

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

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 (ПГ), по данным NOAA, CO₂ на март 2024 - 423,4 ppm, на март 2025 - 426,4 ppm (<https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/global.html>). CH₄ на февраль 2024 - 1925,99 ppb, на февраль 2025 - 1933,97 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. Среди предыдущих космических экспериментов, осуществивших измерение концентрации парниковых газов, такие, как: GOSAT (англ. Greenhouse Gases Observing Satellite) (Kasuya et al., 2009), OCO-2 (англ. Orbiting Carbon Observatory 2) (Crisp et al., 2015), TanSat (Wang et al., 2014), TROPOMI (CH4) (англ. Tropospheric Ozone-Monitoring Instrument) (de Vries et al., 2012).

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 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). 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%. Для обеспечения точности измерений к спектрометру предъявляются определенные требования по разрешению и отношению сигнала к шуму. Для прибора «Дриада» необходима разрешающая сила оцененная как не менее 20000 в основных спектральных каналах, обеспечивающих измерение CO₂ и CH₄ (Трохимовский и др., 2022).

Спектрометр Дриада состоит из двух спектрометров: основной канал, работающего в диапазоне 1.387 – 1.644 мкм для измерения парниковых газов, канал для измерения содержания молекулярного кислорода в диапазоне 0,757 мкм и 0,7736 мкм и камера фотосъемки для фильтрации облачности в диапазонах 402-422 нм, 660-680 нм, 850-870 нм.

Основной канал Дриады представляет собой классический эшелле спектрометр с брэгговской решеткой для разделения порядков. В качестве детектора выбрано матричное фотоприемное устройство формата 640x512 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



Рис.1 Фото прибора «ДРИАДА»

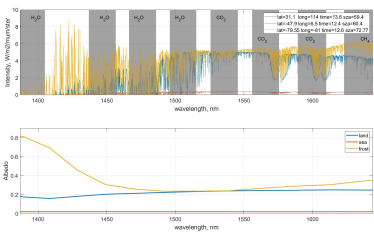
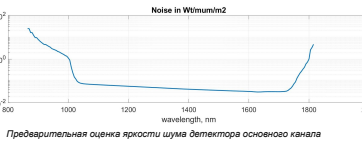


Рис.2 Примеры модельных спектров в диапазоне основного канала Дриады для различных типов поверхности с наложенными диагональными порядками дифракции на детекторе при текущей конфигурации спектрометра

Порядок дифракции, Амн – макс, мкм							
CH4	CO2	CO2	CO2+H2O	H2O	H2O	H2O	H2O
1.6230	1.5893	1.5856	1.5257	1.4960	1.4663	1.4366	1.3870
1.6440	1.6100	1.5756	1.5456	1.5153	1.486	1.456	1.4050



Предварительная оценка яркости шума детектора основного канала

РЕШЕНИЕ ПРЯМОЙ ЗАДАЧИ УРАВНЕНИЯ ПЕРЕНОСА В БЛИЖНЕМ ИНФРАКРАСНОМ ДИАПАЗОНЕ

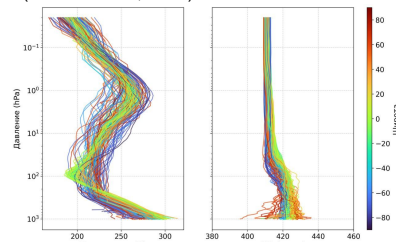
Для исследования чувствительности эксперимента «Дриада» с орбиты Земли нами была создана модель переноса излучения на базе полинейного расчета в ближнем инфракрасном диапазоне с учетом рассеяния света в атмосфере **Спектроскопия:** в качестве спектроскопической информации использовалась база данных HITRAN2020 (Gordon et al., 2021), а также континуум водяного пара модели MT_CKD_H2O (Mlawer et al., 2023).

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

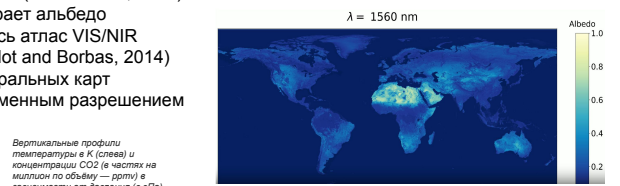
Атмосферные профили: В качестве атмосферных профилей использовались 200 тренировочных профилей ECMWF CAMS на 137 уровнях атмосферы до ~75 км над уровнем моря (0,02 гПа) в период с марта 2024 по февраль 2025 года. (Turner E., 2025). Тренировочные профили для разных локаций на поверхности Земли и сезоны (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), **VDISORT** (Schulz et al., 1999)

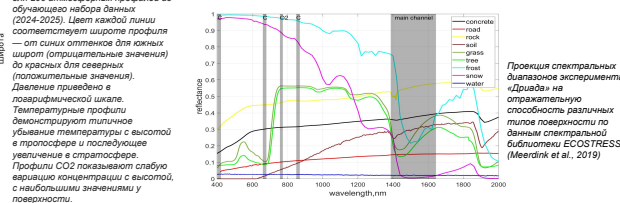
Поверхность: ключевую роль в расчетах играет альbedo поверхности Земли. В модели использовались атлас VIS/NIR BRDF поверхности Земли для RTTOV-11 (Vidot and Borbas, 2014) и база HAMSTER, набор данных гиперспектральных карт альbedo с высоким пространственным и временным разрешением (Roccetti et al., 2024).



Вертикальные профили температуры в К (слева) и концентрации CO2 в частях на миллион по объему – ppmv) в зависимости от высоты в гПа) для 200 атмосферных профилей (из обучающего набора данных (2024-2025). Цвет каждой линии соответствует широте профиля – от синих оттенков для южных широт (отрицательные значения) до красных для северных (положительные значения). Давление приведено в логарифмическом масштабе. Температурные профили демонстрируют типичное убывание температуры с высотой в тропосфере и последующее увеличение в стратосфере. Профили CO2 показывают слабую вертикальную концентрацию с высотой, с небольшими значениями у поверхности.



Альbedo поверхности по базе HAMSTER для 2650 дней на длине волны 1560 нм (Roccetti et al., 2024)



Проекция спектральных экспериментов «Дриада» на спектральную способность различных типов поверхности по данным спутниковой базы данных ECOSTRESS (Meerdink et al., 2019)

РЕЗУЛЬТАТЫ

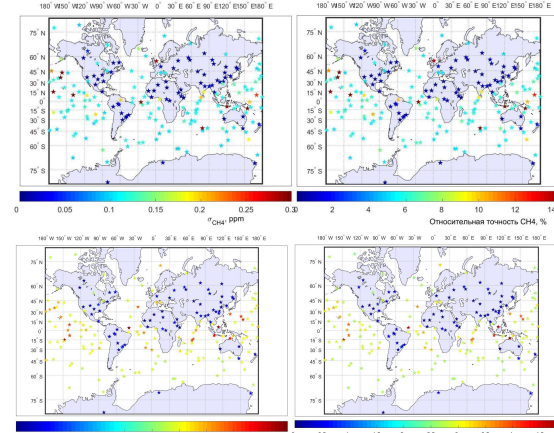
Задачей данной работы было исследование чувствительности спектрометра для восстановления содержания метана и углекислого в порядках дифракции, которые будут измеряться спектрометром. Для этого модельные спектры для 200 тренировочных профилей, свернутые с базовым разрешением ($R=\lambda/\Delta\lambda=20000$), были аппроксимированы на 640 спектральных каналов детектора в 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).

На рисунке представлены оценки точности измерений с высокой точностью над сушей со значениями от 0.2% до 0.9% для CO₂ и от 0.25% до 2.1% для CH₄.

Полученные оценки для единичного спектра базируются на шуме прибора и не включают неопределенности абсолютной калибровки, влияние аэрозольного рассеяния, одновременное восстановление водяного пара и неопределенности входных атмосферных профилей. В дальнейшей работе планируется учесть влияние перечисленных выше неопределенностей.

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



Оценка абсолютной и относительной ошибки измерений углекислого газа и метана по данным эксперимента «ДРИАДА» для 200 тренировочных профилей.

ЛИТЕРАТУРА:

1. 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.
2. 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.
3. Anderson G. P. et al. AFGL atmospheric constituent profiles (0.120 km) – 1986.
4. Chedin A. et al. The feasibility of monitoring CO2 from high-resolution infrared sounders //Journal of Geophysical Research: Atmospheres. – 2003. – Т. 108. – №. D2.
5. Clough S. A. et al. Atmospheric radiative transfer modeling: A summary of the AER codes //Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. – 2005. – Т. 91. – №. 2. – С. 233-244.
6. 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.
7. de Vries J. et al. Technology evolution of the TROPOMI instrument //2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. – IEEE, 2012. – С. 2876-2879.
8. 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.
9. Gordon I. E. et al. The HITRAN2020 molecular spectroscopic database //Journal of quantitative spectroscopy and radiative transfer. – 2022. – Т. 277. – С. 107949.
10. 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. – №. 1st236. – С. 4_5-10_4_10.
11. Korabely O. et al. No detection of methane on Mars from early ExoMars Trace Gas Orbiter observations //Nature. – 2019. – Т. 568. – №. 7753. – С. 517-520.
12. 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.
13. 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.
14. Marquardt D. W. An algorithm for least-squares estimation of non-linear parameters //Journal of the Industrial and Applied Mathematics. – 1963. – Т. 11. – №. 2. – С. 431-441.
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. Roccetti 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>.
19. Schulz F. M., Stamnes K., Wang 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.
20. Stamnes 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 //NWP SAF NWPSAF-ECTR-044. – 2025. <https://nwp-saf.eumetsat.int/site/software/atmospheric-profile-data/>
21. Vidot J., Borbas E. 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>
22. 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.