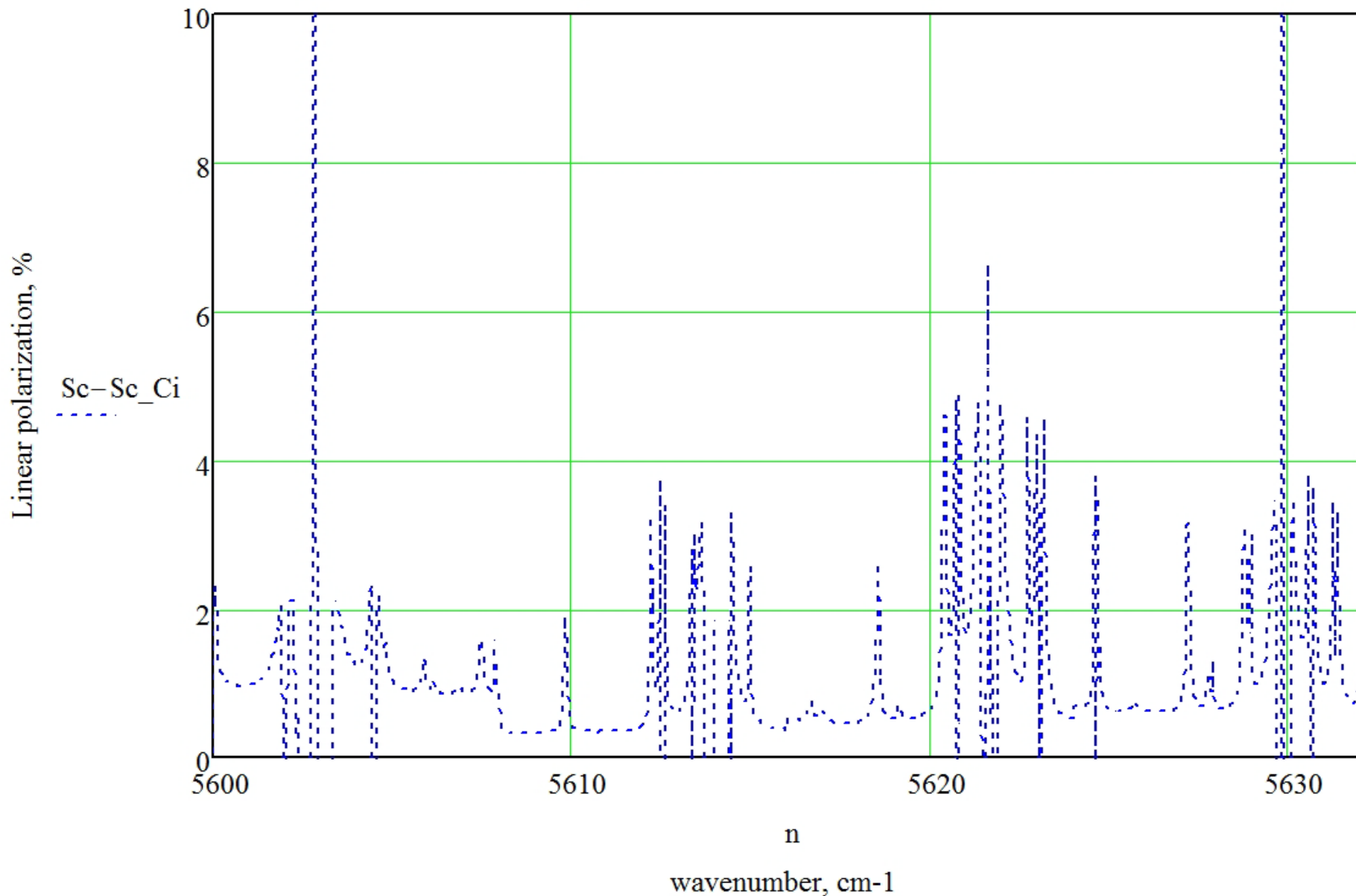
Фиксированный угол визирования: $\vartheta = 30^\circ$ $\varphi = 180^\circ$

Разница в линейной поляризации между случаями с ясным небом и добавлением перистого облака



Фиксированный угол визирования: $\vartheta = 30^\circ$ $\varphi = 180^\circ$

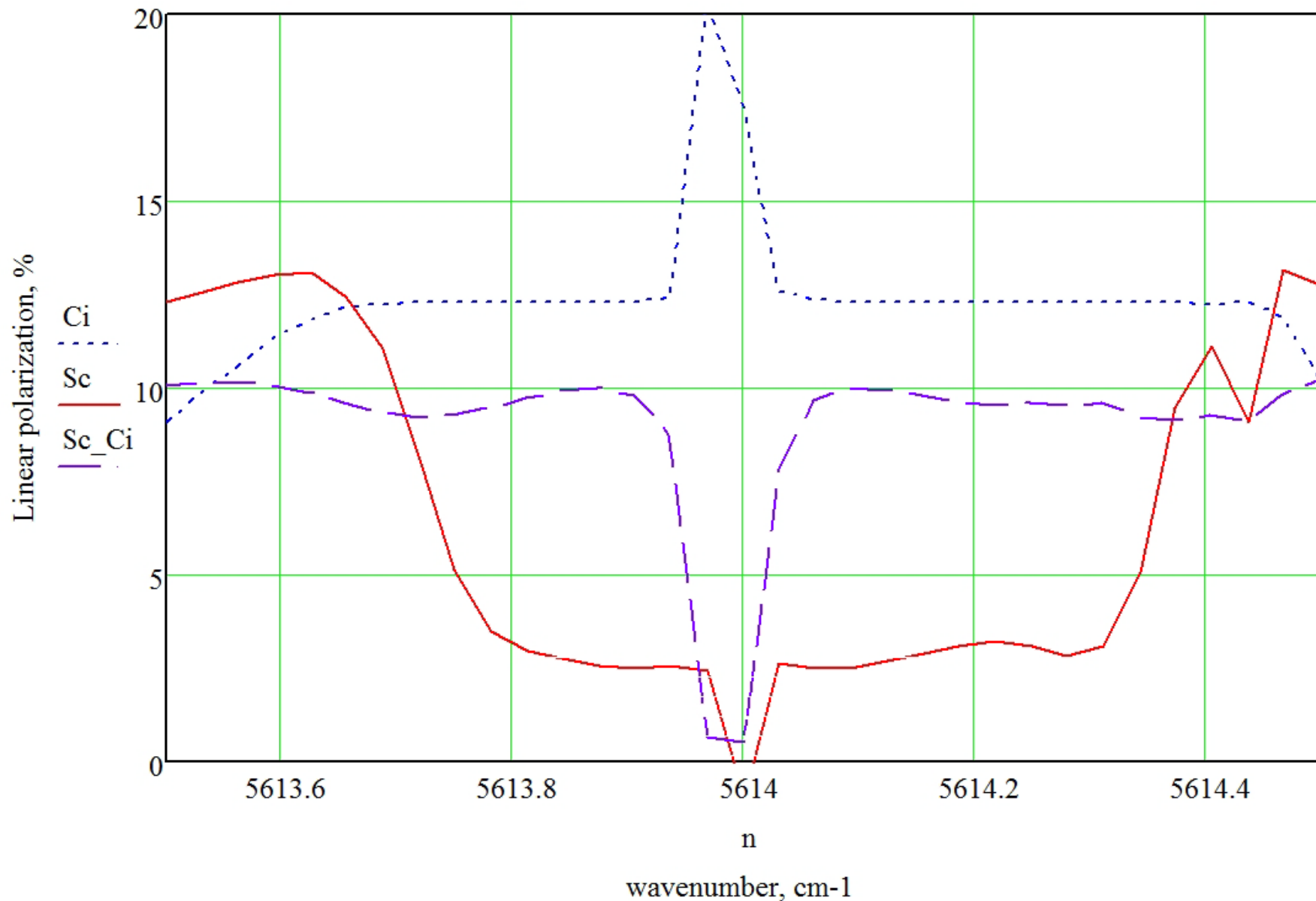
Разница в линейной поляризации между случаями со слоисто-кучевым облаком и добавлением перистого



Фиксированный угол визирования: $\vartheta = 30^\circ$ $\varphi = 180^\circ$

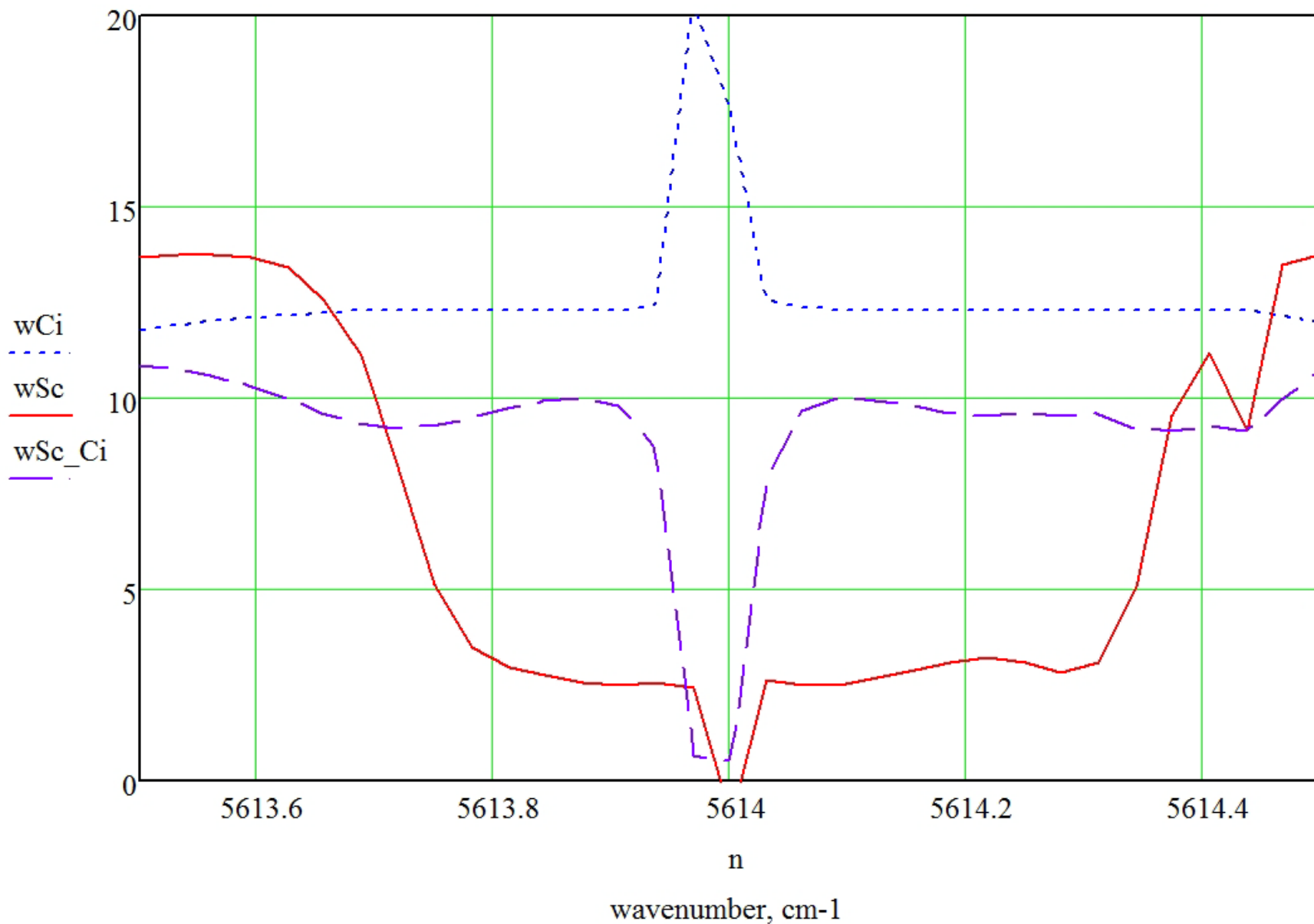
2. Изменение альбедо

Линейная поляризация для 3х случаев с облаками альбедо 0.9 (лёд)



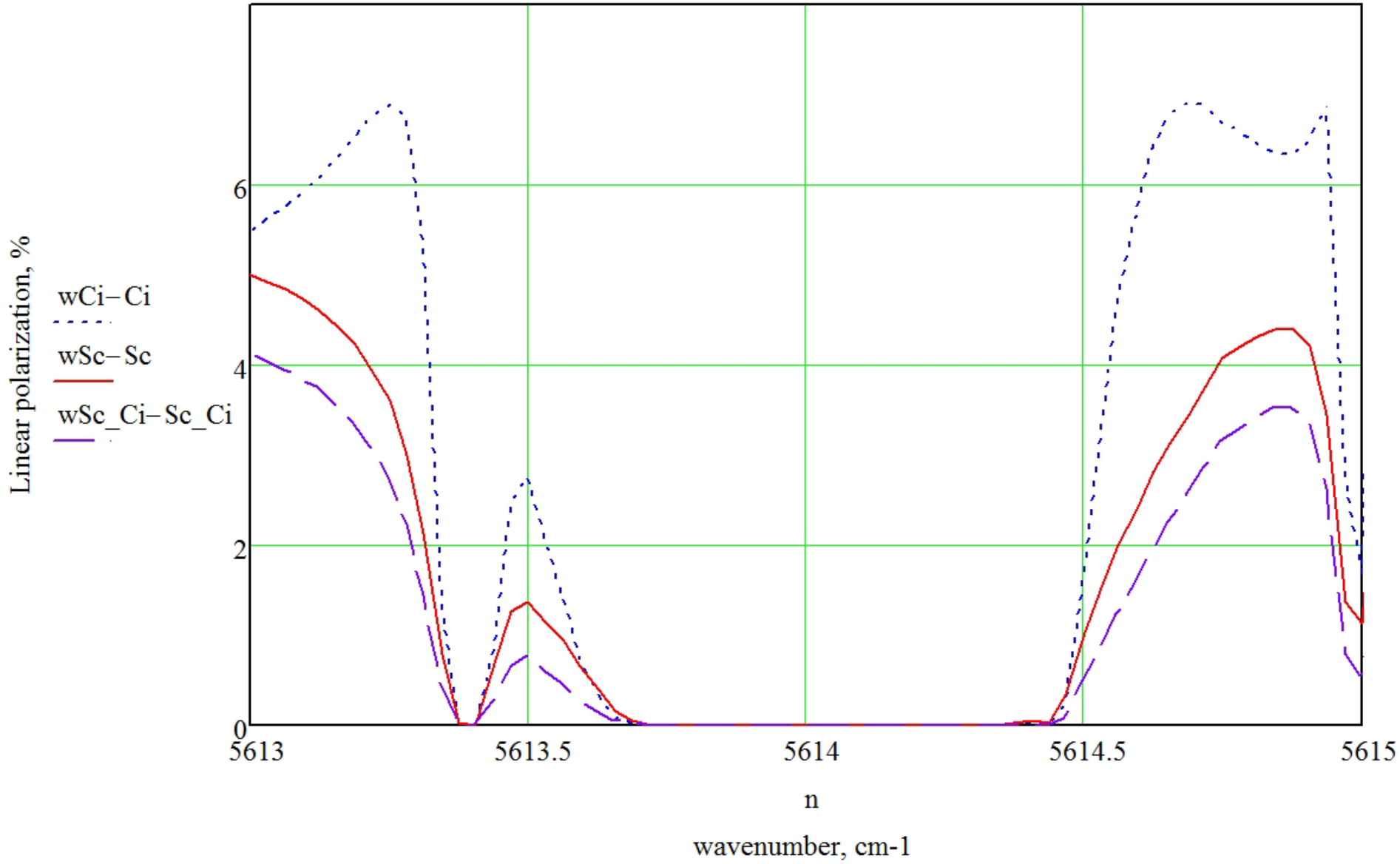
Фиксированный угол визирования: $\vartheta = 30^\circ$ $\varphi = 180^\circ$

Линейная поляризация для 3х случаев с облаками альбедо 0.06 (открытая вода)



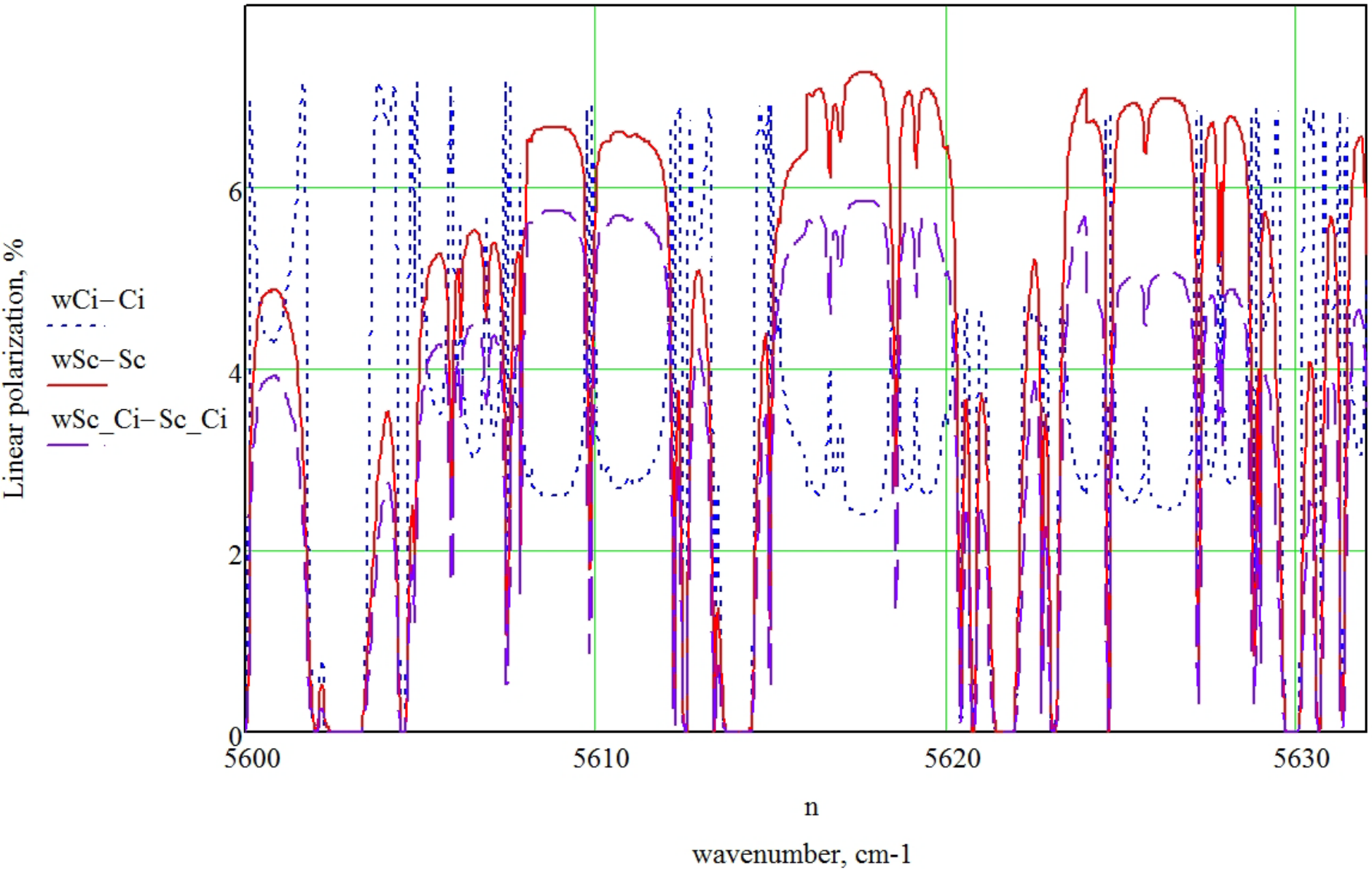
Фиксированный угол визирования: $\vartheta = 30^\circ$ $\varphi = 180^\circ$

Разница в линейной поляризации для различных альбедо



Фиксированный угол визирования: $\vartheta = 30^\circ$ $\varphi = 180^\circ$

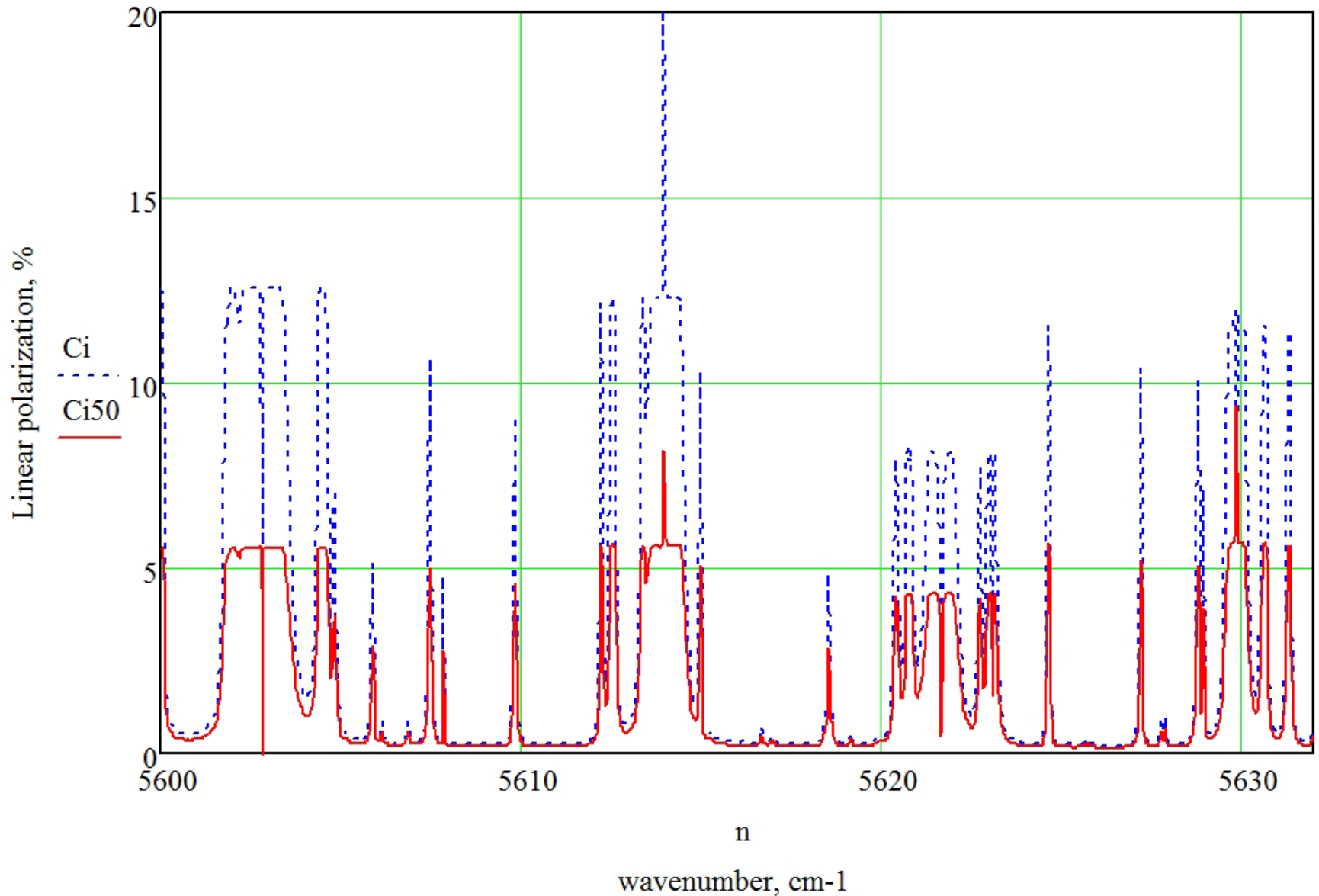
Разница в линейной поляризации для различных альбедо



Фиксированный угол визирования: $\vartheta = 30^\circ$ $\varphi = 180^\circ$

3. Изменение микрофизики перистого облака

Линейная поляризация для перистого облака с эффективными диаметрами частиц 10 и 50 мкм



Фиксированный угол визирования: $\vartheta = 30^\circ$ $\varphi = 180^\circ$

Миссии с поляриметрическими приборами

Приборы	Спутники (годы)	Назначение
POLDER – POLarization and Directionality of Earth Reflectance	PARASOL (2004-2012)	Двулучевая функция отражательной способности (BRDF), растительный покров, аэрозоль
APS – Aerosol Polarimetry Sensor (планируется перезапуск)	Glory (2011) неудачный запуск	Аэрозольная оптическая толщина, форма частиц и распределение по размерам
APS-NG – Aerosol Polarimetry Sensor – New Generation	PACE (2018-2021)	Двулучевая функция отражательной способности (BRDF), аэрозоль, перистые облака
3MI – Multi-viewing Multi-channel Multi-polarisation Imager	MetOp-SG-A1 (2020-2026), MetOp-SG-A2 (2025-2031), MetOp-SG-A3 (2030-2036)	

Measurement characteristics of existing and confirmed passive aerosol sensors with polarization capability

Sensor / Satellite Years	Spectral range (bands / range, nm) ¹	Polarization capability (bands / range, nm)	Viewing angles (# / range)	Radiometric (polarimetric) accuracy	Reference
POLDER / PARASOL 2004-2012	8 / 670 – 1020	3 / 490, 670, 860	16 / every 9° ±57° along track ²	3% (1% – 2%)	Tanre et al. (2011) Dubovik et al. (2011) Hasekamp (2011)
APS / Glory 2011 (failed)	8 / 413 – 2260	8 / 413 – 2260	~250 / +60°/–80° along track ²	3% (0.1% – 0.2%)	Mischenko et al. (2007a) Persh et al. (2010)

¹Number of bands and spectral range used for aerosol retrievals.

²At the earth.

3MI instrument

3MI	<u>Multi-viewing Multi-channel Multi-polarisation Imager</u>
Satellites	EPS-SG-A1, EPS-SG-A2, EPS-SG-A3
Status	<u>Being defined</u> — to be utilised from 2020 to ~ 2036
Mission	Aerosol, cirrus clouds, Bidirectional Reflectance (BRDF)
Instrument type	Multi-channel/direction/polarization radiometer — 13 wavelengths with 3 polarizations at 8 wavelengths from 354 to 2130 nm
Resolution	10-40 nm ($\sim 10^2 \text{ cm}^{-1}$)

SUBROUTINE MONTE_CARLO (NEW_XYZ, NEWDIR, REFLECT

USE M_C_POLAR ... Effective Lorentz half width

USE INITIAL SHW CLOUD ... $AL = TST * FACT(I) * (APALF * APF2 +$

REAL * 8 A, B, C, CHECK ... $ALAL = AL * AL$

CHARACTER MOL_AE ... $VE = VE(I) + SHIFT(I) * P$

COMMON / SCAT / POINT / SSMST, LNUMB ...
DATA K(0) / ... Doppler parameter, half width

К сожалению, в планируемых миссиях нет поляриметрических приборов с высоким спектральным разрешением

WRITE(*,*) Pause (only once) ... $DOPCON = 4.29E-7 * SQRT(T/WI$

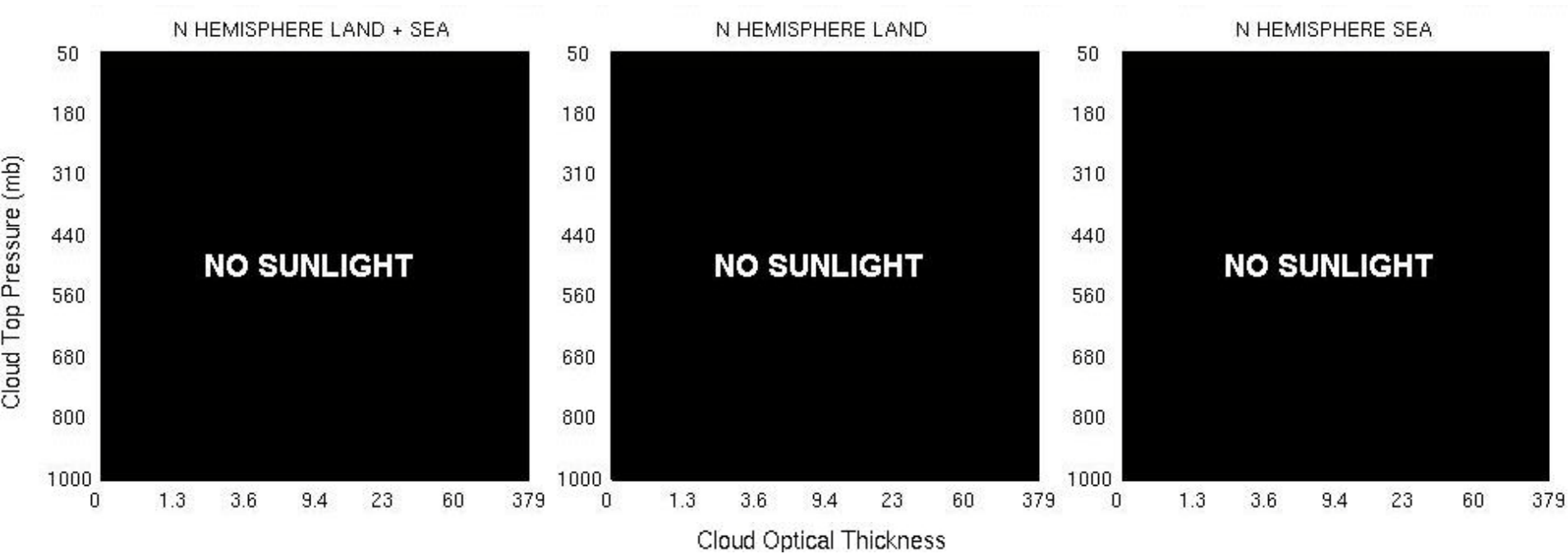
PAUSE ... Total internal partition func

END IF ... $STS3 = QofT(INIS, J_0_3) * A0 + Qof$

END IF ... $+ QofT(INIS, J_0_3+3) * A3$

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

ISCCP D1 1983-2004 усреднённая статистика облачности за январь для полярных широт (65-90° LAT)



Нет солнечного света => Нет данных

=> зондирование в тепловом диапазоне

Заключение

- **Спектр параметров Стокса уходящего солнечного излучения, полученный с высоким спектральным разрешением, содержит полезную информацию о вертикальной структуре и микрофизике рассеивающих слоёв**
- **Представленная модель может применяться в дистанционном зондировании как симулятор таких спектров, для валидации соответствующих измерений, а также для решения обратной задачи, например, для восстановления вертикальных профилей**
- **Представленная модель может использоваться как для атмосферы средних широт, так и для арктической атмосферы**
- **Для дальнейшей работы необходимы экспериментальные данные с будущих поляриметрических приборов высокого спектрального разрешения**
- **Работа поддержана грантом РФФИ 16-35-00585, и частично грантами РФФИ 15-01-00783, 14-01-00197**