

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

А. В. Назарова, А. А. Федорова, М. С. Жарикова,
А. Ю. Трохимовский, А. С. Патракеев, О. И. Кораблев

*Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия
E-mail: enemorian@gmail.com*

Спектрометр высокого разрешения «Дриада», планирующий для установки на Международной космической станции, предназначен для глобальных измерений парниковых газов, CO_2 и CH_4 , в ближнем инфракрасном диапазоне от 1,4 до 1,65 мкм. Регистрация поглощения CO_2 будет проводиться в полосах 1,58 и 1,6 мкм, а CH_4 — в полосе 1,64 мкм, что соответствует спектральному диапазону ряда признанных космических экспериментов для мониторинга концентрации парниковых газов: GOSAT (*англ.* Greenhouse Gases Observing Satellite), OCO-2 (*англ.* Orbiting Carbon Observatory-2) и др. Для оценки потоков парниковых газов требуется высокая точность их измерения. Работа посвящена оценке точности измерения содержания парниковых газов основным каналом спектрометра «Дриада» с учётом основных характеристик прибора по разрешению, шуму и рабочему спектральному диапазону. Для расчётов спектров отражения создана модель переноса излучения на базе полинейного расчёта в ближнем инфракрасном диапазоне. Для исследования чувствительности на масштабе земного шара и в течение года были подготовлены 1200 атмосферных профилей, сформированных на базе глобальных прогнозов химического состава атмосферы CAMS (*англ.* Copernicus Atmospheric Monitoring Service) центра ECMWF (*англ.* European Centre for Medium-range Weather Forecast), по 100 профилей на каждый месяц года. Ключевую роль в расчётах чувствительности в ближнем инфракрасном диапазоне играет освещённость поверхности, которая определяется как солнечным зенитным углом в точке наблюдения, так и альбедо поверхности Земли. Мы адаптировали в модель набор данных карт альбедо с высоким пространственным и временным разрешением HAMSTER (*англ.* Hyperspectral Albedo Maps dataset with high Spatial and Temporal Resolution). Расчёт чувствительности проводился посредством решения обратной задачи. Наименьшая точность измерений, от 1,65 до 20,32 % для CO_2 и от 3,16 до 40,07 % для CH_4 , наблюдается над водной поверхностью. Наибольшая точность, от 0,051 до 0,3 % для CO_2 и от 0,17 до 1,28 % для CH_4 , наблюдается в диапазоне широты над Африканским континентом благодаря высокому альбедо поверхности в течение всего года. В средних северных широтах точность варьируется от 0,047 до 0,47 % для CO_2 и от 0,093 до 4,21 % для CH_4 . Полученные результаты подтверждают возможности спектрометра «Дриада» с текущими характеристиками по обеспечению необходимой точности измерений обоих газов над сушей.

Ключевые слова: атмосфера, парниковые газы, спектроскопия, дистанционное зондирование

Одобрена к печати: 27.01.2026

DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-2-343-358

Введение

Наблюдаемый на Земле парниковый эффект тесно связан с содержанием в атмосфере таких газов, как углекислый газ (CO_2) и метан (CH_4). Одним из их источников является хозяйственная деятельность человека, которая приводит к увеличению среднего уровня концентрации газов. В настоящее время концентрация парниковых газов антропогенного происхождения в атмосфере Земли возрастает с каждым годом. Увеличение объёмов выбросов, связанных с деятельностью человека, привело к текущему среднему содержанию парниковых газов, по данным NOAA (*англ.* National Oceanic and Atmospheric Administration): CO_2 на март 2024 г. — 423,4 ppm (*англ.* parts per million — частей на миллион), на март 2025 г. — 426,4 ppm (<https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/global.html>), CH_4 на февраль 2024 г. — 1925,99 ppb (*англ.* parts per billion — частей на миллиард), на февраль 2025 г. — 1933,97 ppb (https://gml.noaa.gov/ccgg/trends_ch4/). Из-за влияния, оказываемого на окружающую среду, возникла необходимость

в контроле 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, можно считать спектральный анализ солнечного света, отражённого от поверхности в ближнем инфракрасном (ИК) диапазоне. В отличие от наблюдений в тепловом диапазоне, которые чувствительны к CO_2 и CH_4 в средней и верхней тропосфере, наблюдения в ближнем ИК-диапазоне также чувствительны к содержанию газов у поверхности. Поскольку основные источники и стоки углекислого газа и метана находятся около поверхности, ближний ИК-диапазон более удачен для наблюдения этих газов, чем тепловой, с точки зрения оценки потоков углерода (Chevallier et al., 2005).

В начале XXI в. в качестве инструментов дистанционного мониторинга парниковых газов были предложены спектрометры высокого спектрального разрешения ближнего ИК-диапазона. В основу предложенных экспериментов легли измерения поглощения CO_2 в полосах 1,58 и 1,6 мкм и CH_4 в полосе 1,65 мкм и измерения полосы поглощения кислорода (O_2) 0,76 мкм для коррекции воздушной массы. К настоящему моменту реализовано уже несколько космических экспериментов, осуществлявших измерение концентрации парниковых газов, таких как GOSAT (англ. Greenhouse Gases Observing Satellite) (Kasuya et al., 2009), OCO-2 (англ. Orbiting Carbon Observatory-2) (Crisp, 2015), TanSat (англ. China's Carbon Dioxide Observation Satellite Mission) (Wang et al., 2014). В Институте космических исследований РАН в 2009 г. был разработан спектрометр РУСАЛКА (Ручной Спектральный АнаЛизатор Компонентов Атмосферы) (Кораблев и др., 2011) для наблюдения парниковых газов космонавтами с борта Международной космической станции (МКС). Обратные модели, вычисляющие потоки углекислого газа, чувствительны к ошибкам в измерениях усреднённого относительного содержания в столбе воздуха на уровне около 0,5 ppm (Basu et al., 2013). Это накладывает довольно высокие требования на аппаратуру, калибровки, прямые задачи моделирования спектров в ближнем ИК-диапазоне и алгоритмы решения обратных задач для восстановления содержания CO_2 . С точки зрения аппаратуры важным представляется обеспечение высокого спектрального разрешения и отношения сигнала к шуму (Dogniaux, Crevoisier, 2024).

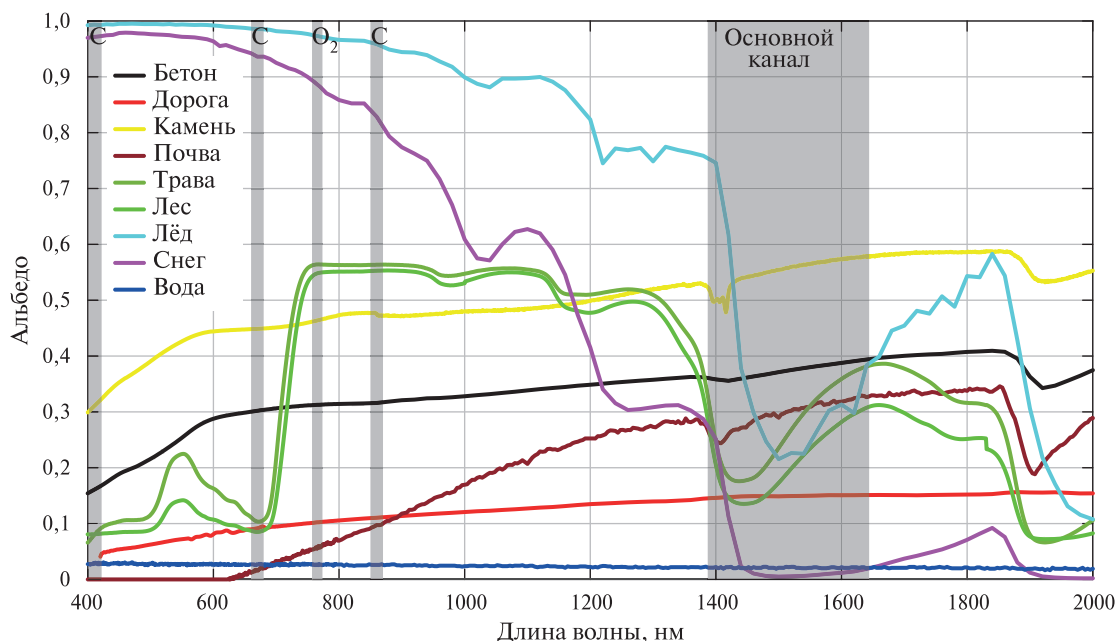


Рис. 1. Спектральная зависимость альбедо различных типов поверхности в видимом – ближнем инфракрасном диапазоне по данным спектральной библиотеки ECOSTRESS (Meerdink et al., 2019). Серые заштрихованные области выделяют спектральные диапазоны будущих измерений эксперимента «Дрида»: С — фотокамеры на трёх длинах волн; O_2 — спектрометр на полосу молекулярного кислорода 0,76 мкм; Основной канал — спектрометр для измерения парниковых газов

Основываясь на опыте предыдущих миссий, а также эксперимента РУСАЛКА для наблюдения парниковых газов с орбитальных космических аппаратов и МКС, был предложен эксперимент «Дриада» (Трохимовский и др., 2022), в котором используются два спектрометра высокого разрешения для двух диапазонов: полосы поглощения O_2 0,76 мкм и поглощения основных парниковых газов CO_2 , CH_4 и водяного пара 1,4–1,6 мкм, а также фотокамеры на трёх длинах волн для фильтрации облачности. Спектрометр был разработан с учётом требований, предъявляемых к подобным измерениям, а именно разрешающая сила не менее 20 000, высокая чувствительность в основных спектральных каналах и широкий динамический диапазон (Трохимовский и др., 2022).

Одной из трудностей измерений парниковых газов в диапазоне, где располагаются полосы поглощения парниковых газов, было достижение достаточной чувствительности спектрометров из-за низкого альbedo поверхности (рис. 1, см. с. 344). Целью данной работы была оценка точности измерений содержания парниковых газов основным каналом спектрометра «Дриада» при глобальных измерениях с орбиты Земли с учётом основных характеристик прибора по разрешению, шуму и рабочему спектральному диапазону, а также появившейся недавно базы данных спектральной зависимости альbedo Земли в видимом и ближнем ИК-диапазоне с высоким пространственным и временным разрешением (Guerra et al., 2024).

Основные характеристики спектрометра «Дриада»

Спектрометр высокого разрешения «Дриада», планирующий для установки на МКС, предназначен для измерения таких парниковых газов как CO_2 и CH_4 в ближнем ИК-диапазоне от 1,4 до 1,65 мкм. Регистрация поглощения CO_2 будет проводиться в полосах 1,58 и 1,6 мкм, а CH_4 — в полосе 1,64 мкм. Прототипом спектрометра послужил инструмент РУСАЛКА, работавший на МКС в 2009–2011 гг. (Кораблев и др., 2011). Основным каналом прибора РУСАЛКА представлял собой эшелле-спектрометр с акустооптической фильтрацией света для разделения порядков дифракции. Такая конструкция определила последовательную запись спектров. В результате за время экспозиции успевала измениться облачная обстановка, что значительно уменьшило точность измерений. Поэтому в эксперименте «Дриада» диапазон разделён на несколько измеряемых одновременно каналов для ускорения наблюдений и одновременного получения информации о состоянии атмосферы в опорных (O_2) и рабочих каналах.

Таблица 1. Спектральные диапазоны, соответствующие порядкам дифракции эшелле-спектрометра «Дриада»

Порядок	λ_1 , нм	λ_0 , нм	λ_{640} , нм	ν_0 , cm^{-1}	Ширина порядка, нм
47	1645,9	1634,3	1621,9	6119	24,0
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	1466,0	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	1386,0	7160	20,5

Примечание: λ_1 — длина волны на 1-м пикселе; λ_0 — длина волны центра порядка; λ_{640} — длина волны на 640-м пикселе, ν_0 — волновое число центра порядка

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. В диапазон основного спектрометра укладывается несколько порядков дифракции, представленных в *табл. 1*. Разрешающая сила ($R = \lambda/\Delta\lambda$, где λ — длина волны) спектрометра составляет не менее 20 000 в основном канале (Трохимовский и др., 2022). Яркость, эквивалентная шуму спектрометра в диапазоне 1600 нм, оценивается в среднем как $0,03 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{мкм}^{-1}$ при времени накопления сигнала 1 с для единичного элемента детектора. При этом была учтена спектральная зависимость яркости шума, связанная как с квантовой эффективностью детектора, так и распределением сигнала по детектору в зависимости от кривой блеска решётки.

Решение прямой задачи уравнения переноса в ближнем ИК-диапазоне

Для восстановления содержания парниковых газов по измерениям в ближнем ИК-диапазоне необходимо решение уравнения переноса излучения в рассеивающей атмосфере. Входящее солнечное излучение отражается от поверхности Земли, рассеивается и поглощается молекулами, аэрозолями и облаками, находящимися в атмосфере. Различные группы исследователей используют разные модели переноса для расчёта рассеяния света в данном диапазоне спектра, например, SCIATRAN (*англ.* Scientific Atmospheric Radiative Transfer) для TanSat (Bao et al., 2020), LIDORT (*англ.* Linearized Discrete Ordinate Radiative Transfer) и RTM (*англ.* Radiative Transfer Model) для GOSAT и OCO-2 (Zhou et al., 2016), 4A/OP для OCO-2 (Butz et al., 2009) и т. д. При этом задача полинейного расчёта газового поглощения на спектральной сетке выполняется разными научными группами индивидуально. Часто в качестве базовой модели переноса излучения используется модель LBLRTM (*англ.* Line-By-Line Radiative Transfer Model) (Clough et al., 2005), основанная на спектроскопической базе данных колебательно-вращательных переходов молекул HITRAN 2012 (Rothman et al., 2013), модели континуума водяного пара с собственным и столкновительным уширением MT_CKD (Mlawer et al., 2012) и модели солнечного спектра (Kurucz, 1994). Форма линии Фойгта рассчитывается на всех уровнях атмосферы. Между тем в оригинальном представлении LBLRTM слабо адаптирована для моделирования реальных спутниковых наблюдений. Она содержит лишь шесть устаревших среднеклиматических профилей температуры AFGL (*англ.* Air Force Geophysical Laboratory) (Anderson et al., 1986). Для отражённого солнечного излучения модель сначала рассчитывает излучение, дошедшее до Земли, а затем, вторым шагом, излучение, идущее от поверхности, что замедляет скорость вычислений и делает их неудобными для многократного использования. Более удачным вариантом выступает модель SCIATRAN (Rozanov et al., 2017), которая позволяет моделировать процессы переноса излучения в земной атмосфере и океане в спектральном диапазоне от 0,18 до 40 мкм. В ней учитывается многократное рассеяние, поляризация, тепловое излучение и взаимодействие океана и атмосферы, а также неупругие процессы рассеяния. В качестве спектроскопической информации используется современная база HITRAN 2020 (Gordon et al., 2022), модель континуума водяного пара MT_CKD 2.5 (Mlawer et al., 2012). Модель SCIATRAN включает различные функции распределения двунаправленного отражения поверхности (*англ.* Bidirectional Reflectance Distribution Function — BRDF) и модели альбедо для суши, растительности, океана, снега и талых вод на морском льду. В качестве солнечного спектра используется модель солнечного излучения (Kurucz, 2005). Модель SCIATRAN разработана для наблюдений GOME (*англ.* Global Ozone Monitoring Experiment) и SCIAMACHY (*англ.* Scanning Imaging Absorption Spectrometer for

Atmospheric Cartography) и адаптирована для наблюдений MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), TROPOMI (*англ.* Tropospheric Monitoring Instrument) и других гиперспектральных сенсоров.

На основе опыта восстановления следовых газов в атмосферах Марса и Венеры по измерениям на космических аппаратах «Марс-Экспресс», «Венера-Экспресс» и Trace Gas Orbiter (Fedorova et al., 2016; 2020; Trokhimovskiy et al., 2015) нами создана модель переноса излучения для оценки точности измерения парниковых газов в эксперименте «Дриада» (далее DRRTM (*англ.* Radiative Transfer Model for DRIADA)). Модель основана на полинейном расчёте в ближнем ИК-диапазоне с учётом рассеяния света в атмосфере. Создание собственной модели позволило использовать новейшую информацию о состоянии атмосферы и альбедо поверхности, относительно LBLRTM и SCIATRAN, и спектроскопии, относительно LBLRTM.

В качестве спектроскопической информации о переходах молекул CO₂, H₂O, CH₄ и O₂ использовалась база данных HITRAN 2020 (Gordon et al., 2022). Монохроматическое поглощение считалось на неравномерной сетке с минимальным шагом 0,001 см⁻¹, где шаг растёт с удалением от центра линии. Для увеличения скорости расчётов для каждой из молекул были построены табулированные матрицы на сетке температуры, давления и длине волн. Для континуума водяного пара взята модель MT_CKD_H2O 4.3 (Mlawer et al., 2023). Релеевское рассеяние было включено, используя данные работы (Bucholtz, 1995). Вместо теоретически рассчитанного солнечного спектра (Kurucz, 2005) взят спектр CAVIAR (*англ.* Continuum Absorption at Visible and Infrared Wavelengths and its Atmospheric Relevance) (Menang et al., 2013). Спектр получен с использованием метода Лэнгли, применённого к калиброванным наблюдениям наземного фурье-спектрометра высокого разрешения (*англ.* Fourier Transform Spectrometer — FTS) в атмосферных окнах в диапазоне от 2000 до 10 000 см⁻¹ (1–5 мкм) в Национальной физической лаборатории NPL (*англ.* National Physical Laboratory), Камборн, Великобритания. Он показал хорошее согласие с положением и силой солнечных линий, измеренных спутниковыми спектрометрами вне атмосферы, а также с данными (<http://kurucz.harvard.edu/sun/irradiance2008/>), полученными по наблюдениям с фурье-спектрометром (FTS) в Национальной обсерватории Китт-Пик (*англ.* Kitt Peak National Observatory), Тоскана, Аризона.

Для моделирования переноса излучения в рассеивающей атмосфере нами был адаптирован код SHDOM (*англ.* Spherical Harmonic Discrete Ordinate Method for Atmospheric Radiative Transfer) (Emde et al., 2015).

Исходные данные для расчёта спектров

Спектры поглощения атмосферных газов, измеренные в ближнем ИК-диапазоне с орбиты Земли, чувствительны к характеристикам атмосферы и поверхности в точке наблюдений. Для моделирования спектров необходимо иметь информацию о вертикальном распределении температуры, плотности и концентрации газов, полосы которых присутствуют в спектре, в случае основного канала «Дриады» это CO₂, CH₄ и H₂O, а также о геометрии наблюдений, поскольку наблюдения в разных частях земного шара будут ограничены максимально возможным зенитным углом Солнца, который для наблюдений в надир с орбиты МКС варьируется от 0° в тропических широтах вблизи экватора до ±65° в высоких широтах и имеет сезонную зависимость.

В качестве атмосферных данных нами было подготовлено 1200 тренировочных профилей. Они были сформированы из набора разнообразных атмосферных профилей (CAM5-137L), построенных по модели глобальных прогнозов химического состава атмосферы CAM5 (*англ.* Copernicus Atmospheric Monitoring Service), выполненных в центре ECMWF (*англ.* European Centre for Medium-range Weather Forecast) (EUMETSAT NWP-SAF, <https://nwp-saf.eumetsat.int/site/software/atmospheric-profile-data/>; Turner, 2025). Профили CAM5-137L составлены на основе краткосрочных прогнозов высокоточной интегрированной системы прогнозирования (IFS, модель последней версии Cy49r1) системы CAM5-AC (*англ.* atmospheric

composition) на 137 гибридных модельных уровнях, охватывающих атмосферу от поверхности до ~75 км над уровнем моря (0,02гПа) за период с марта 2024 по февраль 2025 г. В этой выборке содержатся только профили, инициализированные в 00:00 UTC (*англ.* Coordinated Universal Time) 1, 10 и 20 числа каждого месяца с прогнозом на 36, 42, 48 и 54 ч вперёд. Для долгоживущих парниковых газов, в частности CO₂ и CH₄, применены данные SAMS-GG (*англ.* green-house gases), интерполированные на сетку SAMS-AC. Полный набор профилей включает в себя 20 выборок по 5000 профилей, равномерно распределённых по земному шару и времени года и обеспечивающих динамическую согласованность всех переменных. Каждый профиль включает давление, температуру, вертикальное распределение H₂O(ppmv), CO₂(ppmv), N₂O(ppmv), CH₄(ppmv), CO(ppmv), O₃(ppmv) и других газов, а также сопровождается метаданными, включающими календарную дату, географические координаты и маску «суша/ океан». На основе этих данных дополнительно рассчитывалось локальное солнечное время и солнечно-зенитный угол.

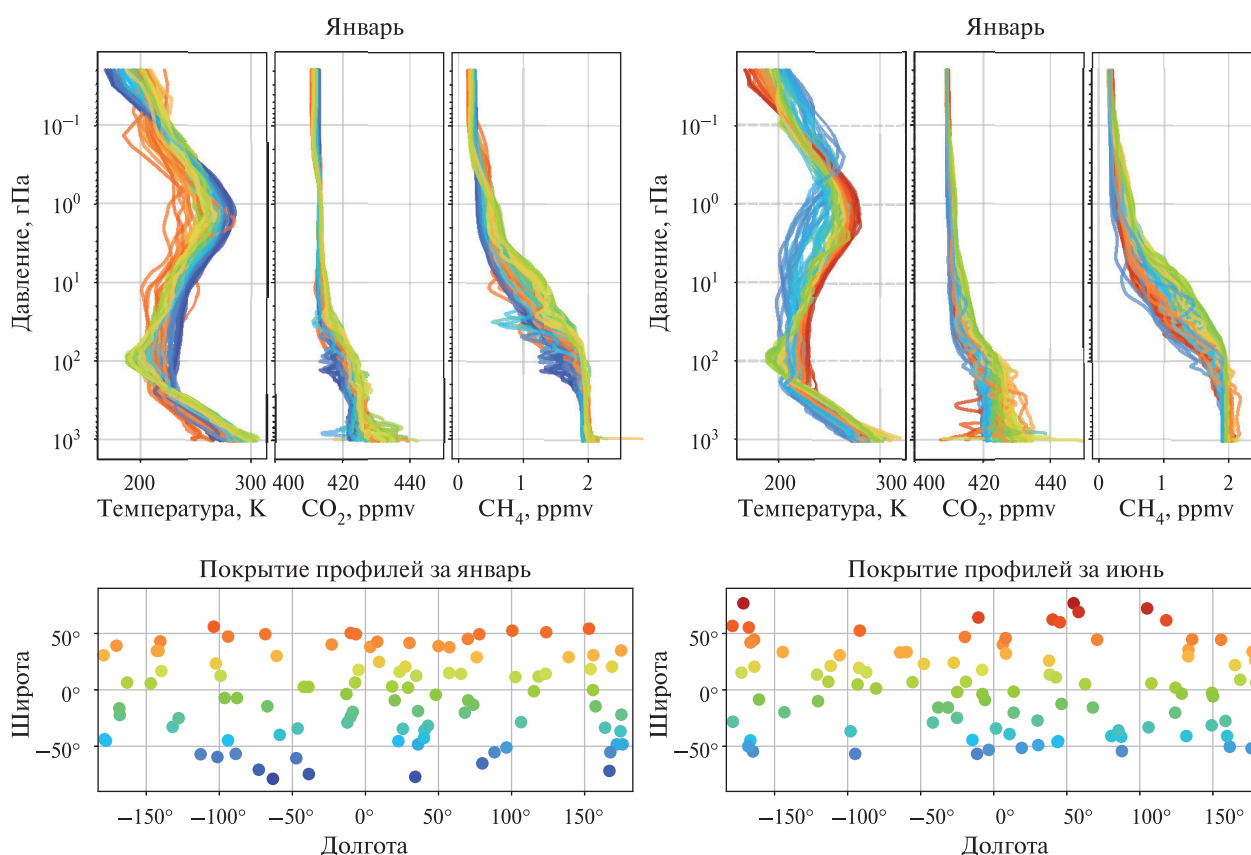


Рис. 2. Вертикальные профили температуры, объёмной концентрации CO₂ и CH₄ для января (левая пара панелей) и июня (правая пара панелей). Цвет каждой линии соответствует широте профиля — от синих оттенков для южных широт (отрицательные значения) до красных для северных (положительные значения). В нижних панелях представлено географическое покрытие соответствующих профилей для каждого месяца

Для построения набора атмосферных профилей было использовано 2 выборки из 20 и все 10 000 профилей были разделены на 12 подмножеств, соответствующих одному месяцу. Внутри каждого подмножества отобрано по 100 репрезентативных дневных профилей (с солнечным зенитным углом менее 80°), равномерно распределённых в пространстве и времени. Совокупность этих 1200 профилей применяется далее для моделирования спектров отражения. Такая выборка охватывает широкий диапазон широты и долготы, обеспечивая репрезентативность данных (рис. 2).

Спектр поверхности

Ключевую роль в расчётах в диапазоне 1,5–1,65 мкм играет альbedo поверхности Земли, как показано на *рис. 1*. В последние годы начали появляться базы данных спектральной зависимости альbedo поверхности в нескольких широких спектральных окнах для разного географического положения и времени года. Например, в модели RTTOV (Saunders et al., 2010) применяется атлас VIS/NIR BRDF поверхности Земли (Vidot, Borbás, 2014), основанный на компиляции данных MODIS (MCD43C1, https://lpdaac.usgs.gov/products/modis_products_table/mcd43c1). Поскольку MODIS работает в широких спектральных окнах, для получения спектров в ближнем ИК-диапазоне использовались лабораторные измерения различных типов поверхности из атласа UWIREMIS (Borbás, Ruston, 2010).

Недавно была опубликована база HAMSTER (*англ.* Hyperspectral Albedo Maps dataset with high Spatial and Temporal Resolution) гиперспектральных карт альbedo с высоким пространственным ($0,05^\circ$ по широте и долготе) и временным (1 день) разрешением (Rocchetti et al., 2024). Применяя алгоритм регрессионного анализа главных компонент PCA (*англ.* principal component analysis), авторы объединяют разные гиперспектральные спектры лабораторных и натуральных измерений различных сухих почв, растительности и других типов поверхности и их комбинаций для реконструкции карт альbedo во всём диапазоне длин волн от 400 до 2500 нм со спектральным разрешением 10 нм. Мы использовали эту базу данных для получения альbedo поверхности для каждого подготовленного нами тренировочного профиля.

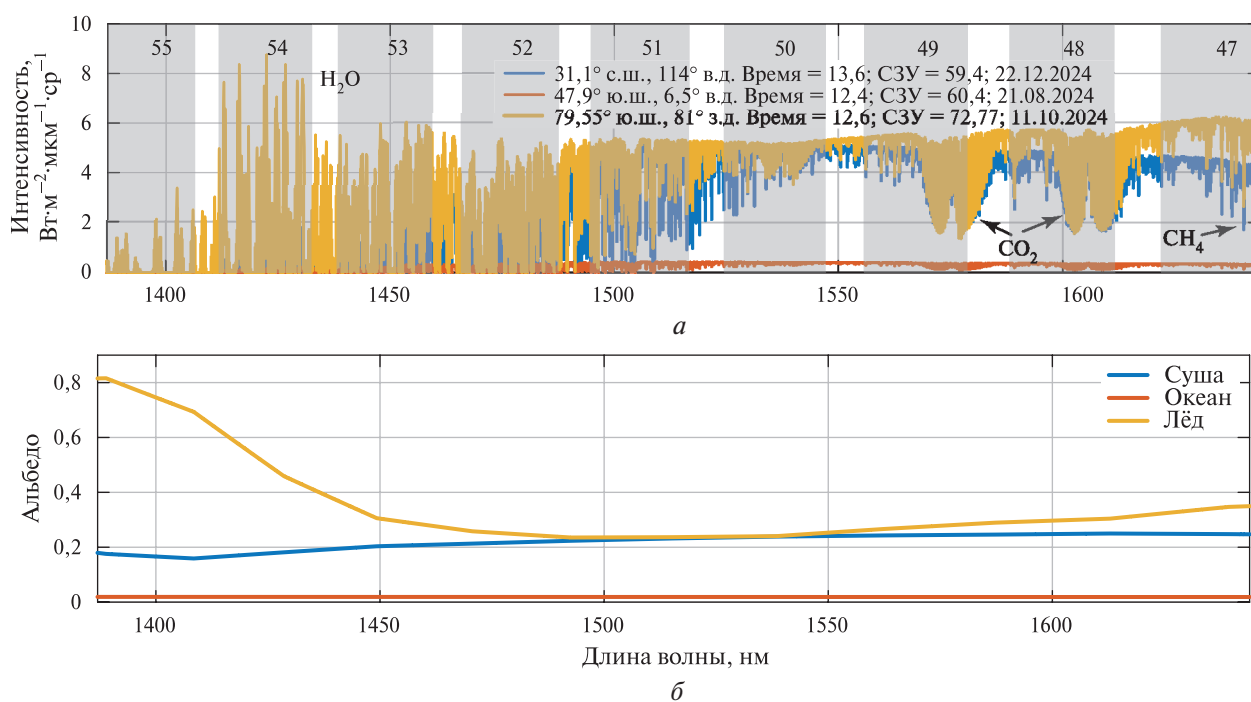


Рис. 3. Примеры модельных спектров в диапазоне основного канала «Дриады» для различных типов поверхности с наложенными диапазонами порядков дифракции на детекторе при текущей конфигурации спектрометра (а); зависимость альbedo поверхности от длины волны для суши (синяя кривая), океана (красная) и льда (жёлтая) для соответствующих модельных спектров (б)

Аэрозоль и облака считаются весомым источником систематических ошибок при определении содержания парниковых газов в ближнем ИК-диапазоне. Для их минимизации большинство алгоритмов применяют процедуры скрининга облачности и аэрозоля, основанные на восстановлении содержания кислорода в полосе его поглощения $0,76$ мкм или восстановление содержания CO_2 и H_2O в разных полосах поглощения в приближении безоблачной атмосферы (Taylor et al., 2016). При пренебрежении рассеянием восстановленные по разным

полосам содержания одних и тех же газов расходятся. Такие данные фильтруются, и создаётся маска облачности. Подобная маска может быть создана, даже используя одну полосу поглощения, как было показано в работе (Wu et al., 2019). Таким образом, большая часть алгоритмов использует наблюдения с очень низкой аэрозольной и облачной загрузкой. В этом случае применение для оценки точности измерений алгоритма без учёта рассеяния света можно считать достаточным. В настоящей работе мы использовали приближение безоблачной атмосферы для моделирования спектров и последующей оценки восстановления содержания парниковых газов. Учитывалось только рэлеевское рассеяние.

Таким образом, мы получаем наиболее оптимистичную оценку, основанную на характеристиках прибора с учётом свойств подстилающей поверхности и условий освещённости.

С помощью модели DRRTM нами рассчитаны монохроматические спектры отражённого солнечного излучения для 1200 модельных атмосферных профилей, распределённых по земному шару и для различных условий наблюдения (см. рис. 2). Далее спектры сворачивались с инструментальным контуром спектрометра, соответствующим разрешающей силе $R = 20\,000$. Примеры спектров для разных географических точек, углов наблюдения и времени года в спектральном диапазоне основного канала спектрометра «Дриада» представлены на рис. 3а (см. с.349) (DRRTM). На рисунке изображены участки спектра, соответствующие регистрируемым порядкам эшелле-спектрометра. На рис. 3б представлены соответствующие спектральные зависимости альbedo поверхности.

Восстановление содержания парниковых газов

Для оценки чувствительности на модельные спектры был наложен случайный шум с ожидаемой эквивалентной яркостью шума детектора. Спектры интерполированы на 640 спектральных каналов детектора в диапазоне 1,623–1,644 мкм для CH_4 (порядок 47) и 1,5893–1,61 мкм (порядок 48) и 1,5893–1,61 мкм (порядок 47) для CO_2 , как показано на рис. 4.

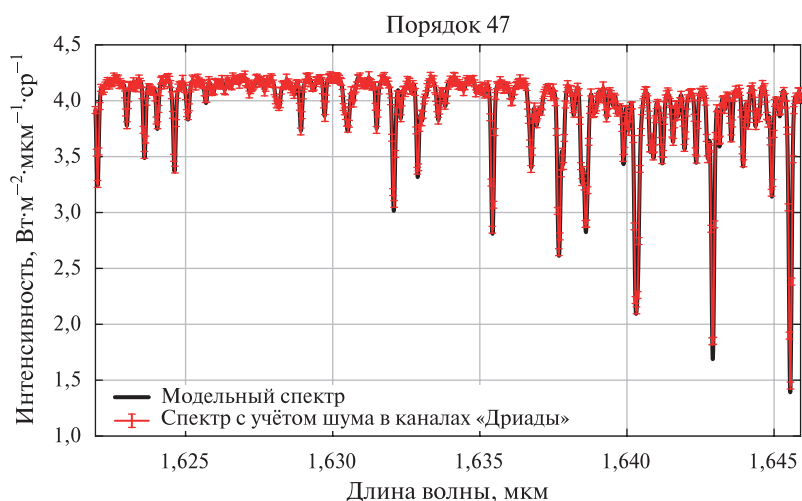


Рис. 4. Пример спектра в порядке 47 спектрометра «Дриада» с учётом шума и спектральных каналов прибора

Опираясь на опыт восстановления содержания атмосферных газов в эксперименте ACS (англ. Atmospheric Chemistry Suite) на космическом аппарате Trace Gas Orbiter (Fedorova et al., 2020), для решения обратной задачи мы использовали метод Левенберга – Марквардта (Press et al., 1996). В этом случае ошибка измерений будет определяться ковариационной матрицей ошибок. В отличие от тепловых ИК-измерений, поглощение в ближнем ИК-диапазоне имеет приблизительно одинаковую чувствительность к CO_2 и CH_4 от поверхности до средней тропосферы (O’Dell et al., 2012; Yoshida et al., 2011). Поэтому в подобных экспериментах цель ре-

шения обратной задачи заключалась в определении среднего в столбе содержания CO_2 , обозначаемого X_{CO_2} :

$$X_{\text{CO}_2} = \int_0^{\infty} f(z) N_d(z) dz / \int_0^{\infty} N_d(z) dz,$$

где $f(z)$ — относительное содержание CO_2 по отношению к сухому воздуху; $N_d(z)$ — полная численная плотность сухого воздуха на высоте z . Аналогичная формула может быть написана для X_{CH_4} .

Для восстановления CO_2 был выбран порядок 48, содержащий полосу CO_2 1,6 мкм. Для восстановления CH_4 использован порядок 47 на рис. 4 с полосой 1,65 мкм. В настоящее время разработано множество алгоритмов решения обратных задач для экспериментов GOSAT, OCO-2 и TanSat, где число восстанавливаемых переменных при решении обратной задачи варьируется от одного до нескольких десятков. В частности, для CO_2 используется или одна переменная, например коэффициент масштабирования начального профиля, или постоянное с высотой относительное содержание (Lu et al., 2022) нескольких слоёв CO_2 (от 3 до 20), с высотой распределённых с постоянным шагом по давлению (Buchwitz et al., 2013; O'Dell et al., 2012; Reuter et al., 2017). В данной работе для оценки случайной ошибки мы ограничились восстановлением в приближении постоянного по высоте относительного содержания. Полученные оценки для единичного спектра базируются на шуме прибора и не включают неопределённости абсолютной калибровки, альбедо поверхности, количества водяного пара, давления и температуры, не учитывают влияния аэрозольного рассеяния. Между тем, как продемонстрировано в работах (Buchwitz et al., 2013; Yoshida et al., 2011), из-за низкого альбедо поверхности в области 1,5–1,65 мкм случайная ошибка является доминирующей.

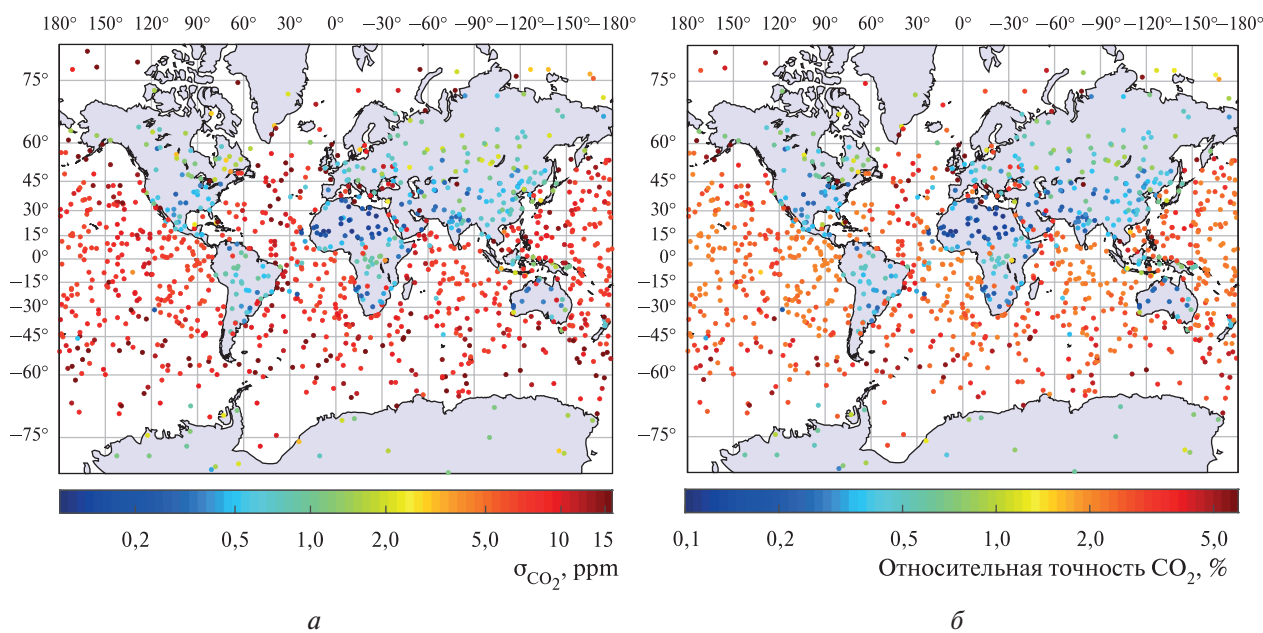


Рис. 5. Оценка абсолютной (а) и относительной (б) ошибки измерений CO_2 по данным эксперимента «Дриада» для 1200 тренировочных профилей

На рис. 5 и 6 (см. с. 352) представлено распределение ошибок измерений CO_2 и метана по земному шару для 1200 атмосферных профилей, разбросанных по временам года и географическим координатам. Наблюдается большой контраст в точности восстановления над сушей и над поверхностью воды, что связано с низким альбедо воды в ближнем ИК-диапазоне. В табл. 2 представлены средние абсолютные и относительные ошибки измерений для X_{CO_2} и X_{CO_4} , а также минимальные и максимальные значения для суши и водной поверхности.

Над водной поверхностью точность измерений составляет от 6,95 ppm (1,65 %) до 78,1 ppm (20,32 %) для CO₂ и от 60,6 ppb (3,16 %) до 821,8 ppb (40,07 %) для CH₄. Наибольшая точность наблюдается над сушей от 0,051 до 0,3 % для CO₂ и от 0,17 до 1,28 % для CH₄.

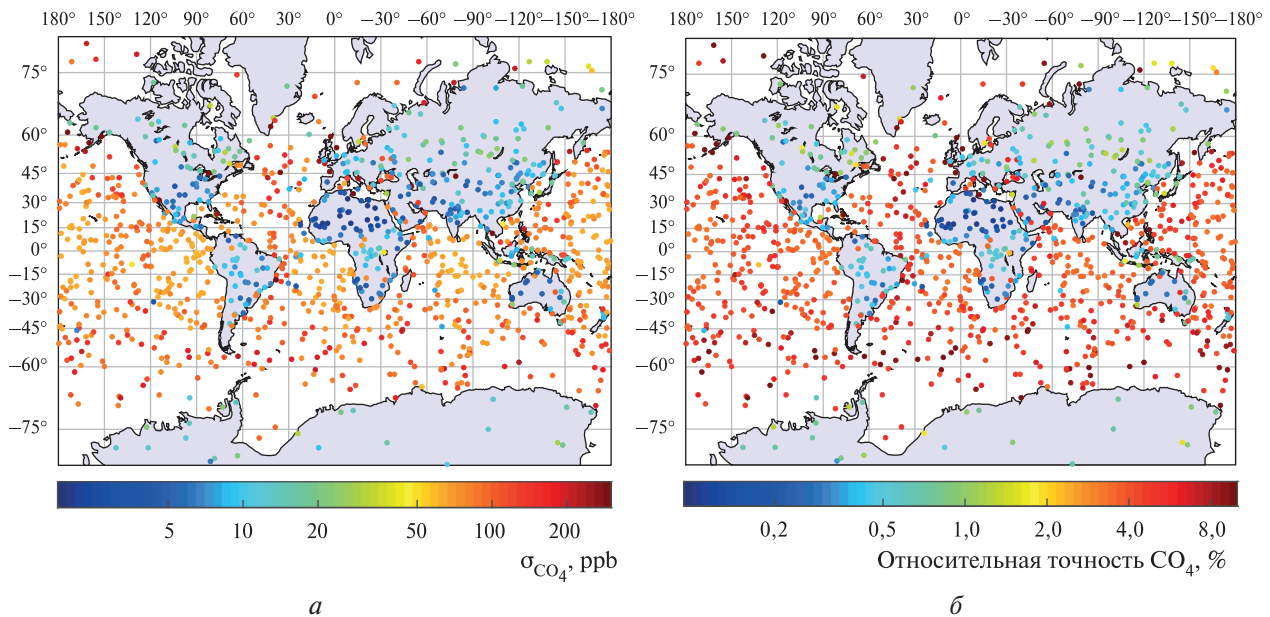


Рис. 6. Оценка абсолютной (а) и относительной (б) ошибки измерений CH₄ по данным эксперимента «Дриада» для 1200 тренировочных профилей

Таблица 2. Статистика ошибки восстановления X_{CO₂} и X_{CO₄}.
Рассматривается только случайная ошибка шума измерений

	Суша				Океан			
	Среднее	Станд. откл.	Макс.	Мин.	Среднее	Станд. откл.	Макс.	Мин.
Ошибка CO ₂ , ppmv	0,97	0,43	1,99	0,200	11,02	6,30	78,10	6,95
Относительная ошибка, %	0,23	0,10	0,48	0,047	2,62	1,56	20,32	1,65
Ошибка CH ₄ , ppbv	11,56	9,36	81,90	1,800	98,14	60,79	821,80	60,60
Относительная ошибка, %	0,60	0,49	4,21	0,093	5,18	3,15	40,07	3,16

Примечание: Станд. откл. — стандартное отклонение, Макс. — максимальная, Мин. — минимальная.

В освещённости поверхности важную роль играет высота Солнца, чьё максимальное значение над горизонтом определяется широтой и временем года. В полярных областях летом Солнце не поднимается выше 55–65°, тогда как в тропиках в полдень близко к зениту. На рис. 7 (см. с. 353) представлено широтное распределение ошибок измерений для суши и водной поверхности. Видно, что над океаном распределение ошибок имеет ожидаемую зависимость от освещённости Солнцем — к полюсам ошибка растёт. Над сушей зависимость более сложная из-за разнообразия отражающих свойств поверхности. Наименьшая ошибка в низких широтах Северного полушария (0,051 ppm и 0,3 % для CO₂ и 6,78 ppb и 0,35 % для CH₄) определяется севером Африканского континента, как видно также на Рис. 7, благодаря высокому альбедо поверхности в течение всего года. Второй минимум (0,81 ppm и 0,19 % для CO₂ и 7,4 ppb и 0,39 % для CH₄), не такой ярко выраженный, наблюдается в южных широтах от 20 до 40° и определяется югом Африканского континента и Австралией (яркое альбедо пустыни). В средних северных широтах точность измерений в два раза хуже и составляет 1,03 ppm и 0,24 % для CO₂ и 12,28 ppb и 0,63 % для CH₄.

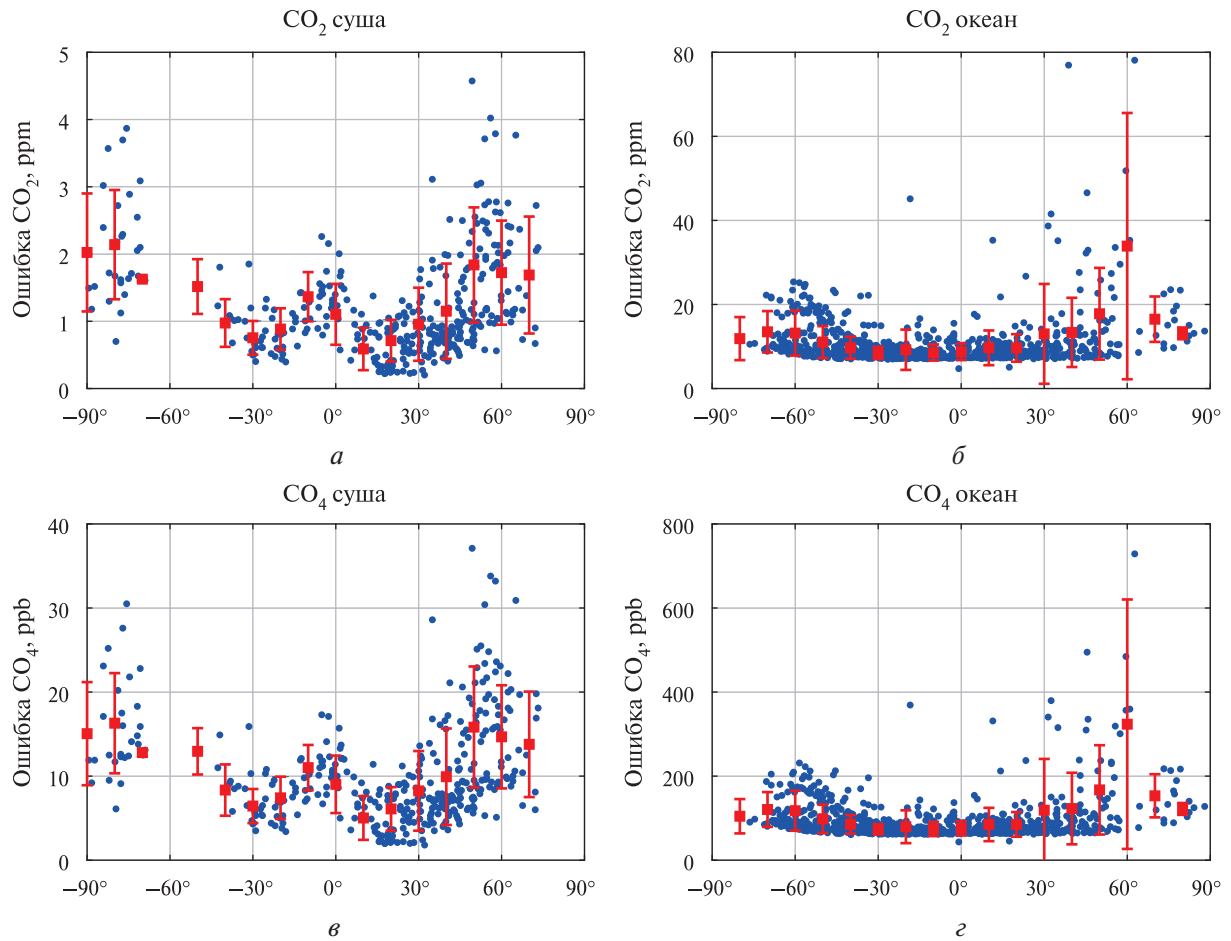


Рис. 7. Распределение абсолютной (а, в) и относительной (б, г) ошибки измерений CO_2 (а, б) и CH_4 (в, г) в зависимости от широты (синие точки) и зональные средние ошибки (оранжевые линии)

Заключение

В работе исследована чувствительность измерений эксперимента «Дриада» с учётом основных характеристик прибора по разрешению, шуму и рабочему спектральному диапазону в зависимости от альbedo поверхности и освещённости для 1200 атмосферных профилей, разбросанных по географическим координатам и времени года. Информация по альbedo поверхности для каждого из профилей была получена из гиперспектральных карт альbedo с высоким пространственным и временным разрешением HAMSTER (Rocetti et al., 2024). В результате созданы географические карты распределения ошибок наблюдений для CO_2 и CH_4 по данным, полученным в течение календарного года.

Как и ожидалось, наименьшая точность измерений, от 1,65 до 20,32 % для CO_2 и от 3,16 до 40,07 % для CH_4 , наблюдается над водной поверхностью. Наибольшая точность, от 0,051 до 0,3 % для CO_2 и от 0,17 до 1,28 % для CH_4 , наблюдается над Африканским континентом и Австралией благодаря высокому альbedo поверхности в течение всего года. В средних северных широтах точность варьируется от 0,047 до 0,47 % для CO_2 и от 0,093 до 4,21 % для CH_4 .

Полученные статистические ошибки, основанные на характеристиках прибора и данных об освещённости и отражающих свойствах поверхности Земли, демонстрируют, что эксперимент «Дриада» способен обеспечить точность измерений лучше 0,5 % для обоих газов. В реальных наблюдениях на точность результатов будет влиять неопределённость калибровки прибора, а также входных атмосферных данных, например содержания водяного пара. Это приведёт к увеличению ошибки измерений. Несмотря на это, как показано в работах

(Buchwitz et al., 2013; Yoshida et al., 2011), полученная статистическая ошибка представляется доминирующей. Корректировка рабочих характеристик прибора, таких как время накопления сигнала, а также усреднение линий детектора может помочь уменьшить ошибку измерений при орбитальных наблюдениях прибора. В дальнейшей работе планируется расширить решение обратной задачи и учесть влияние перечисленных выше неопределённостей, а также рассеяние света в атмосфере на аэрозоле и облаках.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда, грант № 25-27-00338, <https://rscf.ru/project/25-27-00338/>.

Литература

1. *Кораблев О. И., Трохимовский А. Ю., Виноградов И. И., Федорова А. А., Иванов А. Ю., Калинин Ю. К., Титов А. Ю., Калужный А. В., Родин А. В., Кострова Е. А., Венкстерн А. А., Барке В. В., Смирнов Ю. В., Полуаршинов М. А., Ростэ О. З.* Прибор РУСАЛКА для измерения содержания углекислого газа и метана в атмосфере с борта Международной космической станции // *Оптич. журн.* 2011. Т. 78. № 5. С. 44–58.
2. *Трохимовский А. Ю., Кораблев О. И., Иванов Ю. С. 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. С. 50–60. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-6-50-60.
3. *Anderson G. P., Clough S. A., Kneizys F. X., Chetwynd J. H., Shettle E. P.* AFGL atmospheric constituent profiles (0–120 km) // *Environmental Research Papers.* 1986. No. 954. 48 p.
4. *Bao Z., Zhang X., Yue T. et al.* Retrieval and validation of XCO₂ from TanSat target mode observations in Beijing // *Remote Sensing.* 2020. V. 12. No. 18. Article 3063. DOI: 10.3390/rs12183063.
5. *Basu S., Guerlet S., Butz A. et al.* Global CO₂ fluxes estimated from GOSAT retrievals of total column CO₂ // *Atmospheric Chemistry and Physics.* 2013. V. 13. No. 17. P. 8695–8717. DOI: 10.5194/acp-13-8695-2013.
6. *Borbias E. E., Ruston B. C.* The RTTOV UWiremis IR land surface emissivity module. Darmstadt: EUMETSAT, 2010. Article NWPSAF-MO-VS-042. 25 p.
7. *Bucholtz A.* Rayleigh-scattering calculations for the terrestrial atmosphere // *Applied optics.* 1995. V. 34. No. 15. P. 2765–2773. DOI: 10.1364/AO.34.002765.
8. *Buchwitz M., Reuter M., Bovensmann H. et al.* Carbon Monitoring Satellite (CarbonSat): Assessment of atmospheric CO₂ and CH₄ retrieval errors by error parameterization // *Atmospheric Measurement Techniques.* 2013. V. 6. No. 12. P. 3477–3500. DOI: 10.5194/amt-6-3477-2013.
9. *Butz A., Hasekamp O. P., Frankenberg C., Aben I.* Retrievals of atmospheric CO₂ from simulated spaceborne measurements of backscattered near-infrared sunlight: accounting for aerosol effects // *Applied Optics.* 2009. V. 48. No. 18. P. 3322–3336. DOI: 10.1364/AO.48.003322.
10. *Chevallier F., Fisher M., Peylin P. et al.* Inferring CO₂ sources and sinks from satellite observations: Method and application to TOVS data // *J. Geophysical Research: Atmospheres.* 2005. V. 110. No. D24. Article D24309. DOI: 10.1029/2005JD006390.
11. *Clough S. A., Shephard M. W., Mlawer E. J. et al.* Atmospheric radiative transfer modeling: A summary of the AER codes // *J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer.* 2005. V. 91. No. 2. P. 233–244. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2004.05.058.
12. *Crisp D.* Measuring atmospheric carbon dioxide from space with the Orbiting Carbon Observatory-2 (OCO-2) // *Proc. SPIE. Earth observing systems XX.* 2015. V. 9607. Article 960702. 7 p.
13. *Dogniaux M., Crevoisier C.* Mapping the CO₂ total column retrieval performance from shortwave infrared measurements: synthetic impacts of the spectral resolution, signal-to-noise ratio, and spectral band selection // *Atmospheric Measurement Techniques.* 2024. V. 17. No. 17. P. 5373–5396. DOI: 10.5194/amt-17-5373-2024.
14. *Emde C., Barlakas V., Cornet C. et al.* IPRT polarized radiative transfer model intercomparison project — Phase A // *J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer.* 2015. V. 164. P. 8–36. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2015.05.007.
15. *Fedorova A., Marcq E., Luginin M. et al.* Variations of water vapor and cloud top altitude in the Venus' mesosphere from SPICAV/VEx observations // *Icarus.* 2016. V. 275. P. 143–162. DOI: 10.1016/j.icarus.2016.04.010.
16. *Fedorova A. A., Montmessin F., Korabiev O. et al.* Stormy water on Mars: The distribution and saturation of atmospheric water during the dusty season // *Science.* 2020. V. 367. No. 6475. P. 297–300. DOI: 10.1126/science.aay9522.

17. Gordon I. E., Rothman L. S., Hargreaves E. R. et al. The HITRAN2020 molecular spectroscopic database // *J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2022. V. 277. Article 107949. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2021.107949.
18. Guerri G., Albini G., Casali A. et al. Earth observation analysis and microclimate simulations of mitigation scenarios to support urban planning: The MIRIFICUS project // *Geographic Approaches to Climate Change and Mitigation: Urban and Rural Perspectives* (V. 1). Cham: Springer Nature Switzerland, 2024. P. 43–56. DOI: 10.1007/978-3-031-92119-3_4.
19. Kasuya M., Nakajima M., Hamazaki T. Greenhouse gases observing satellite (GOSAT) program overview and its development status // *Trans. of Japan Soc. for Aeronautical and Space Sciences, Space Technology Japan*. 2009. V. 7. No. ists26. P. To_4_5–To_4_10. DOI: 10.2322/tstj.7.To_4_5.
20. Kurucz R. L. Synthetic infrared spectra // *Symp. — Intern. Astronomical Union*. V. 154. Cambridge University Press, 1994. P. 523–531. DOI: 10.1017/S0074180900124805.
21. Kurucz R. L. New atlases for solar flux, irradiance, central intensity, and limb intensity // *Memorie della Società Astronomica Italiana Suppl.* 2005. V. 8. Article 189.
22. Lu S., Landgraf J., Fu G. et al. Simultaneous retrieval of trace gases, aerosols, and cirrus using RemoTAP — The global orbit ensemble study for the CO2M mission // *Frontiers in Remote Sensing*. 2022. V. 3. Article 914378. DOI: 10.3389/frsen.2022.914378.
23. Meerdink S. K., Hook S. J., Roberts D. A., Abbott E. A. The ECOSTRESS spectral library version 1.0 // *Remote Sensing of Environment*. 2019. V. 230. Article 111196. DOI: 10.1016/j.rse.2019.05.015.
24. Menang K. P., Coleman M. D., Gardiner T. D. et al. A high-resolution near-infrared extraterrestrial solar spectrum derived from ground-based Fourier transform spectrometer measurements // *J. Geophysical Research: Atmospheres*. 2013. V. 118. No. 11. P. 5319–5331. DOI: 10.1002/jgrd.50425.
25. Mlawer E. J., Payne V. , Moncet J.-L. et al. Development and recent evaluation of the MT_CKD model of continuum absorption // *Philosophical Trans. Royal Soc. A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2012. V. 370. No. 1968. P. 2520–2556. DOI: 10.1098/rsta.2011.0295.
26. Mlawer E. J., Cady-Pereira K. E., Mascio J., Gordon I. E. The inclusion of the MT_CKD water vapor continuum model in the HITRAN molecular spectroscopic database // *J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2023. V. 306. Article 108645. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2023.108645.
27. O'Dell C. W., Connor B., Bösch H. et al. The ACOS CO₂ retrieval algorithm — Part 1: Description and validation against synthetic observations // *Atmospheric Measurement Techniques*. 2012. V. 5. No. 1. P. 99–121. DOI: 10.5194/amt-5-99-2012.
28. Press W. H., Teukolsky S. A., Vetterling W. T., Flannery B. P. Numerical recipes in Fortran 90: The art of scientific computing. 2nd ed. N. Y.: Cambridge University Press, 1996. 578 p.
29. Reuter M., Buchwitz M., Schneising O. et al. A fast atmospheric trace gas retrieval for hyperspectral instruments approximating multiple scattering — Part 1: Radiative transfer and a potential OCO-2 XCO₂ retrieval setup // *Remote Sensing*. 2017. V. 9. No. 11. Article 1159. DOI: 10.3390/rs9111159.
30. Rocetti G., Bugliaro L., Gödde F. et al. HAMSTER: Hyperspectral Albedo Maps dataset with high Spatial and Temporal Resolution // *Atmospheric Measurement Techniques*. 2024. V. 17. No. 20. P. 6025–6046. DOI: 10.5194/amt-17-6025-2024.
31. Rothman L. S., Gordon I. E., Babikov Y. et al. The HITRAN2012 molecular spectroscopic data-base // *J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2013. V. 130. P. 4–50. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2013.07.002.
32. Rozanov V. V., Dinter T., Rozanov A. V. et al. Radiative transfer modeling through terrestrial atmosphere and ocean accounting for inelastic processes: Software package SCIATRAN // *J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2017. V. 194. P. 65–85. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2017.03.009.
33. Saunders R., Matricardi M., Geer A., Rayer P., Embury O., Merchant C. RTTOV9 science and validation plan. EUMETSAT, 2010. Article NWPSAF-MO-TV-020. 75 p. https://nwp-saf.eumetsat.int/oldsite/deliverables/rtm/rttov9_files/rttov9_svr.pdf.
34. Taylor T. E., O'Dell C. W., Frankenberg C. et al. Orbiting Carbon Observatory-2 (OCO-2) cloud screening algorithms: validation against collocated MODIS and CALIOP data // *Atmospheric Measurement Techniques*. 2016. V. 9. No. 3. P. 973–989. DOI: 10.5194/amt-9-973-2016.
35. Trokhimovskiy A., Fedorova A., Korablev O. et al. Mars' water vapor mapping by the SPICAM IR spectrometer: Five Martian years of observations // *Icarus*. 2015. V. 251. P. 50–64. DOI: 10.1016/j.icarus.2014.10.007.
36. Turner E. Diverse profile datasets from the ECMWF CAMS 137-level short range forecasts. EUMETSAT, 2025. Article NWPSAF-EC_TR-044. 47 p.
37. Vidot J., Borbás É. Land surface VIS/NIR BRDF atlas for RTTOV-11: model and validation against SEVIRI land SAF albedo product // *Quarterly J. Royal Meteorological Soc.* 2014. V. 140. No. 684. P. 2186–2196. DOI: 10.1002/qj.2288.
38. Wang Q., Yang Z.-D., Bi Y.-M. Spectral parameters and signal-to-noise ratio requirement for TANSAT hyperspectral remote sensor of atmospheric CO₂ // *Proc. SPIE 9259. Remote Sensing of the Atmosphere, Clouds, and Precipitation V*. 2014. Article 92591T. 16 p. DOI: 10.1117/12.2067572.

39. Wu W., Liu X., Yang Q. et al. All sky single field of view retrieval system for hyperspectral sounding // IGARSS 2019 — 2019 IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. IEEE, 2019. P. 7560–7563. DOI: 10.1109/IGARSS.2019.8898307.
40. Yoshida Y., Ota Y., Eguchi N. et al. Retrieval algorithm for CO₂ and CH₄ column abundances from short-wavelength infrared spectral observations by the Greenhouse gases observing satellite // Atmospheric Measurement Techniques. 2011. V. 4. No. 4. P. 717–734. DOI: 10.5194/amt-4-717-2011.
41. Zhou M., Dils B., Wang P. et al. Validation of TANSO-FTS/GOSAT XCO₂ and XCH₄ glint mode retrievals using TCCON data from nearocean sites // Atmospheric Measurement Techniques. 2016. V. 9. No. 3. P. 1415–1430. DOI: 10.5194/amt-9-1415-2016.

Evaluation of the accuracy of greenhouse gas content measurement in the Earth's atmosphere by Driada high-resolution orbital spectrometer

A. V. Nazarova, A. A. Fedorova, M. S. Zharikova,
A. Yu. Trokhimovskiy, A. S. Patrakeev, O. I. Korablev

*Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia
E-mail: enemorian@gmail.com*

The Driada high-resolution spectrometer, planned for installation on the International Space Station (ISS), is designed for global measurement of greenhouse gases CO₂ and CH₄ in the near-infrared range from 1.4 to 1.65 microns. CO₂ absorption will be recorded in the bands of 1.58 and 1.6 microns, and CH₄ in the band of 1.64 microns, which corresponds to the spectral range of a number of recognized space experiments for monitoring greenhouse gas concentrations, GOSAT (Greenhouse Gases Observing Satellite), OCO-2 (Orbiting Carbon Observatory-2), etc. To estimate greenhouse gas fluxes, high accuracy of their measurement is required. The work is devoted to assessing the accuracy of greenhouse gas content measurements by the main channel of Driada, taking into account the main characteristics of the device in terms of resolution, noise and operating spectral range. To calculate the reflection spectra, a radiation transfer model based on a line-by-line calculation in the near-infrared range has been created. To study sensitivity on a global scale and through-out the year, 1,200 atmospheric profiles were prepared based on global atmospheric chemistry forecasts from the CAMS (Copernicus Atmospheric Monitoring Service) center of ECMWF (European Center for Medium-range Weather Forecast), 100 profiles for each month of the year. The illumination of the surface, which is determined both by the solar zenith angle at the observation point and by the albedo of the Earth's surface, plays a key role in calculating sensitivity in the near-infrared range. We have adapted a data set of HAMSTER (Hyperspectral Albedo Maps dataset with high Spatial and TEmporal Resolution) into the model. The sensitivity calculation was carried out by solving the inverse problem. The lowest measurement accuracy from 1.65 to 20.32 % for CO₂ and from 3.16 to 40.07 % for CH₄ is observed above the water surface. The highest accuracy from 0.051 to 0.3 % for CO₂ and from 0.17 to 1.28 % for CH₄ is observed in the latitude range over the African continent due to the high albedo of the surface throughout the year. In the mid-northern latitudes, the accuracy varies from 0.047 to 0.47 % for CO₂ and from 0.093 to 4.21 % for CH₄. The results obtained confirm the capabilities of Driada with current characteristics to ensure the necessary accuracy of measurements of both gases over land.

Keywords: atmosphere, greenhouse gases, spectroscopy, remote sensing

Accepted: 27.01.2026

DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-2-343-358

References

1. Korablev O. I., Kalinnikov Yu. K., Titov A. Yu. et al., The RUSALKA device for measuring the carbon dioxide and methane concentration in the atmosphere from on board the International Space Station, *J. Optical Technology*, 2011, V. 78, No. 5, pp. 317–327, DOI: 10.1364/JOT.78.000317.
2. Trokhimovsky A. Yu., Korablev O. I., Ivanov Yu. S. et al., Infrared channel of the Driada spectrometer for greenhouse gases measurement from space, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, V. 19, No. 6, pp. 50–60 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-6-50-60.
3. Anderson G. P., Clough S. A., Kneizys F. X., Chetwynd J. H., Shettle E. P., AFGL atmospheric constituent profiles (0–120 km), *Environmental Research Papers*, 1986, No. 954, 48 p.
4. Bao Z., Zhang X., Yue T. et al., Retrieval and validation of XCO₂ from TanSat target mode observations in Beijing, *Remote Sensing*, 2020, V. 12, No. 18, Article 3063, DOI: 10.3390/rs12183063.
5. Basu S., Guerlet S., Butz A. et al., Global CO₂ fluxes estimated from GOSAT retrievals of total column CO₂, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, V. 13, No. 17, pp. 8695–8717, DOI: 10.5194/acp-13-8695-2013.
6. Borbas E. E., Ruston B. C. *The RTTOV UWiremis IR land surface emissivity module*. Darmstadt: EUMETSAT, 2010, Article NWPSAF-MO-VS-042, 25 p.
7. Bucholtz A., Rayleigh-scattering calculations for the terrestrial atmosphere, *Applied optics*, 1995, V. 34, No. 15, pp. 2765–2773, DOI: 10.1364/AO.34.002765.
8. Buchwitz M., Reuter M., Bovensmann H. et al., Carbon Monitoring Satellite (CarbonSat): Assessment of atmospheric CO₂ and CH₄ retrieval errors by error parameterization, *Atmospheric Measurement Techniques*, 2013, V. 6, No. 12, pp. 3477–3500, DOI: 10.5194/amt-6-3477-2013.
9. Butz A., Hasekamp O. P., Frankenberg C., Aben I., Retrievals of atmospheric CO₂ from simulated spaceborne measurements of backscattered near-infrared sunlight: accounting for aerosol effects, *Applied Optics*, 2009, V. 48, No. 18, pp. 3322–3336, DOI: 10.1364/AO.48.003322.
10. Chevallier F., Fisher M., Peylin P. et al., Inferring CO₂ sources and sinks from satellite observations: Method and application to TOVS data, *J. Geophysical Research: Atmospheres*, 2005, V. 110, No. D24, Article D24309, DOI: 10.1029/2005JD006390.
11. Clough S. A., Shephard M. W., Mlawer E. J. et al., Atmospheric radiative transfer modeling: A summary of the AER codes, *J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2005, V. 91, No. 2, pp. 233–244, DOI: 10.1016/j.jqsrt.2004.05.058.
12. Crisp D., Measuring atmospheric carbon dioxide from space with the Orbiting Carbon Observatory-2 (OCO-2), *Proc. SPIE. Earth observing systems XX*, 2015, V. 9607, Article 960702, 7 p.
13. Dogniaux M., Crevoisier C., Mapping the CO₂ total column retrieval performance from shortwave infra-red measurements: synthetic impacts of the spectral resolution, signal-to-noise ratio, and spectral band selection, *Atmospheric Measurement Techniques*, 2024, V. 17, No. 17, pp. 5373–5396, DOI: 10.5194/amt-17-5373-2024.
14. Emde C., Barlakas V., Cornet C. et al., IPRT polarized radiative transfer model intercomparison project — Phase A, *J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2015, V. 164, pp. 8–36, DOI: 10.1016/j.jqsrt.2015.05.007.
15. Fedorova A., Marcq E., Luginin M. et al., Variations of water vapor and cloud top altitude in the Venus' mesosphere from SPICAV/VEx observations, *Icarus*, 2016, V. 275, pp. 143–162, DOI: 10.1016/j.icarus.2016.04.010.
16. Fedorova A. A., Montmessin F., Korablev O. et al., Stormy water on Mars: The distribution and saturation of atmospheric water during the dusty season, *Science*, 2020, V. 367, No. 6475, pp. 297–300, DOI: 10.1126/science.aay9522.
17. Gordon I. E., Rothman L. S., Hargreaves E. R. et al., The HITRAN2020 molecular spectroscopic database, *J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2022, V. 277, Article 107949, DOI: 10.1016/j.jqsrt.2021.107949.
18. Guerri G., Albin G., Casali A. et al., Earth observation analysis and microclimate simulations of mitigation scenarios to support urban planning: The MIRIFICUS project, In: *Geographic Approaches to Climate Change and Mitigation: Urban and Rural Perspectives (V. 1)*, Cham: Springer Nature Switzerland, 2024, pp. 43–56, DOI: 10.1007/978-3-031-92119-3_4.
19. Kasuya M., Nakajima M., Hamazaki T., Greenhouse gases observing satellite (GOSAT) program overview and its development status, *Trans. of Japan Soc. for Aeronautical and Space Sciences, Space Technology Japan*, 2009, V. 7, No. ists26, pp. To_4_5–To_4_10, DOI: 10.2322/tstj.7.To_4_5.
20. Kurucz R. L., Synthetic infrared spectra, *Symp. — Intern. Astronomical Union*, V. 154, Cambridge University Press, 1994, pp. 523–531, DOI: 10.1017/S0074180900124805.
21. Kurucz R. L., New atlases for solar flux, irradiance, central intensity, and limb intensity, *Memorie della Società Astronomica Italiana Suppl.*, 2005, V. 8, Article 189.

22. Lu S., Landgraf J., Fu G. et al., Simultaneous retrieval of trace gases, aerosols, and cirrus using RemoTAP — The global orbit ensemble study for the CO2M mission, *Frontiers in Remote Sensing*, 2022, V. 3, Article 914378, DOI: 10.3389/frsen.2022.914378.
23. Meerdink S. K., Hook S. J., Roberts D. A., Abbott E. A., The ECOSTRESS spectral library version 1.0, *Remote Sensing of Environment*, 2019, V. 230, Article 111196, DOI: 10.1016/j.rse.2019.05.015.
24. Menang K. P., Coleman M. D., Gardiner T. D. et al., A high-resolution near-infrared extraterrestrial solar spectrum derived from ground-based Fourier transform spectrometer measurements, *J. Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, V. 118, No. 11, pp. 5319–5331, DOI: 10.1002/jgrd.50425.
25. Mlawer E. J., Payne V. H., Moncet J.-L. et al., Development and recent evaluation of the MT_CKD model of continuum absorption, *Philosophical Trans. Royal Soc. A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2012, V. 370, No. 1968, pp. 2520–2556, DOI: 10.1098/rsta.2011.0295.
26. Mlawer E. J., Cady-Pereira K. E., Mascio J., Gordon I. E., The inclusion of the MT_CKD water vapor continuum model in the HITRAN molecular spectroscopic database, *J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2023, V. 306, Article 108645, DOI: 10.1016/j.jqsrt.2023.108645.
27. O'Dell C. W., Connor B., Bösch H. et al., The ACOS CO₂ retrieval algorithm — Part 1: Description and validation against synthetic observations, *Atmospheric Measurement Techniques*, 2012, V. 5, No. 1, pp. 99–121, DOI: 10.5194/amt-5-99-2012.
28. Press W. H., Teukolsky S. A., Vetterling W. T., Flannery B. P., *Numerical recipes in Fortran 90: The art of scientific computing*, 2nd ed., New York: Cambridge University Press, 1996, 578 p.
29. Reuter M., Buchwitz M., Schneising O. et al., A fast atmospheric trace gas retrieval for hyperspectral instruments approximating multiple scattering — Part 1: Radiative transfer and a potential OCO-2 XCO₂ retrieval setup, *Remote Sensing*, 2017, V. 9, No. 11, Article 1159, DOI: 10.3390/rs9111159.
30. Rocchetti G., Bugliaro L., Gödde F. et al., HAMSTER: Hyperspectral Albedo Maps dataset with high Spatial and TEmporal Resolution, *Atmospheric Measurement Techniques*, 2024, V. 17, No. 20, pp. 6025–6046, DOI: 10.5194/amt-17-6025-2024.
31. Rothman L. S., Gordon I. E., Babikov Y. et al., The HITRAN2012 molecular spectroscopic database, *J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2013, V. 130, pp. 4–50, DOI: 10.1016/j.jqsrt.2013.07.002.
32. Rozanov V. V., Dinter T., Rozanov A. V. et al., Radiative transfer modeling through terrestrial atmosphere and ocean accounting for inelastic processes: Software package SCIATRAN, *J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2017, V. 194, pp. 65–85, DOI: 10.1016/j.jqsrt.2017.03.009.
33. Saunders R., Matricardi M., Geer A., Rayer P., Embury O., Merchant C., *RTTOV9 science and validation plan*, EUMETSAT, 2010, Article NWPSAF-MO-TV-020, 75 p. https://nwp-saf.eumetsat.int/oldsite/deliverables/rtm/rttov9_files/rttov9_svr.pdf.
34. Taylor T. E., O'Dell C. W., Frankenberg C. et al., Orbiting Carbon Observatory-2 (OCO-2) cloud screening algorithms: validation against collocated MODIS and CALIOP data, *Atmospheric Measurement Techniques*, 2016, V. 9, No. 3, pp. 973–989, DOI: 10.5194/amt-9-973-2016.
35. Trokhimovskiy A., Fedorova A., Korablev O. et al., Mars' water vapor mapping by the SPICAM IR spectrometer: Five Martian years of observations, *Icarus*, 2015, V. 251, pp. 50–64, DOI: 10.1016/j.icarus.2014.10.007.
36. Turner E., *Diverse profile datasets from the ECMWF CAMS 137-level short range forecasts*, EUMETSAT, 2025, Article NWPSAF-EC_TR-044, 47 p.
37. Vidot J., Borbás É., Land surface VIS/NIR BRDF atlas for RTTOV-11: model and validation against SEVIRI land SAF albedo product, *Quarterly J. Royal Meteorological Soc.*, 2014, V. 140, No. 684, pp. 2186–2196, DOI: 10.1002/qj.2288.
38. 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, *Proc. SPIE 9259. Remote Sensing of the Atmosphere, Clouds, and Precipitation V*, 2014, Article 92591T, 16 p., DOI: 10.1117/12.2067572.
39. Wu W., Liu X., Yang Q. et al., All sky single field of view retrieval system for hyperspectral sounding, *IGARSS 2019 — 2019 IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp.*, IEEE, 2019, pp. 7560–7563, DOI: 10.1109/IGARSS.2019.8898307.
40. Yoshida Y., Ota Y., Eguchi N. et al., Retrieval algorithm for CO₂ and CH₄ column abundances from short-wavelength infrared spectral observations by the Greenhouse gases observing satellite, *Atmospheric Measurement Techniques*, 2011, V. 4, No. 4, pp. 717–734, DOI: 10.5194/amt-4-717-2011.
41. Zhou M., Dils B., Wang P. et al., Validation of TANSO-FTS/GOSAT XCO₂ and XCH₄ glint mode retrievals using TCCON data from near-ocean sites, *Atmospheric Measurement Techniques*, 2016, V. 9, No. 3, pp. 1415–1430, DOI: 10.5194/amt-9-1415-2016.