

О возможностях наблюдения перистых облаков в эксперименте “ДРИАДА”.

Федорова А.А. (1), Жарикова М.С. (1), Назарова А.В. (1), Трохимовский А.Ю. (1)

(1) Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

АКТУАЛЬНОСТЬ

Перистые облака играют важную роль в климатической системе Земли. Покрывая большие области на высотах верхней тропосферы примерно 5–13 километров, они оказывают значительное влияние на энергетический баланс планеты и являются источником неопределенности в атмосферных и климатических исследованиях. Рассеяние и поглощение света ледяными кристаллами в перистых облаках может существенно модулировать перенос излучения в атмосфере. Это особенно важно в ближнем ИК диапазоне, где неучтенный перистых облаков может привести к ошибкам в восстановлении содержания атмосферных газов, что следует учитывать при решении прямых и обратных задач. Особую важность в этом плане представляет измерение их оптических свойств. Но задача усложняется тем, что в видимом и ближнем ИК диапазоне перистые облака являются оптически тонкими.

ВВЕДЕНИЕ

Возможность зондирования перистых облаков по насыщенной полосе поглощения водяного пара 1.38 мкм была предложена Gao et al. (1993) для изображений, полученных спектрометром AVIRIS (Airborn Visible/Infrared Imaging Spectrometer). В дальнейшем канал 1.38 мкм был предложен для спектрорадиометра MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) на спутнике Terra (Gao et al., 2002), где был предложен алгоритм на базе совместных измерений каналов 0.67 мкм и 1.38 мкм, для восстановления истинной отражающей способности перистых облаков в видимой области. В дальнейшем эти каналы использовались на многих спутниках, например, VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite) на борту SNPP (Suomi national Polar-orbiting Partnership) (Gao and Li, 2023), MSI (Multi Spectral Instrument) на KA Sentinel-2 (Drusch et al., 2012). Gu et al. (2020) предложил алгоритм для восстановления вертикальных профилей эффективных радиусов частиц, используя 16 спектральных каналов внутри полосы 1.38 мкм.

ДРИАДА

Спектрометр высокого разрешения «Дриада», планирующийся для установки на Международной Космической станции (МКС) предназначен для измерения таких парниковых газов как CO₂ и CH₄ в ближнем ИК диапазоне от 1.4 до 1.65 мкм. Регистрация поглощения CO₂ будет производиться в полосах 1.58 и 1.6 мкм, а CH₄ — в полосе 1.64 мкм. Выбор диапазона основан на опыте предыдущих космических экспериментов, осуществлявших измерение концентрации парниковых газов, такие, как: GOSAT (англ. Greenhouse Gases Observing Satellite) (Kasuya et al., 2009), OCO-2 (англ. Orbiting Carbon Observatory 2) (Crisp, 2015), TanSat (Wang et al., 2014). Для обеспечения точности измерений к спектрометру предъявляются определенные требования по разрешению. Для прибора «Дриада» необходимая разрешающая сила оценивалась как не менее 20000 в основных спектральных каналах, обеспечивающих измерение CO₂ и CH₄ (Трохимовский и др., 2022).

Одним из основных источников ошибок при определении концентрации газов является рассеяние света оптически тонкими перистыми облаками и аэрозолем (O'Brien et al., 2002; Dufour et al., 2003; Trieu et al., 2022). Поэтому в эксперименте Дриада предусмотрены измерения полосы поглощения водяного пара в диапазоне 1.4–1.47 мкм, а также камера фотосъемки для фильтрации облачности в диапазонах 402–422 нм, 660–680 нм, 850–870 нм.

Основной канал Дриады представляет собой классический эшелон спектрометр с Брэгговской решеткой для разделения порядков. В качестве детектора выбрано матричное фотоприемное устройство формата 640×512 элементов с шагом 15 мкм на основе фотодиодной гетероструктуры InGaAs.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Нами приведены предварительные расчеты влияния перистых облаков на измерения в диапазоне спектрометра «Дриада» на базе решения прямой задачи переноса излучения с учетом многократного рассеяния. На рисунке показаны результаты моделирования для трех типов перистых облаков пакета OPAC (Hess et al., 1998), а также для фиксированной модели, но при разной высоте облака. Оптическая толщина во всех случаях была фиксирована $t=0.6$.

Полученные спектры демонстрируют высокую чувствительность измерений в порядках дифракции Дриады для определения различных характеристик перистых облаков. В дальнейшем планируется выделение различных спектральных каналов наиболее чувствительных к высотам, оптическим толщинам и размерам частиц.

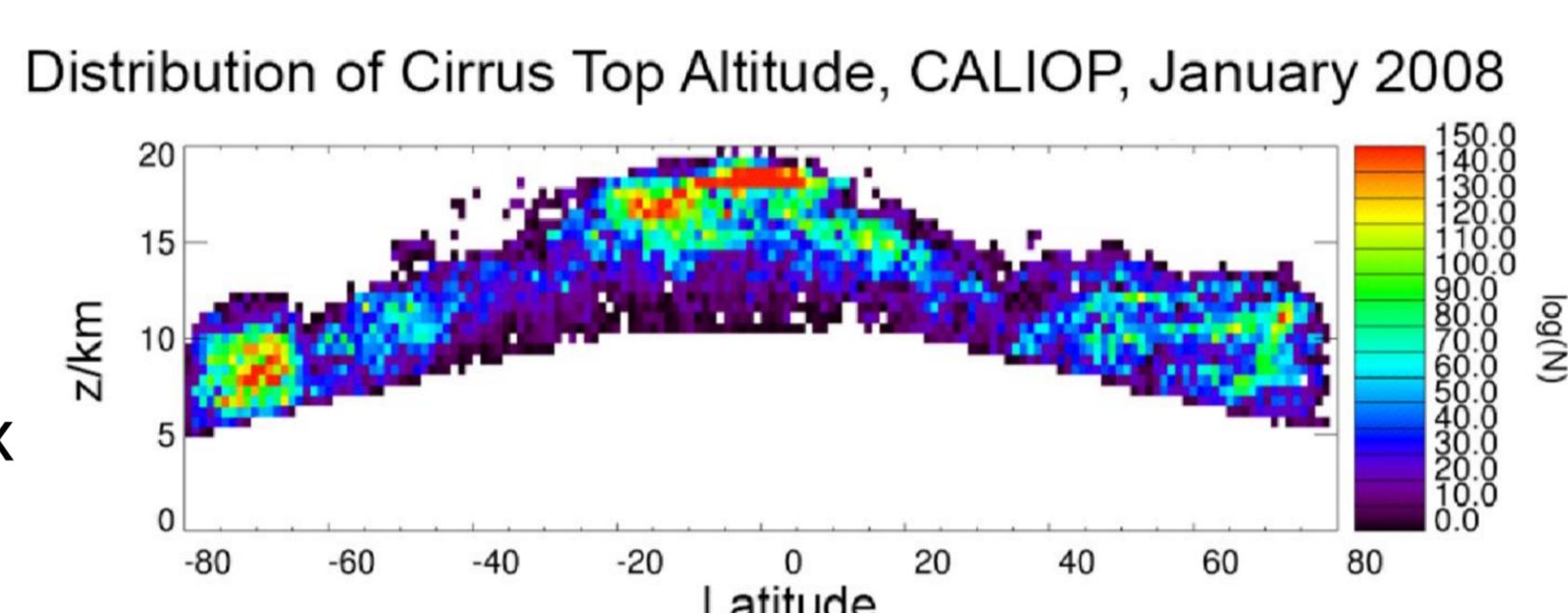
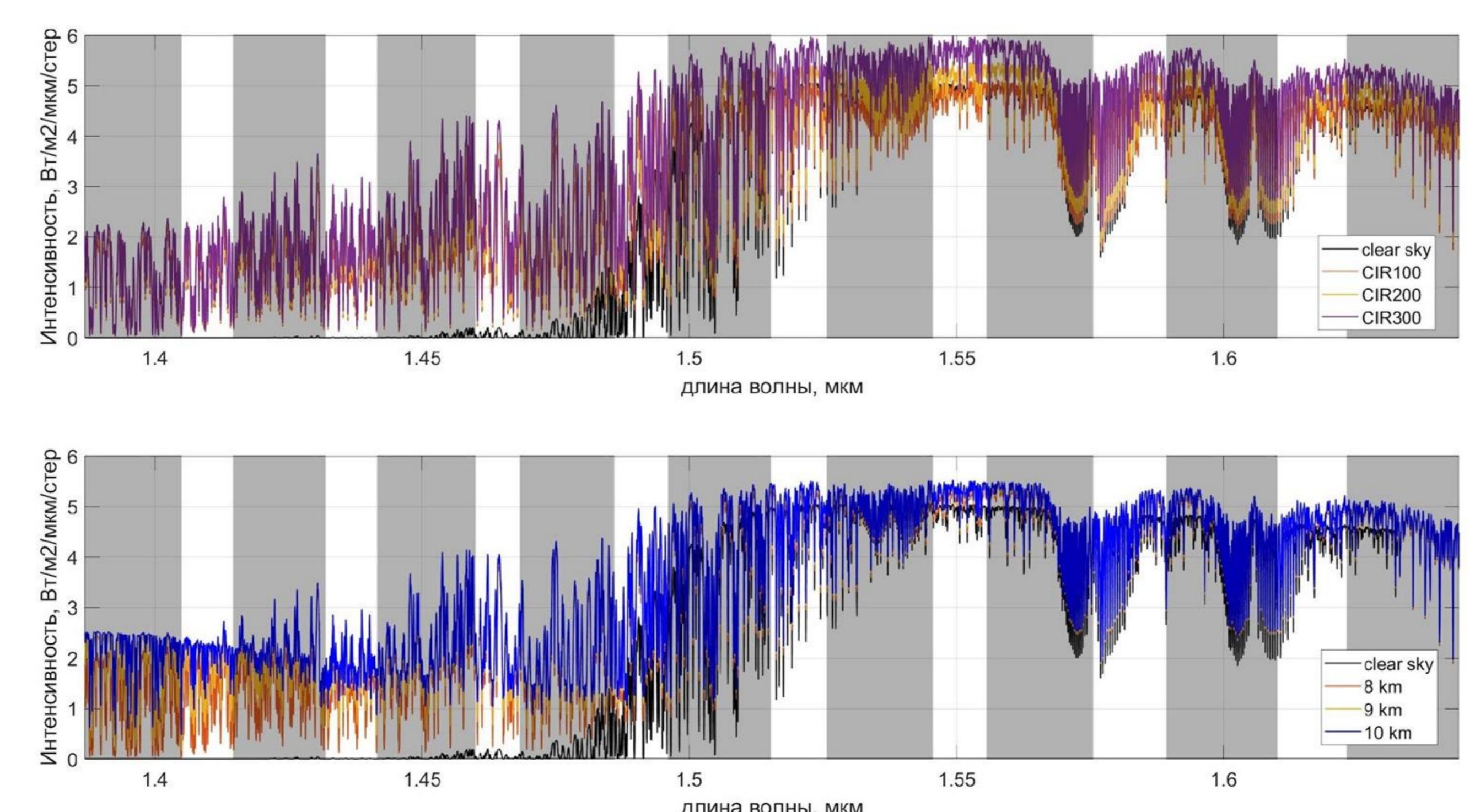


Рисунок взят из Cox et al. (2014)

Порядок дифракции, лмин – лмакс, мкм								
CH ₄	CO ₂	CO ₂	CO ₂ +H ₂ O	H ₂ O				
1.6230	1.5893	1.5556	1.5257	1.4960	1.4683	1.4416	1.4146	1.3870
1.6440	1.6100	1.5756	1.5456	1.5153	1.486	1.46	1.432	1.4050



Результаты моделирования спектров (вверху) для различных типов перистых облаков на фиксированной высоте 8 км с $t=0.6$ для демонстрации чувствительности к размерам частиц; (внизу) для Cirrus 2 на различных высотах. Заштрихованные области представляют покрытие порядков основного канала эксперимента «Дриада»

РЕШЕНИЕ ПРЯМОЙ ЗАДАЧИ УРАВНЕНИЯ ПЕРЕНОСА В ВИДИМОМ-БЛИЖНЕМ ИНФРАКРАСНОМ ДИАПАЗОНЕ

Для расчета спектров, получаемых экспериментом «Дриада» с орбиты Земли, нами была создана модель переноса излучения на базе полиномального расчета в ближнем инфракрасном диапазоне с учетом рассеяния света в атмосфере

Спектроскопия: в качестве спектроскопической информации использовалась база данных HITRAN 2020 (Gordon et al., 2021), а также континuum водяного пара модели MT_CKD_H2O (Mlawer et al., 2023).

Солнечный спектр: CAVIAR (Continuum Absorption at Visible and Infrared Wavelengths and its Atmospheric Relevance) (Menang et al., 2013)

Атмосферные профили: В качестве атмосферных профилей использовались 200 тренировочных профилей ECMWF CAMS на 137 уровнях атмосферы до ~75 км над уровнем моря (0,02 гПа) в период с марта 2024 по февраль 2025 года. (Turner E., 2025).

Тренировочные профили для разных локаций на поверхности Земли и сезонов (Matricardi, 2008). Профили генерируются на основе ECMWF и ERA 5 на 2023 и 2024 г.г. и включают давление, температуру, вертикальное распределение H₂O (ppmv), CO₂ (ppmv), N₂O(ppmv), CH₄(ppmv).

Учет рассеяния: DISORT (Discrete Ordinates Radiative Transfer Program for a Multi-Layered Plane-Parallel Medium) (Stamnes et al., 1988; Lin et al., 2015), SHDOMPP (Spherical Harmonic Discrete Ordinate Method) (Evans et al., 1998)

Поверхность: ключевую роль в расчетах играет альбедо поверхности Земли. В модели использовались атлас VIS/NIR BRDF поверхности Земли для RTTOV-11 (Vidot and Borbas, 2014) и база HAMSTER, набор данных гиперспектральных карт альбедо с высоким пространственным и временным разрешением (Rocchetto et al., 2022).

Оптические свойства перистых облаков:

OPAC (Hess et al., 1998), три типа ледяных облаков со спектральной зависимостью альбедо однократного рассеяния, параметра асимметрии и индикаторы рассеяния.

Component	File name	r_{eff} (μm)	N (cm^{-3})	I (g m^{-3})
Cirrus 1: -25°C	CIR1	91.7	0.107	0.0260
Cirrus 2: -50°C	CIR2	57.4	0.0225	0.00193
Cirrus 3: -50°C (+ small particles)	CIR3	34.3	0.578	0.00208

ЛИТЕРАТУРА:

1. Трохимовский А.Ю., О.И. Кораблев, Ю.С. Иванов, А.С. Патракеев, А.А. Федорова, И.А. Дзюбан, В.В. Дружин, М.А. Полуаршинов, Ю.В. Смирнов, Инфракрасный канал научной аппаратуры «Дриада» для измерения содержания парниковых газов из космоса //Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», том 19, номер 6, 2022.
2. Crisp D. Measuring atmospheric carbon dioxide from space with the Orbiting Carbon Observatory-2 (OCO-2) //Earth observing systems xx. – SPIE, 2015. – Т. 9607. – С. 960702.
3. Drusch M., Del Bello U., Carlier S., Collin O., Fernandez V., Gascon F., Hoersch B., Isola C., Laberinti P., Martimort P., Meygret A., Spoto F., Sy O., Marchese F., Bagalini P., 2012.
4. Dufour E. and Bréon F.M., "Spaceborne estimate of atmospheric CO₂ column by use of the differential absorption method: error analysis," Appl. Opt. 42, 3595-3609 (2003)
5. Evans K. F. The spherical harmonics discrete ordinate method for three-dimensional atmospheric radiative transfer //Journal of the Atmospheric Sciences. – 1998. – Т. 55. – №. 3. – С. 429-446.
6. Gao, B.-C., Goetz, A.F.H., Wiscombe, W.J., 1993. Cirrus cloud detection from Airborne Imaging Spectrometer data using the 1.38 μm water vapor band. Geophysical Research Letters 20, 301–304. <https://doi.org/10.1029/93GL00106>
7. Bo-Cai Gao, Ping Yang, Wei Han and W. J. Wiscombe, "An algorithm using visible and 1.38-spl mu/m channels to retrieve cirrus cloud reflectances from aircraft and satellite data," in IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 40, no. 8, pp. 1659-1668, Aug. 2002, doi: 10.1109/TGRS.2002.802454
8. Gao B.-C.; Li, R.-R. The VIIRS Cirrus Reflectance Algorithm. Sensors 2023, 23, 2234. <https://doi.org/10.3390/s23022234>
9. Gordon I. E. et al. The HITRAN2020 molecular spectroscopic database //Journal of quantitative spectroscopy and radiative transfer. – 2022. – Т. 277. – С. 107949.
10. Gu Y., Takano Y., Liou K. N. Retrieval of vertical profile of cirrus cloud effective particle size using reflected line spectra in 1.38 μm band //Earth and Space Science. – 2020. – Т. 7. – №. 5. – С. 2020EA00119.
11. Hess M., Koepke P., Schult I. Optical properties of aerosols and clouds: The software package OPAC //Bulletin of the American meteorological society. – 1998. – Т. 79. – №. 5. – С. 831-844.
12. Kasuya M., Nakajima M., Hamazaki T. Greenhouse gases observing satellite (GOSAT) program overview and its development status //Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Space Technology Japan. – 2009. – Т. 7. – №. 1st26. – С. To_4_5-To_4_10.
13. Cox K. B., Bugliaro L., Ostler A. Retrieval of cirrus cloud optical thickness and top altitude from geostationary remote sensing //Atmospheric Measurement Techniques. – 2014. – Т. 7. – №. 10. – С. 3233-3246.
14. Lin Z. et al. Improved discrete ordinate solutions in the presence of an anisotropically reflecting lower boundary: Upgrades of the DISORT computational tool //Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. – 2015. – Т. 157. – С. 119-134.
15. Matricardi M. et al. The generation of RTTOV regression coefficients for IASI and AIRS using a new profile training set and a new line-by-line database. – Reading : ECMWF, 2008. – Т. 564. – С. 1-47.
16. Menang K. P. et al. A high-resolution near-infrared extraterrestrial solar spectrum derived from ground-based Fourier transform spectrometer measurements //Journal of Geophysical Research: Atmospheres. – 2013. – Т. 118. – №. 11. – С. 5319-5331.
17. Mlawer E. J. et al. The inclusion of the MT_CKD water vapor continuum model in the HITRAN molecular spectroscopic database //Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. – 2023. – Т. 306. – С. 108645.
18. O'Brien D. M., and P. J. Rayner, Global observations of the carbon budget, 2, CO₂ column from differential absorption of reflected sunlight in the 1.61 μm band of CO₂, J. Geophys. Res., 107(D18), 4354, doi:10.1029/2001JD000617, 2002.
19. Rocchetto G. et al. HAMSTER: Hyperpectral Albedo Maps dataset with high Spatial and TEmporal Resolution //Atmospheric Measurement Techniques. – 2024. – Т. 17. – №. 20. – С. 6025-6046, https://doi.org/10.5194/amt-17-6025-2024, 2024.
20. Starnes K. et al. DISORT, a general-purpose Fortran program for discrete-ordinate-method radiative transfer in scattering and emitting layered media: documentation of methodology. – 2000.
21. Trieu, T.T.N., Morino, I., Uchino, O., Tsutsumi, Y., Sakai, T., Nagai, T., Yamazaki, A., Okumura, H., Arai, K., Shiomi, K., Pollard, D.F., Liley, B., 2022. Influences of aerosols and thin cirrus clouds on GOSAT XCO₂ and XCH₄ using Total Carbon Column Observing Network, sky radiometer, and lidar data. International Journal of Remote Sensing 43, 1770–1799. <https://doi.org/10.1080/01431611.2022.2038395>
22. Turner E. Diverse profile datasets from the ECMWF CAMS 137-level short-range forecasts //NWP SAF NWPSAF-ECTR-044. – 2025. https://nwp-saf.eumetsat.int/site/software/atmospheric-profile-data/
23. Vidot J., Borbás É. Land surface VIS/NIR BRDF atlas for RTTOV-11: model and validation against SEVIRI land SAF albedo product //Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. – 2014. – Т. 140. – №. 684. – С. 2186-2196. <https://doi.org/10.1002/qj.2888>
24. Wang Q., Yang Z. D., Bi Y. M. Spectral parameters and signal-to-noise ratio requirement for TANSAT hyper spectral remote sensor of atmospheric CO₂ //Remote Sensing of the Atmosphere, Clouds, and Precipitation V. – SPIE, 2014. – Т. 9259. – С. 351-366.