

Инфракрасный канал научной аппаратуры «Дриада» для измерения содержания парниковых газов из космоса

А. Ю. Трохимовский¹, О. И. Кораблев¹, Ю. С. Иванов²,
А. С. Патракеев¹, А. А. Федорова¹, И. А. Дзюбан¹,
В. В. Дружин³, М. А. Полуаршинов⁴, Ю. В. Смирнов⁴

¹ *Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия*
E-mail: trokh@iki.rssi.ru

² *Главная астрономическая обсерватория НАНУ, Киев, 03143, Украина*

³ *Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана*
Москва, 105005, Россия

⁴ *Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С. П. Королёва*
Московская обл., Королёв, 141070, Россия

Представлена концепция космического эксперимента и спектрометра ближнего инфракрасного диапазона на принципе скрещенной дисперсии для дистанционных измерений атмосферных парниковых газов с орбиты искусственного спутника Земли. Данная задача имеет глобальный характер. Промышленные и хозяйственные выбросы выступают антропогенными источниками эмиссии парниковых газов. За последние столетия средние уровни углекислого газа (CO₂) и метана (CH₄) непрерывно увеличиваются, достигнув на сегодняшний день 410 ppm и 1877 ppb соответственно. Получение объективной количественной информации о состоянии углеродного баланса в атмосфере возможно лишь с применением приборов космического базирования. Эксперимент «Дриада» предполагает измерения в трёх каналах. Основной канал на базе спектрометра высокого спектрального разрешения для диапазона 1,4–1,67 мкм предназначен для измерения содержания углекислого газа (в полосах поглощения 1,58 и 1,6 мкм), метана (в полосе 1,65 мкм), водяного пара, а также для детектирования перистых облаков. Два дополнительных канала предназначены для измерения оптических свойств зондируемых воздушных масс по поглощению в полосе молекулярного кислорода (O₂) (0,76 мкм) и контроля состояния аэрозоля. Обсуждаются научные задачи и ключевые параметры основного инфракрасного канала.

Ключевые слова: парниковые газы, ИК-спектрометр, эшелле, скрещенная дисперсия

Одобрена к печати: 01.12.2022
DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-6-50-60

Введение

Изменение газового состава атмосферы Земли, обусловленное увеличением концентрации парниковых газов антропогенного происхождения, и связанные с ним изменения климата представляются проблемой первостепенного значения (Ciais et al., 2013; Greenhouse..., 2021). В дополнение к наземным измерительным сетям (Stanley et al., 2018; State..., 2020; The NOAA..., 2022) реализуются программы спутникового мониторинга, позволяющие при меньшей абсолютной точности измерений обеспечить больший охват и лучше характеризовать источники и стоки парниковых газов.

Наиболее эффективным методом дистанционного мониторинга парниковых газов признан спектральный анализ солнечного света, отражённого от поверхности в ближнем инфракрасном (ИК) диапазоне. Измерительная аппаратура для космического мониторинга состоит из спектрометров высокого спектрального разрешения. Это большие научные комплексы, требующие значительных ресурсов космического аппарата. Так, например, аппаратура всех реализованных за последние 10 лет космических экспериментов по исследованию парниковых газов: GOSAT (*англ.* Greenhouse Gases Observing Satellite) (Kasuya et al., 2009), OCO-2 (*англ.* Orbiting Carbon Observatory 2) (Crisp, 2015), TanSat (Wang et al., 2014), TROPOMI (*англ.*

Tropospheric Ozone-Monitoring Instrument) (de Vries et al., 2012) — имела массу порядка 200 кг и энергопотребление более 150 Вт. С другой стороны, в силу ограничений на межпланетных космических аппаратах для исследования атмосфер планет разработаны приборы, требующие значительно меньших ресурсов. Сочетание эшелле-спектрометра с высокой дисперсией и акустооптического фильтра для селекции порядков дифракции позволило достичь необходимого высокого спектрального разрешения при значительно меньших габаритах и массе аппаратуры (Korablev et al., 2002). Соответствующие приборы (Korablev et al., 2018; Nevejans et al., 2006) были созданы и использовались для исследования атмосфер Венеры и Марса на космических аппаратах (КА) «Венера-Экспресс» и Trace Gas Orbiter миссии ЭкзоМарс (*англ.* ExoMars). Хотя потенциал подобного типа спектрометров для измерений парниковых газов в атмосфере Земли отмечался давно (Korablev et al., 2002, 2004), первым прибором стал эшелле-спектрометр РУСАЛКА (РУчной Спектральный АнаЛизатор Компонентов Атмосферы), применявшийся в одноимённом эксперименте на российском сегменте Международной космической станции (МКС) (2009–2012). Спектрометр РУСАЛКА был создан для отработки методики измерения углекислого газа (CO_2) и метана (CH_4) в ближнем ИК-диапазоне (0,7–1,7 мкм) и имел разрешающую силу $\sim 20\,000$ (Кораблев и др., 2011).

Опыт измерения парниковых газов в эксперименте РУСАЛКА поставил ряд вопросов, которые необходимо решить для более точного определения концентрации газовых составляющих атмосферы. В настоящей работе мы представляем концепцию усовершенствованного прибора, оптимизированного для орбитальных измерений парниковых газов в надир и при наблюдениях блика от водной поверхности.

Постановка задачи

При обработке данных, полученных в ходе выполнения космического эксперимента РУСАЛКА на МКС, пришлось столкнуться с тремя основными взаимосвязанными проблемами:

- 1) длинные экспозиции (~ 5 с на каждый спектральный канал), в течение которых существенно менялась сцена измерения (облачность, альbedo подстилающей поверхности);
- 2) необходимость одновременного измерения облачности, свойств аэрозолей и полос поглощения парниковых газов;
- 3) малое количество измерений, полученных в ходе эксперимента.

Число измерений напрямую связано с точностью результатов, так как отбраковка данных из-за неудачного контекста (например, сильная облачность, низкое альbedo подстилающей поверхности) является неотъемлемой частью контроля качества измерений малых атмосферных составляющих во всех космических экспериментах (Taylor et al., 2012; Uchino et al., 2012). Этот недостаток связан с постановкой эксперимента (измерения проводились силами экипажей из гермоотсека станции) и легко преодолим в случае автоматической платформы. В свою очередь, первые две проблемы вызваны особенностями аппаратуры.

Так, невысокая чувствительность прибора РУСАЛКА становится прямым следствием его малой светосилы и особенностей последовательной регистрации спектральных каналов, переключаемых при помощи акустооптического фильтра. В любом случае поверхность водной глади практически непригодна для измерений из-за очень малых значений альbedo: не более нескольких процентов в инфракрасной области. А для значительной части подстилающей поверхности значения альbedo в окрестности длины волны 1,5 мкм имеют провал вплоть до $\sim 5\%$ (Wendisch et al., 2004). Современные детекторы ближнего ИК-диапазона на основе InGaAs (*англ.* Indium gallium arsenide, арсенид галлия-индия) близки по своим параметрам к теоретическому пределу чувствительности. Следовательно, увеличение чувствительности при прочих равных условиях возможно лишь за счёт изменения оптической схемы и увеличения геометрического фактора или светосилы прибора. Для измерения содержания парниковых газов над поверхностью воды следует применять метод наблюдения блика: зеркального

отражения солнечного диска от поверхности воды. Для этого требуется обеспечить специальное наведение оптической оси прибора.

В атмосфере в большей или меньшей степени всегда присутствует аэрозоль, рассеивающий часть солнечного излучения. Таким образом, эффективная толщина атмосферы больше, чем для прямого хода лучей, и это должно учитываться при сравнении экспериментальных данных с моделью на этапе восстановления искомой концентрации газов. Таким образом, для восстановления содержания малых составляющих необходимо параллельное определение эффективной толщины в точке наблюдения. Для этого измеряется количество молекул кислорода (O_2) (обильный и хорошо перемешанный атмосферный газ) на оптическом пути по поглощению в полосах 0,76 или 1,27 мкм. Полоса 1,27 мкм находится рядом с полосами поглощения углекислого газа и метана, но в ней также присутствует свечение синглетного кислорода, что требует дополнительного моделирования (Bertaux et al., 2020; Kuang et al., 2002), поэтому обычно используется полоса 0,76 мкм. Так как диапазоны 0,76 мкм (где измеряется O_2) и ~1,6 мкм (где измеряются CO_2 и CH_4) в различной степени подвержены влиянию аэрозоля, то для выборки спектров необходима дополнительная информация о свойствах и количестве аэрозоля, которую можно получить, проводя одновременные измерения в нескольких участках видимого диапазона спектра, аналогично эксперименту GOSAT (Taylor et al., 2012). Особый тип облачности представляют собой перистые облака, обуславливающие систематические погрешности в измерения парниковых газов, но малозаметные в видимом диапазоне. Одним из методов детектирования таких облаков представляются измерения в насыщенных полосах водяного пара, например в диапазоне 2 мкм (Guerlet et al., 2013). При наблюдениях солнечного блика влияние атмосферного аэрозоля на точность измерений существенно снижается.

Таким образом, опыт предыдущих миссий и эксперимента РУСАЛКА показывает, что прибор для космического мониторинга парниковых газов должен обеспечивать:

- 1) высокую спектральную разрешающую силу — для разрешения отдельных линий поглощения парниковых газов в ближнем ИК-диапазоне требуется разрешающая сила ($\lambda/\Delta\lambda$) не менее 20 000;
- 2) высокую чувствительность (отношение «сигнал – шум») в основных спектральных каналах, обеспечивающих измерение CO_2 и CH_4 ;
- 3) широкий динамический диапазон, достаточный для наблюдений как участков поверхности с низкой отражающей способностью, так и солнечного блика, отражённого от поверхности воды;
- 4) регистрацию поглощения молекулярного кислорода O_2 в полосе 0,76 мкм с разрешающей силой не менее 17 000 (Kuang et al., 2002) одновременно с измерениями и CO_2 , и CH_4 ;
- 5) одновременные измерения в нескольких спектральных участках видимого диапазона спектра для определения типа и содержания аэрозоля;
- 6) одновременные измерения спектральных каналов, соответствующие основным измеряемым газам (CO_2 , CH_4), а не последовательные, как было в эксперименте РУСАЛКА;
- 7) измерения в одной из насыщенных полос водяного пара для определения перистых облаков.

Концепция прибора для измерения парниковых газов

В рамках подготовки космического эксперимента «Дриада» была разработана концепция аппаратуры, оптимизированной для измерения парниковых газов с помощью орбитальных измерений в надир и с помощью наблюдения блика от водной поверхности. Предложена комбинация из двух инфракрасных спектрометров высокого разрешения и камеры. Телевизионная камера служит для получения изображений подстилающей поверхности в ряде спектральных диапазонов видимого излучения, что позволяет определять состояние

облачности и проводить селекцию данных. Предлагается организовать её работу по принципу сканирования, часто применяемому в аэросъёмке. В этом случае матричный детектор закрывается несколькими полосовыми фильтрами. За одну экспозицию фотографируются узкие полосы подстилающей поверхности в различных спектральных интервалах, а изображение получается за счёт склеивания множества таких полос по мере пролёта космического аппарата. Для определения облачности были выбраны три спектральных полосы: 0,412; 0,67 и 0,86 мкм шириной 10 нм каждая. Данные длины волн считаются в определённом смысле стандартными, используемыми для детектирования облачности (миссии GOSAT, MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) и др.), что позволит не только применять готовые алгоритмы, но и проводить валидацию с другими спутниками (Taylor et al., 2012). Один инфракрасный спектрометр предназначен для измерения поглощения кислорода в полосе 0,76 мкм и может быть реализован на основе эшелле-спектрометра, работающего в единственном дифракционном порядке, и кремниевого детектора. Второй спектрометр выступает ключевым и должен регистрировать с высоким разрешением и высокой чувствительностью спектры ненасыщенных полос углекислого газа и метана. Для обеспечения максимальной чувствительности целесообразно использовать инфракрасный детектор на основе InGaAs с ограниченным диапазоном ($\ll 1,67$ мкм). Это позволит регистрировать поглощение углекислого газа в полосах 1,58 и 1,6 мкм и метана в полосе 1,65 мкм. Соответствующий диапазон максимальной чувствительности (1,4–1,67 мкм) позволяет решить ряд дополнительных задач, в частности измерения изотопного отношения $\text{H}_2\text{O}/\text{HDO}$ и оценки содержания в атмосфере перистых облаков по части насыщенной полосы водяного пара 1,38 мкм. Одновременность регистрации всех спектральных каналов обеспечивается применением матричного InGaAs-детектора и скрещенной дисперсии. На *рис. 1* приведены типичные спектры пропускания атмосферы, отдельными цветами показан вклад CO_2 , CH_4 и H_2O .

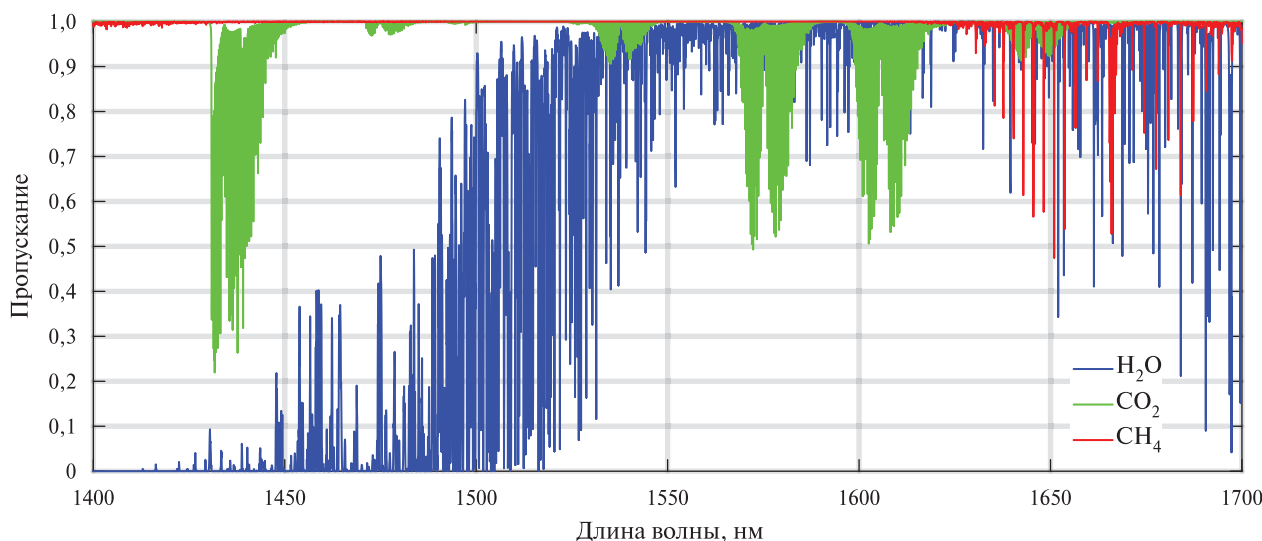


Рис. 1. Модельные спектры пропускания атмосферы при нормальных атмосферных параметрах: содержание водяного пара — 2 %, углекислого газа — 380 ppm, метана — 1,8 ppm. Цветами показан вклад различных газов, спектральное разрешение $\lambda/\Delta\lambda = 30\,000$

ИК-спектрометр высокого разрешения

В качестве отправной точки для создания спектрометра был выбран опыт успешной реализации канала MIR (*англ.* Mid-InfraRed) прибора ACS (*англ.* Atmospheric Chemistry Suite), основанного на принципе скрещенной дисперсии и позволяющего проводить измерения спектров поглощения с разрешающей силой $\lambda/\Delta\lambda$, достигающей 30 000 на длинах волн 2,3–4,3 мкм (Korablev et al., 2018; Trokhimovskiy et al., 2015).

Как было указано выше, для измерения парниковых газов требуется разрешающая сила не менее 20 000 на длине волны 1,5 мкм. Для увеличения чувствительности прибор должен быть достаточно светосильным (порядка 1:3 или лучше). Сочетание этих факторов определяет габаритные размеры оптического блока, при этом разрешающая сила ограничивается дисперсией (размерами элемента фотоприёмника, фокусным расстоянием основного коллиматора спектрометра, aberrациями), а размеры дифракционной решётки влияют на светосилу прибора в целом. Для регистрации спектрального диапазона 1,4–1,67 мкм, содержащего полосы парниковых газов и водяного пара, достаточно одного кадра с 12 дифракционными порядками эшелле, разделёнными при помощи скрещенной дисперсии.

Существует множество вариантов систем со скрещенной дисперсией, но во всех случаях необходимо прежде всего решать проблему зрачков. Оба диспергирующих элемента — и основной, и вспомогательный — наиболее эффективно работают в зрачках, и эти зрачки должны быть, во-первых, сопряжены, а во-вторых, не создавать потери на виньетирование или неконтролируемое разрастание габаритов. Самым простым вариантом видится слияние этих зрачков, т. е. расположение диспергирующих элементов рядом, в непосредственной близости. Для эшелле-спектрометра этого легко достичь, если вспомогательным диспергирующим элементом становится призма. Моделирование показало, что при требуемой светосиле не хуже 1:3 сближение зрачков для такой системы возможно только в автоколлимационной схеме, так как работа эшелле в существенно косых пучках приводит к недопустимым aberrациям.

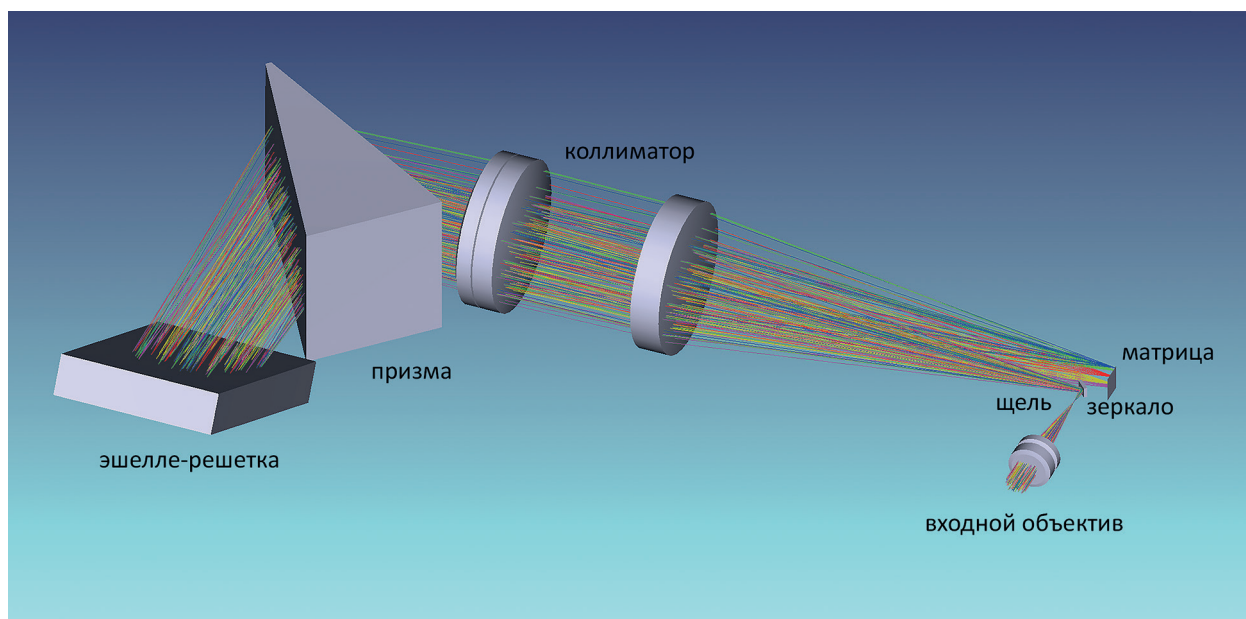


Рис. 2. Принципиальная схема инфракрасного эшелле-спектрометра со скрещенной дисперсией на спектральный диапазон 1,4–1,67 мкм

В разработанной схеме (рис. 2) используется линзовый коллиматор, образованный линзами BaF₂ (фторид бария) и ZnSe (селенид цинка) с фокусным расстоянием 160 мм. Построенная схема требует стёкол высоких категорий по показателю преломления и дисперсии, поэтому материалы выбраны из кристаллической номенклатуры, так как у них показатели преломления практически не зависят от технологии получения. При расчёте из многих требований к коллиматору особенно выделены два: максимальная простота (и сопутствующая ей надёжность) и отсутствие в автоколлимационном режиме опасных бликов, так как изображение яркой щели размывается в виде спектра по всей площади приёмника и есть опасность, что сколько-нибудь сфокусированный блик от этой яркой щели снизит контраст слабых деталей спектра.

Дифракционная решётка эшелле имеет частоту нарезки 16,15 штр/мм, угол блеска $60,78^\circ$ и рабочую зону 60×104 мм. Рабочие порядки эшелле (66–77) укладываются на приёмник в виде строк неравномерно, к синему концу строки прогрессивно сжимаются. Чтобы рационально и плотно заполнить площадь приёмника, следует подобрать материал и геометрию призмы таким образом, чтобы компенсировать указанную неравномерность. Этому способствует тот факт, что у подавляющего большинства сред дисперсия имеет обратный характер: в синей части спектра дисперсия выше, нежели в красной. Подбор материала призмы велся по частным дисперсиям и уточнялся расчётом. Выбор материала зависит и от рабочего спектрального диапазона. Так, для диапазона 2–5 мкм лучше всего подходит титанат стронция SrTiO_3 ; для диапазона 1,4–1,65 мкм наиболее пригоден кремний. Выбор кремния несколько усложняет юстировку схемы ввиду его непрозрачности в видимой части спектра, однако прозрачных альтернатив не обнаружено.

В качестве детектора выбрано матричное фотоприёмное устройство формата 640×512 элементов с шагом 15 мкм на основе фотодиодной гетероструктуры InGaAs. На *рис. 3* показана укладка шести порядков (включая крайние) на приёмнике. Крайние порядки содержат следующие диапазоны длин волн: порядок 66 — от 1,6258 до 1,6502 мкм, порядок 77 — от 1,3950 до 1,4130 мкм. Наклон спектральных линий может быть компенсирован поворотом входной щели в своей плоскости. Следует отметить, что система эшелле-призмы обладает некоторой анаморфозой — изменением отношения масштабов по двум взаимно перпендикулярным направлениям — и сжимает спектральные строки по высоте с 0,64 до 0,52 мм (~35 пикселей). Это немного уменьшает aberrации и поднимает эффективное относительное отверстие до проектного значения 1:3. Сэмплинг получаемых спектров составляет 0,0387 нм, а спектральное разрешение на 2 пикселя — 21 000.

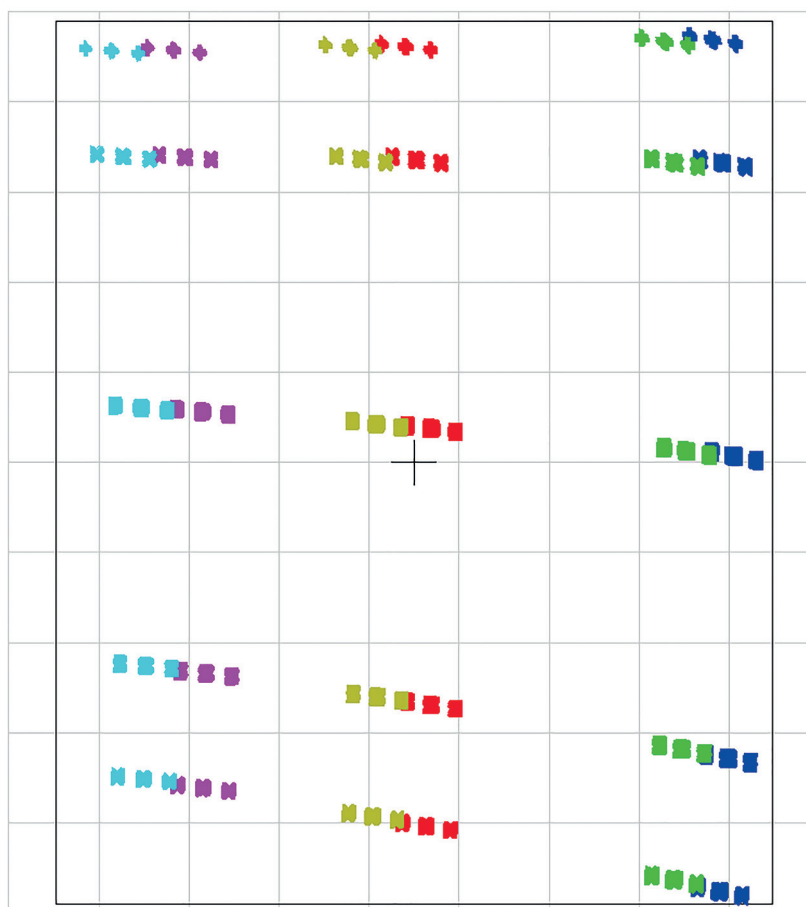


Рис. 3. Укладка спектров на матрице. Порядки эшелле обозначены разными цветами: голубой — дифракционный порядок 77, фиолетовый — 76, жёлтый — 73, красный — 72, зелёный — 67, синий — 66

Конструкция входного телескопа не вызывает сложности, так как должна обеспечивать лишь качественную засветку щели спектрометра. Возможны два принципиальных варианта его конструкции. В случае малого поля зрения порядка 1° входной телескоп со щелью формирует поле зрения прибора в виде узкой полосы, соответствующее пятно зрения на поверхности Земли с высоты МКС 400 км составляет $7 \times 0,1$ км. В этом случае целесообразно суммировать строки изображения дифракционных порядков вдоль щели для увеличения отношения «сигнал—шум». В такой конфигурации аппаратура обеспечивает последовательные точечные измерения. С другой стороны, возможно увеличение полосы захвата с целью работы в режиме гиперспектральной съёмки атмосферы и картирования парниковых газов. Это обеспечивается установкой перед входной щелью короткофокусного широкоугольного объектива с полем зрения 30° . В данном случае строки изображения анализируются индивидуально: с орбиты МКС захват составит 214 км и проекция пикселя на земную поверхность (*англ.* Ground Sample Distance — GSD) — $\sim 6,1$ км, т. е. 35 элементов на строку. Другие элементы существующей оптической системы без каких-либо модификаций обеспечивают как спектральное, так и пространственное качество изображения. Также возможны любые промежуточные варианты с меньшей полосой съёмки на те же 35 элементов изображения.

Заключение

Рассмотренная концепция спектрометра для регистрации спектров поглощения газовых составляющих позволяет создать аппаратуру, способную выполнять высококачественные измерения парниковых газов в атмосфере при жёстких ограничениях на объёмно-весовые и энергетические характеристики регистрирующей аппаратуры. Обоснована схема, включающая два спектроскопических канала инфракрасного диапазона на основе эшелле-спектрометров: основной — для регистрации парниковых газов и канал сравнения — для регистрации молекулярного кислорода. Дополнительный фотометрический канал служит для оценки содержания и свойств аэрозоля. По сравнению со спектрометром РУСАЛКА данная схема обеспечивает более высокую светосилу и разрешающую способность $\lambda/\Delta\lambda \approx 30\,000$, обеспечивающую наблюдение ненасыщенных линий поглощения парниковых газов, быстроедействие, одновременность измерений ключевых параметров. С другой стороны, по сравнению с чисто «экстенсивным» подходом, как, например, три параллельных светосильных эшелле-спектрометра аппаратуры ОСО-2 (Crisp, 2015), данная концепция характеризуется существенно меньшими необходимыми ресурсами, а также высокой технологичностью при изготовлении и сборке.

Представлена оптическая схема основного ИК-спектрометра, определена светосила прибора и состав оптических компонентов. Выполнен расчёт диспергирующих элементов, на которых реализуется принцип скрещенной дисперсии, выделены рабочие порядки эшелле-спектрометра. Данная разработка положена в основу оптической схемы планируемого космического эксперимента «Дриада» на российском сегменте МКС, на 2023 г. намечено изготовление и испытания макетов аппаратуры. Начало реализации космического эксперимента запланировано на 2024 г. Представленная концепция также может быть использована в будущих приборах мониторинга парниковых газов из космоса.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (тема «Эмиссия»).

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 МКС // Оптич. журн. 2011. Т. 78. № 5. С. 44–58. <http://www.optic-journ.ru/download/private/0-1105-44.pdf>.

2. Bertaux J.-L., Hauchecorne A., Lefèvre F., Bréon F.-M., Blanot L., Jouglet D., Lafrique P., Akaev P. The use of the 1.27 μm O_2 absorption band for greenhouse gas monitoring from space and application to MicroCarb // Atmospheric Measurement Techniques. 2020. V. 13. P. 3329–3374. <https://doi.org/10.5194/amt-13-3329-2020>.
3. Ciais P., Sabine C., Bala G., Bopp L., Brovkin V., Canadell J., Chhabra A., DeFries R., Galloway J., Heimann M., Jones C., Le Quéré C., Myneni R. B., Piao S., Thornton P. Carbon and Other Biogeochemical Cycles // Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC Report / eds. Stocker T. F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S. K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., Midgley P. M. Cambridge, UK; N. Y., US: Cambridge Univ. Press, 2013. P. 465–570. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_Chapter06_FINAL.pdf.
4. Crisp D. Measuring atmospheric carbon dioxide from space with the Orbiting Carbon Observatory-2 (OCO-2) // Earth Observing Systems XX: Proc. SPIE. San Diego, CA, US. 2015. V. 9607. Art. No. 960702. <https://doi.org/10.1117/12.2187291>.
5. de Vries J., Hoogeveen R., Voors R., Kleipool Q., Veeffkind P., Aben I., Snel R., van der Valk N., Visser H., Otter G. Technology evolution of the TROPOMI instrument // Proc. IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Sym. Munich. 2012. P. 2876–2879. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2012.6350726>.
6. Greenhouse Gas Bulletin / World Meteorological Organization. 2021. No. 17. 10 p. https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10904.
7. Guerlet S., Butz A., Schepers D., Basu S., Hasekamp O. P., Kuze A., Yokota T., Blavier J.-F., Deutscher N. M., Griffith D. W. T., Hase F., Kyro E., Morino I., Sherlock V., Sussmann R., Galli A., Aben I. Impact of aerosol and thin cirrus on retrieving and validating XCO_2 from GOSAT shortwave infrared measurements // J. Geophysical Research: Atmospheres. 2013. V. 118. P. 4887–4905. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50332>.
8. Kasuya M., Nakajima M., Hamazaki T. Greenhouse Gases Observing Satellite (GOSAT) Program Overview and Its Development Status // Trans. Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Space Technology. Japan, 2009. V. 7. No. ists26. P. To_4_5–To_4_10. https://www.jstage.jst.go.jp/article/tstj/7/ists26/7_ists26_To_4_5/_pdf.
9. Korablev O. I., Bertaux J.-L., Vinogradov I. I. Compact high-resolution IR spectrometer for atmospheric studies // Infrared Spaceborne Remote Sensing X: Proc. SPIE. Seattle. 2002. V. 4818. P. 272–281. <https://doi.org/10.1117/12.451993>.
10. Korablev O. I., Bertaux J.-L., Vinogradov I. I., Kalinnikov Y. K., Nevejans D., Neefs E., Le Barbu T., Durry G. Compact high-resolution echelle-AOTF NIR spectrometer for atmospheric measurements // Intern. Conf. Space Optics – ICSO 2004: Proc. SPIE. Toulouse. 2004. V. 10568. Art. No. 105680A. P. 73–80. <https://doi.org/10.1117/12.2308000>.
11. Korablev O., Montmessin F., Trokhimovskiy A., Fedorova A. A., Shakun A. V., Grigoriev A. V., Moshkin B. E., Ignatiev N. I., Forget F., Lefèvre F., Anufreychik K., Dzuban I., Ivanov Y. S., Kalinnikov Y. K., Kozlova T. O., Kungurov A., Makarov V., Martynovich F., Maslov I., Merzlyakov D., Moiseev P. P., Nikolskiy Y., Patrakeev A., Patsaev D., Santos-Skripko A., Sazonov O., Semena N., Semenov A., Shashkin V., Sidorov A., Stepanov A. V., Stupin I., Timonin D., Titov A. Y., Viktorov A., Zharkov A., Altieri F., Arnold G., Belyaev D. A., Bertaux J. L., Betsis D. S., Duxbury N., Encrenaz T., Fouchet T., Gérard J.-C., Grassi D., Guerlet S., Hartogh P., Kasaba Y., Khatuntsev I., Krasnopolsky V. A., Kuzmin R. O., Lellouch E., Lopez-Valverde M. A., Luginin M., Määttänen A., Marcq E., Martin Torres J., Medvedev A. S., Millour E., Olsen K. S., Patel M. R., Quantin-Nataf C., Rodin A. V., Shematovich V. I., Berkenboschs I., Thomas N., Vazquez L., Vincendon M., Wilquet V., Wilson C. F., Zasova L. V., Zelenyi L. M., Zorzano M. P. The Atmospheric Chemistry Suite (ACS) of Three Spectrometers for the ExoMars 2016 Trace Gas Orbiter // Space Science Reviews. 2018. V. 214. No. 7. <https://doi.org/10.1007/s11214-017-0437-6>.
12. Kuang Z., Margolis J., Toon G., Crisp D., Yung Y. Spaceborne measurements of atmospheric CO_2 by high-resolution NIR spectrometry of reflected sunlight: An introductory study // Geophysical Research Letters. 2002. V. 29. No. 15. P. 11-1–11-4. <https://doi.org/10.1029/2001GL014298>.
13. Nevejans D., Neefs E., Van Ransbeeck E., Berkenbosch S., Clairquin R., De Vos L., Moelans W., Glorieux S., Baeke A., Korablev O., Vinogradov I., Kalinnikov Y., Bach B., Dubois J.-P., Villard E. Compact high-resolution spaceborne echelle grating spectrometer with acousto-optical tunable filter based order sorting for the infrared domain from 2.2 to 4.3 micrometer // Applied Optics. 2006. V. 45. Iss. 21. P. 5191–5206. <https://doi.org/10.1364/AO.45.005191>.
14. Stanley K. M., Grant A., O'Doherty S., Young D., Manning A. J., Stavert A. R., Spain T. G., Salameh P. K., Harth C. M., Simmonds P. G., Sturges W. T., Oram D. E., Derwent R. G. Greenhouse gas measurements from a UK network of tall towers: technical description and first results // Atmospheric Measurement Techniques. 2018. V. 11. P. 1437–1458. DOI: 10.5194/amt-11-1437-2018.
15. State of the Global Climate 2020: Provisional Report / World Meteorological Organization, 2020. 38 p. https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10444.

16. Taylor T. E., O'Dell C. W., O'Brien D. M., Kikuchi N., Yokota T., Nakajima T. Y., Ishida H., Crisp D., Nakajima T. Comparison of Cloud-Screening Methods Applied to GOSAT Near-Infrared Spectra // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2012. V. 50. No. 1. P. 295–309. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2011.2160270>.
17. The NOAA Annual Greenhouse Gas Index (AGGI) / ed. Montzka S. A.; NOAA Global Monitoring Laboratory. 2022. <https://gml.noaa.gov/aggi/aggi.html>.
18. Trokhimovskiy A., Korablev O., Ivanov Y. S., Siniyavsky I. I., Fedorova A., Stepanov A. V., Titov A. Y., Moiseev P. P., Kozlova T. O., Montmessin F. Middle-infrared echelle cross-dispersion spectrometer ACS-MIR for the ExoMars Trace Gas Orbiter // Infrared Remote Sensing and Instrumentation XXIII: Proc. SPIE. San Diego. 2015. V. 9608. Art. No. 960808. <https://doi.org/10.1117/12.2190359>.
19. Uchino O., Kikuchi N., Sakai T., Morino I., Yoshida Y., Nagai T., Shimizu A., Shibata T., Yamazaki A., Uchiyama A., Kikuchi N., Oshchepkov S., Bril A., Yokota T. Influence of aerosols and thin cirrus clouds on the GOSAT-observed CO₂: a case study over Tsukuba // Atmospheric Chemistry and Physics. 2012. V. 12. P. 3393–3404. <https://doi.org/10.5194/acp-12-3393-2012>.
20. 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: Proc. SPIE. Beijing. 2014. V. 9259. Art. No. 92591T. <https://doi.org/10.1117/12.2067572>.
21. Wendisch M., Pilewskie P., Jäkel E., Schmidt S., Pommier J., Howard S., Jonsson H. H., Guan H., Schröder M., Mayer B. Airborne measurements of areal spectral surface albedo over different sea and land surfaces // J. Geophysical Research: Atmospheres. 2004. V. 109. Art. No. D08203. <https://doi.org/10.1029/2003JD004392>.

Infrared channel of the Driada spectrometer for greenhouse gases measurement from space

A. Yu. Trokhimovskiy¹, O. I. Korablev¹, Yu. S. Ivanov², A. S. PatrakeeV¹,
A. A. Fedorova¹, I. A. Dzyuban¹, V. V. Druzhin³, M. A. Poluarshinov⁴, Yu. V. Smirnov⁴

¹ Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia
E-mail: trokh@iki.rssi.ru

² Main Astronomical Observatory NAS, Kyiv 03143, Ukraine

³ Bauman Moscow State Technical University, Moscow 105005, Russia

⁴ S. P. Korolev Rocket and Space Corporation "Energia"
Korolev 141070, Moscow Region, Russia

The concept of a high aperture near-infrared cross-dispersion echelle-spectrometer is presented for greenhouse gases remote measurements from space. This task is of a global nature, industrial and household emissions are anthropogenic sources of greenhouse gas emissions. In recent years, average levels of carbon (CO₂) and methane (CH₄) have continued to increase, reaching levels of 410 ppm and 1877 ppb, respectively, to date. Obtaining objective information about the state of the carbon balance in the atmosphere is possible only with the use of space-based instruments. The instrument Driada consists of three channels. The main one is a high-resolution spectrometer for 1,4–1,67 micron wavelength range and is designed to measure CO₂ absorption lines at 1,58 and 1,6 micron, CH₄ lines at 1,65 micron and a number of H₂O lines. Two additional channels are designed to measure O₂ band at 0,76 micron and aerosol characterization. The scientific tasks and key parameters of the main infrared channel are discussed.

Keywords: greenhouse gases, infrared spectrometer, echelle, cross-dispersion

Accepted: 01.12.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-6-50-60

References

1. Korablev O. I., Trokhimovskiy A. Yu., Vinogradov I. I., Fedorova A. A., Ivanov A. Yu., Kalinnikov Yu. K., Titov A. Y., Kalyuzhny A. V., Rodin A. V., Kostrova E. A., Venkstern A. A., Barke V. V., Smirnov Yu. V., Poluarshinov M. A., Roste O. Z., 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, Vol. 78, No. 5, pp. 44–58 (in Russian), <http://www.opticjourn.ru/download/private/0-1105-44.pdf>.
2. Bertaux J.-L., Hauchecorne A., Lefèvre F., Bréon F.-M., Blanot L., Jougllet D., Lafrique P., Akaev P., The use of the 1.27 μm O₂ absorption band for greenhouse gas monitoring from space and application to MicroCarb, *Atmospheric Measurement Techniques*, 2020, Vol. 13, pp. 3329–3374, <https://doi.org/10.5194/amt-13-3329-2020>.
3. Ciais P., Sabine C., Bala G., Bopp L., Brovkin V., Canadell J., Chhabra A., DeFries R., Galloway J., Heimann M., Jones C., Le Quéré C., Myneni R. B., Piao S., Thornton P., Carbon and Other Biogeochemical Cycles, *Climate Change 2013: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC Report*, Stocker T. F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S. K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., Midgley P. M. (eds.), Cambridge, UK; New York, US: Cambridge Univ. Press, 2013, pp. 465–570, https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_Chapter06_FINAL.pdf.
4. Crisp D., Measuring atmospheric carbon dioxide from space with the Orbiting Carbon Observatory-2 (OCO-2), *Earth Observing Systems XX: Proc. SPIE*, San Diego, 2015, Vol. 9607, Art. No. 960702, <https://doi.org/10.1117/12.2187291>.
5. de Vries J., Hoogeveen R., Voors R., Kleipool Q., Veefkind P., Aben I., Snel R., van der Valk N., Visse H., Otter G., Technology evolution of the TROPOMI instrument, *Proc. IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp.*, Munich, 2012, pp. 2876–2879, <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2012.6350726>.
6. *Greenhouse Gas Bulletin*, World Meteorological Organization, 2021, No. 17, 10 p., https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10904.
7. Guerlet S., Butz A., Schepers D., Basu S., Hasekamp O. P., Kuze A., Yokota T., Blavier J.-F., Deutscher N. M., Griffith D. W. T., Hase F., Kyro E., Morino I., Sherlock V., Sussmann R., Galli A., Aben I., Impact of aerosol and thin cirrus on retrieving and validating XCO₂ from GOSAT shortwave infrared measurements, *J. Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, Vol. 118, pp. 4887–4905, <https://doi.org/10.1002/jgrd.50332>.
8. Kasuya M., Nakajima M., Hamazaki T., Greenhouse Gases Observing Satellite (GOSAT) Program Overview and Its Development Status, *Trans. Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Space Technology*, Japan, 2009, Vol. 7, No. ists26, pp. To_4_5–To_4_10, available at: https://www.jstage.jst.go.jp/article/tstj/7/ists26/7_ists26_To_4_5/_pdf.
9. Korablev O. I., Bertaux J.-L., Vinogradov I. I., Compact high-resolution IR spectrometer for atmospheric studies, *Infrared Spaceborne Remote Sensing X: Proc. SPIE*, Seattle, 2002, Vol. 4818, pp. 272–281, <https://doi.org/10.1117/12.451993>.
10. Korablev O. I., Bertaux J.-L., Vinogradov I. I., Kalinnikov Y. K., Nevejans D., Neefs E., Le Barbu T., Durry G., Compact high-resolution echelle-AOTF NIR spectrometer for atmospheric measurements, *Intern. Conf. Space Optics — ICSO 2004: Proc. SPIE*, Toulouse, 2004, Vol. 10568, Art. No. 105680A, pp. 73–80, <https://doi.org/10.1117/12.2308000>.
11. Korablev O., Montmessin F., Trokhimovskiy A., Fedorova A. A., Shakun A. V., Grigoriev A. V., Moshkin B. E., Ignatiev N. I., Forget F., Lefèvre F., Anufreychik K., Dzuban I., Ivanov Y. S., Kalinnikov Y. K., Kozlova T. O., Kungurov A., Makarov V., Martynovich F., Maslov I., Merzlyakov D., Moiseev P. P., Nikolskiy Y., Patrakeevev A., Patsaev D., Santos-Skripko A., Sazonov O., Semena N., Semenov A., Shashkin V., Sidorov A., Stepanov A. V., Stupin I., Timonin D., Titov A. Y., Viktorov A., Zharkov A., Altieri F., Arnold G., Belyaev D. A., Bertaux J. L., Betsis D. S., Duxbury N., Encrenaz T., Fouchet T., Gérard J.-C., Grassi D., Guerlet S., Hartogh P., Kasaba Y., Khatuntsev I., Krasnopolsky V. A., Kuzmin R. O., Lellouch E., Lopez-Valverde M. A., Luginin M., Määttänen A., Marcq E., Martin Torres J., Medvedev A. S., Millour E., Olsen K. S., Patel M. R., Quantin-Nataf C., Rodin A. V., Shematovich V. I., Berkenboschs I., Thomas N., Vazquez L., Vincendon M., Wilquet V., Wilson C. F., Zasova L. V., Zelenyi L. M., Zorzano M. P., The Atmospheric Chemistry Suite (ACS) of Three Spectrometers for the ExoMars 2016 Trace Gas Orbiter, *Space Science Reviews*, 2018, Vol. 214, No. 7, <https://doi.org/10.1007/s11214-017-0437-6>.
12. Kuang Z., Margolis J., Toon G., Crisp D., Yung Y., Spaceborne measurements of atmospheric CO₂ by high-resolution NIR spectrometry of reflected sunlight: An introductory study, *Geophysical Research Letters*, 2002, Vol. 29, No. 15, pp. 11-1–11-4, <https://doi.org/10.1029/2001GL014298>.
13. Nevejans D., Neefs E., Van Ransbeeck E., Berkenbosch S., Clairquin R., De Vos L., Moelans W., Glorieux S., Baeke A., Korablev O., Vinogradov I., Kalinnikov Y., Bach B., Dubois J.-P., Villard E., Compact high-resolution spaceborne echelle grating spectrometer with acousto-optical tunable filter based

- order sorting for the infrared domain from 2.2 to 4.3 micrometer, *Applied Optics*, 2006, Vol. 5, Issue 21, pp. 5191–5206, <https://doi.org/10.1364/AO.45.005191>.
14. Stanley K. M., Grant A., O'Doherty S., Young D., Manning A. J., Stavert A. R., Spain T. G., Salameh P. K., Harth C. M., Simmonds P. G., Sturges W. T., Oram D. E., Derwent R. G., Greenhouse gas measurements from a UK network of tall towers: technical description and first results, *Atmospheric Measurement Techniques*, 2018, Vol. 11, pp. 1437–1458, DOI: 10.5194/amt-11-1437-2018.
 15. *State of the Global Climate 2020: Provisional Report*, World Meteorological Organization, 2020, 38 p., https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10444.
 16. Taylor T. E., O'Dell C. W., O'Brien D. M., Kikuchi N., Yokota T., Nakajima T. Y., Ishida H., Crisp D., Nakajima T., Comparison of Cloud-Screening Methods Applied to GOSAT Near-Infrared Spectra, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2012, Vol. 50, No. 1, pp. 295–309, <https://doi.org/10.1109/TGRS.2011.2160270>.
 17. *The NOAA Annual Greenhouse Gas Index (AGGI)*, Montzka S. A. (ed.), NOAA Global Monitoring Laboratory, 2022, <https://gml.noaa.gov/aggi/aggi.html>.
 18. Trokhimovskiy A., Korablev O., Ivanov Y. S., Siniyavsky I. I., Fedorova A., Stepanov A. V., Titov A. Y., Moiseev P. P., Kozlova T. O., Montmessin F., Middle-infrared echelle cross-dispersion spectrometer ACS-MIR for the ExoMars Trace Gas Orbiter, *Infrared Remote Sensing and Instrumentation XXIII: Proc. SPIE*, San Diego, 2015, Vol. 9608, Art. No. 960808, <https://doi.org/10.1117/12.2190359>.
 19. Uchino O., Kikuchi N., Sakai T., Morino I., Yoshida Y., Nagai T., Shimizu A., Shibata T., Yamazaki A., Uchiyama A., Kikuchi N., Oshchepkov S., Bril A., Yokota T., Influence of aerosols and thin cirrus clouds on the GOSAT-observed CO₂: a case study over Tsukuba, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2012, Vol. 12, pp. 3393–3404, <https://doi.org/10.5194/acp-12-3393-2012>.
 20. 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: Proc. SPIE*, Beijing, 2014, Vol. 9259, Art. No. 92591T, <https://doi.org/10.1117/12.2067572>.
 21. Wendisch M., Pilewskie P., Jäkel E., Schmidt S., Pommier J., Howard S., Jonsson H. H., Guan H., Schröder M., Mayer B., Airborne measurements of areal spectral surface albedo over different sea and land surfaces, *J. Geophysical Research: Atmospheres*, 2004, Vol. 109, Art. No. D08203, <https://doi.org/10.1029/2003JD004392>.