

Оценка точности измерения содержания парниковых газов в атмосфере Земли орбитальным спектрометром высокого разрешения «Дриада»

Назарова А.В. (1), Федорова А.А. (1), Жарикова М.С. (1), Трохимовский А.Ю. (1), Патракеев А.В. (1), Кораблев О.И. (1)
(1) Институт космических исследований РАН, Москва, Россия
nazarova_av@cosmos.ru

АКТУАЛЬНОСТЬ

Наблюдаемый на Земле парниковый эффект тесно связан с содержанием в атмосфере таких газов, как углекислый газ (CO₂) и метан (CH₄). Одним из источников является хозяйственная деятельность человека, что приводит к увеличению среднего уровня концентрации газов. В настоящее время концентрация парниковых газов антропогенного происхождения в атмосфере Земли возрастает с каждым годом. Увеличение объемов выбросов, связанных с деятельностью человека, привело к текущему содержанию парниковых газов, по данным NOAA, CO₂ на декабрь 2024 - 425.21 ppm, на декабрь 2025 - 427.35 ppm (<https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/global.html>). CH₄ на ноябрь 2024 - 1940.00 ppb, на ноябрь 2025 - 1945.85 ppb (https://gml.noaa.gov/ccgg/trends_ch4/). Из-за влияния, оказываемого на окружающую среду, возникла необходимость в контроле концентрации выбросов основных парниковых газов и поиска мест их происхождения. Помимо наземных сетей измерения, для отслеживания изменений состава атмосферы необходимы спутники и приборы для дистанционного мониторинга парниковых газов. Наиболее эффективным методом, решающим эту задачу, является спектральный анализ солнечного света, отраженного от поверхности в ближнем инфракрасном (ИК) диапазоне. В качестве инструмента дистанционного мониторинга используются спектрометры высокого спектрального разрешения.

РЕШЕНИЕ ПРЯМОЙ ЗАДАЧИ УРАВНЕНИЯ ПЕРЕНОСА В БЛИЖНЕМ ИНФРАКРАСНОМ ДИАПАЗОНЕ

Для исследования чувствительности эксперимента «Дриада» с орбиты Земли нами была создана модель переноса излучения на базе полинейного расчета в ближнем инфракрасном диапазоне с учетом рассеяния света в атмосфере

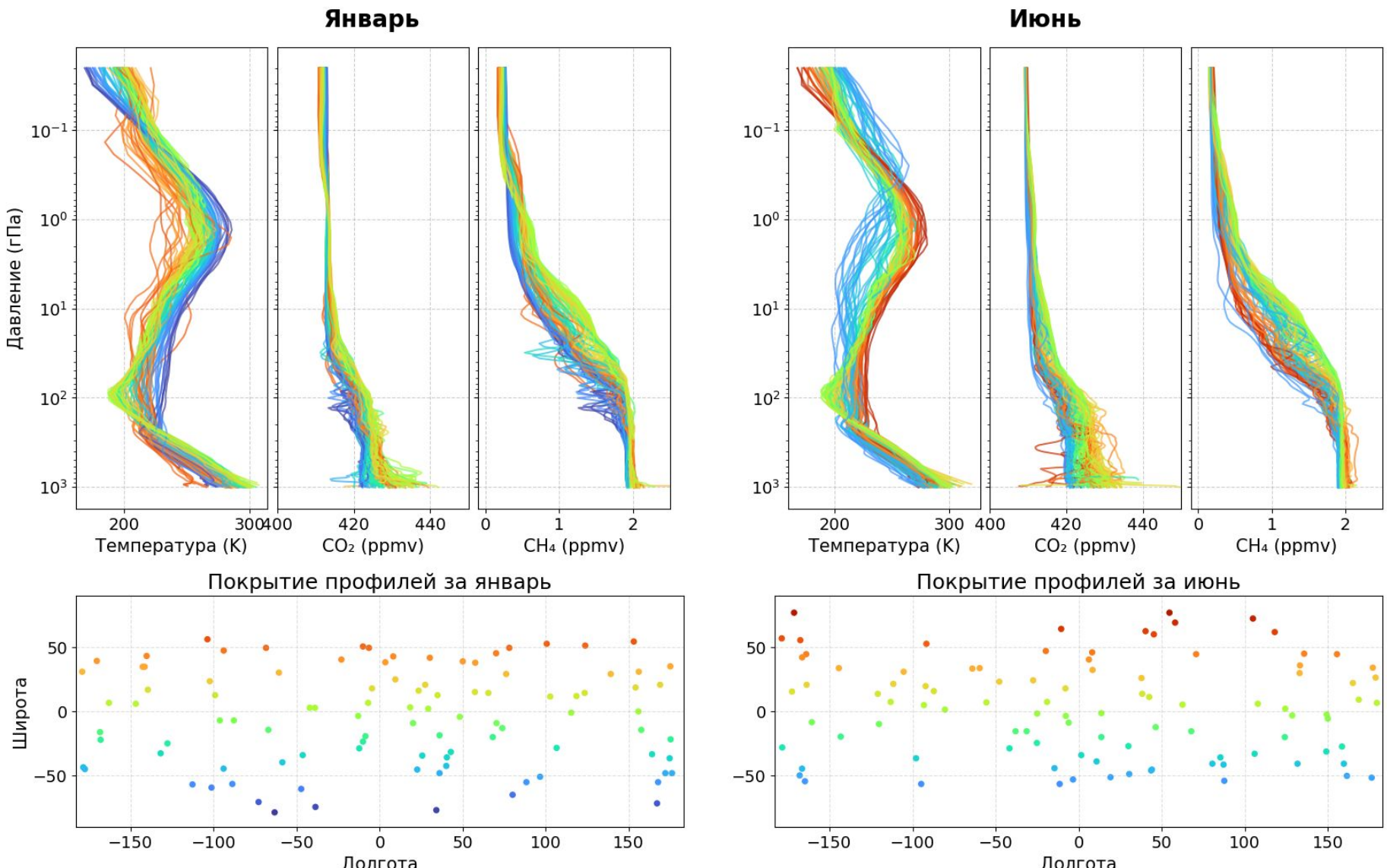
Спектроскопия: в качестве спектроскопической информации использовалась база данных HITRAN2020 (Gordon et al., 2021), а также континуум водяного пара модели MT_CKD_H2O 4.3 (Mawer et al., 2023).

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

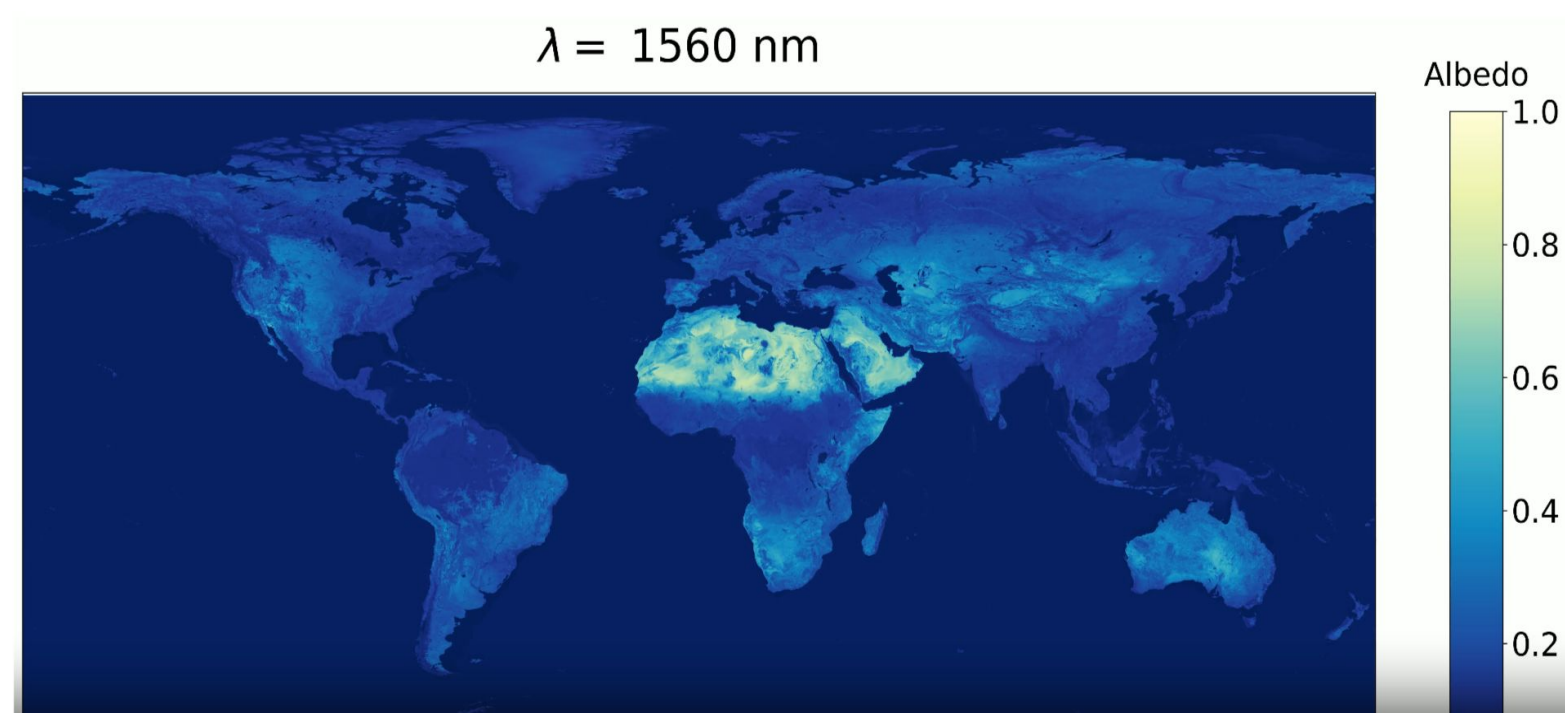
Атмосферные профили: В качестве атмосферных профилей использовались 1200 тренировочных профилей, сформированных на базе глобальных прогнозов химического состава атмосферы CAMS (Copernicus Atmospheric Monitoring Service) центра ECMWF (The European Centre for Medium-range Weather Forecast), по 100 профилей на каждый месяц года 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). В этой выборке содержатся только профили, инициализированные в 00:00 UTC 1-го, 10-го и 20-го числа каждого месяца с прогнозом на 36, 42, 48 и 54 часа вперед. 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: SHDOM (Spherical Harmonic Discrete Ordinate Method for Atmospheric Radiative Transfer; Emde et al., 2015)

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 альбеда с высоким пространственным и временным разрешением (Rosscetti et al., 2024).



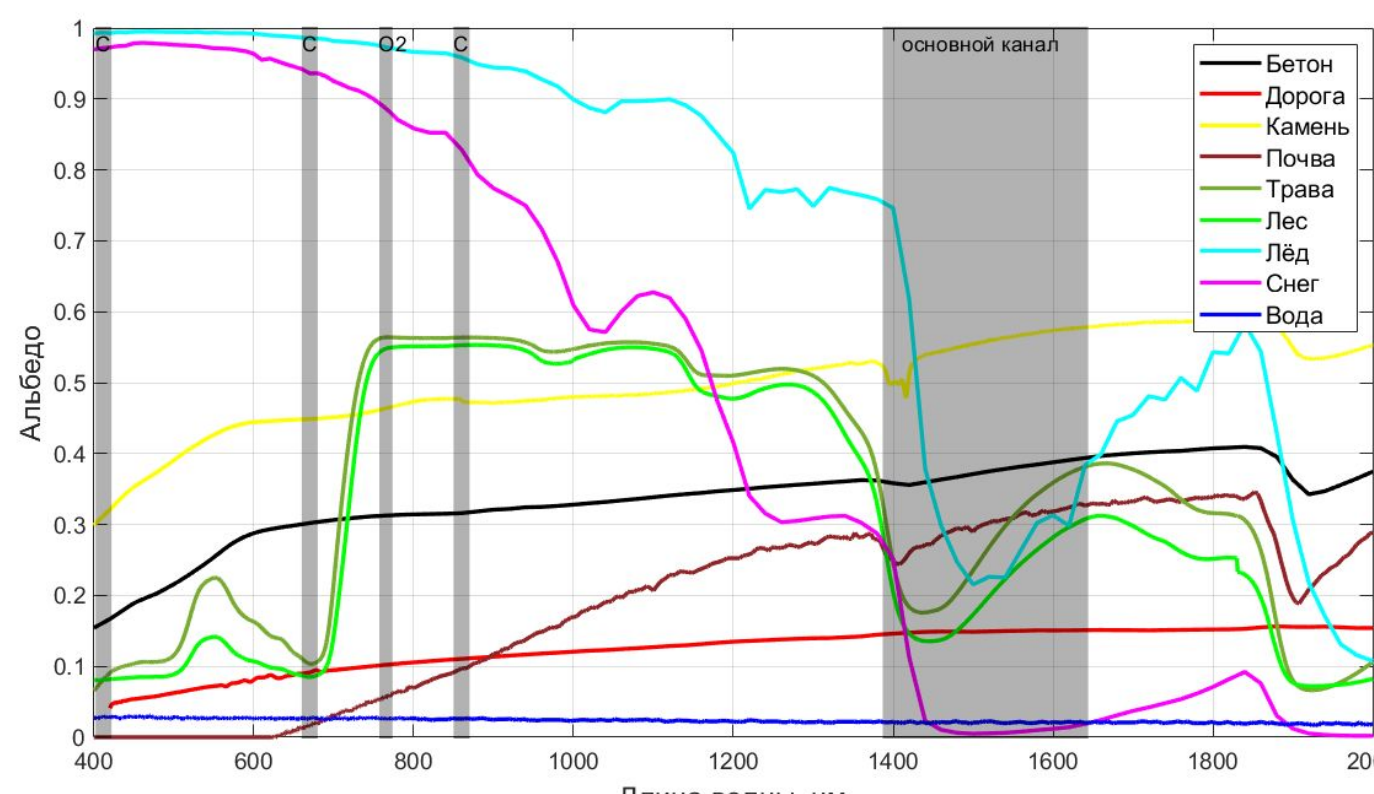
Вертикальные профили температуры, объемной концентрации CO₂ и CH₄ для января (левая пара панелей) и июня (правая пара панелей). Цвет каждой линии соответствует широте профиля — от синих оттенков для южных широт (отрицательные значения) до красных для северных (положительные значения). В нижних панелях представлено географическое покрытие соответствующих профилей для каждого месяца.



Альбеда поверхности по базе HAMSTER для 265го дня на длине волны 1560 нм (Rosscetti et al., 2024)

Порядок	λ_{c1} , нм	λ_{c2} , нм	$\lambda_{шир}$, нм	$\nu_{шир}$, см ⁻¹	Ширина порядка, нм
47	1645,9	1634,3	1621,9	6119	24
48	1611,6	1600,2	1588,1	6249	23,5
49	1578,8	1567,6	1555,7	6379	23,1
50	1547,2	1536,2	1524,6	6509	22,6
51	1516,8	1506,1	1494,7	6640	22,1
52	1487,7	1477,1	1466	6770	21,7
53	1459,6	1449,3	1438,3	6900	21,3
54	1432,6	1422,4	1411,7	7030	20,9
55	1406,5	1396,6	1386	7160	20,5

Спектральные диапазоны, соответствующим порядкам дифракции эшелле-спектрометра «Дриада»



Проекция спектральных диапазонов эксперимента «Дриада» на отражательную способность различных типов поверхности по данным спектральной библиотеки ECOSTRESS (Meerdink et al., 2019)

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 25-27-00338.

ЛИТЕРАТУРА:

- Кораблев О. И. и др. Прибор "РУСАЛКА" для измерения содержания углекислого газа и метана в атмосфере с борта Международной космической станции //Оптический журнал. – 2011. – Т. 78. – №. 5. – С. 44-58.
- Трохимовский А. Ю. и др. Инфракрасный канал научной аппаратуры «Дриада» для измерения содержания парниковых газов из космоса //Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2022. – Т. 19. – №. 6.
- Chédin A. et al. The feasibility of monitoring CO₂ from high-resolution infrared sounders //Journal of Geophysical Research: Atmospheres. – 2003. – Т. 108. – №. D2.
- 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.
- de Vries J. et al. Technology evolution of the TROPOMI instrument //2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. – IEEE, 2012. – С. 2876-2879.
- Emde C., Barlakas V., Cornet C. et al. IPRT polarized radiative transfer model Intercomparison project-Phase A //Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 2015. V. 164. P. 8-36. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2015.05.007.
- Fedorova A. A. et al. Stormy water on Mars: The distribution and saturation of atmospheric water during the dusty season //Science. – 2020. – Т. 367. – №. 6475. – С. 297-300.
- Gordon I. E. et al. The HITRAN2020 molecular spectroscopic database //Journal of quantitative spectroscopy and radiative transfer. – 2022. – Т. 277. – С. 107949.
- 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. – №. ists26. – С. To_4_5-To_4_10.
- Korablev O. et al. No detection of methane on Mars from early ExoMars Trace Gas Orbiter observations //Nature. – 2019. – Т. 568. – №. 7753. – С. 517-520.
- Levenberg K. A method for the solution of certain non-linear problems in least squares //Quarterly of applied mathematics. – 1944. – Т. 2. – С. 164-168.
- 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.
- Marquardt D. W. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters //Journal of the society for Industrial and Applied Mathematics. – 1963. – Т. 11. – №. 2. – С. 431-441.
- 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.
- 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.
- Mawer 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.
- Rosscetti G. et al. HAMSTER: Hyperspectral 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.
- Schulz F. M., Stammes K., Weng F. VDISORT: an improved and generalized discrete ordinate method for polarized (vector) radiative transfer //Journal of quantitative spectroscopy and radiative transfer. – 1999. – Т. 61. – №. 1. – С. 105-122.
- Stammes 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.
- Turner E. Diverse profile datasets from the ECMWF CAMS 137-level short-range forecasts //NWPF SAF NWP/SAF-ECTR-044. – 2025. <https://nwp-saf.eu/umetsat/site/software/atmospheric-profile-data/>
- Vidot J., Borbas E. 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.2288>
- 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.

ДРИАДА

Спектрометр высокого разрешения «Дриада», планирующий 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 предыдущий 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). Прототипом спектрометра послужил (РУчной Спектральный Анализатор Компонентов Атмосферы) РУСАЛКА, работавший на МКС в 2009-2011 годах (Кораблев и др., 2011). Современные модели требуют для экспериментов дистанционного зондирования высокую точность измерений содержания. В случае парниковых газов лучше чем 0.5% (Chedin et al., 2003). Для обеспечения точности измерений к спектрометру предъявляются определенные требования по разрешению и отношению сигнала к шуму. Для прибора «Дриада» необходимая разрешающая сила оценивалась как не менее 20000 в основных спектральных каналах, обеспечивающих измерение CO₂ и CH₄ (Трохимовский и др., 2022).

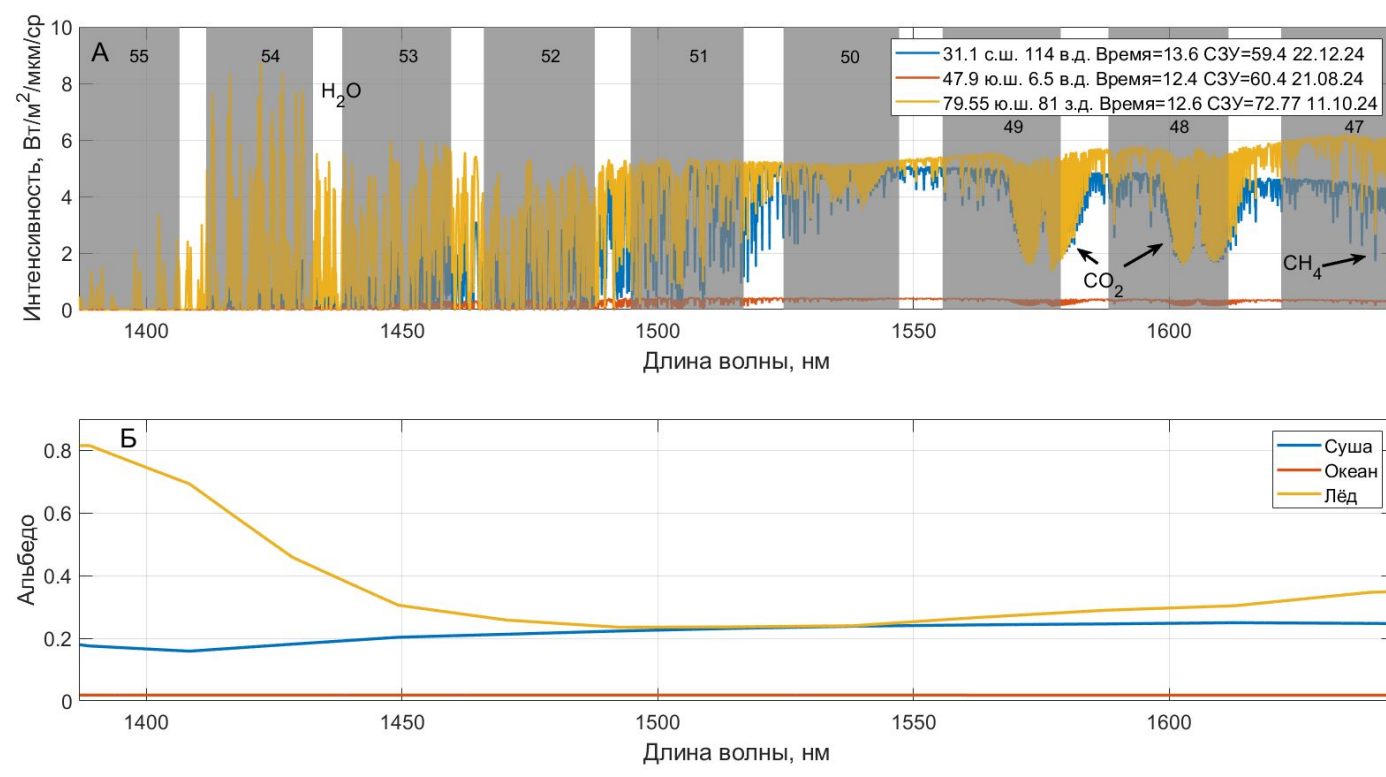
Спектрометр «Дриада» состоит из двух спектрометров (основного канала, работающего в диапазоне 1,38–1,65 мкм для измерения парниковых газов, канала для измерения содержания молекулярного кислорода в диапазоне 0,757 и 0,7736 мкм) и контекстной камеры для распознавания облачности в диапазонах 402–422, 660–680, 850–870 нм.

Основной канал

«Дриады» представляет собой классический эшелле-спектрометр, дополненный брэгговской решёткой для разделения порядков. Эшелле-решётка имеет 23,2 штриха/мм с номинальным углом блеска 63° (R2). В качестве детектора выбрано матричное фотоприёмное устройство формата 640×512 элементов с шагом 15 мкм на основе фотодиодной гетероструктуры InGaAs. Яркость шума спектрометра в диапазоне 1600 нм оценивается как 0.03 Вт м⁻² мкм⁻¹.



Фото прибора «ДРИАДА»

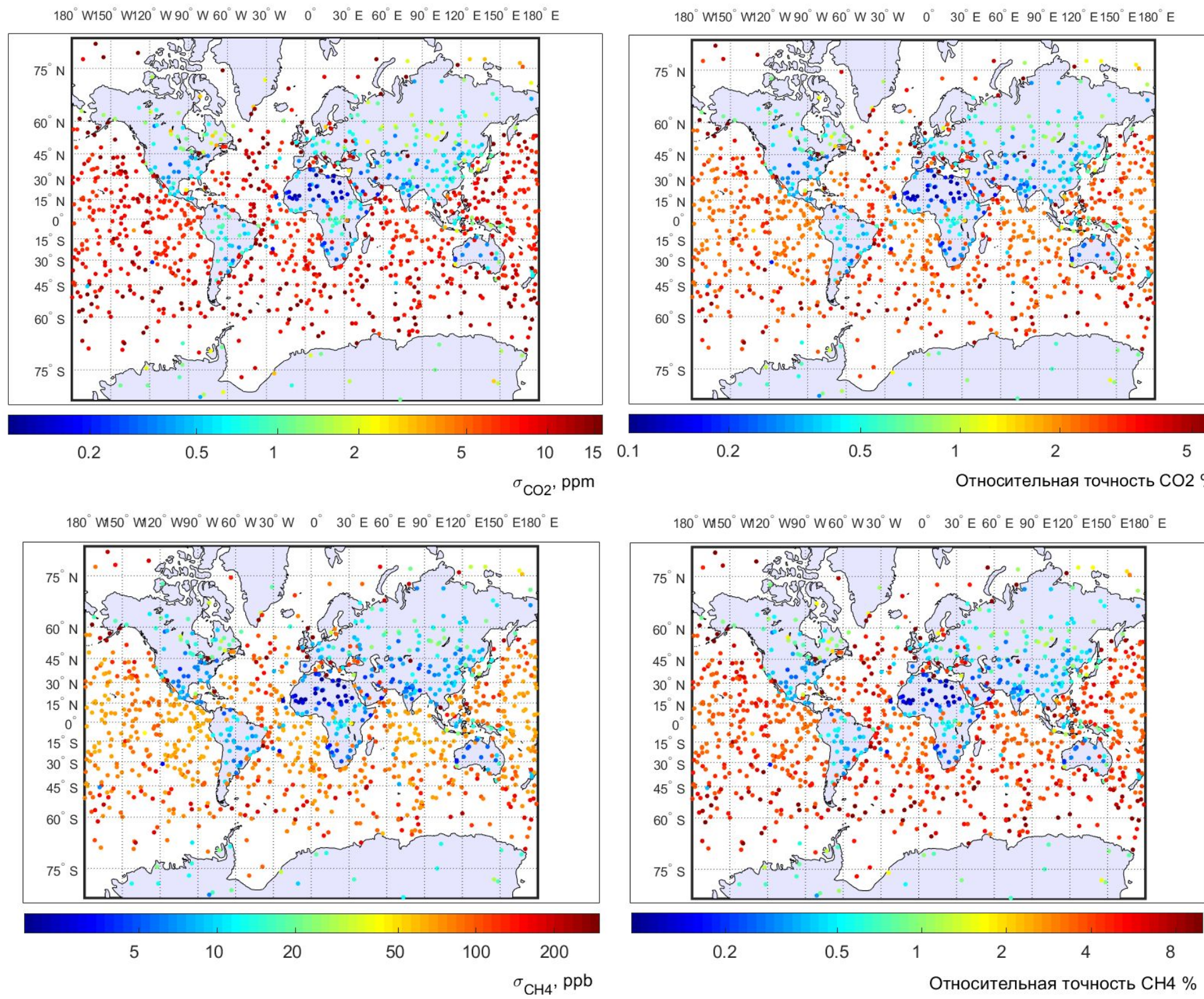


Примеры модельных спектров в диапазоне основного канала Дриады для различных типов поверхности с наложенными диапазонами порядков дифракции на детекторе при текущей конфигурации спектрометра (а) и зависимость альбеда поверхности от длины волны для суши, океана и льда (б)

РЕЗУЛЬТАТЫ

Задачей данной работы было исследование чувствительности спектрометра для одновременного восстановления содержания метана и углекислого в порядках дифракции, которые будут измеряться спектрометром. Для этого модельные спектры для 1200 тренировочных профилей, свернутые с базовым разрешением (R=λ/Δλ=20000), были аппроксимированы на 640 спектральных каналов детектора с диапазоне 1.623-1.644 мкм для CH₄ и 1.5893-1.61 мкм для CO₂. Спектры были зашумлены с ожидаемой яркостью шума детектора.

Для решения обратной задачи и восстановления содержания CO₂ и CH₄ в соответствующих порядках использовался метод Левенберга-Марквардта (Levenberg, 1944; Marquardt, 1963). Наименьшая точность измерений от 1,65% до 20,32% для CO₂ и 3,16% до 40,07% для CH₄ наблюдается над водной поверхностью. Наибольшая точность от 0,051% до 0,3% для CO₂ и от 0,17% до 1,28% для CH₄ наблюдается над африканским континентом и Австралией, благодаря высокому альбеда поверхности в течение всего года. В средних северных широтах точность варьируется от 0,047% до 0,47% для CO₂ и от 0,093% до 4,21% для CH₄. Ведется работа по одновременному восстановлению содержания CO₂,CH₄, H₂O, альбеда поверхности и других параметров.



Оценка абсолютной (а) и относительной (б) ошибки измерений CO₂ по данным эксперимента «Дриада» для 1200 тренировочных профилей

Оценка абсолютной(а) и относительной(б) ошибки измерений CH₄ по данным эксперимента «Дриада» для 1200 тренировочных профилей