

УДК 551.501.86

## СПУТНИКОВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГАЗОВОГО СОСТАВА АТМОСФЕРЫ

© 2024 г. Ю. М. Тимофеев<sup>a</sup>, Г. М. Неробелов<sup>a, b, c, \*</sup>

<sup>a</sup>Санкт-Петербургский государственный университет,  
Университетская наб., 7/9, Санкт-Петербург, 199034, Россия

<sup>b</sup>СПб ФИЦ РАН – Научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН,  
ул. Корпусная, 18, Санкт-Петербург, 187110, Россия

<sup>c</sup>Российский государственный гидрометеорологический университет,  
Малоохтинский проспект, 98, Санкт-Петербург, 195196, Россия

\*e-mail: akulishe95@mail.ru

Поступила в редакцию 02.03.2023 г.

После доработки 14.05.2024 г.

Принята к публикации 10.07.2024 г.

Газовый состав атмосферы Земли в значительной степени определяет многочисленные погодные и климатические процессы и явления. Важность изучения состава атмосферы стимулировала создание за последние десятилетия глобальных и региональных систем наблюдений за содержанием водяного пара, озона и его разрушителей, углекислого газа и других парниковых газов, и десятков газов-загрязнителей. Существенную роль в глобальном мониторинге газового состава атмосферы играют спутниковые системы наблюдений, позволяющие получать регулярные, глобальные и региональные высококачественные (по точности и пространственному разрешению) данные о ее газовом составе. Обзор посвящен анализу современных дистанционных спутниковых пассивных методов определения газового состава атмосферы и основных результатов, полученных к настоящему времени. Дана современная классификация пассивных и активных спутниковых методов, физико-математические основы пассивных методов, приведены основные характеристики используемых орбит космических носителей и типы геометрии спутниковых наблюдений.

Анализируются преимущества и недостатки различных спутниковых пассивных методов, использующих измерения характеристик прозрачности атмосферы (затменный метод), собственного излучения Земли, а также отраженного и рассеянного солнечного излучения при различной геометрии спутниковых измерений в широкой спектральной области от УФ до радиоволн. Приведены краткая история создания специальной современной спутниковой аппаратуры, а также их характеристики – информативность, высотные диапазоны измерений, погрешности и вертикальное разрешение. Представлены многочисленные результаты глобального и регионального мониторинга газового состава атмосферы и примеры их использования в различных задачах физики атмосферы и климатологии.

**Ключевые слова:** газовый состав атмосферы, спутниковые пассивные методы, рассеянное и отраженное солнечное излучение, собственное излучение Земли и атмосферы

**DOI:** 10.31857/S0002351524060056 **EDN:** HUYRKI

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Газовый состав атмосферы Земли в значительной степени определяет многочисленные погодные и климатические процессы и явления [WMO, 2018; IPCC, 2013; IPCC, 2023]. Например, водяной пар является важнейшим парниковым газом для нашей планеты и существенно повышает ее среднюю температуру. Озон ответственен за радиационный и химический режим стратосферы, ультрафиолето-

вую (УФ) освещенность поверхности и экологическое состояние нижней тропосферы. Углекислый газ является важнейшим антропогенным парниковым газом. Его непрерывный рост в последние десятилетия существенно меняет радиационный режим нашей планеты и приводит к увеличению температуры нижней тропосферы. Многие другие газы участвуют в формировании радиационного баланса планеты, состояния озоносферы, измене-

ний климата Земли и экологии окружающей среды. Десятки токсичных газов существенно влияют на экологию атмосферы [WMO, 2006; WHO, 2024; BMO, 2010]. Поэтому наблюдения, например, в рамках GAW (Global Atmospheric Watch) сосредоточены на трех классах газов:

(1) озон (общее содержание (ОС) и вертикальные профили озона) с акцентом на стратосферу и верхнюю тропосферу; озоноразрушающие газы);

(2) парниковые газы ( $\text{CO}_2$ ,  $\delta^{14}\text{C}$ ,  $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$  в  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2/\text{N}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\delta^{13}\text{C}$  и  $\delta\text{D}$  в  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  и галогенированные соединения, например  $\text{SF}_6$ );

(3) активные газы (приземный и тропосферный озон,  $\text{CO}$ , летучие органические соединения,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{H}_2$  и  $\text{NH}_3$ ) [WMO, 2023a].

Целесообразно объединить все эти газы в категорию климатически и экологически важных газов. Они часто измеряются одними и теми же приборами, хотя к ним предъявляются различные требования по пространственному и временному разрешению, высотным областям и погрешностям измерений. Рост средней температуры Земли, особенно интенсивный в высоких широтах, формирование озоновых дыр в Антарктике и в Арктике, уменьшение температуры в средней атмосфере, различия в оценках временных трендов содержания озона в стратосфере и другие факторы свидетельствуют о значимости исследований влияния этих газов на климат и экологию нашей планеты [WMO, 2018; BMO, 2010; IPCC, 2013; IPCC, 2023; WHO, 2024].

Важность изучения состава атмосферы стимулировала создание за последние десятилетия глобальных и региональных систем наблюдений за содержанием водяного пара, озона и его разрушителей, углекислого и других парниковых газов, и десятков газов-загрязнителей. Системы наблюдений состоят из наземных, самолетных, аэростатных и судовых измерений, а также дистанционных, прежде всего спутниковых, измерений. Эти системы позволяют контролировать содержание газов, влияющих на климат и экологию, с различными пространственным и временным разрешением и погрешностями, проводить научные и прикладные исследования, а также контролировать оперативную обстановку, например, с загрязнениями атмосферы в мегаполисах и промышленных районах [WHO, 2024; BMO, 2010; WMO, 2006; WMO, 2018; WMO, 2023a; Кароль и др., 1983].

Важную роль в глобальном мониторинге газового состава атмосферы играют спутниковые

системы наблюдений, позволяющие получать регулярные, глобальные и высококачественные (по точности и пространственному разрешению) данные о состоянии атмосферы, в том числе о ее газовом составе [WMO, 2006; WMO, 2023a; Кароль и др., 1983; Кондратьев и Тимофеев, 1970; Кондратьев и Тимофеев, 1978; Малкевич, 1973; Houghton et al., 1984; Timofeyev and Vasiliev, 2008; Cracknell and Varotsos, 2012; Hassler et al., 2014; Тимофеев, 2016].

## 2. КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЙ

По характеру взаимодействия измерительных средств с исследуемым газом в атмосфере методы измерений можно разделить на следующие три группы [Кароль и др., 1983]:

1. Отбор проб воздуха или отдельных, содержащихся в нем, газов из определенных частей атмосферы с их последующей обработкой, анализом и измерением, обычно в лабораторных условиях;
2. Контактные измерения, которые отличаются от отбора проб тем, что измерительный прибор взаимодействует с воздухом или его определенным объемом сразу на месте и во время осуществления измерений;
3. Дистанционные измерения, основанные преимущественно на измерениях прямого, рассеянного, отраженного солнечного и собственного электромагнитного излучения (ЭМИ) и восстановления информации о характеристиках атмосферы и поверхности земли.

Дистанционные методы измерений интенсивно используются в наземных, самолетных, аэростатных, судовых, а также в космических схемах измерений. В последних схемах приборы помещаются на полярные, геостационарные и высокоэллиптические спутники и международные космические станции [BMO, 2010; Тимофеев, 2016; WMO, 2023; Асмус и др., 2021].

Как было сказано, дистанционные методы измерений параметров атмосфер планет и их поверхностей в большинстве случаев основаны на измерениях ЭМИ разного происхождения и в различных диапазонах спектра. Существуют также дистанционные акустические измерения, но они не так популярны в силу относительной ограниченности информативности.

Классификация дистанционных методов измерений параметров атмосферы и поверхности основана на следующих принципах:

1. Происхождение излучения – естественное или искусственное (пассивные и активные методы, соответственно).
2. Тип носителя и положение измерительной аппаратуры – наземные, самолетные, аэростатные, спутниковые и др.
3. Область спектра – ультрафиолетовый (УФ), видимый (ВИД), инфракрасный (ИК), микроволновый (МКВ) диапазоны и другое радиоизлучение.
4. Основной механизм взаимодействия излучения со средой – методы поглощения (ослабления), рассеяния, отражения, излучения, рефракции и др.
5. Геометрия измерений – например, у спутниковых измерений это – надирные, касательные, лимбовые.
6. Исследуемая область атмосферы – тропосфера, стратосфера, мезосфера и др.
7. Тип спутниковых носителей – например, полярные и геостационарные спутники и орбиты.
8. Исследуемый параметр атмосферы и поверхности.
9. Инструментальная основа метода измерений – дифракционные спектрометры, фотометры, Фурье-спектрометры и др.

На рис. 1 представлен пример классификации современных дистанционных методов измерений, основанный на природе используемого источника излучения (пассивные и активные методы) и основных процессах генерации и взаимодействия излучения со средой.

В пассивных методах используется излучение от естественных источников (например, прямое сол-

нечное излучение), а в активных – излучение от искусственных источников (например, лазерное излучение).

Пассивные методы измерений включают: (1) метод прозрачности (МП, иногда называемый методом поглощения) или затменный метод для спутниковой геометрии измерений; (2) методы собственного атмосферного излучения (АИ); и (3) методы отраженного и рассеянного солнечного излучения (ОРСИ).

Методы собственного атмосферного излучения часто подразделяются на методы теплового излучения (ТИ), ИК неравновесного излучения и свечения атмосферы. Метод ОРСИ часто подразделяют на методы отражения и рассеяния. В первом случае – при исследовании характеристик поверхности, во втором – атмосферы. Отметим также четвертый пассивный метод рефракции, который основан на регистрации углов преломления солнечного или звездного излучения и позволяет определять профили температуры и давления. Его реализация в радиодиапазоне позволяет получать также информацию о содержании водяного пара. Однако, он относительно малоинформативен по отношению к газовому составу атмосферы и в данном обзоре не затрагивается.

Активные методы подразделяются на прожекторные, лидарные, радиолокационные и рефрактометрические, а также на их комбинации, например, радиоакустический метод. Мы не рассматриваем эти методы в данном обзоре, т.к. они пока не дают заметного объема информации о газовом составе атмосферы с помощью именно космических носителей.

На рис. 2 приведены примеры геометрий (затменные, надирные и лимбовые) пассивных и активных спутниковых измерений параметров атмосферы и поверхности. В затменных методах используется излучение от источника естественного происхождения (прежде всего Солнца) во время его захода и восхода за горизонт планеты. При надирной геометрии измерений поле зрения прибора обращено на поверхность планеты, а в лимбовой – на её горизонт. Каждая геометрия измерений имеет преимущества и недостатки, которые будут обсуждаться далее. Можно лишь отметить, что затменная и лимбовая геометрии измерений, как правило, имеют относительно высокое вертикальное (1–5 км) и достаточно грубое горизонтальное разрешение (200–300 км). Надирные пассивные измерения, в целом, характеризуются довольно грубым вертикальным разрешением (5–15 км) и высоким горизонтальным разрешением (до десятков метров).

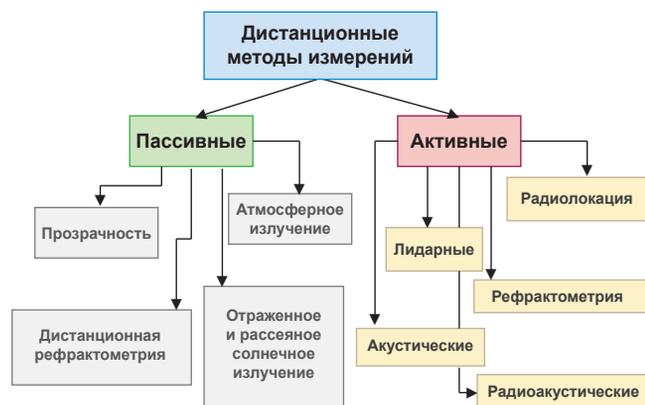


Рис. 1. Классификация дистанционных методов измерений.

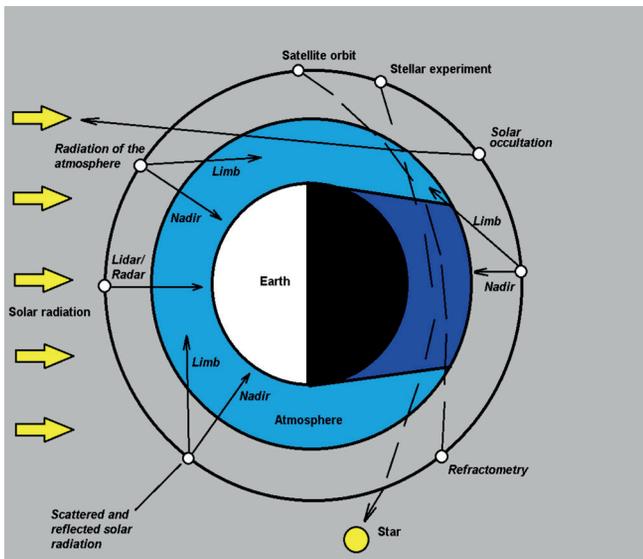


Рис. 2 Примеры дистанционных спутниковых методов измерений и их геометрии.

### 3. ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ДИСТАНЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Физико-математические модели дистанционных измерений основаны на уравнениях переноса излучения, являющихся основой решения прямых и обратных задач атмосферной оптики. Эти уравнения содержат характеристики излучения (чаще всего – интенсивность излучения) и параметры (функции), описывающие взаимодействие излучения со средой атмосфера-поверхность. К параметрам относятся коэффициенты ослабления, поглощения, рассеяния, отражения, преломления, индикатрисы рассеяния и др. [Тимофеев и Васильев, 2003]. В свою очередь, параметры, описывающие взаимодействие излучения со средой, зависят от состояния атмосферы, которое ученые стремятся измерить.

В качестве примера рассмотрим дистанционный метод определения содержания поглощающего газа по измерениям солнечного излучения, ослабленного атмосферой. Воспользуемся простейшей формой уравнения переноса монохроматического излучения – законом Бера–Бугера–Ламберта (1). Это уравнение описывает ослабление, например, солнечного излучения  $I_0$  в слое  $(0-z)$  [Тимофеев и Васильев, 2003]:

$$I(z) = I_0 \exp \left( -\sec \varphi \int_0^z a(z') dz' \right), \quad (1)$$

где  $I(z)$  – измеренное ослабленное солнечное излучение;  $a(z')$  – коэффициент ослабления, в общем случае состоящий из коэффициентов рассеяния и поглощения;  $\varphi$  – зенитный угол Солнца.

Элементарное решение обратной задачи теории переноса ЭМИ, которое заключается в определении оптической толщи, например, всей атмосферы  $(0-\infty)$ , можно записать в форме (2):

$$t_0 = \int_0^\infty a(z) dz. \quad (2)$$

Дальнейшая детализация процессов взаимодействия излучения со средой, например, выделение молекулярного поглощения атмосферного газа, которое описано коэффициентом поглощения  $k_m$ , из суммарной оптической толщи, приводит к выражению:

$$t_m = k_m U^* S f(v, v') U, \quad (3)$$

где  $S$  – интенсивность линии поглощения;  $f(v, v')$  – форма контура линии поглощения, измерения в которой дают возможность определения содержания поглощающего газа  $U$ . Однако, из-за зависимости коэффициентов молекулярного поглощения от давления и температуры атмосферы необходимо использовать измерения этих параметров в качестве дополнительной информации, или решать комплексную обратную задачу по определению содержания газа, температуры и давления в атмосфере. Таким образом, использование зависимости оптических характеристик взаимодействия излучения со средой от параметров атмосферы позволяет реализовать дистанционные измерения параметров атмосферы.

Аналогичным образом можно описать физико-математические основы других пассивных методов, например, методов рассеяния и собственного излучения атмосферы. Для этого используются интегральная или интегро-дифференциальная форма уравнения переноса ЭМИ в атмосфере и соотношения, описывающие зависимости атмосферных оптических характеристик (коэффициенты излучения, рассеяния, индикатрисы рассеяния и т.д.) от физических характеристик атмосферы и поверхности (температуры, содержания газов и т.д.), для формулировки обратных задач относительно параметров атмосферы и поверхности.

Так, интегральную форму уравнения переноса теплового излучения для интенсивности восходящего излучения на высоте  $z$  можно записать с учетом ослабления и собственного излучения в форме (4) из [Тимофеев и Васильев, 2003]:

$$I_n^\uparrow(z) = I_{n,0} P_n(0, z) + \int_0^z B_n[T(z)] \frac{dP_n(z', z)}{dz'} dz', \quad (4)$$

где  $P_n(z', z)$  – функция пропускания слоя атмосферы ( $z - z'$ ),  $B_n$  – функция Планка излучения абсолютно черного тела;  $T(z)$  – вертикальный профиль температуры воздуха. Информация о газовом составе атмосферы содержится в функциях пропускания  $P_n(z', z)$  и в соотношениях, описывающих метод ОРСИ.

#### 4. ПАССИВНЫЕ СПУТНИКОВЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ ГАЗОВОГО СОСТАВА

Опишем кратко пассивные спутниковые дистанционные методы, позволяющие в настоящее время получать основную информацию о газовом составе атмосферы. С математической точки зрения все дистанционные методы (за исключением определения общего содержания газов) относятся к некорректным по Адамару обратным задачам атмосферной оптики. В частности, как это видно, например, из формулы (4), – к нелинейным интегральным уравнениям Фредгольма первого рода [Тимофеев, 2016]. Эти уравнения корректны по А. Н. Тихонову, и за последние десятилетия предложены регуляризационные численные методы их решений (см., например, [Rodgers, 2000]). Важной особенностью этих методов является использование при решении не только данных измерений (например, спектров излучения), но и априорной информации об искомом решении. Так, при численной реализации дистанционных методов задается, например, среднее состояние атмосферы (средний профиль содержания исследуемого газа) и свойства искомой функции – ограниченность, положительность, принадлежность к эмпирическому статистическому ансамблю и т.д. Зависимость решения от априорной информации может быть очень сильная при малой информативности самих измерений излучения. Математические особенности реализации дистанционных измерений атмосферных параметров подробно изложены в работах [Тимофеев, 2016; Rodgers, 2000; WMO, 2023b, c].

##### 4.1. Метод прозрачности (МП), затменный метод

Метод основан на регистрации величин ослабления солнечного, лунного, звездного и другого излучения в различных областях спектра (от гамма-излучения до радиоволн) и при разной геометрии измерений (наземная, самолетная, аэростатная, спутниковая) за счет молекулярного поглощения атмосферных газов для определения их содержания. Высокая информативность метода обусловлена наличием большого количества по-

лос поглощения десятков газов, а также высоким отношением сигнал/шум при измерениях солнечного излучения. Методу характерна простая модель переноса излучения; высокая точность измерений солнечного излучения и, как следствие, содержания газов, широкая высотная область и высокое вертикальное разрешение (при применении касательной спутниковой геометрии). Важное преимущество метода заключается в использовании относительных измерений излучений.

Из недостатков метода можно выделить малое количество измерений (~30 измерений в сутки) по излучению восходящего и заходящего за горизонт планеты Солнца, ограничение высотного диапазона измерений, связанное с наличием облачности, влияние нестационарного состояния атмосферы при измерениях по восходящему и заходящему Солнцу (например, содержания  $\text{NO}_2$  в стратосфере, содержания озона в мезосфере), что отрицательно сказывается на точности, а также значительное горизонтальное усреднение содержания исследуемого газа (200–300 км). Отметим, что использование излучения звезд на порядок повышает число спутниковых измерений в сутки и позволяет исследовать атмосферу в ночное время. Однако, при этом отношение сигнал/шум на порядки ниже, чем при применении Солнца в качестве источника излучения.

##### 4.2. Метод атмосферного излучения (АИ)

Метод АИ часто подразделяется на три метода:

1. Метод теплового излучения (ТИ).
2. Метод ИК неравновесного излучения атмосферы.
3. Метод свечения атмосферы.

Наиболее активно в последние десятилетия используется метод АИ, который обладает высокой информативностью (большое количество излучающих газов при измерениях с высоким спектральным разрешением и охлаждении приемников). Кроме того, данный метод возможно использовать в отсутствии солнечного излучения (например, в период полярной ночи). Недостатком метода является сильная зависимость информативности (относительно газового состава атмосферы) от температурной вертикальной неоднородности атмосферы [Кондратьев и Тимофеев, 1978; Timofeyev and Vasiliev, 2008; Houghton et al., 1984]. Отметим, что спутниковые методы, основанные на измерениях собственного излучения атмосферы, используют надирную и лимбовую геометрии.

#### 4.3. Методы отраженного и рассеянного солнечного излучения (ОРСИ)

Метод основан на измерениях отраженного и рассеянного солнечного излучения (ОРСИ) [Малкевич, 1973; Cracknell and Varotsos, 2012] в диапазонах длин волн от УФ до ближнего ИК (БИК). В отличие от метода ТИ, ОРСИ используется в дневное время или при сумерках. Это связано с зависимостью метода от наличия прямого солнечного излучения. Измерения рассеянного солнечного излучения в полосах поглощения газов позволяют определять общее содержание и элементы вертикальной структуры их содержания. Метод ОРСИ в спутниковых измерениях используется с лимбовой, надирной или другими близкими геометриями.

Все представленные выше дистанционные методы измерений позволяют получать информацию о газовом составе атмосферы. Однако, важнейшие характеристики данных дистанционных методов, такие, как погрешности, высотные диапазоны измерений, пространственный и временной охват измерениями, пространственное и временное разрешение, стоимость и др. сильно различаются. Именно поэтому, а также из-за требований к измерениям газового состава атмосферы в научных и прикладных задачах, существующие системы глобального мониторинга состоят из совокупности различных методов, приборов и геометрий измерений.

В табл. 1 приведены основные характеристики пассивных дистанционных методов измерений.

Из табл. 1 следует, что в МП используется излучение в очень широкой области – от гамма-излучения до МКВ диапазона. Метод имеет достаточно высокое вертикальное разрешение, но грубое горизонтальное (если не используется томографический подход). В методах АИ используются измерения ЭМИ в областях от УФ до МКВ. Метод ОРСИ (солнечного излучения) распространяется на обла-

сти от УФ до ближней ИК. Современные надирные методы имеют, как правило, высокое горизонтальное разрешение, но низкое – вертикальное.

## 5. СПУТНИКОВЫЕ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ГАЗОВОГО СОСТАВА АТМОСФЕРЫ

Измерения газового состава атмосферы из космоса осуществляются с использованием нескольких типов орбит и геометрий наблюдений. В настоящее время имеются три важнейшие орбитальные системы спутниковых измерений – полярная, геостационарная и высокоэллиптическая [Асмус и др., 2021]. На рис. 3 приведена для примера действующая и создаваемая группировка российских космических аппаратов (в соответствии с Федеральной космической программой России на 2016–2025 гг.), состоящая из трех указанных выше типов орбит.

На этом рисунке приведены также примеры многочисленных российских спутников, используемых для решения научных и прикладных задач в областях метеорологии и экологии (например системы Электро-Л, Метеор-М, Ресурс-П, Арктика-М и др.). Из них можно выделить полярные спутники, которые позволяют осуществлять периодический глобальный мониторинг характеристик газового состава атмосферы с определенной частотой; геостационарные спутники с временным разрешением 15–30 мин. в тропиках и средних широтах и высокоэллиптические спутники с временным разрешением ~30 мин. в полярных районах [Асмус и др., 2021]. Существенную роль в информативности спутниковых дистанционных методов играют такие параметры космических носителей, как высоты над поверхностью, углы наклоны, типы орбит, полосы обзора и др.

Другими важными факторами, которые обуславливают информативность спутниковых ме-

Таблица 1. Основные характеристики пассивных спутниковых методов измерений газового состава атмосферы.

Метод	Геометрия измерений	Источник ЭМИ	Спектральная область	Вертикальное/ горизонтальное разрешение, км
Прозрачности (МП), затменный	Лимбовая, касательная	Солнце, Луна, звезды, галактики	От гамма-излучения до дальнего ИК	1–3/200–300
Атмосферного излучения (АИ)	Надирная, лимбовая	Тепловое и ИК неравновесное, свечения атмосферы	БИК–МКВ	5–10/5–50 2–5/200–300
Отраженного и рассеянного солнечного излучения (ОРСИ)	Надирная, лимбовая	Солнце	УФ–ВИД– БИК	5–15/2–30 2–4/200–300

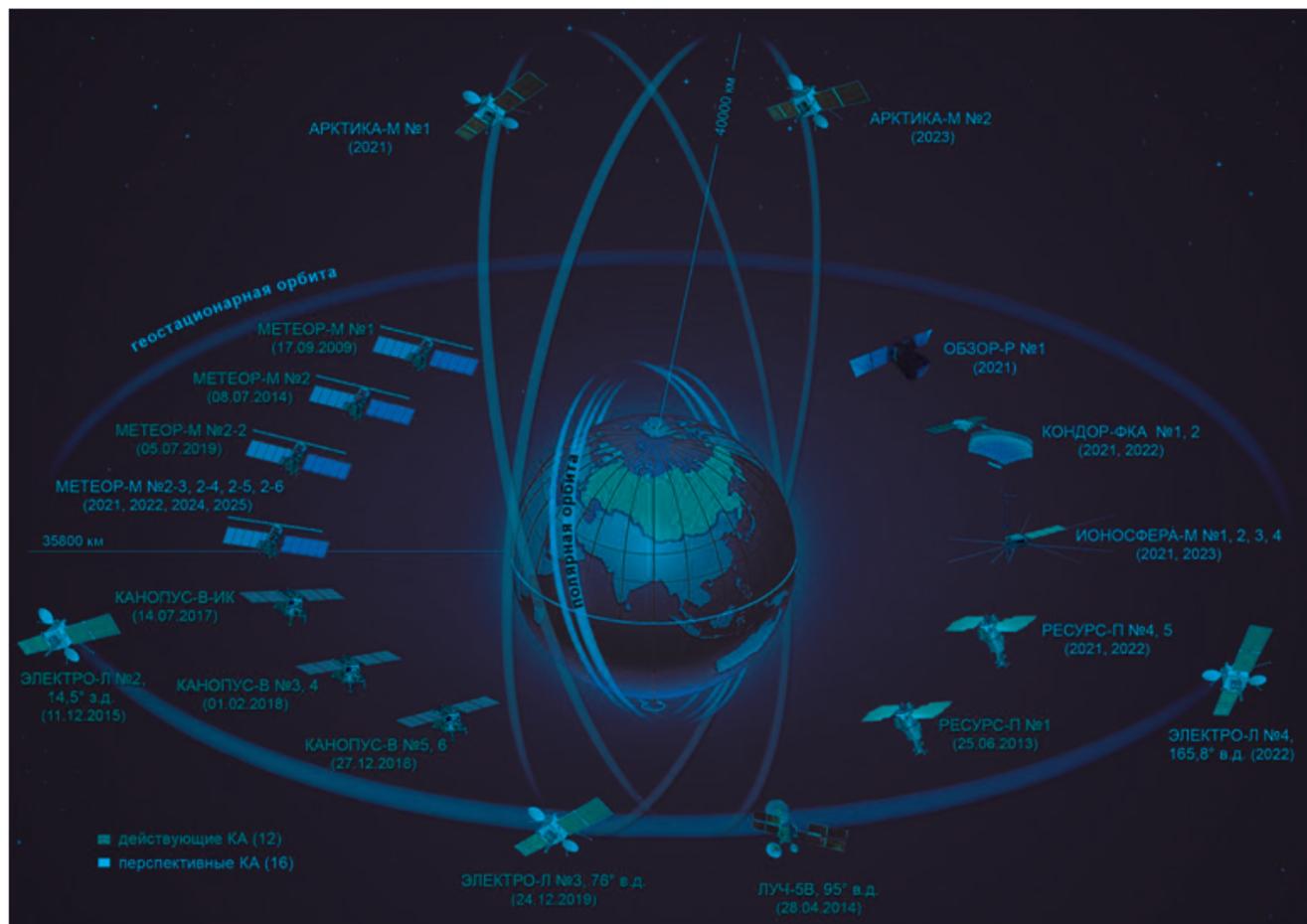


Рис. 3. Действующая и создаваемая в интересах Росгидромета группировка российских космических аппаратов.

тодов определения газового состава атмосферы, являются используемые спектральные области измерений, характеристики применяемой аппаратуры и дистанционных методов. К этим характеристикам относятся спектральное разрешение, случайные и систематические погрешности и угловое разрешение измерений, качество используемой априорной информации, точность задания характеристик молекулярного поглощения, в частности интенсивностей, полуширин спектральных линий и их зависимостей от давления и температуры, контуров линий поглощения и др.

В следующем разделе мы рассмотрим основные характеристики трех пассивных спутниковых методов и приборов, активно использовавшихся для получения информации о газовом составе атмосферы в последние два-три десятилетия, и с помощью которых был получен основной объем данных наблюдений. Активные спутниковые методы (в частности, лидарный метод) интенсивно применяются в настоящее время для мониторинга характеристики облаков и аэрозолей. Использование их для мони-

торинга газового состава атмосферы планируется в самые ближайшие годы.

## 6. АППАРАТУРА ДЛЯ СПУТНИКОВОГО МОНИТОРИНГА ГАЗОВОГО СОСТАВА АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ И ЕЕ ИНФОРМАТИВНОСТЬ

Первыми метеорологическими спутниками, исследовавшими газовый состав атмосферы и измерявшими тепловое излучение, содержащее информацию об облаках и водяном паре, были американские спутники серии TIROS. Спутники TIROS 2, 3 и 4 (запущенные в 1960, 1961 и 1962 годах) использовали сканирующие радиометры, чувствительные к содержанию водяного пара в спектральном интервале 6.0–6.5 мкм [Hanel and Wark, 1961]. Первые советские наблюдения общего содержания озона (СОС) с помощью спектрофотометра, измеряющего отраженное и рассеянное земной поверхностью УФ излучение Солнца, были осуществлены на КА «Космос-121» [Березин и др., 1972; Хргиан и др., 1973].

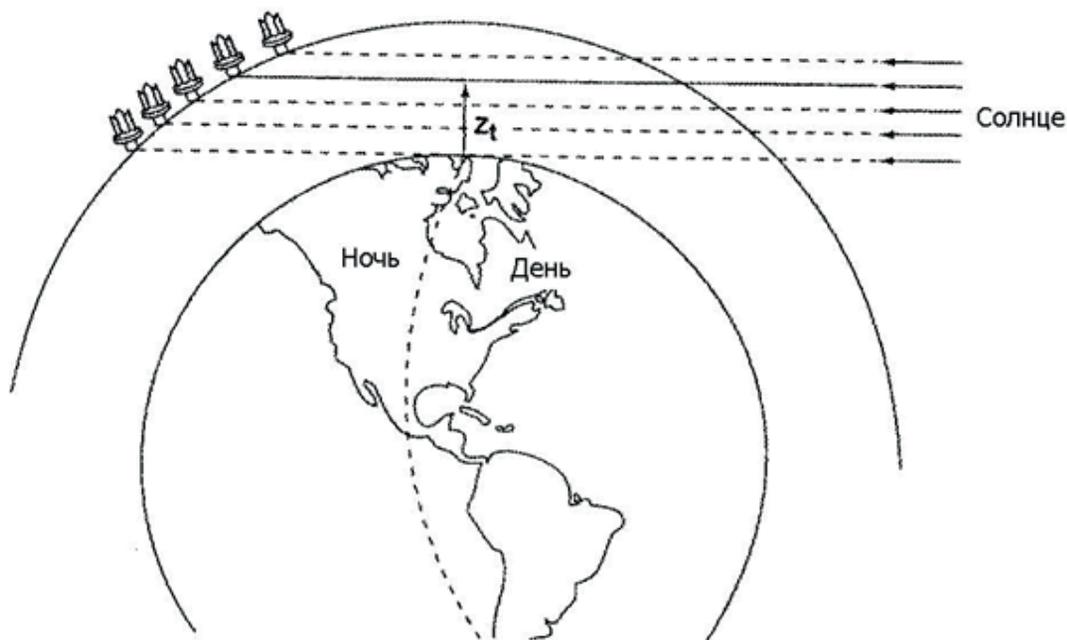


Рис. 4. Схема затменных спутниковых экспериментов с использованием излучения Солнца.

### 6.1. Методы прозрачности

Метод прозрачности уже длительное время используется для изучения газового и аэрозольного состава в наземных, аэростатных, самолетных и спутниковых измерениях [Тимофеев, 2016; WMO, 2023b, c; Rodgers, 2000]. В середине 80-х годов в СССР проводились спутниковые измерения содержания озона и аэрозолей методом прозрачности, а также с помощью измерений сумеречного лимба Земли [Гречко и др., 1988; Grechko et al., 1991; Elansky et al., 1991; Elansky et al. 1991a]. Схема таких измерений представлена на рис. 4. Прибор измеряет ослабленное солнечное излучение, которое проходит через разные слои атмосферы, характеризующиеся прицельной высотой  $z_t$ . При измерениях на трассах, не проходящих через атмосферу, он измеряет также и прямое, не ослабленное атмосферой, солнечное излучение (на схеме не представлено). Отношение между измеренным ослабленным и не ослабленным солнечным излучением является функцией пропускания атмосферы на касательных трассах и зависит от двух переменных — прицельной высоты и длины волны ЭМИ. Измерения солнечного излучения осуществляются при его восходе и заходе за планету, и поэтому этот метод также называют затменным.

Эпизодические затменные спутниковые эксперименты проводились на орбитальной станции «Салют», по данным измерений восстанавливались

вертикальные профили содержания водяного пара [Кондратьев и др., 1976, 1978]. Первые регулярные спутниковые измерения вертикальных профилей содержания  $O_3$  и  $NO_2$  этим методом были выполнены с помощью прибора SAGE I (Stratospheric Aerosol and Gas Experiment) в 1979–1981 гг. [Chu and McCormick, 1979; McCormick et al., 1989]. Комплексные исследования газового состава стратосферы были проведены в 1983 г. прибором GRILLE-1 [Muller et al., 1985]. В этих измерениях были определены вертикальные профили содержания  $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $NO$ ,  $NO_2$ ,  $N_2O$ ,  $CH_4$ .

В 1984 г. начались исследования усовершенствованным прибором SAGE II, которые продолжались до 2003 г. С 2002 г. примерно 3 года усовершенствованный прибор SAGE III функционировал на спутнике «Метеор-3М». Позднее прибор SAGE III с 2017 г. работал на Международной космической станции (МКС) [McCormick et al., 1991]. Одной из особенностей SAGE III была возможность измерений с помощью отраженного от Луны солнечного излучения. Спутниковые приборы SAGE постоянно совершенствовались и в общей сложности участвуют в мониторинге озоносферы уже более 40 лет. В Приложении приведена табл. П1 с примерами затменных спутниковых экспериментов по излучению Солнца и звезд, проводимых с 1979 г.

Приборы UVISI (Ultraviolet and Visible Imagers and Spectrographic Imagers) на спутнике MSX

(Midcourse Space Experiment) [Yee et al., 2002] и GOMOS (Global Ozone Monitoring by Occultation of Stars) на спутнике Envisat (Environmental Satellite) [Kyrola et al., 2004] измеряли излучение звезд, что позволило увеличить число измерений в сутки более чем на порядок по сравнению с солнечными экспериментами и изучать ночную озоносферу. В период функционирования прибора UVISI (Ultraviolet and Visible Imagers and Spectrographic Imagers) (1996–2004 гг.), с помощью которого измерялось ЭМИ в области 114–897 нм, удалось восстановить профили содержания  $O_2$ ,  $K_3$ ,  $NO_2$  и температуры воздуха. Высотный диапазон измерений прибора GOMOS (Global Ozone monitoring by Occultation of Stars) составлял 10–100 км при вертикальном разрешении 2–4 км. Спектрометр GOMOS измерял излучение от ~180 звезд в следующих областях спектра: 248–690, 755–774 и 926–954 нм. Это позволяло получать в определенные периоды функционирования аппаратуры за сутки ~400 измерений (280 измерений в сутки после июля 2007 г.) с глобальным покрытием, в том числе и в условиях полярной ночи. В общей сложности с начала измерений за 10 лет (в апреле 2012 г. была потеряна связь со спутником Envisat) прибор GOMOS осуществил 866000 затменных измерений. Измерения излучения звезд в УФ и ВИД областях спектра позволили определить вертикальные профили  $O_3$ ,  $NO_2$ ,  $NO_3$ ,  $H_2O$ ,  $O_2$ , характеристики натриевого слоя, турбулентности, гравитационных волн, стратосферного аэрозоля и полупрозрачных облаков различного типа.

Прибор ATMOS (Atmospheric Trace MOlecule Spectroscopy experiment), представлявший собой Фурье-интерферометр, открыл «новую эру» в методе прозрачности и в исследованиях газового состава атмосферы [Farmer, 1987]. Измерения проводились в 1985, 1992, 1993 и 1994 гг. на шаттлах и продолжались в течение 10 дней. Прибор ATMOS измерял спектры прямого солнечного излучения с высоким спектральным разрешением ( $0.01 \text{ см}^{-1}$ ) в широкой спектральной области ( $600\text{--}4800 \text{ см}^{-1}$ ). Важной особенностью прибора являлось малое время измерений (~2 сек), что давало возможность реализации достаточно высокого вертикального разрешения (1–2 км) при затменных наблюдениях [Farmer, 1987]. Проведенные эксперименты позволили определить вертикальные профили концентраций более 30 малых газовых составляющих атмосферы, в том числе ряда их изотопических разновидностей. На рис. 5 представлены измеренные прибором ATMOS газы, высоты их измерений и погрешности определения содержания [Gunson et al., 1996].

Отметим российские затменные эксперименты с аппаратурой «Озон-Мир», созданной в Санкт-Петербургском государственном университете (СПбГУ). С ее помощью измерялось солнечное излучение в УФ, ВИД и БИК областях спектра на научном модуле «Природа» станции «Мир» в 1996–1997 гг. [Поберовский и др., 1999; Поляков и др., 1999]. Спектральные особенности прибора позволяли осуществлять независимую высотную привязку данных с помощью анализа измерений в полосах поглощения кислорода и получить информацию о содержании озона до высот 70–80 км.

На рис. 6 приведен пример сопоставлений измеренных вертикальных профилей содержания озона приборами «Озон-Мир» на орбитальной станции «МИР» и HALOE (Halogen Occultation Experiment) на борту спутника UARS (Upper Atmosphere Research Satellite, NASA), демонстрирующий высокое качество спутниковых измерений [Поберовский и др., 1999; Поляков и др., 1999].

Как продолжение исследований газового состава с помощью интерферометра ATMOS можно рассматривать эксперименты с интерферометром ACE (Atmospheric Chemistry Experiment) на канадском спутнике SCISAT (Science Satellite), запущенном 12 августа 2003 г. [Bernath et al., 2005, 2021] и действующего до сих пор (более 20 лет). Прибор ACE измеряет спектры солнечного излучения в области 2.2–13.3 мкм ( $750\text{--}4400 \text{ см}^{-1}$ ) с разрешением  $0.02 \text{ см}^{-1}$ . Высотный диапазон измерений составляет ~6–100 км в зависимости от газа. Данные измерений позволяют получать информацию о вертикальных профилях температуры, давления, отношения смеси многих газов, оптических и микрофизических характеристиках аэрозолей и облаков. Из измерений прибора ACE была получена информация о содержании следующих газов:  $H_2O$ ,  $O_3$ ,  $N_2O$ ,  $CO$ ,  $CH_4$ ,  $NO$ ,  $NO_2$ ,  $HNO_3$ ,  $HF$ ,  $HCl$ ,  $N_2O_5$ ,  $ClONO_2$ , CFC-12 ( $CCl_2F_2$ ), CFC-11 ( $CCl_3F$ ),  $COF_2$ , HCFC-22 ( $CHClF_2$ ),  $HDO$ ,  $SF_6$ ,  $OCS$ ,  $HCN$ ,  $CF_4$ ,  $CH_3Cl$ ,  $C_2H_2$ ,  $C_2H_6$ ,  $N_2$ ,  $CO_2$ ,  $H_2CO$ ,  $H_2O_2$ ,  $O_2$ ,  $HO_2NO_2$ ,  $HCOOH$ ,  $CH_3OH$ ,  $COCl_2$ ,  $CCl_4$ ,  $COClF$ , HCFC-142b ( $ClF_2C-CH_3$ ), CFC-113 ( $Cl_2FC-CClF_2$ ), HCFC-141b ( $Cl_2FC-CH_3$ ), а также ряда изотопов.

Погрешности метода прозрачности (как и других дистанционных методов определения газового состава атмосферы) зависят от многих факторов – в существенной степени от величины поглощения исследуемого газа, высоты в атмосфере, точности измерений солнечных спектров, качества априорной информации (прежде всего точности задания спектроскопических параметров – интенсивностей,

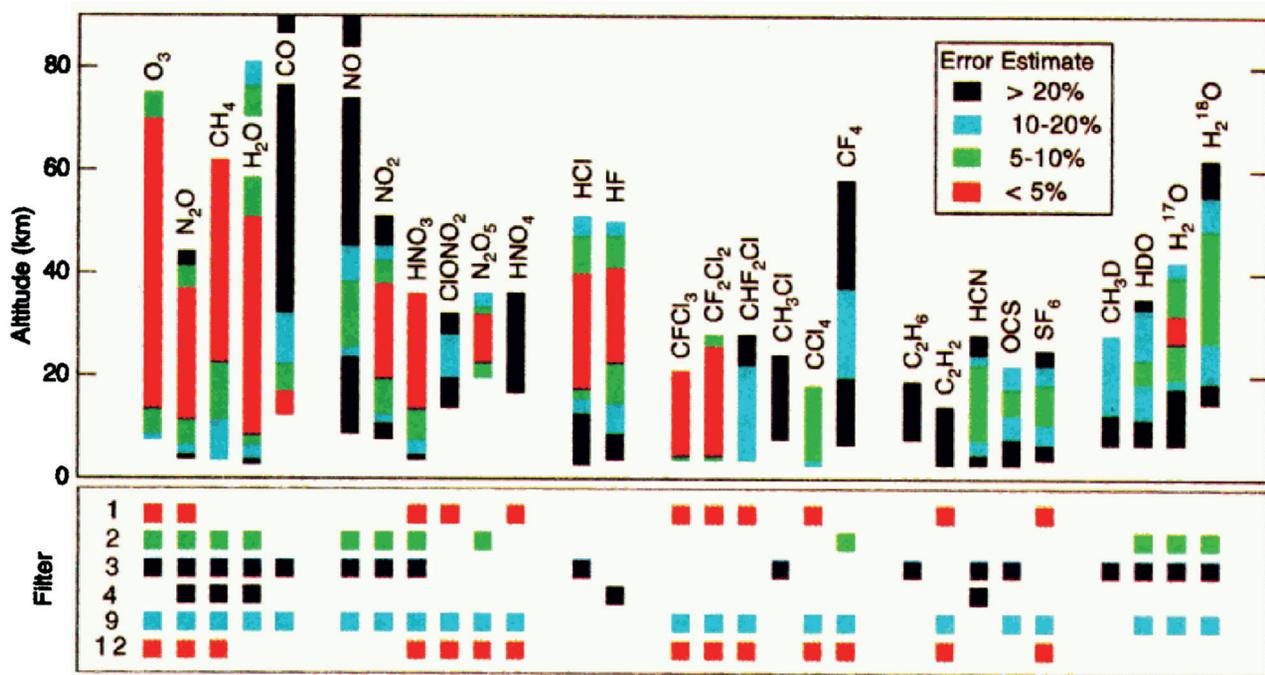


Рис. 5. Газы, измеренные в затменных экспериментах с помощью прибора ATMOS, погрешности и высоты измерений [Gunson et al., 1996].

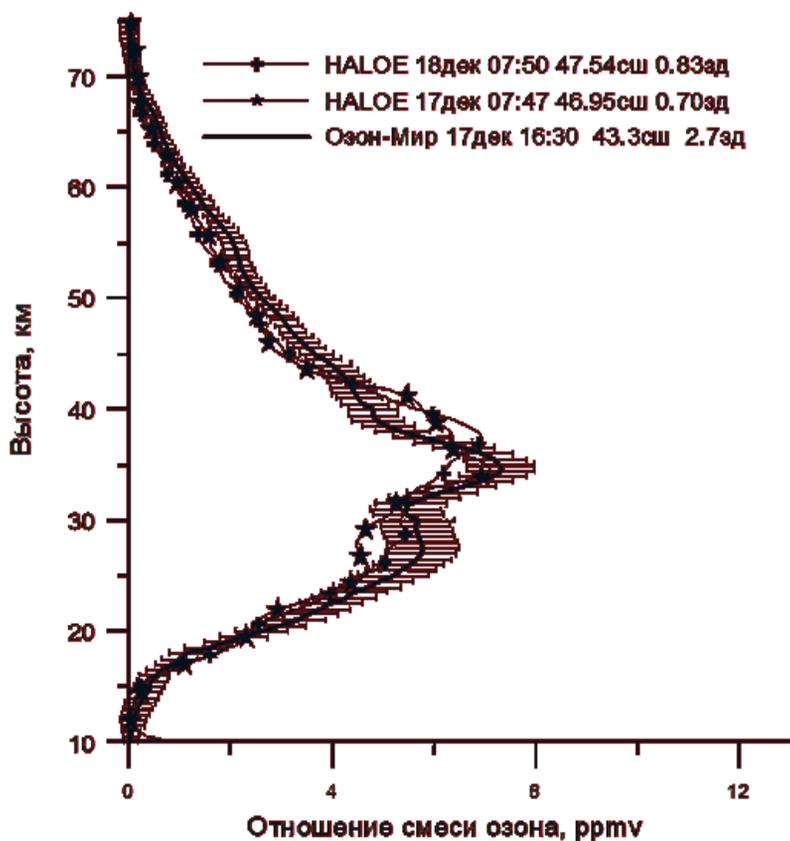


Рис. 6. Пример сопоставлений вертикальных профилей содержания озона на основе измерений спутниковыми приборами «Озон-Мир» и HALOE.

полуширин спектральных линий и т.д.). Погрешности варьируются от единиц до 10–50% и более. В табл. 2 приведены примеры оценки погрешностей определения содержания газов с помощью спутникового прибора ACE-FTS [Bernath et al., 2021].

В качестве примера, характеризующего высокую информативность измерений прибора ACE, приведем табл. 3 с оценками долговременных линейных трендов (2004–2020 гг.) содержаний для 44 молекул атмосферных газов, измеренных ACE-FTS в единицах %/год и ppt/год для версии данных прибора ACE 4.1 [Bernath et al., 2021]. В скобках приведено стандартное отклонение трендов.

Космические приборы SCIAMACHY (Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Cartography) работали в космосе с использованием трех геометрий наблюдений – надирных, лимбовых и затменных [Noel et al., 2002]. В затменных экспериментах с этим прибором как Солнце, так и Луна (отраженное солнечное излучение от Луны) выступали в качестве источников. В результате использования различных мод наблюдений прибор SCIAMACHY позволил получить информацию о содержании  $O_3$ ,  $NO_2$ ,  $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$ ,  $N_2O$ ,  $BrO$ ,  $CO$ ,  $O_2$ ,  $NO$ ,  $SO_2$ ,  $H_2CO$ ,  $ClO$  и  $OCIO$  в стратосфере и тропосфере.

Интересно отметить, что источниками в затменных экспериментах могут быть не только Солнце и звезды, но и жесткое рентгеновское излучение космических объектов. Например, в [Yu et al., 2022] излучение Крабовидной туманности используется для исследования термосферы Земли.

### 6.2. Метод теплового излучения (надир)

Методы теплового излучения реализуются при двух типах геометрии измерений – в надирных и лимбовых направлениях, – и они начали активно развиваться в 70-х годах 20-го века. Исследования газового состава атмосферы, в частности содержания водяного пара и озона, стартовали с первых спутниковых надирных измерений спектров уходящего теплового излучения Фурье-спектрометром IRIS (InfraRed Interferometer Spectrometer) на спутнике Nimbus-3 в апреле 1969 г. [Hanel and Conrath, 1969]. Подобные же измерения на спутниках «Метеор» в 1977 и 1979 гг. (Фурье-спектрометр SI-1 [Kemper et al., 1980]) позволили определять содержание водяного пара и озона [Головки и др., 1979; Досов и др., 1979]. В последние годы с помощью современных методик интерпретации эти же измерения использовались для определения содержания  $CO_2$  в 1977–1979 гг. [Тимофеев и др., 2020].

**Таблица 2.** Измеряемые газы, высоты их измерений и суммарные погрешности определения с помощью прибора ACE-FTS.

Газы	Высотный диапазон (км)	Погрешность (%)
$O_3$	10–50	5
$N_2O$	10–50	5
$CH_4$	10–50	5
$HNO_3$	15–40	16
$H_2O$	10–50	5
$HCl$	15–50	5
$HF$	15–50	5
$NO$	15–100	5
$NO_2$	15–50	5
$ClNO_3$	15–40	20
$CO$	15–100	5
$CCl_3F$	10–30	10
$CCl_2F_2$	10–30	10
$N_2O_5$	20–40	20

Современные приборы (примерно с 2000 г.), применяемые в надирных исследованиях, обладают относительно высоким спектральным разрешением (как правило выше  $\sim 1 \text{ см}^{-1}$ ), широкой спектральной областью измерений и наличием большого числа используемых спектральных интервалов в средней ИК области для дистанционного зондирования атмосферы. Так, прибор AIRS (Atmospheric Infrared Sounder) был запущен в мае 2002 г. на спутнике Aqua [Goldberg et al., 2003] и измеряет собственное излучение Земли в спектральной области 3.7–15.4 мкм в 2378 спектральных каналах с высоким спектральным разрешением ( $\lambda/\Delta\lambda = 1200$ ). Горизонтальное разрешение прибора в надире составляет  $\sim 13.5$  км. Абсолютные погрешности измерений в терминах яркостной температуры оценивались в  $\sim 0.14$ – $0.35$  К. Измерения AIRS позволяют определять вертикальные профили температуры, влажности, содержание  $O_3$ ,  $CO$ ,  $CH_4$ ,  $CO_2$ ,  $SO_2$  и ряда других газов.

Прибор TES (The Tropospheric Emissions Spectrometer), запущенный в июле 2004 г, почти 14 лет

Таблица 3. Долговременные глобальные тренды (2004–2020 гг.) содержаний 44 атмосферных газов [Bernath et al., 2021].

Молекула	Тренд, %/год (погрешность)	Тренд, ppt/год (погрешность)	Молекула	Тренд, %/год (погрешность)	Тренд, ppt/год (погрешность)
COClF	–0.85 (15)	–0.377 (59)	HCN	–0.14 (30)	–0.35 (70)
H <sub>2</sub> O	0.250 (30)	13.3(1.5) × 10 <sup>3</sup>	HCOOH	–0.70 (28)	–0.32 (11)
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	0.23 (24)	0.47 (48)	HF	0.868 (45)	17.52 (79)
HCFC-22	1.723 (56)	4.079 (94)	HFC-134a	6.86 (22)	5.708 (70)
HCFC-141b	0.59 (22)	0.169 (55)	HNO <sub>3</sub>	0.61 (20)	50 (13)
HCFC-142b	1.06 (17)	0.168 (21)	HO <sub>2</sub> NO <sub>2</sub>	0.24 (10)	0.54 (23)
HCl	–0.297 (30)	–7.70 (72)	N <sub>2</sub>	0.0038 (25)	30(28) × 10 <sup>6</sup>
N <sub>2</sub> O	0.2852 (93)	938 (29)	PAN	–13.3 (5.4)	–6.06 (58)
N <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.22 (17)	2.3 (1.7)	CFC-11	–0.531 (25)	–1.225 (51)
NO	0.13 (16)	10 (12)	COF <sub>2</sub>	0.35 (11)	1.00 (28)
NO <sub>2</sub>	0.01 (11)	0.4 (5.2)	ClONO <sub>2</sub>	–0.55 (10)	–4.59 (77)
O <sub>2</sub>	0.0059 (60)	13(13) × 10 <sup>6</sup>	CO <sub>2</sub>	0.5484 (52)	2206(19) × 10 <sup>3</sup>
O <sub>3</sub>	0.095 (54)	7.2(4.0) × 10 <sup>3</sup>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	1.34 (31)	8.9 (1.6)
OCS	–1.44 (15)	–6.40 (47)	H <sub>2</sub> CO	0.19 (19)	0.18 (17)
(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> CO	2.31 (37)	8.14 (94)	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	–1.12 (38)	–0.81 (23)
CCl <sub>4</sub>	–1.231 (75)	–0.992 (50)	CF <sub>4</sub>	1.057 (20)	0.870 (13)
CFC-12	–0.608 (18)	–3.156 (83)	CFC-113	–1.387 (33)	–1.005 (19)
CH <sub>3</sub> Cl	0.168 (40)	1.03 (24)	CH <sub>3</sub> CN	–0.23 (16)	–0.62 (40)
CH <sub>3</sub> OH	–0.07 (19)	–0.4 (1.1)	CH <sub>4</sub>	0.346 (17)	6.26(29) × 10 <sup>3</sup>
CHF <sub>3</sub>	3.450 (83)	0.840 (13)	ClO	0.35 (43)	0.82 (94)
CO	–0.47 (16)	–0.34(11) × 10 <sup>3</sup>	COCl <sub>2</sub>	–0.63 (17)	–0.072 (18)
SF <sub>6</sub>	3.829 (27)	0.3272 (23)	SO <sub>2</sub>	–0.68 (46)	–0.059 (36)

измерял собственное ИК излучение атмосферы в надирных и лимбовых направлениях в спектральной области 650–3050 см<sup>–1</sup> (15.4–3.3 мкм) с очень высоким спектральным разрешением – 0.025 (лимб) и 0.1 см<sup>–1</sup> (надир) [Beer et al., 2001; EOS, 2020]. Этот прибор предназначался прежде всего для измерений содержания газов-загрязнителей. Он позволил определять содержание большого числа газов (O<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>O, CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, HDO, NH<sub>3</sub>, HNO<sub>3</sub>, HCOOH, CH<sub>3</sub>OH, PAN, OCS и HCN) [EOS, 2020]. При надирных наблюдениях он имеет относительно высокое горизонтальное разрешение 5.3 × 8.3 км<sup>2</sup>, а при лимбовых – высокое вертикальное (2.3 км). Системы прибора позволяют также исследовать отдельные районы земного шара с высокой плотностью

измерений, например в районах сильных газовых загрязнений.

Первый прибор IASI (Infrared Atmospheric Sounding Interferometer) [Clerbaux et al., 2009; Blumstein et al., 2004; Van Damme et al., 2014; Garcia et al., 2016] был запущен в октябре 2006 г., второй – в сентябре 2012 г., третий – в ноябре 2018 г. Эти приборы характеризуются высокой точностью и горизонтальным разрешением (~12 км) в широкой спектральной области 645–2675 см<sup>–1</sup> со спектральным разрешением ~0.5 см<sup>–1</sup>. Погрешности измерений уходящего излучения в терминах яркостной температуры составляют 0.2–0.35 К. Характеристики последующих версий прибора постоянно ухудшались (в частности, его спектральное разрешение).

Приборы IASI используются для определения содержания более 20 климатически и экологически важных газов, в частности –  $O_3$ ,  $CH_4$ ,  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $HNO_3$ ,  $NH_3$ . Рис. 7 наглядно характеризует высокую информативность прибора относительно содержания атмосферных газов [Clerbaux et al., 2009; Van Damme et al., 2014]. На нем приведен пример спектра уходящего теплового излучения, измеренный IASI, и положение полос поглощения газов, содержание которых определяются по его данным. Ряд газов определялся в оперативном режиме ( $H_2O$ ,  $O_3$ ,  $CO$ ,  $N_2O$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$ ).

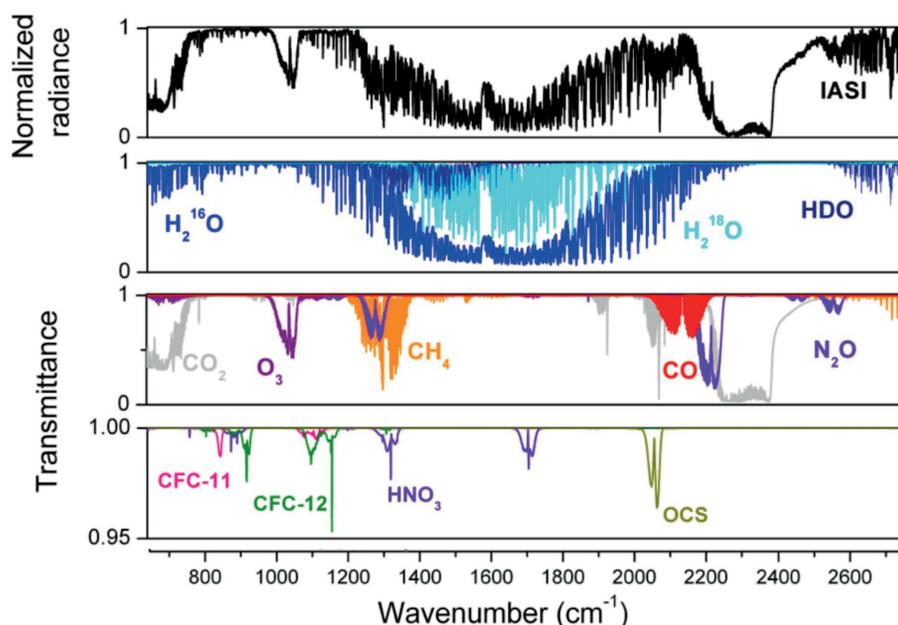
В качестве примера измерений IASI приведем временной ход ОС аммиака для Северного и Южного полушарий (рис. 8), демонстрирующий существенные пространственные и временные вариации содержания этого газа.

Прибор CrIS (Cross-track Infrared Sounder) на спутнике Suomi National Polar-orbiting Partnership Satellite (S-NPP) был запущен в космос в октябре 2011 г. Он используется также на спутниках NOAA-20, NOAA-21, и на JPSS-3, -4 [Han et al., 2013; Smith and Barnett, 2020]. Прибор представляет собой Фурье-спектрометр, который измеряет уходящее тепловое ИК излучение в спектральных областях 650–1095, 1210–1750 и 2155–2550  $cm^{-1}$  со спектральным разрешением 0.625, 1.25 и 2.5  $cm^{-1}$ . Общее число каналов составляет 1305. Оценки случайных погрешностей измерений прибора дают

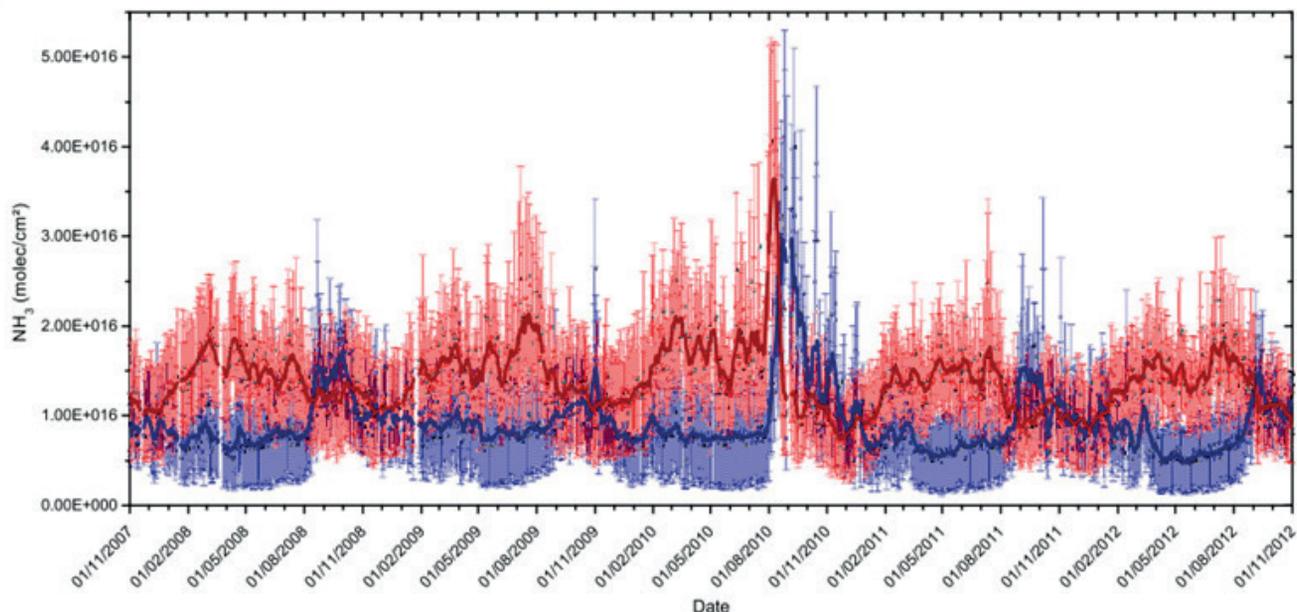
цифру  $\sim 0.1$  К яркостной температуры излучения. CrIS обеспечивает хороший пространственный охват территорий за счет полосы обзора шириной 2200 км и измерений  $3 \times 3$  точек диаметром 14 км в надире. Измеряемые газы включают  $H_2O$ ,  $O_3$ ,  $CH_4$ ,  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $HNO_3$ ,  $N_2O$ ,  $SO_2$ .

В июле 2014 г. был выведен на орбиту российский метеорологический спутник «Метеор-М» № 2, на борту которого функционировал ИК Фурье-спектрометр ИКФС-2, предназначенный, прежде всего, для температурно-влажностного зондирования атмосферы [Golovin et al., 2018; Zavelevich et al., 2018; Timofeyev et al., 2019]. Рабочий спектральный диапазон измерений уходящего теплового излучения ИКФС-2 составляет 5–15  $\mu m$  (660–2000  $cm^{-1}$ ) при спектральном разрешении 0.4  $cm^{-1}$ . Точность измерений уходящего теплового излучения (0.1–0.3 мВт/( $m^2$  ср  $cm^{-1}$ )), позволяет с высокой точностью восстанавливать вертикальные профили температуры. Прибор также дает возможность с высокой точностью определять общее содержание озона (в среднем  $\sim 3\%$  за исключением полярных регионов) [Polyakov et al., 2023].

В качестве примера результатов измерений ИКФС-2 приведем рис. 9, где даны временные вариации среднемесячных ОС озона в зимний и весенний периоды при наличии значительных аномалий (озоновых дыр в 2020 г.) [Polyakov et al., 2023].



**Рис. 7.** Спектр уходящего излучения (верхний рис.), измеренный прибором IASI, и положение полос поглощения различных газов на шкале волновых чисел, определенное с помощью приведенных функций пропускания атмосферы [Clerbaux et al., 2009].



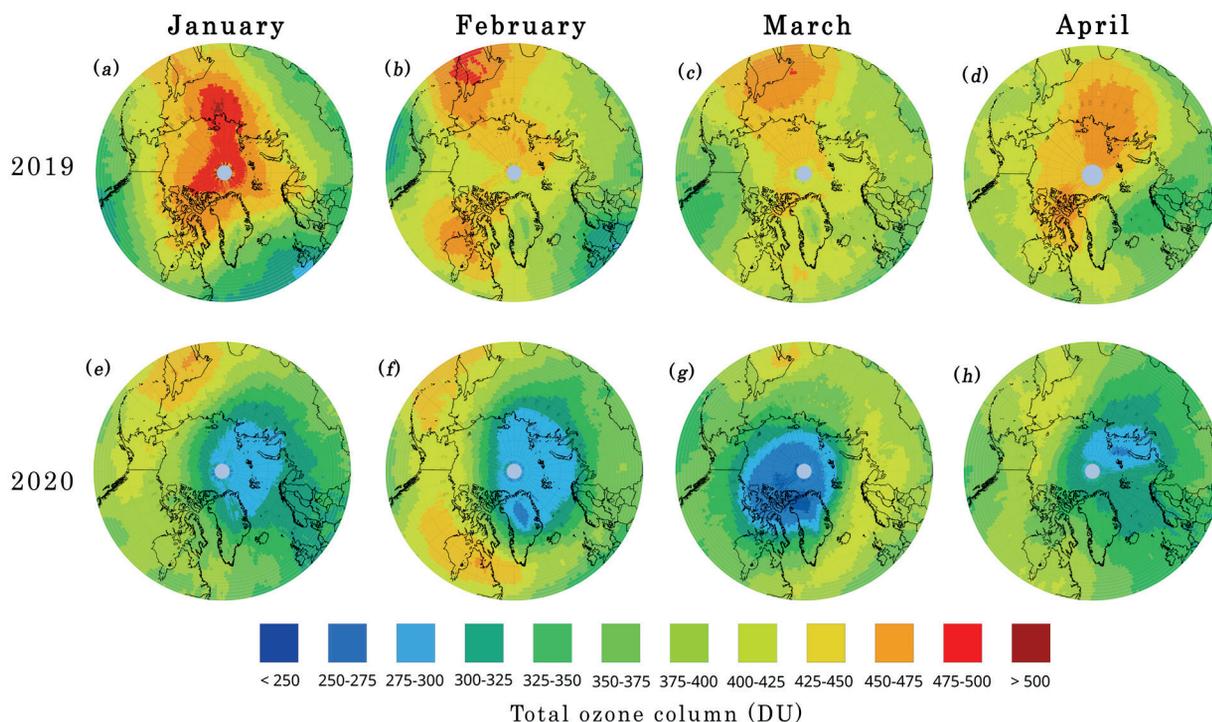
**Рис. 8.** Временные ряды дневных общих содержаний  $\text{NH}_3$  над сушей для Северного (красный) и Южного (синий) полушарий; столбики характеризуют погрешности дистанционных измерений; темно-красная и темно-синяя линии – средние значения за 11 дней [Van Damme et al., 2014].

Спутниковые Фурье-спектрометры в ИК области спектра, подобные рассмотренным выше, были запущены и в других странах, например в Китае и Японии. Прибор HIRAS (Hyperspectral Infrared Atmospheric Sounder) был запущен на китайском полярном спутнике FY-3D в ноябре 2017 г. [Wu et al., 2020]. Прибор измеряет уходящее тепловое излучение в трех спектральных областях –  $(650\text{--}1135)\text{ см}^{-1}$ ,  $(1210\text{--}1750)\text{ см}^{-1}$  и  $(2155\text{--}2550)\text{ см}^{-1}$  – со спектральным и пространственным разрешениями  $0.625\text{ см}^{-1}$  и  $\sim 16\text{ км}$ , соответственно.

На японском спутнике GOSAT (Greenhouse gases Observing SATellite) [Kuze et al., 2009], с 23 января 2009 г. начал функционировать прибор для измерений общего содержания важнейших парниковых газов –  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$ . Позднее был запущен спутник GOSAT-2 (29.10.2018) с аппаратурой TANSO-FTS-2 (the Thermal And Near infrared Sensor for carbon Observation Fourier-Transform Spectrometer-2) и прибором мониторинга облачности и аэрозоля – TANSO-CAI-2 (Cloud and Aerosol Imager-2). Приборы на спутнике GOSAT-2 измеряют уходящее излучение Земли в широкой спектральной области – отраженное и рассеянное солнечное излучение в БИК области спектра от  $0.76\text{ мкм}$  и тепловое излучение в диапазоне  $5.5\text{--}14.3\text{ мкм}$  со спектральным разрешением  $\sim 0.2\text{ см}^{-1}$ . Кроме важнейших парниковых газов ( $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$ ) это позволяет также измерять содержание CO [Suto et al., 2021].

Для измерений газового состава используются также надирные приборы, измеряющие тепловое ИК излучение не только на полярных, но и на геостационарных и высокоэллиптических спутниках (приборы GOES-8 Sounder, МСУ-ГС и т.д.). Они позволяют восстанавливать СОС с высоким пространственным и временным разрешением над обширными территориями. Так, с апреля 1994 г. с помощью прибора SEVIRI (Spinning Enhanced Visible and InfraRed Imager) осуществляются оценки атмосферных параметров и, в том числе СОС, по измерениям теплового излучения в 8 спектральных каналах (например, в полосе поглощения озона  $9.6\text{ мкм}$ ). Погрешности измерений уходящего излучения в ИК области составляют  $0.2\text{--}0.5\text{ К}$ , пространственное разрешение прибора –  $3 \times 3\text{ км}^2$ , временное – 15 мин. Точность измерений СОС ( $5\text{--}7\%$ ) [Li et al., 2001] дает возможность получать уникальную информацию о мезомасштабных вариациях СОС (пространственное разрешение  $\sim 10\text{ км}$ ) в тропических и средних широтах.

Подобный многоканальный радиометр МСУ-ГС (Многозональное Сканирующее Устройство Гидрометеорологического Обеспечения) функционирует на российском геостационарном метеорологическом спутнике «Электро-Л» № 1. и высокоэллиптическом спутнике «Арктика-М1». Измерения в 3-х ИК каналах уходящего теплового излучения ( $8.2\text{--}9.2$ ,  $9.2\text{--}10.2$ ,  $10.2\text{--}11.2\text{ мкм}$ ) с пространственным



**Рис. 9.** Сравнения среднемесячных карт ОСО по данным ИКФС-2 в январе (а), феврале (б), марте (с) и апреле (д) 2019 г. и январе (е), феврале (ф), марте (г) и апреле (h) 2020 г. в широтном поясе 50–90 градусов Северного полушария.

разрешением 4 км в надире позволяют оценивать ОСО [Поляков и Тимофеев, 2010].

В последние годы на геостационарных спутниках начали использовать приборы высокого спектрального разрешения. Так, прибор GIIRS (Geostationary Interferometric Infrared Sounder) был запущен на китайском геостационарном спутнике FengYun-4A (FY-4A) в декабре 2016 г. [Yang et al., 2017]. Второй прибор GIIRS начал функционировать в 2021 г. [63]. Фурье-спектрометр высокого спектрального разрешения GIIRS, измеряющий уходящее тепловое излучение в спектральных областях 680–1130  $\text{см}^{-1}$  и 1650–2250  $\text{см}^{-1}$  с разрешением 0.625  $\text{см}^{-1}$  и горизонтальным разрешением ~12 км в надире предназначен для исследования содержания ряда климатически важных атмосферных газов. Так, в статье [Zeng et al., 2023] приведены характеристики приборов тепловой области спектра, установленных на спутниках и позволяющих измерять содержания климатически важных газов, и примеры определения ОС CO. В табл. П2 Приложения приведены примеры сравнений характеристик надириных ИК приборов, измеряющих климатически важные газы с различным пространственным разрешением.

Погрешности измерений атмосферных газов рассмотренными спутниковыми приборами силь-

но варьируются для разных газов, зависят от их вклада в уходящее излучение и характеристик приборов, высот в атмосфере и составляют от 2–3% до 50% и более. Конкретные оценки погрешностей приведены в оригинальных статьях.

### 6.3. Метод теплового излучения (лимба)

Лимбовые спутниковые измерения собственного излучения в направлении на горизонт планеты характеризуются высокой чувствительностью к газовому составу атмосферы в силу отсутствия вклада поверхности планеты и большими трассами формирования излучения. Лимбовые измерения начались с запуском спектрометров среднего спектрального разрешения (многоканальных радиометров) в 1975 и 1978 гг. на спутниках Nimbus-6 и 7 – приборов LRIR (Limb Radiance Infrared Radiometer) и LIMS (Limb Infrared Monitor of the Stratosphere) [Gille and Russell III, 1984]. Прибор LIMS измерял вертикальные профили содержания  $\text{O}_3$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{HNO}_3$  и  $\text{NO}_2$  в стратосфере. Последующие лимбовые измерения осуществлялись приборами SAMS (Stratospheric Aerosol Measurement Sounder), ISAMS (Improved Stratospheric and Mesospheric Sounder) и CLAES (Cryogenic Limb Array Etalon Spectrometer) со спутника НАСА (Национальное управление по аэронав-

тике и исследованию космического пространства, NASA (National Aeronautics and Space Administration)), UARS (Upper Atmosphere Research Satellite).

В 1994 и 1997 гг. были проведены две серии уникальных космических экспериментов с аппаратурой CRISTA (CRYogenic Infrared Spectrometers and Telescopes for the Atmosphere) для комплексного изучения параметров средней атмосферы [Offermann et al., 1999; Grossmann et al., 2002]. Приборы регистрировали спектры собственного (теплового и неравновесного) ИК излучения горизонта Земли в области 4–71 мкм со спектральным разрешением  $\lambda/\Delta\lambda \sim 300\text{--}600$ . Измерения осуществлялись в диапазоне прицельных высот 15–150 км с горизонтальным разрешением  $\sim 300$  км и вертикальным – 2–3 км. Оптические элементы и приемники излучения охлаждались жидким гелием до температуры ниже 15 К, что позволяло свести случайные погрешности измерений излучения до 0.005–0.006 мВт ( $\text{м}^2 \text{ ср } \text{см}^{-1}$ ). Измерения позволили определить вертикальные профили температуры и давления, а также содержания  $\text{O}_3$ ,  $\text{CO}_2$ , CO,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{CH}_4$ , CFC11 и  $\text{HNO}_3$  [Grossmann et al., 2004; Kuehl et al., 2004]. Отметим, что для верхней атмосферы в большинстве случаев дистанционные методы относятся к классу обратных задач ИК неравновесного излучения, в которых не используется предположение о выполнении ЛТР (локального термодинамического равновесия). В качестве примеров результатов измерений приведем рис. 10 с восстановленными вертикальными профилями отношения смеси  $\text{CO}_2$ , полученные в экспериментах CRISTA-1 и CRISTA-2 для нескольких дней измерений [Косцов и Тимофеев, 2003].

Лимбовый прибор SABER (Sounding of the Atmosphere using Broadband Emission Radiometry) был запущен на спутнике НАСА TIMED (Thermosphere Ionosphere Mesosphere Energetics Dynamics) в декабре 2001 г. С его помощью исследовались процессы, определяющие энергетику, химию, динамику мезосферы и нижней термосферы. Для измерений использовался 10-канальный ИК-радиометр среднего разрешения в спектральной области 1–17 мкм. Измерения осуществлялись в полосах излучения  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ , NO,  $\text{NO}_2$ , CO, OH,  $\text{O}_2$ . Угловая апертура прибора соответствовала вертикальному разрешению в  $\sim 2$  км. С помощью измерений радиометра SABER были реализованы все три дистанционных метода, использующих собственное атмосферное излучение – тепловое, ИК неравновесное и свечение атмосферы [Esplin et al., 1994; Braun et al., 2006]. Измерения прибора SABER сыграли важную роль в исследованиях процессов в средней атмосфере. Они позволили

получить вертикальные профили кинетической температуры, давления, геопотенциальной высоты, отношений смеси  $\text{O}_3$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ , [O] и [H], объемные скорости эмиссии излучения в полосах 5.3 мкм NO, 2.1 мкм OH, 1.6 мкм OH и 1.27 мкм  $\text{O}_2(1\Delta)$ , скорости охлаждения и нагрева для многих полос поглощения  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_3$  и  $\text{O}_2$ , а также скорости химического нагрева для 7 важных реакций. Для примера приведем рис. 11, иллюстрирующий временные изменения отношения смеси  $\text{CO}_2$  по данным SABER за 13-летний период на разных высотах (80, 90 и 100 км) по сравнению с данными измерений у поверхности Земли для Мауна-Лоа [Yue et al., 2015].

Лимбовый прибор MIPAS (Michelson Interferometer for Passive Atmospheric Sounding) – Фурье-спектрометр, запущенный в космос в июле 2002 г., измерял ИК излучение горизонта Земли в спектральной области 685–2410  $\text{см}^{-1}$  с высоким спектральным разрешением 0.025  $\text{см}^{-1}$  до марта 2004 г. и 0.0625  $\text{см}^{-1}$  позднее [Fischer and Oelhaf, 1996; Fischer et al., 2008]. Абсолютные погрешности измерений NESR (Noise Equivalent Spectral Radiance) составляли от 3 до 50 нВт/( $\text{см}^2 \cdot \text{ср} \cdot \text{см}^{-1}$ ) в зависимости от спектральной области и интервала. Высокое спектральное разрешение и точность измерений прибора позволили определять содержания многих газов –  $\text{C}_2\text{H}_2$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6$ , CFC's ( $\text{CCl}_4$ ,  $\text{CF}_4$ , F11, F12, F22),  $\text{CH}_4$ ,  $\text{ClONO}_2$ , CO,  $\text{COF}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{HNO}_4$ , HOCl,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{N}_2\text{O}_5$ , NO,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{O}_3$ , OCS,  $\text{SF}_6$  в стратосфере и мезосфере. Для иллюстрации высокой информативности прибора MIPAS приведем рис. 12, где указано положение полос поглощения газов в измеряемом спектре уходящего излучения горизонта Земли [Fischer et al., 2008].

Для мониторинга газового состава атмосферы широко используется МКВ область спектра, где расположены вращательные линии поглощения многих газов, в экспериментах с лимбовой геометрией. Для надирной геометрии измерений интенсивности газов малы для уверенной регистрации, но недостаточны при длинных касательных трассах.

Так, лимбовый прибор SMR (Submillimeter wave Radiometer) был запущен в 2001 г. и измерял тепловое МКВ излучение горизонта планеты (в спектральных областях 486–504 и 541–581 ГГц, а также в линии 118 ГГц  $\text{O}_2$ ) для восстановления содержания  $\text{O}_3$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ , CO, NO, ClO,  $\text{N}_2\text{O}$  и  $\text{HNO}_3$ . Вертикальное сканирование горизонта осуществлялось в диапазоне высот 7–110 км [Grieco et al., 2020].

Прибор MLS (The Microwave Limb Sounder) функционировал на двух спутниках – UARS (1991 г.) и AURA (2004 г.) – и измерял тепловое МКВ излу-

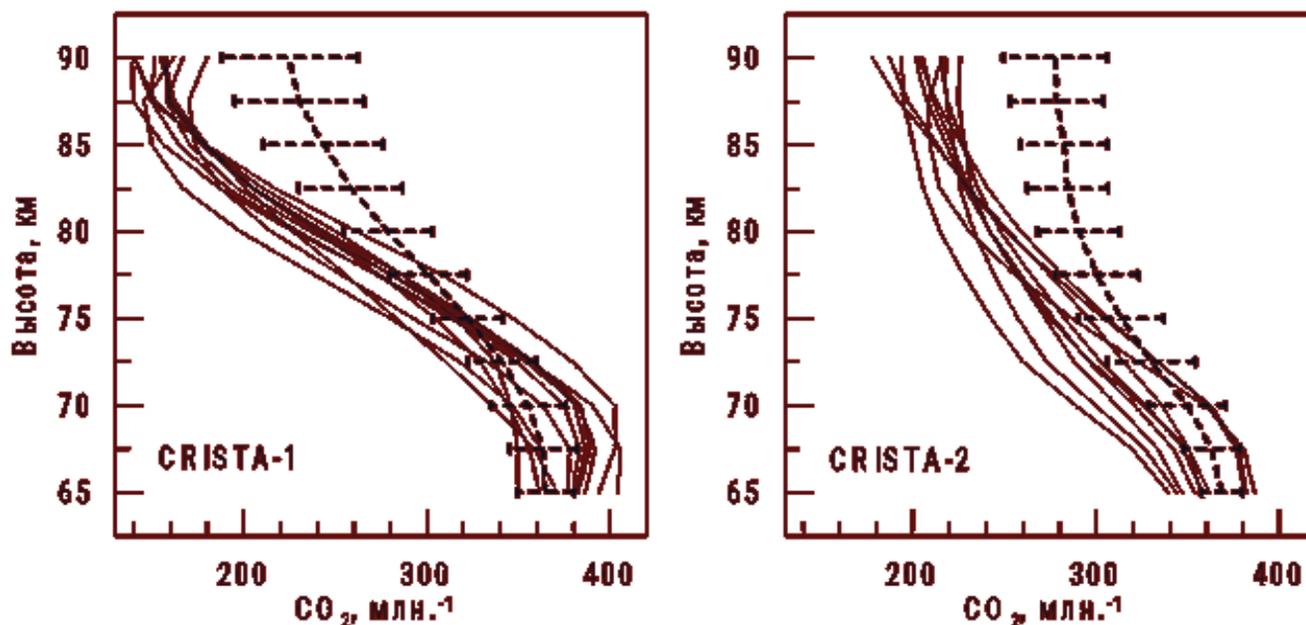


Рис. 10. Профили отношения смеси  $\text{CO}_2$ , полученные в экспериментах CRISTA-1 и CRISTA-2 для нескольких дней измерений; пунктир – средние профили, отрезками показана величина стандартного отклонения [Жосцов и Тимофеев, 2003].

чение горизонта планеты [Waters et al., 2004, 2006]. Измерения осуществлялись в спектральной области 118–2500 ГГц с вертикальным разрешением 1.5–3 км, во вращательных линиях газов и позволяли определять вертикальные профили содержания  $\text{BrO}$ ,  $\text{CH}_3\text{Cl}$ ,  $\text{CH}_3\text{CN}$ ,  $\text{CH}_3\text{OH}$ ,  $\text{ClO}$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{HCN}$ ,  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{HO}_2$ ,  $\text{HOCl}$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{OH}$ ,  $\text{SO}_2$  на высотах от ~10 до 50–70 км. На рис. 13 приведены высоты измерений содержаний газов с помощью прибора MLS [Waters et al., 2006].

Отметим также субмиллиметровый спектрометр SMILES (Superconducting Submillimeter-Wave Limb-Emission Sounder), работавший на МКС и измерявший профили содержания озона с октября 2009 по апрель 2010 г. [Kikuchi et al., 2010] в диапазоне высот от 16 до 85 км в дневное и до 96 км в ночное время.

На рис. 14 представлены результаты сопоставлений измерений вертикальных профилей содержания озона в верхней атмосфере (слой 30–100 км) описанными выше приборами – MIPAS, SABER, MLS, ACE и SMILES [López-Puertas et al., 2023]. На нем приведены среднегодовые глобальные разности (в процентах относительно измерений MIPAS) для дневных и ночных условий. На большей части рассмотренных высот их величины составляют 5–10% за исключением слоя вблизи 80 км, где они достигают 20–50%, что связано с минимумом концентраций  $\text{O}_3$  на этих высотах.

В табл. ПЗ Приложения приведены примеры лимбовых приборов для измерений атмосферного излучения и их основные характеристики.

#### 6.4. Метод отраженного и рассеянного солнечного излучения (надир)

Регулярные надирные спутниковые измерения ОСО начаты в США в 1978 г. с помощью серий приборов TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer) и SBUV (Solar Backscattered Ultraviolet spectral radiometer) [McPeters et al., 1993; Miller et al., 2002]. В европейских странах измерения ОСО начались в апреле 1995 г. с использованием прибора GOME (Global Ozone Monitoring Experiment) [Burrows et al., 1999] на спутнике ERS-2 (European Remote Sensing Satellite) и активно продолжались последующие годы. Приборы GOME (Global Ozone Monitoring Experiment) представляли собой 4-х каналные спектрометры среднего спектрального разрешения (0.2–0.4 нм) в УФ, ВИД и БИК областях спектра. Горизонтальное разрешение прибора варьировалось с  $40 \times 40 \text{ км}^2$  до  $320 \times 40 \text{ км}^2$ . Номинальный размер наземного пикселя составляет  $80 \times 40 \text{ км}^2$  с глобальным охватом почти за один день (полоса обзора 1920 км). Следующий прибор GOME-2 был запущен в 2012 г. на платформе METOP-B (Meteorological operational satellite) [Chan et al., 2023]. Приборы GOME измеряют ОСО, ОС и тропосферное содержание  $\text{NO}_2$ ,  $\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ ,  $\text{BrO}$ ,  $\text{HCHO}$  и  $\text{SO}_2$ .

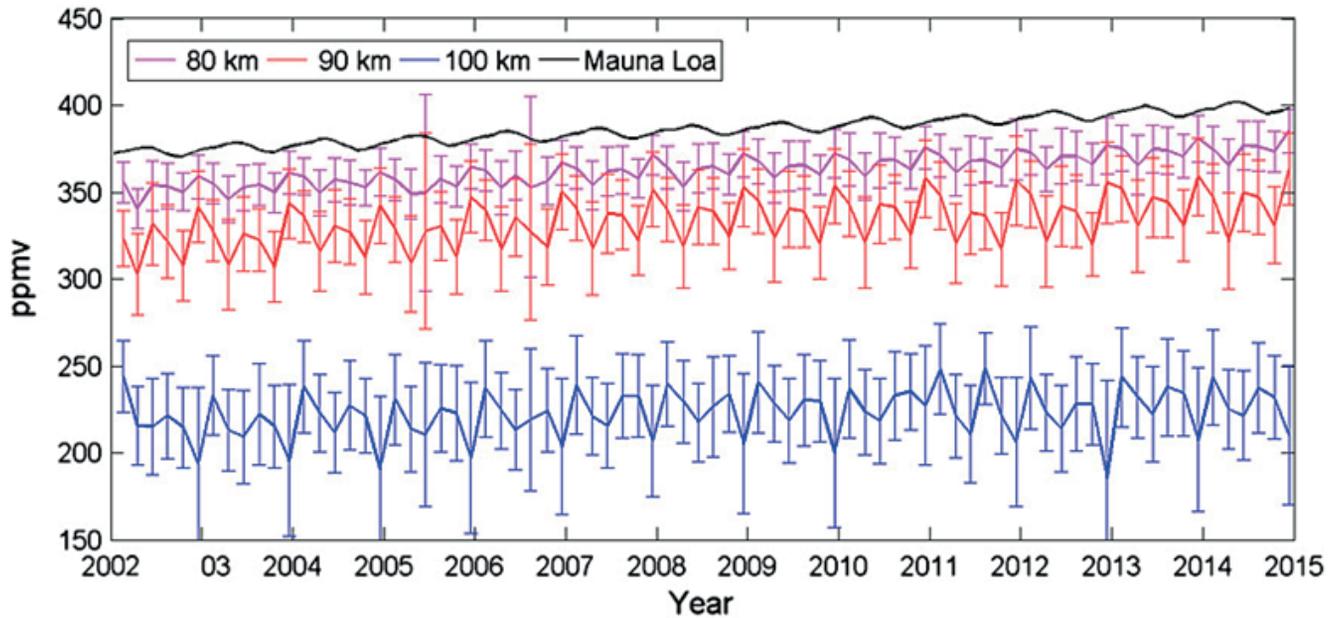


Рис. 11. Временные изменения отношения смеси  $\text{CO}_2$  на высотах 80, 90 и 100 км. Временной ряд, выделенный черным цветом, — измеренная концентрация углекислого газа у поверхности Земли (Mauna Loa) [Yue et al., 2015].

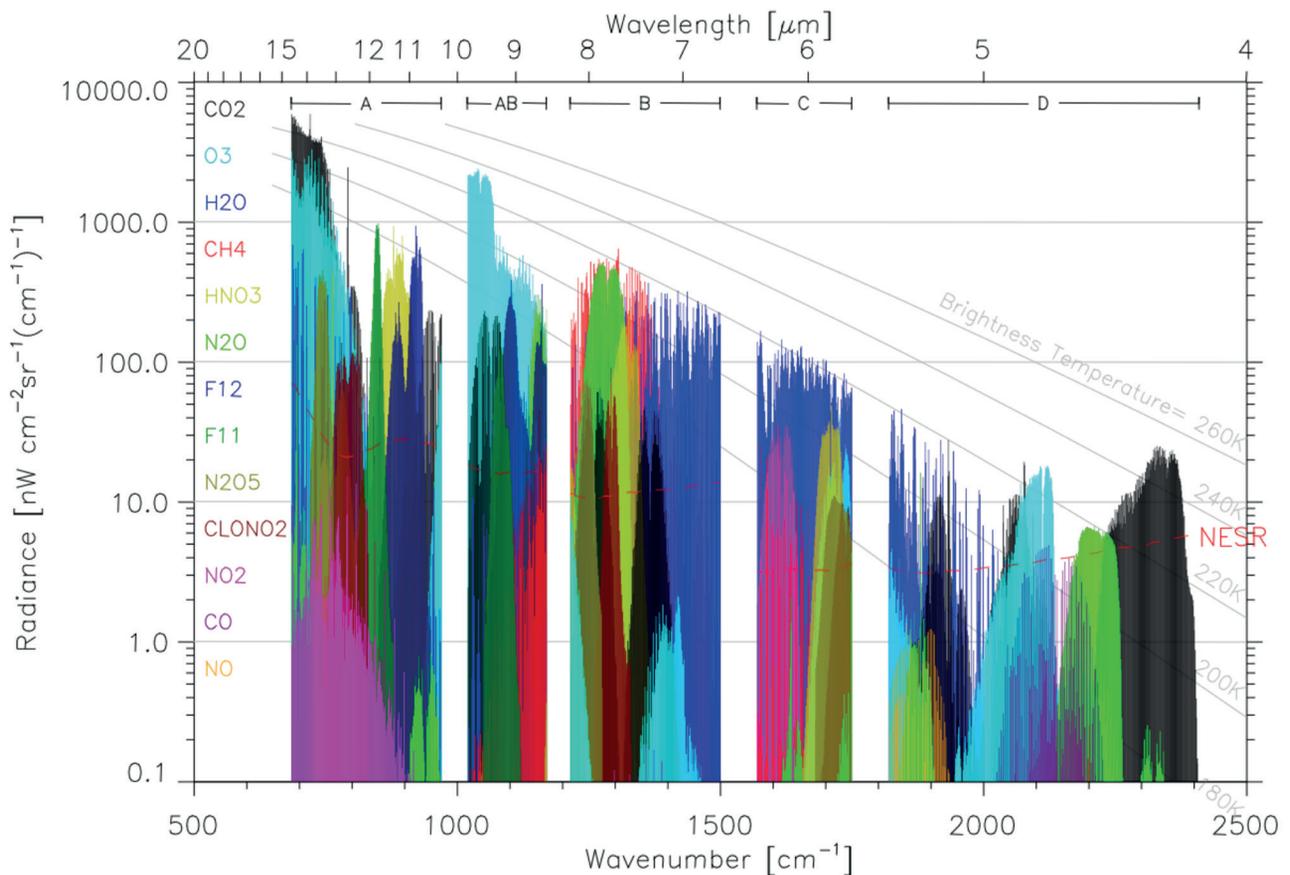


Рис. 12. Уходящее ИК излучение горизонта Земли, измеряемое прибором MIPAS. Цвет полос излучения различных газов, использованных для определения их содержания, указан у вертикальной шкалы [Fischer et al., 2008].

Прибор SCIAMACHY, о котором мы уже упоминали в затменных экспериментах по Солнцу и Луне, активно использовался более 10 лет в методе ОРСИ с надирной геометрией измерений с 2002 г. Его спектральная область измерений составляла 240–1700 нм, а также ряд интервалов в диапазоне 2.0–2.4 мкм со спектральным разрешением от 0.2 до 1.5 нм [Bovensmann et al., 1999].

На рис. 15 проведено сравнение спектральных областей измерений уходящего отраженного и рассеянного солнечного излучения, а также измеряемых газов двумя спутниковыми приборами — GOME (спутник ERS-2) и SCIAMACHY (спутник ENVISAT-1 (Environmental Satellite)).

Аппаратура для измерений содержания озона и других газов OMI (Ozone Monitoring Instrument) была запущена на борту спутника НАСА Aura в июле 2004 г. и предназначена для мониторинга озона на основе измерений в диапазоне длин волн от 270 до 500 нм со спектральным разрешением около 0.5 нм [Levelt et al., 2018]. OMI характеризуется большей шириной полосы обзора (2600 км), что позволяет проводить измерения ОСО с ежедневным глобальным охватом. Номинальный размер пикселя OMI  $13 \times 24 \text{ км}^2$  в надире. Данные OMI об ОСО также используются для сопоставления и валидации с измерениями приборами GOME, SCIAMACHY и GOME-2. В таких сопоставлениях, а также при по-

строении алгоритмов интерпретации спутниковых измерений с помощью искусственных нейронных сетей (ИНС) данные OMI часто рассматриваются как вторичной эталон.

Прибор TROPOMI (Tropospheric Monitoring Instrument), функционирующий на спутнике Sentinel 5 Precursor (S5P) Mission с 2017 г., измеряет отраженное и рассеянное солнечное излучение в широкой спектральной области от УФ до БИК и состоит из 4-х видео спектрометров, работающих в диапазоне 270–2385 нм с разрешением 0.2–0.5 нм. Горизонтальное разрешение прибора составляло  $7.5 \times 3.5 \text{ км}^2$  (с 6 августа 2019 г. —  $5.5 \times 3.5 \text{ км}^2$ ). Большая полоса обзора (2600 км) позволяет получать глобальные измерения на дневной стороне планеты ежедневно [Van Geffen et al., 2021].

Прибор EMI (Environment Monitoring Instrument), запущенный в мае 2018 г. на спутнике GaoFen-5, представляет собой видео-спектрометр, работающий в спектральном диапазоне 240–710 нм и позволяющий определять содержание  $\text{O}_2$ ,  $\text{NO}_2$  и других газов по измерениям отражённого и рассеянного солнечного излучения [Zhang et al., 2020]. Прибор EMI-2, запущенный в сентябре 2021 г., обладает более высоким горизонтальным разрешением ( $13 \times 7 \text{ км}^2$ ). Первые результаты мониторинга атмосферы этими приборами обсуждаются в работах [Zhao et al., 2020; Yang et al., 2021]

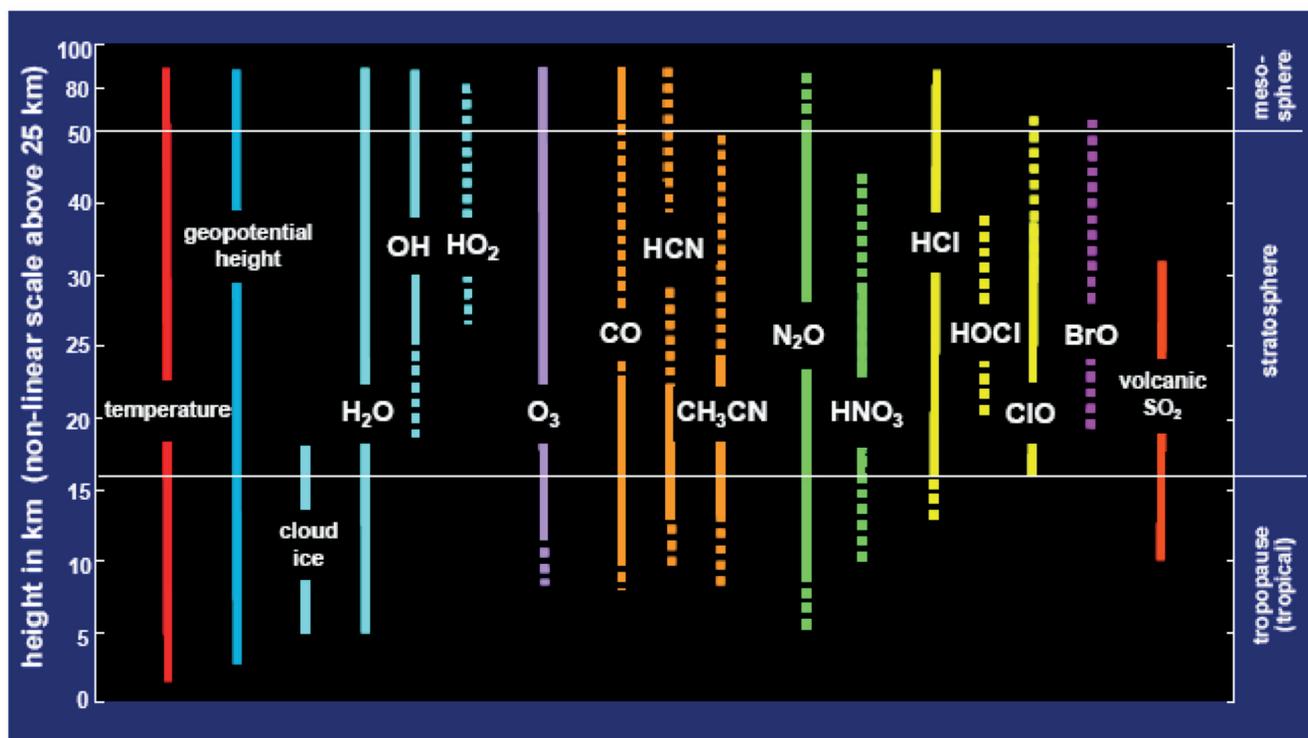


Рис 13. Высоты измерений газовой смеси атмосферы прибором MLS [Waters et al., 2006].

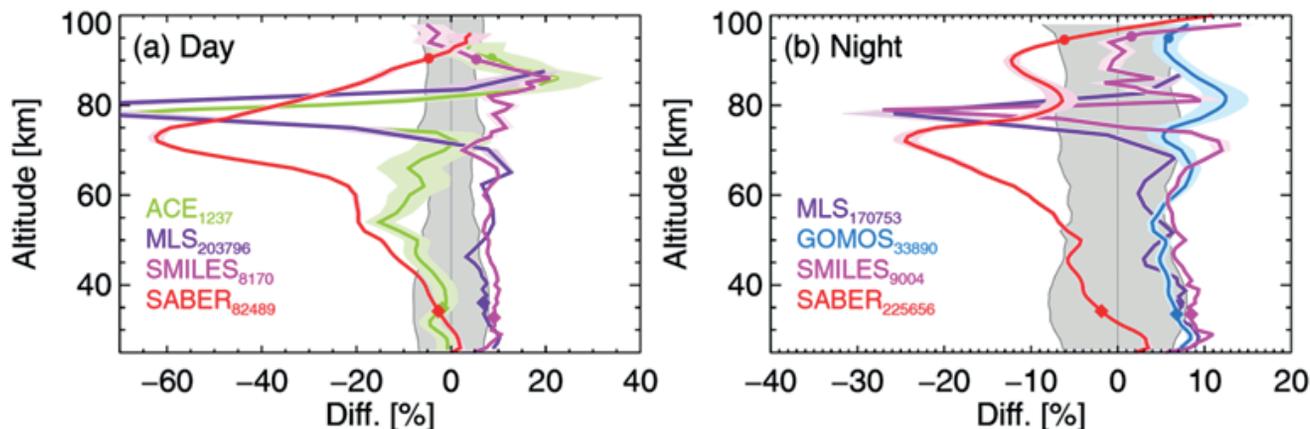


Рис. 14. Среднегодовые глобальные (для всех широт и сезонов) разности в содержании озона относительно измерений MIPAS для дневных и ночных условий, полученные по данным приборов ACE-FTS (зеленый цвет), MLS (фиолетовый), SMILES (пурпурный), SABER (красный) и GOMOS (светло-голубой) [López-Puertas et al., 2023].

Отметим также использование надирных наблюдений для определения ОС  $\text{NO}_2$  по данным измерений прибора ГСА (Гиперспектральная аппаратура) [Postylyakov et al., 2017; Mukhartova et al., 2021]. Этот прибор функционировал на российских спутниках Ресурс-Р (2013–2016 гг.) и измерял отраженное и рассеянное солнечное излучение в спектральной области 400–1000 нм. Недостатком этого прибора в задаче мониторинга  $\text{NO}_2$  является относительно низкое спектральное разрешение – 3–4 нм. Максимальное горизонтальное разрешение при этом составляет 120 м. Усреднение по времени

и пространству сигналов позволило получить полезную информацию об интенсивных источниках  $\text{NO}_2$ .

Исследования газового состава все более активно осуществляются с помощью приборов, установленных на геостационарных спутниках. Так, в работе [Baek et al., 2023] приведены конкретные примеры мониторинга атмосферы прибором GEMS (Geostationary Environment Monitoring Spectrometer), представляющим собою УФ-ВИД гипер-спектрометр. Сравнение данных измерений ОСО инструментами GEMS, TROPOMI и OMPS выявило их высокую корреляцию (0.99) и низкие значения

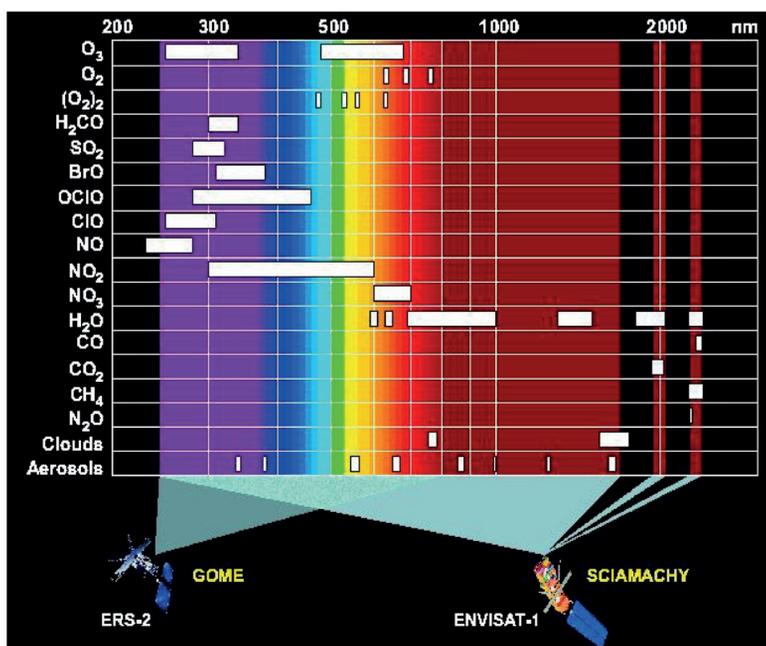
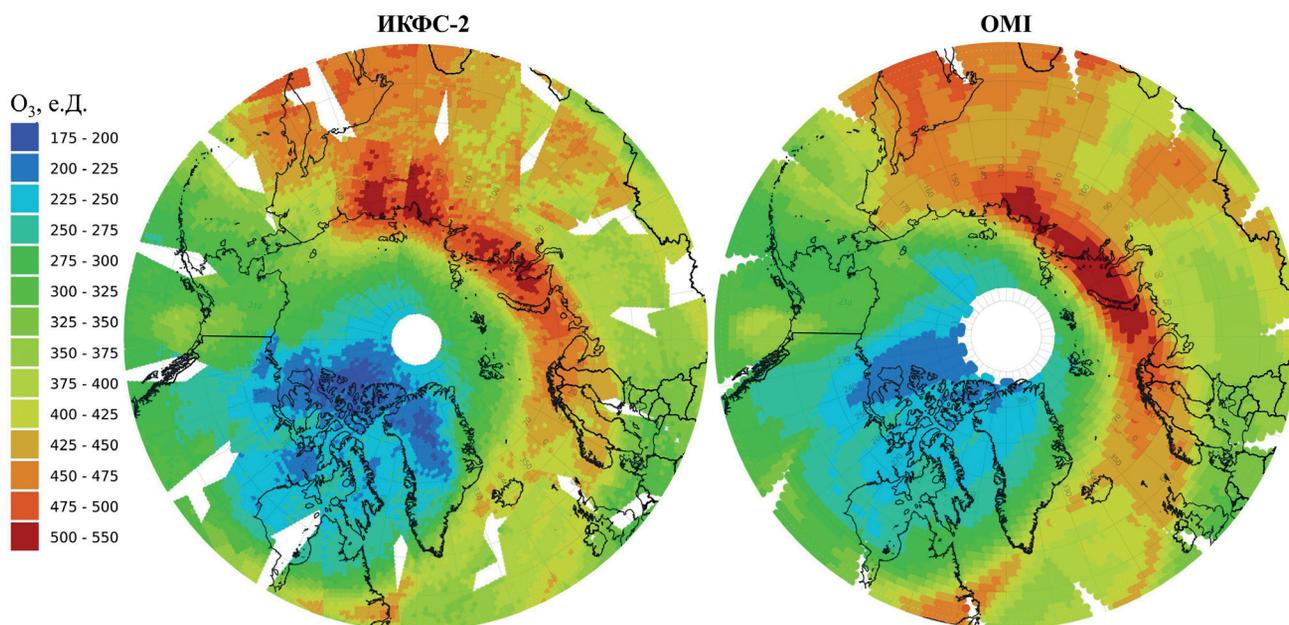


Рис. 15. Спектральные области измерений солнечного излучения и газы, восстанавливаемые по данным спутниковых приборов GOME и SCIAMACHY.

18 марта 2020 г.



**Рис. 16.** Сравнение измерений ОСО двумя спутниковыми методами – ТИ (ИКФС-2) и ОРСИ (ОМІ), 18 марта 2020 г. в области озонных аномалий [Тимофеев и др., 2021].

среднеквадратических разностей. Однако, обнаружены также систематические разности в  $-2.38\%$  и  $-2.17\%$  соответственно, со стандартными отклонениями  $1.33\%$  и  $1.57\%$ .

На рис. 16 приведен пример сопоставлений спутниковых определений ОСО двумя различными приборами с помощью двух пассивных методов – метода ТИ (ИКФС-2) и ОРСИ (ОМІ), демонстрирующий высокую степень согласия измерений аномальных содержаний озона (озонной дыры в Северном полушарии) [Тимофеев и др., 2021].

Приборы, измеряющие рассеянное солнечное излучение, как правило, более информативны по отношению к газовому составу атмосферы по сравнению с приборами, реализующими методы теплового излучения. Однако эти преимущества в существенной степени определяются конкретными характеристиками аппаратуры. В частности, в методах теплового излучения важную роль при решении обратной задачи восстановления параметров атмосферы по данным дистанционных измерений играет качество используемой информации о вертикальном профиле ее температуры. С другой стороны, важным преимуществом методов ТИ является возможность измерений в ночное время и, в частности, в период полярных ночей. Для иллюстрации этой особенности на рис. 17 приведено сравнение ОСО по данным российского

прибора ИКФС-2 (метод ТИ) и инструмента ОМІ (метод ОРСИ) в периоды полярных ночей в северном полушарии [Тимофеев и др., 2021]. Рисунок наглядно демонстрирует преимущества метода ТИ (ИКФС-2) в пространственном охвате наблюдений ОСО по сравнению с методом ОРСИ (ОМІ) в сентябре–декабре 2019 г. в период полярной ночи. Белые области на изображениях по данным ОМІ демонстрируют невозможность измерений ОСО методом ОРСИ. В частности, в период декабрь–январь данные наблюдений ОМІ отсутствуют от полюса до  $\sim 60^\circ$  с.ш., что соответствует площади более  $30 \cdot 10^6$  км<sup>2</sup>.

В последнее десятилетие существенно возрос интерес и необходимость в спутниковых измерениях антропогенных эмиссий парниковых газов [Uspensky, 2023]. В связи с этим в январе 2009 г. был запущен на спутнике GOSAT (Greenhouse gases Observing SATellite) прибор TANSO-FTS (Thermal And Nearinfrared Sensor for carbon Observation – Fourier Transform Spectrometer) [Noël et al., 2021]. Прибор измеряет отраженное и рассеянное солнечное излучение в полосах поглощения  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  (1.6, 2.0 и 2.3 мкм) и собственное тепловое ИК излучение системы атмосфера-поверхность. Измерения проводятся в широкой спектральной области и позволяют определять общие содержания

$\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  и  $\text{CO}$ , а также элементы их вертикальной структуры.

На рис. 18 приведены глобальные карто-схемы спутниковых измерений ОС  $\text{CO}_2$  в отдельные месяцы 2009–2010 гг. с помощью прибора TANSO-FTS спутника GOSAT [Watanabe et al., 2015; Noël et al., 2021]. Рисунок демонстрирует пространственные и временные вариации содержания  $\text{CO}_2$ . Максимальные средние отношения смеси  $\text{XCO}_2$  в атмосфере наблюдаются в Северном полушарии в конце зимы и начале весны.

Измерения спектров отраженного и рассеянного солнечного излучения в трех спектральных БИК областях с помощью аппаратуры ОСО-2 (Orbiting Carbon Observatory) для определения общего содержания  $\text{CO}_2$  начались в сентябре 2014 г. [Crisp et al., 2017]. Аналогичный прибор ОСО-3 на МКС начал функционировать в 2019 г. Измерения спектров осуществляются с высоким спектральным разрешением ( $\lambda/\Delta\lambda > 17000$ ) в полосах поглощения кислорода 0.76 мкм и  $\text{CO}_2$  при 1.61 и 2.06 мкм. Измерения в полосе кислорода используются для калибровки измерений ОС  $\text{CO}_2$ . Высокое горизонтальное разрешение измерений ( $\sim 1.29 \times 2.25$  км) позволяет обнаруживать и изучать локальные источники  $\text{CO}_2$ . Приборы измеряют из-

лучение в надирном и направлении солнечных бликов (для увеличения сигнала) над выбранной ограниченной территорией площадью  $15 \times 20$  км<sup>2</sup> (ОСО-2) и  $80 \times 80$  км<sup>2</sup> (ОСО-3). На рис. 19 приведена иллюстрация трех типов геометрии наблюдений приборов ОСО-2 [JPL, 2018].

Важное значение при спутниковых измерениях ОС  $\text{CO}_2$  и определении антропогенных эмиссий  $\text{CO}_2$  имеют погрешности измерений. Это связано с относительно малыми антропогенными эмиссиями  $\text{CO}_2$  (например, с территориями мегаполисов 1–5 ppm) и необходимостью решения последовательно двух обратных задач – атмосферной оптики и атмосферного переноса [Тимофеев и др., 2022]. Если в начале спутниковых наблюдений ОС  $\text{CO}_2$  погрешности измерений прибора ОСО-2 составляли ~1% (~4 ppm), то совершенствование методики интерпретации (разработана 11-я версия) и критериев фильтрации данных позволили существенно повысить качество восстановления ОС  $\text{CO}_2$  по данным измерений ОСО-2 – до 0.8–0.9 ppm и менее [Taylor et al., 2023].

Китайский опыт мониторинга ОС  $\text{CO}_2$  с помощью дифракционного спектрометра ACGS (Atmospheric Carbon Dioxide Grating Spectrometer) высокого спектрального разрешения на спутнике

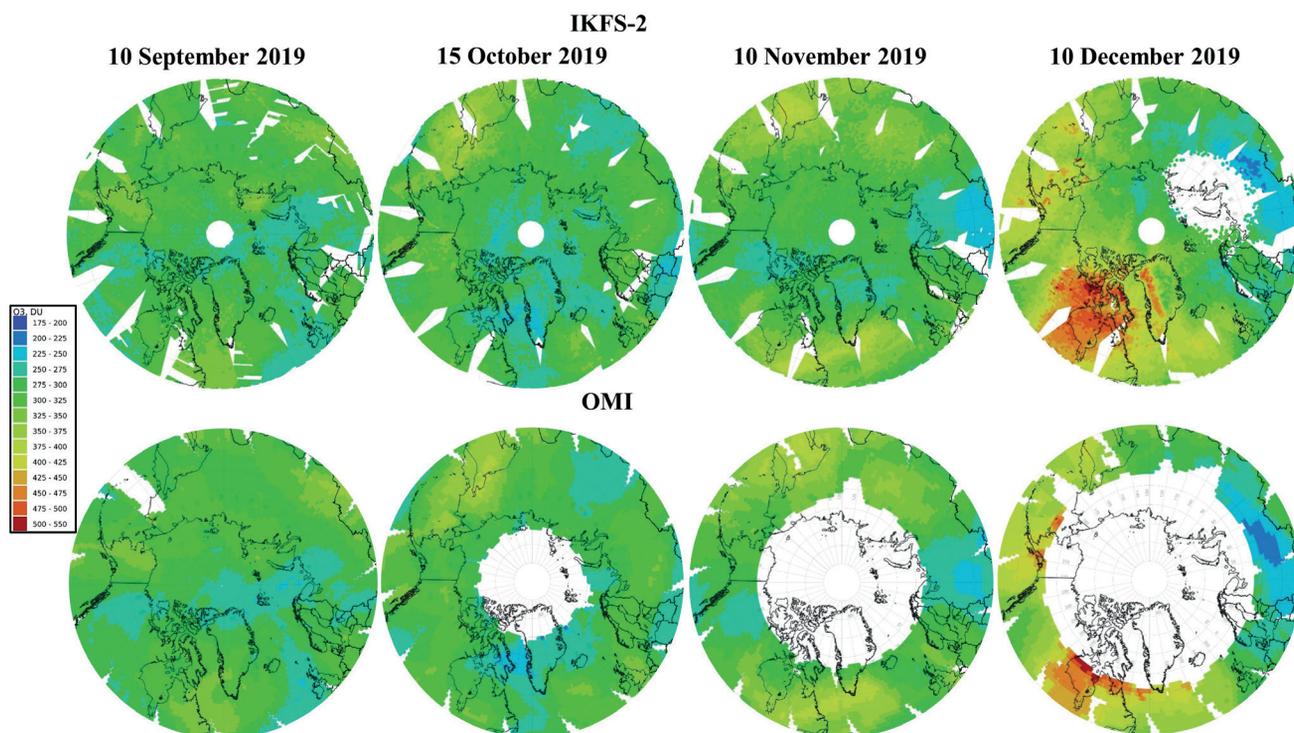


Рис. 17. Сравнения результатов мониторинга ОСО приборами ИКФС-2 и ОМІ в полярных районах Северного полушария в течение периода сентябрь–декабрь 2019 г. [Тимофеев и др., 2021].

TanSat описан в работах [Yang et al., 2020; Boesch et al., 2021]. Прибор ACGS измеряет солнечное излучение в спектральных интервалах полосы поглощения кислорода (758–778 нм, спектральное разрешение  $\sim 0.04$  нм), в полосах поглощения  $\text{CO}_2$  – в слабой (1594–1624 нм, разрешение  $\sim 0.125$  нм) и сильной (2042–2082 нм, разрешение  $\sim 0.16$  нм). Горизонтальное разрешение измерений прибора составляет  $2 \times 2$  км<sup>2</sup>. Примеры определения содержания  $\text{CO}_2$  этим инструментом и валидации результатов приведены в работе [Boesch et al., 2021]. В ней показано, что прибор позволяет определять отношения смеси  $\text{XCO}_2$  со систематическими разностями при сравнении с наземными измерениями (Фурье-спектрометром фирмы Bruker) в 2.62 ppm и стандартным отклонением 1.41 ppm, которые уменьшаются после калибровки до 1.11 и 1.35 ppm, соответственно.

Примеры измерений ОС  $\text{CO}_2$  прибором ACGS, наглядно демонстрирующие сезонные и пространственные вариации его содержания в 2017–2018 гг., приведены на рис. 20 [Boesch et al., 2021].

В 2020 г., когда был запущен первый спутник новой спутниковой системы контроля качества воздуха (Air Quality Satellite Constellation), началась новая эра мониторинга климатически важных газов, в том числе и качества воздуха [ТЕМРО, 2023]. Группировка состоит из трех спутников, которые находятся на геостационарной орбите (GEO). Первым прибором этой программы контроля, за-

пущенным в 2020 г., стал южнокорейский геостационарный спектрометр для мониторинга окружающей среды GEMS (Geostationary Environment Monitoring Spectrometer), который осуществляет мониторинг состава атмосферы над Азией. Следующий прибор группировки ТЕМРО (Tropospheric Emissions: Monitoring of Pollution) был успешно запущен НАСА 7 апреля 2023 г. Он осуществляет мониторинг состава атмосферы над Северной Америкой. Третий прибор – Copernicus Sentinel-4, – будет функционировать на спутнике Meteosat третьего поколения MTG (Meteosat Third Generation), и вести наблюдение над территориями Европы и Северной Африки. Каждая из этих миссий будет обеспечивать ежедневные наблюдения за основными параметрами качества воздуха в светлое время суток. При этом используется спутниковый метод ОРСИ в УФ и видимой областях спектра с высоким спектральным разрешением 0.12–0.6 нм и горизонтальным разрешением от 2 до 8 км. Спектральные области измерений позволяют определять общие содержания  $\text{O}_3$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CH}_2\text{O}$ ,  $\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_2$ , а также характеристики аэрозолей и облаков. На рис. 21 представлены области мониторинга состава тропосферы указанными тремя геостационарными спутниками [ТЕМРО, 2023].

В табл. П4 Приложения приведены примеры надирных спутниковых приборов для измерений газового состава атмосферы с помощью метода ОРСИ.

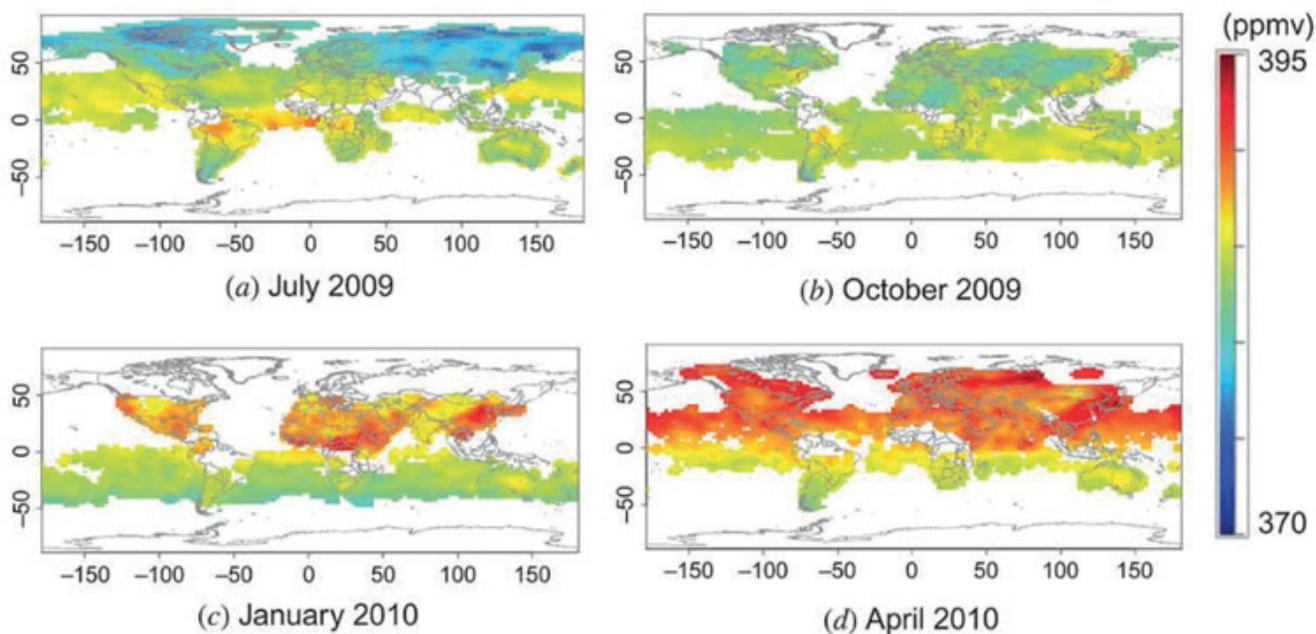


Рис. 18. Пример глобальной карты спутниковых измерений ОС  $\text{CO}_2$  (прибор TANSO-FTS на спутнике GOSAT) [Watanabe et al., 2015; Noël et al., 2021].

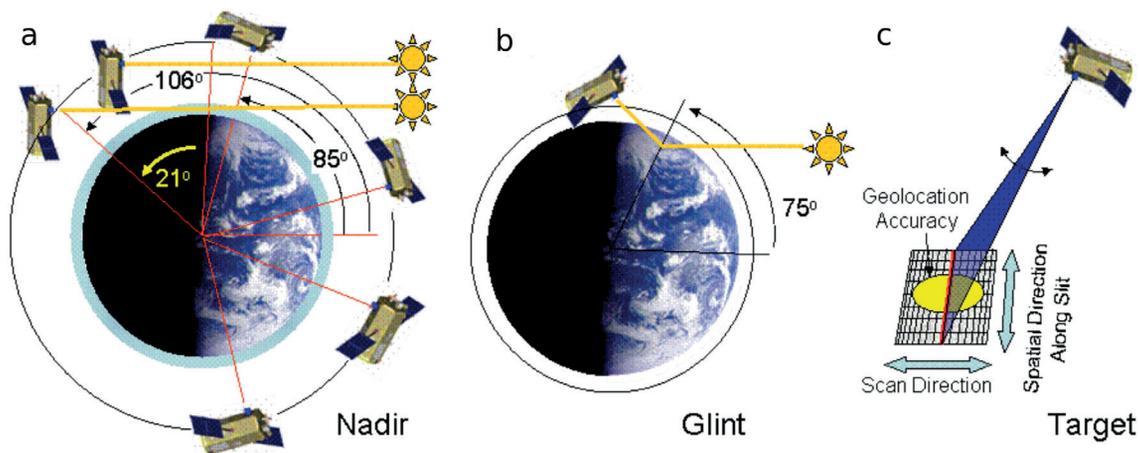


Рис. 19. Три геометрии наблюдений приборов OCO-2 и OCO-3: (a) — надирные наблюдения на освещенной Солнцем территории с зенитным углом меньше 85 градусов; (b) — зеркальные (бликовые) наблюдения при солнечных зенитных углах менее 75 градусов; (c) — целевые наблюдения, сканирование по ограниченной территории [JPL, 2018].

### 6.5. Методы рассеяния (лимб)

Лимбовая геометрия наблюдений (измерения интенсивности рассеянного солнечного излучения горизонта) осуществлялась еще космонавтами на обитаемых космических станциях. Регулярные лимбовые спутниковые измерения излучения горизонта и определения газового состава начались с запуском аппаратуры CLAES (Cryogenic Limb Array Etalon Spectrometer) [Roche et al., 1993] и ISAMS (Improved Stratospheric and Mesospheric Sounder) [Taylor et al., 1987; Ballard et al., 1995]. CLAES с 1993 г. измерял содержание  $O_3$ ,  $H_2O$ ,  $CH_4$ ,  $N_2O$ ,  $NO$ ,  $NO_2$ ,  $N_2O_5$ ,  $HNO_3$ ,  $ClONO_2$ ,  $HCl$ ,  $CFC11$ ,  $CFC12$ . Другой спутниковый прибор ISAMS — многоканальный радиометр — измерял содержание  $CO$ ,  $H_2O$ ,  $N_2O$ ,  $CO_2$ ,  $HNO_3$ ,  $O_3$ ,  $NO$ ,  $NO_2$ ,  $CH_4$ ,  $N_2O_5$ . К лимбовым приборам частично относятся уже рассматривавшиеся приборы SABER и SCIAMACHY, с помощью которых выполнялись измерения рассеянного солнечного излучения горизонта планеты и разных типов атмосферных свечений в УФ, ВИД и БИК областях спектра. Прибор SCIAMACHY позволял получать информацию о многих атмосферных газах, в частности  $O_3$ ,  $NO_2$ ,  $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$ ,  $N_2O$ ,  $BrO$ ,  $CO$ ,  $NO$ ,  $SO_2$ ,  $CH_2O$ ,  $OCIO$ ,  $ClO$ . При этом в лимбовой геометрии мониторинг осуществляется в широкой высотной области — от тропосферы до термосферы. Прибор OSIRIS (Optical Spectrograph and InfraRed Imager System) функционировал на спутнике Odin, запущенном в феврале 2001 г. [Benze et al., 2018]. Лимбовые измерения рассеянного солнечного излучения (спектральная область 274–810 нм) регистрировались с вертикальным разрешением приблизительно 2 км на высотах от 10 км

до 100 км. Этот инструмент используется эпизодически для исследований газового состава атмосферы и кристаллических облаков, в частности — для определения профилей озона в диапазоне широт от  $80^\circ S$  до  $80^\circ N$ . При стратосферно-мезосферных исследованиях измерения осуществляются на высотах 7–107 км.

Прибор OMPS (Ozone Mapping and Profiler Suite), был запущен в космос в октябре 2011 г. на спутнике Suomi NPP и использует две геометрии измерений — надирную и лимбовую. Как лимбовый инструмент (Limb Profiler или LP) OMPS предназначен для определения вертикального профиля содержания озона с высоким вертикальным разрешением (1–3 км) на высотах от верхней тропосферы до мезосферы [Flynn et al., 2006]. Измерения рассеянного солнечного излучения горизонта планеты осуществляются в спектральной области 290–1000 нм с переменным спектральным разрешением (1–25 нм). Горизонтальное разрешение лимбовых измерений составляет ~250 км. Сравнение вертикальных профилей содержания озона по данным спутниковых приборов OMPS и MLS показало их согласие в пределах 5–10%. Основные характеристики рассмотренных лимбовых спутниковых приборов приведены в табл. П5 приложения.

В последние годы активно развиваются синергетические (комплексные) методы измерений газового состава атмосферы, использующие одновременно разные дистанционные методы, излучение различного происхождения, разнообразные спектральные области, что позволяет повышать точность измерений и вертикальное разрешение методов мониторинга (см., например, [Mettig et al., 2022]).

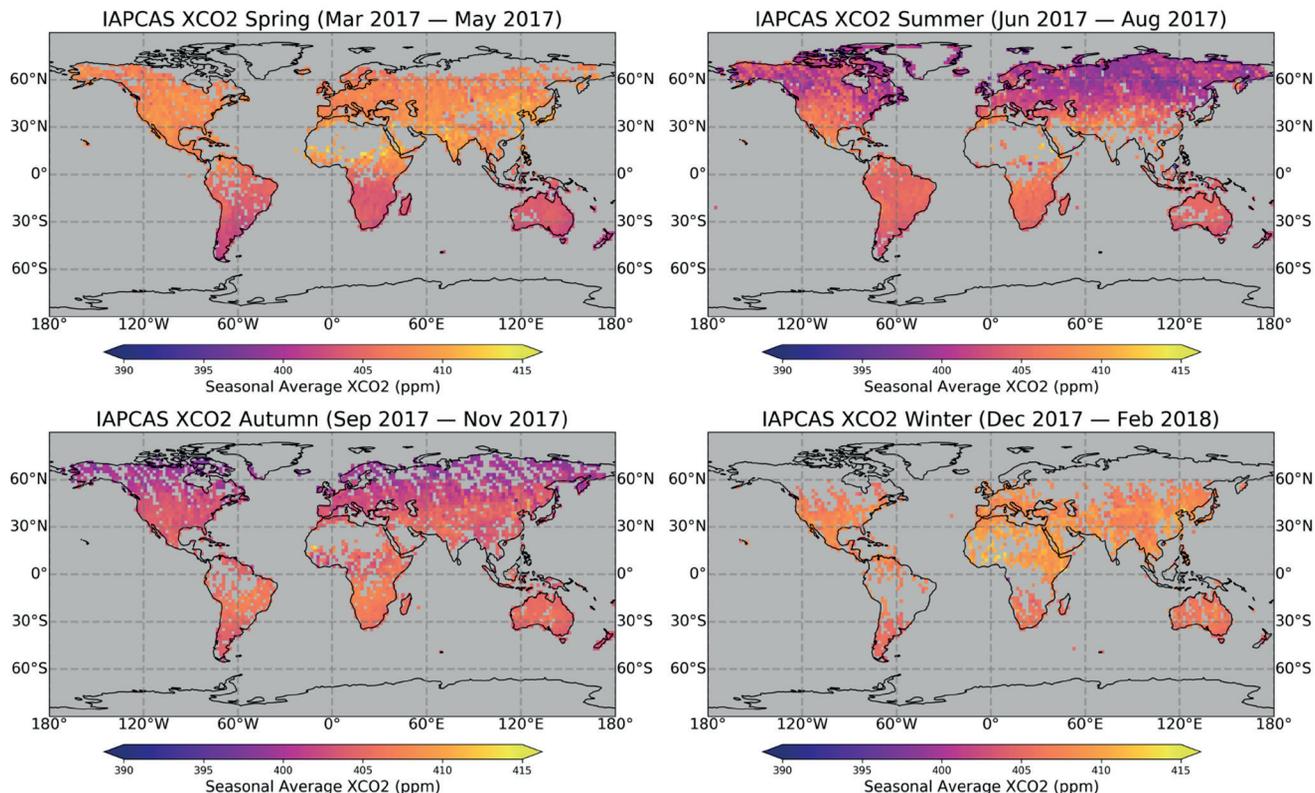


Рис. 20. Сезонные карты средних величин отношения смеси XCO<sub>2</sub> для периода 2017–2018 гг. по данным прибора ACGS [Boesch et al., 2021].

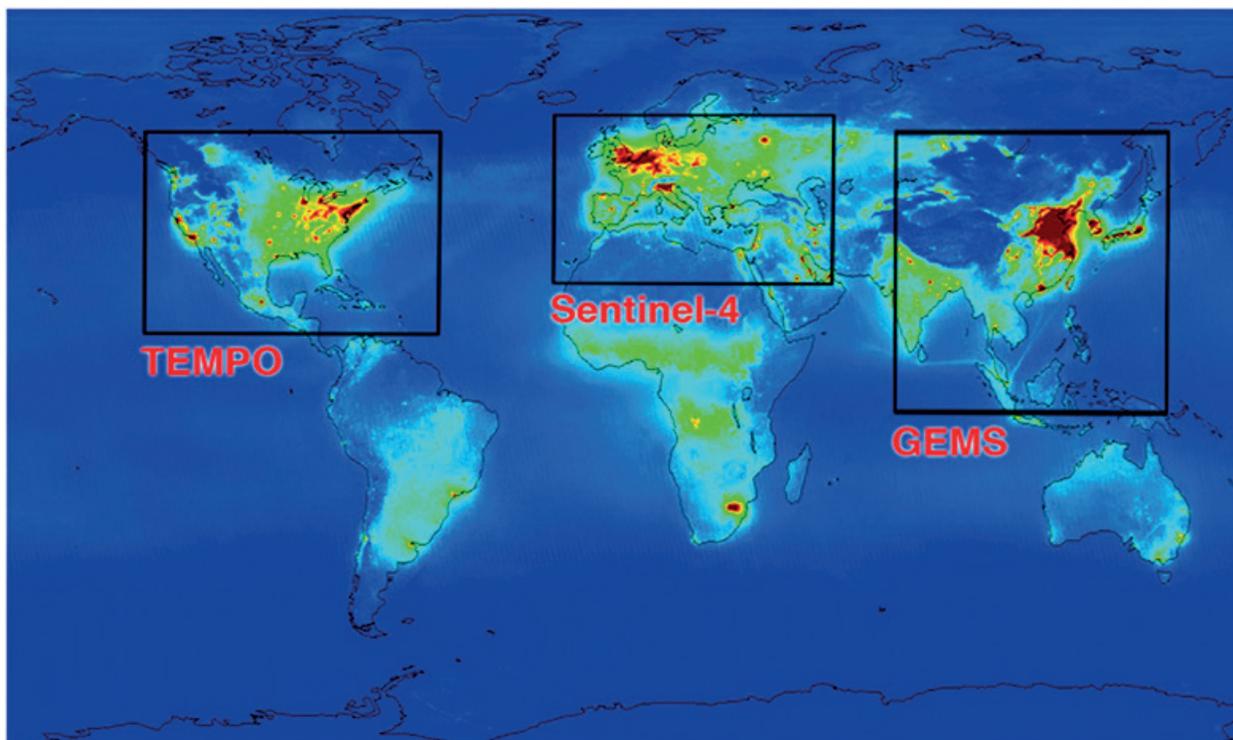


Рис. 21. Области мониторинга газового состава тропосферы в проекте спутниковой системы контроля качества воздуха (Air Quality Satellite Constellation) [TEMPO, 2023].

## 7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Многочисленные естественные процессы и явления в атмосфере Земли, а также усиливающееся антропогенное влияние на систему атмосфера-поверхность делает необходимым все более тщательный мониторинг газового состава атмосферы. Результаты этого мониторинга позволяют совершенствовать численные модели атмосферы и осуществлять прогнозы изменений климата Земли, ее озоносферы и экологического состояния окружающей среды в ближайшие десятилетия. Значительную роль в мониторинге климатически и экологически важных газов играют дистанционные пассивные спутниковые методы, которые последние десятилетия активно используются для получения информации о пространственно-временных вариациях содержания атмосферных газов.

Для мониторинга климатически и экологически важных газов используются:

- космические носители разного типа (полярные, геостационарные, высокоэллиптические спутники и космические станции),
- измерения ЭМИ различного физического происхождения (излучения солнечное (рассеянное и отраженное) и звездное, собственное атмосферное – тепловое, неравновесное и свечения атмосферы),
- измерения ЭМИ в широкой спектральной области от УФ до радиоволн,
- различные геометрии измерений (затменную, надирную и лимбовую),
- оптическую аппаратуру различного типа, спектрального, горизонтального и вертикального разрешения.

Современные спутниковые дистанционные методы мониторинга газового состава атмосферы используют прежде всего пассивные методы – методы прозрачности (МП), атмосферного излучения (АИ) и отраженного и рассеянного солнечного излучения (ОРСИ), – имеющие свои преимущества и недостатки. Объем полученной спутниковой информации и результаты ее использования огромен, и его можно охарактеризовать с помощью количества публикаций, имеющих отношение, например, к только одному спутниковому прибору ОМІ. За период с 2005 по 2022 гг. по тематике измерений прибором ОМІ опубликовано 2877 статей.

Спутниковый мониторинг газового состава атмосферы используется в исследованиях атмосферных процессов и явлений, их описаний и параметризации, при изучении их пространственно-

временных вариаций, в том числе аномалий, в оценках естественных и антропогенных источников и стоков газов, долговременных трендов, валидации численных моделей атмосферы и их совершенствовании, в прогнозах состояния атмосферы, а также при формировании баз данных о газовом составе атмосферы. Глобальная и региональные системы мониторинга постоянно совершенствуются и решают новые важные задачи (например, региональные и локальные спутниковые оценки антропогенных эмиссий климатически и экологически важных газов), повышается их пространственный охват, временное и пространственное разрешение, список исследуемых компонентов и качество измерений.

## ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке государственного контракта № 13.2251.21.0005 Министерства науки и высшего образования РФ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Асмус В.В., Милехин О.Е., Крамарева Л.С., Хайлов М.Н., Ширшаков А.Е., Шумаков И.А.* Первая в мире высокоэллиптическая гидрометеорологическая космическая система «Арктика-М» // *Метеорология и гидрология*. 2021. Т. 12. С. 11–26.
- Березин В.М., Еланский Н.Ф.* Распределение общего содержания озона в атмосфере по наблюдениям с ИСЗ // *Изв. АН СССР. ФАО*. 1972. Т. 8. № 5. С. 526–532.
- ВМО, 2010: Руководство по Глобальной системе наблюдений: ВМО-№ 488. Женева, Швейцария, 2010, 251 с.
- Головкин В.А., Куракин В.С., Пахомов Л.А.* Одновременное определение температуры, относительного геопотенциала, удельной влажности, общего содержания озона в атмосфере и температуры поверхности океана статистическим методом интерпретации излучения, измеряемого спектрометром-интерферометром // *Дистанционное зондирование атмосферы со спутника «Метеор»*. Л.: Гидрометеиздат, 1979. С. 79–95.
- Головкин В.А., Куракин В.С., Пахомов Л.А.* Одновременное определение температуры, относительного геопотенциала, удельной влажности, общего содержания озона в атмосфере и температуры поверхности океана статистическим методом интерпретации излучения, измеряемого спектрометром-интерферометром // *Дистанционное зондирование атмосферы со спутника «Метеор»*. Л.: Гидрометеиздат, 1979. С. 79–95.

- Гречко Г.М., Гурвич А.С., Еланский Н.Ф., Кан В., Плоткин М.Е., Ситнов С.А. Фотографические наблюдения вертикального распределения озона в стратосфере с орбитальной станции «Салют» // ДАН СССР. 1988. Т. 301. № 2. С. 306–309.
- Досов В.Н., Пахомов Л.А., Прохоров А.П. Определение общего содержания озона по уходящему тепловому излучению в полосе 9,6 мкм // Дистанционное зондирование атмосферы со спутника «Метеор». Л.: Гидрометеоиздат. 1979. С. 113–119.
- Кароль И.Л., Розанов В.В., Тимофеев Ю.М. Газовые примеси в атмосфере. Л.: Гидрометеоиздат, 1983. 192 с.
- Кондратьев К.Я., Бузников А.А., Гречко Г.М., Губарев А.А., Покровский А.Г. Измерение отношения смеси атмосферного водяного пара в стратосфере и мезосфере с помощью спектральной аппаратуры, установленной на орбитальной станции «Салют-4» // Доклады АН СССР. 1976. Т. 226. № 3. С. 563–565.
- Кондратьев К.Я., Бузников А.А., Гречко Г.М., Губарев А.А., Покровский А.Г. Измерение отношения смеси атмосферного водяного пара в стратосфере и мезосфере с помощью спектральной аппаратуры, установленной на орбитальной станции «Салют-4» // Доклады АН СССР. 1976. Т. 226. № 3. С. 563–565.
- Кондратьев К.Я., Бузников А.А., Покровский А.Г. Определение малых газовых компонент стратосферы и мезосферы методом затменного зондирования // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1978. Т. 14. С. 1235–1248.
- Кондратьев К.Я., Бузников А.А., Покровский А.Г. Определение малых газовых компонент стратосферы и мезосферы методом затменного зондирования // Изв. АН СССР. ФАО. 1978. Т. 14. С. 1235–1248.
- Кондратьев К.Я., Тимофеев Ю.М. Метеорологическое зондирование атмосферы из космоса. Л.: Гидрометеоиздат, 1978. 280 с.
- Кондратьев К.Я., Тимофеев Ю.М. Термическое зондирование атмосферы со спутников. Л.: Гидрометеоиздат, 1970. 410 с.
- Косцов В.С., Тимофеев Ю.М. Содержание углекислого газа в мезосфере по результатам интерпретации данных эксперимента CRISTA-1 // Изв. РАН. ФАО. 2003. Т. 39. № 3. С. 369–380.
- Малкевич М.С. Оптические исследования атмосферы со спутников. М.: Наука, 1973. 304 с.
- Поберовский А.В., Поляков А.В., Тимофеев Ю.М., Ковалев А.Е., Прохоров В.М., Хрусталева А.З., Панченко В.А., Мансуров И.И., Волков О.Н. Определение вертикальных профилей содержания озона методом затменного зондирования с ДОС «МИР». 1. Описание прибора и методики обработки данных. Примеры результатов // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 1999. Т. 35. № 3. С. 312–321.
- Поляков А., Тимофеев Ю.М. Усовершенствованная методика определения общего содержания озона с помощью аппаратуры SEVIRI на геостационарных спутниках METEOSAT // Исслед. Земли из космоса. 2010. № 5. С. 42–45.
- Поляков А.В., Поберовский А.В., Тимофеев Ю.М. Определение вертикальных профилей содержания озона методом затменного зондирования с ДОС «МИР». 2. Валидация измерений вертикальных профилей содержания озона. Примеры результатов // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 1999. Т. 35. № 3. С. 322–328.
- Тимофеев Ю.М. Исследования атмосферы Земли методом прозрачности. СПб.: Наука. 2016. 367 с.
- Тимофеев Ю.М., Васильев А.В. Теоретические основы атмосферной оптики. СПб.: Наука. 2003. 474 с.
- Тимофеев Ю.М., Неробелов Г.М., Поберовский А.В. Экспериментальные оценки интегральных антропогенных эмиссий CO<sub>2</sub> города Санкт-Петербурга // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана, 2022. Т. 58. № 3. С. 1–10. doi:10.31857/S0002351522030105
- Тимофеев Ю.М., Неробелов Г.М., Поляков А.В., Виролайн Я.А. Спутниковый мониторинг озоносферы // Метеорология и гидрология. 2021. № 12. С. 71–79. <https://doi.org/10.52002/0130-2906-2021-12-71-79>
- Тимофеев Ю.М., Поляков А.В., Виролайн Я.А., Делер В., Эртель Д., Шпенкух Д. Первые спутниковые измерения содержания углекислого газа в земной атмосфере (1977 и 1979 гг., спутник «МЕТЕОР», прибор SI-1) // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2020. Т. 56. № 4. С. 458–461. <https://doi.org/10.31857/S0002351520040094>
- Хргуан А.Х., Еланский Н.Ф., Березин В.М., Йозенас В.А., Краснопольский В.А. Некоторые результаты наблюдения озона со спутника 17–18 июня 1966 г // Метеорология и гидрология. 1973. № 4. С. 3–12.
- Baek K., Kim J.H., Bak J., Haffner D.P., Kang M., Hong H. Evaluation of total ozone measurements from Geostationary Environmental Monitoring Spectrometer (GEMS) // Atmos. Meas. Tech. 2023. V. 16. P. 5461–5478. <https://doi.org/10.5194/amt-16-5461-2023>
- Ballard J. and coauthors. Calibration of the Improved Stratospheric and Mesospheric Sounder. Part I: Introduction, spectral, and radiometric calibration // J. Atmos. Oceanic Technol. 1996. V. 13. P. 810–831.
- Beer R., Glavich T., Rider D.M. Tropospheric emission spectrometer for the Earth Observing System's Aura satellite // Appl. Opt. 2001. V. 40. P. 2356–367.
- Benze S., Gumbel J., Randall C., Karlsson B., Hultgren K., Lumpe J., Baumgarten G. Making limb and nadir measurements comparable: A common volume study of

- PMC brightness observed by Odin OSIRIS and AIM CIPS // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2018. V. 167. P. 66–73. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.11.007>
- Bernath P.F., Crouse J., Hughes R.C., Boone C.D.* The Atmospheric Chemistry Experiment Fourier transform spectrometer (ACE-FTS) version 4.1 retrievals: Trends and seasonal distributions // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.* 2021. V. 259. 107409.
- Bernath P.F., McElroy C.T., Abrams M.C., Boone C.D., Butler M., Camy-Peyret C., Carleer M., Clerbaux C., Coheur P.-F., Colin R., DeCola P., De Maziere M., Drummond J.R., Dufour D., Evans W.F.J., Fast H., Fussen D., Gilbert K., Jennings D.E., Llewellyn E.J., Lowe R.P., Mahieu E., McConnell J.C., McHugh M., McLeod S.D., Midwinter C., Nassar R., Nichitiu F., Nowlan C., Rinsland C.P., Rochon Y.J., Rowlands N., Semeniuk K., Simon P., Skelton R., Sloan J.J., Soucy M.-A., Strong K., Tremblay P., Turnbull D., Walker K.A., Walkty I., Wardle D.A., Wehrle V., Zander R., Zou J.* Atmospheric Chemistry Experiment (ACE): mission overview // *Geophys. Res. Lett.* 2005. V. 32. № 15. L15S01. <https://doi.org/10.1029/2005GL022386>.
- McPeters R.D., Krueger A.J., Bhartia P.K., Herman J.R., Oaks A., Ahmad Z., Cebula R.P., Schlesinger B.M., Swissler T., Taylor S.L., Torres O., Wellemeyer S.G.* Nimbus-7 total ozone mapping spectrometer (TOMS) data products user's guide. NASA Reference publication 1323. 1993. N94–2435. 93 p. 19940019882.pdf
- Blumstein D., Chalona G., Carliera T., Buila C., Héberta Ph., Maciaszeka T., Poncea G., Phulpina T., Tournierb B., Siméonic D., Astrucc P., Clausse A., Kayald G., Jegoue R.* IASI instrument: Technical overview and measured performances // *Proc. SPIE 5543, Infrared Spaceborne Remote Sensing XII*, (4 November 2004); <https://doi.org/10.1117/12.560907>.
- Boesch H., Liu Y., Tamminen J., Yang D., Palmer P.I., Lindqvist H., Cai Z., Che K., Di Noia A., Feng L., Hakkarainen J., Ialongo I., Kalaitzi N., Karppinen T., Kivi R., Kivimäki E., Parker R.J., Preval S., Wang J., Webb A.J., Yao L., Chen H.* Monitoring Greenhouse Gases from Space // *Remote Sensing*. 2021. V. 13. № 14. 2700. <https://doi.org/10.3390/rs13142700>
- Bovensmann H., Burrows J., Buchwitz M., Frerick J., Noel S., Rozanov V., Chance K., Goede A.* SCIAMACHY: Mission Objectives and Measurement Modes // *J. Atmos. Sci.* 1999. V. 56. P. 127–150.
- Braun S.B., Jensen M., Jensen S., Hansen G., Zollinger L., Esplin R., Miller J.B.* Sounding of the atmosphere using broadband emission radiometry (SABER): sensor design, performance, and lessons learned // *Proc. SPIE Infrared Spaceborne Remote Sensing XIV*. 2006. V. 6297. 62970U. <https://doi.org/10.1117/12.684137>
- Burrows J., Weber M., Buchwitz M., Rozanov V., Ladstätter-Weissenmayer A., Richter A., de Beek R., Hoogen R., Bramstadt K., Eichmann K.-U., Eisinger M., Perner D.* The Global Ozone Monitoring Experiment (GOME): mission concept and first scientific results // *J. Atmos. Sci.* 1999. V. 56. P. 151–175.
- Chan K.L., Valks P., Heue K.-P., Lutz R., Hedel P., Loyola D., Pinardi G., Van Roozendaal M., Hendrick F., Wagner T., Kumar V., Bais A., PETERS A., Irie H., Takashima H., Kanaya Y., Choi Y., Park K., Chong J., Cede A., Frieß U., Richter A., Ma J., Benavent N., Holla R., Postylyakov O., Cárdenas C.R., Wenig M.* Global Ozone Monitoring Experiment-2 (GOME-2) Daily and Monthly Level 3 Products of Atmospheric Trace Gas Columns // *Earth Syst. Sci. Data*. 2023. V. 15. P. 1831–1870. <https://doi.org/10.5194/essd-2022-315>
- Chu W.P., McCormick M.P.* Inversion of stratospheric aerosol and gaseous constituents from spacecraft solar extinction data in the 0.38–1.0 mm wavelength region // *Appl. Opt.* 1979. V. 18. P. 1404–1414.
- Clerbaux C., Boynard A., Clarisse L., George M., Hadji-Lazaro J., Herbin H., Hurtmans D., Pommier M., Razavi A., Turquety S., Wespes C., Coheur P.-F.* Monitoring of atmospheric composition using the thermal infrared IASI/MetOp sounder // *Atmos. Chem. Phys.* 2009. V. 9. P. 6041–6054, <https://doi.org/10.5194/acp-9-6041-2009>.
- Cracknell A.P., Varotsos C.A.* Remote Sensing and Atmospheric Ozone: Human Activities versus Natural Variability. Berlin, Heidelberg: Springer Science & Business Media, 2012. 662 p.
- Crisp D., Pollock H.R., Rosenberg R., Chapsky L., Lee R.A.M., Oyafuso F.A., Frankenberg C., O'Dell C.W., Bruegge C.J., Doran G.B., Eldering A., Fisher B.M., Fu D., Gunson M.R., Mandrake L., Osterman G.B., Schwandner F.M., Sun K., Taylor T.E., Wennberg P.O., Wunchet D.* The on-orbit performance of the Orbiting Carbon Observatory-2 (OCO-2) instrument and its radiometrically calibrated products // *Atmos. Meas. Tech.* 2017. V. 10. P. 59–81. <https://doi.org/10.5194/amt-10-59-2017>.
- Elansky N.F., Grechko G.M., Plotkin M.E., Postylyakov O.V.* The ozone and aerosol fine structure experiment: observing the fine structure of ozone and aerosol distribution in the atmosphere from the "Salyut-7" orbiter: 3. Experimental Results // *J. Geoph. Res.* 1991. V. 96. № D10. P. 18661–18670.
- Elansky N.F., Plotkin M.E., Postylyakov O.V., Ukhinov S.A.* The ozone and aerosol fine structure experiment: observing the fine structure of ozone and aerosol distribution in the atmosphere from the "Salyut-7" orbiter. 2. Formation of the Earth's twilight limb coloration

- and radiance: Numeric calculations // *J. Geoph. Res.* 1991a. V. 96. № D10. P. 18653–18660.
- EOS, 2020: Level 2 (L2) Data User's Guide Version 8.0 – Tropospheric Emission Spectrometer (TES) [Herman R. and Kulawik S. (eds.)]. Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology Pasadena, California. 2020. 78 p.
- Esplin R., Batty C., Jensen M., McLain D., Stauder J., Jensen S., Stump C., Robinson D., Dodgen J.* Sounding of the Atmosphere Using Broadband Emission Radiometer (SABER): System Overview // *Proc. SPIE* 2268, Infrared Spaceborne Remote Sensing II, (14 September 1994), <https://doi.org/10.1117/12.185831>
- Farmer C.B.* High resolution infrared spectroscopy of the sun and Earth's atmosphere from space. *Mikrochim Acta.* 1987. V. 93. P. 89–214.
- Fischer H., Birk M., Blom C., Carli B., Carlott M., von Clarmann T., Delbouille L., Dudhia A., Ehhalt D., Ende-mann M., Flaud J.M., Gessner R., Kleinert A., Koopman R., Langen J., Lopez-Puertas M., Mosner P., Nett H., Oelhaf H., Perron G., Remedios J., Ridolfi M., Stiller G., Zander R.* MIPAS: an instrument for atmospheric and climate research // *Atmos. Chem. Phys.* 2008. V. 8. № 8. P. 2151–2188, <https://doi.org/10.5194/acp-8-2151-2008>
- Fischer H., Oelhaf H.* Remote sensing of vertical profiles of atmospheric trace constituents with MIPAS limb-emission spectra // *Appl. Opt.* 1996. V. 35. № 16. P. 2787–2796 <https://doi.org/10.1364/AO.35.002787>
- Flynn L.E., Seftor C.J., Larsen J.C., Xu P.* The Ozone Mapping and Profiler Suite // *Earth Science Satellite Remote Sensing. Volume 1: Science and instruments* [Qu J., Gao W., Kafatos M., Murphy R.E., Salomonson V.V. (eds.)], Tsinghua University Press, Beijing and Springer, Berlin Heidelberg New York, 2006. P. 279–296, <https://doi.org/10.1007/978-3-540-37293-6>
- Garcia O.E., Sepúlveda E., Schneider M., Hase F., August T., Blumenstock T., Kühl S., Munro R., Gómez-Peláez A.J., Hultberg T., Redondas A., Barthlott S., Wiegele A., González Y., Sanromá E.* Consistency and quality assessment of the Metop-A/IASI and Metop-B/IASI operational trace gas products ( $O_3$ ,  $CO$ ,  $N_2O$ ,  $CH_4$ , and  $CO_2$ ) in the subtropical North Atlantic // *Atmos. Meas. Tech.* 2016. V. 9. № 5. P. 2315–2333. <https://doi.org/10.5194/amt-9-2315-2016>
- Gille J.C., Russell III J.M.* The limb infrared monitor of the stratosphere: experiment description, performance, and results // *J. Geophys. Res.* 1984. V. 89. P. 5125–5140.
- Goldberg M.D., Qu Y., McMillin L.M., Wolf W., Zhou L., Divakarla M.* AIRS near-real-time products and algorithms in support of numerical weather prediction // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing.* 2003. V. 41. P. 379–389.
- Golovin Yu.M., Zavelevich F.S., Kozlov D.A., Kozlov I.A., Monakhov D.O., Nikulin A.G., Uspensky A.B., Rublev A.N., Kukharsky A.V.* The IKFS-2 Infrared Fourier-Transform Spectrometer Operating Onboard the Meteor-M No. 2 Satellite // *Izv. Atmos. Oceanic Phys.* 2018. V. 54. P. 1381–1390. <https://doi.org/10.1134/S0001433818090153>
- Grechko G.M., Elansky N.F., Plotkin M.E., Postlyakov O.V.* The ozone and aerosol fine structure experiment: observing the fine structure of ozone and aerosol distribution in the atmosphere from the "Salyut-7" orbiter. 1. Introduction and the occultation experiment // *J. Geoph. Res.* 1991. V. 96. № D10. P. 18647–18653 <https://doi.org/10.1029/91JD01395>
- Grieco F., Pérot K., Murtagh D., Eriksson P., Forkman P., Rydberg B., Funke B., Walker K.A., Pumphrey H.C.* Recovery and validation of Odin/SMR long-term measurements of mesospheric carbon monoxide // *Atmos. Meas. Tech.* 2020. V. 13. № 9. P. 5013–5031, <https://doi.org/10.5194/amt-13-5013-2020>
- Grossmann K.U., Goussev O., Oberheide J.* A Review of new Results from CRISTA // *Proc. SPIE. Remote Sensing of Clouds and the Atmosphere IX.* 2004. V. 5571. <https://doi.org/10.1117/12.563902>
- Grossmann K.U., Offerman D., Gusev O., Oberheide J., Riese M., Spang R.* The CRISTA 2 mission // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107. № D23, P. 8173–8185. <https://doi.org/10.1029/2001JD000667>
- Gunson M.R., Abbas M.M., Abrams M.C., Allen M., Brown L.R., Brown T.L., Chang A.Y., Goldman A., Irion F.W., Lowes L.L., Mahieu E., Manney G.L., Michelsen H.A., Newchurch M.J., Rinsland C.P., Salawitch R.J., Stiller G.P., Toon G.C., Yung Y.L., Zander R.* The Atmospheric Trace Molecule Spectroscopy (ATMOS) experiment: Deployment on the ATLAS Space Shuttle missions // *Geophys. Res. Lett.* 1996. V. 23. P. 2333–2336.
- Han Y., Revercomb H., Cromp M., Gu D., Johnson D., Mooney D., Scott D., Strow L., Bingham G., Borg L., Chen Y., DeSlover D., Esplin M., Hagan D., Jin X., Knuteson R., Motteler H., Predina J., Suwinski L., Taylor J., Tobin D., Tremblay D., Wang C., Wang Lih., Wang Lik., Zavyalovet V.* Suomi NPP CrIS Measurements, Sensor Data Record Algorithm, Calibration and Validation Activities, and Record Data Quality // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2013. V. 118. P. 12,734–12,748. <https://doi.org/10.1002/2013JD020344>
- Hanel R., Conrath B.* Interferometer Experiment on Nimbus 3: Preliminary Results // *Science.* 1969. V. 165. № 3899. P. 1258–1260. <https://doi.org/10.1126/science.165.3899.1258>
- Hanel R.A., Wark D.Q.* Tiros II Radiation Experiment and its Physical Significance // *J. Opt. Soc. Am.* 1961. V. 51. № 12. P. 1394–1399.

- Hassler B., Petropavlovskikh I., Staehelin J., August T. et al.* Past changes in the vertical distribution of ozone – Part 1: Measurement techniques, uncertainties and availability // *Atmos. Meas. Tech.* 2014. V. 7. P. 1395–1427.
- Houghton J.T., Taylor F.W., Rodgers C.D.* Remote Sounding of Atmospheres. N-Y.: Cambridge University Press, 1984. 343 с.
- IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 p.
- IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. Geneva, Switzerland, 184 p.
- JPL, 2018: Orbiting Carbon Observatory–2 (OCO-2). Data Product User’s Guide, Operational L1 and L2 Data Versions 8 and Lite File Version 9. 2018. Jet Propulsion Laboratory California, Institute of Technology Pasadena, California. 96 p. R9\_OCO2\_DUG\_Ver1\_RevJ (nasa.gov)
- Kempe V., Oertel D., Schuster R., Becker-Ross H., Jahn H.* Absolute IR-spectra from the measurement of Fourier-spectrometers aboard Meteor 25 and 28 // *Acta Astronautica.* 1980. V. 7. № 12. P. 1403–1416.
- Kikuchi K.-I., Nishibori T., Ochiai S., Ozeki H., Irimajiri Y., Kasai Y., Koike M., Manabe T., Mizukoshi K., Murayama Y., Nagahama T., Sano T., Sato R., Seta M., Takahashi C., Takayanagi M., Masuko H., Inatani J., Suzuki M., Shiotani M.* // Overview and early results of the Superconducting Submillimeter-Wave Limb Emission Sounder (SMILES) // *J. Geophys. Res.* 2010. V. 115. D23306, <https://doi.org/10.1029/2010JD014379>
- Kuell V., Olschewski F., Jarisch M., Offermann D., Grossmann K.U.* Trace gas variability in the stratosphere // *Adv. Space Res.* 2004. V. 34. P. 1722–1730. [www.elsevier.com/locate/asr](http://www.elsevier.com/locate/asr)
- Kuze A., Suto H., Nakajima M., Hamazaki T.* Thermal and near infrared sensor for carbon observation Fourier-transform spectrometer on the Greenhouse Gases Observing Satellite for greenhouse gases monitoring // *Appl. Opt.* 2009. V. 48. P. 6716–6733.
- Kyrola E., Tamminen J., Leppelmeier G.W., Sofieva V., Hassinen S., Bertaux J.-L., Hauchecorne A., Dalaudier F., Cot C., Korabely O., d’Andon O.F., Barrot G., Mangin A., Theodore B., Guirlet M., Etanchaud F., Snoij P., Koopman R., Saavedra L., Fraisse R., Fussen D., Vanhelle-mont F.* GOMOS on Envisat: An overview // *Adv. Space Res.* 2004. V. 33. P. 1020–1028.
- Levelt P.F., Joiner J., Tamminen J., Veefkind J.P., Bhartia P.K., Stein Zweers D.C., Duncan B.N., Streets D.G., Eskes H., van der A R., McLinden C., Fioletov V., Carn S., de Laat J., DeLand M., Marchenko S., McPeters R., Ziemke J., Fu D., Liu X., Pickering K., Apituley A., González Abad G., Arola A., Boersma F., Miller Ch.C., Chance K., de Graaf M., Hakkarainen J., Hassinen S., Ialongo I., Kleipool Q., Krotkov N., Li C., Lamsal L., Newman P., Nowlan C., Suleiman R., Tilstra L.G., Torres O., Wang H., Wargan K.* The Ozone Monitoring Instrument: overview of 14 years in space // *Atmos. Chem. Phys.* 2018. V. 18. P. 5699–5745. <https://doi.org/10.5194/acp-18-5699-2018>
- Li J., Schmidt C.C., Nelson III J.P., Schmit T.J., Menzel W.P.* Estimation of total atmospheric ozone from GOES sounder radiances with high temporal resolution. *J. Atmos. Oceanic. Technol.* 2001. V. 18. P. 157–168.
- López-Puertas M., García-Comas M., Funke B., von Clarmann T., Glatthor N., Grabowski U., Kellmann S., Kiefer M., Laeng A., Linden A., Stiller G.P.* MIPAS ozone retrieval version 8: middle-atmosphere measurements // *Atmos. Meas. Tech.* 2023. V. 16. № 22. P. 5609–5645, <https://doi.org/10.5194/amt-16-5609-2023>
- McCormick M.P., Chu W.P., Zawodny J.M., Mauldin III L.E., McMaster L.R.* Stratospheric aerosol and gas experiment III: aerosol and trace gas measurements for the Earth Observing System // *Proc. SPIE.* 1991. Remote Sensing of Atmospheric Chemistry. V. 1491. <https://doi.org/10.1117/12.46655>
- McCormick M.P., Zawodny J.M., Veiga R.E., Larsen J.C., Wang P.H.* An overview of SAGE I and II ozone measurements // *Planetary and Space Science.* 1989. V. 37. № 12. P. 1567–1586.
- Mettig N., Weber M., Rozanov A., Burrows J.P., Veefkind P., Thompson A.M., Stauffer R.M., Leblanc T., Ancellet G., Newchurch M.J., Kuang S., Kivi R., Tully M.B., Van Maderen R., Piders A., Kois B., Stübi R., Skrivankova P.* Combined UV and IR ozone profile retrieval from TROPOMI and CrIS measurements // *Atmos. Meas. Tech.* 2022. V. 15. P. 2955–2978. <https://doi.org/10.5194/amt-15-2955-2022>
- Miller A.J., Nagatani R.M., Flynn L.E., Kondragunta S., Beach E., Stolarski R., McPeters R.D., Bhartia P.K., De-Land M.T., Jackman C.H., Wuebbles D.J., Patten K.O., Cebula R.P.* A cohesive total ozone data set from the SBUV(2) satellite system // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107. № D23. P. 4701–4709. <https://doi.org/10.1029/2001JD00085>
- Mukhartova Y.V., Postlyakov O.V., Davydova M.A., Zakharova S.A.* High-detailed tropospheric transport of NOx

- from ground sources: comparison of model data and satellite imagery // Proc. SPIE – Remote Sensing of Clouds and the Atmosphere XXVI. 2021. V. 11859. 1185906. <https://doi.org/10.1117/12.2600283>
- Muller C, Lippens C., Vercheval J., Ackerman M., Laurent J., Lemaitre M.P., Besson J., Girard A. Experience (spectrometre a grille) a bord de la premiere charge utile de SPACELAB // J. Optics (Paris). 1985. V. 16. № 4. P. 155–168.
- Noël S., Reuter M., Buchwitz M., Borchardt J., Hilker M., Bovensmann H., Burrows J.P., Di Noia A., Suto H., Yoshida Y., Buschmann M., Deutscher N.M., Feist D.G., Griffith D.W.T., Hase F., Kivi R., Morino I., Notholt J., Ohyama H., Petri C., Podolske J.R., Pollard D.F., Sha M.K., Shiomi K., Sussmann R., Té Y., Velazco V.A., Warneke T. XCO<sub>2</sub> retrieval for GOSAT and GOSAT-2 based on the FOCAL algorithm // Atmos. Meas. Tech. 2021. V. 14. P. 3837–3869. <https://doi.org/10.5194/amt-14-3837-2021>
- Noel S., Bovensmann H., Wuttke M.W., Burrows J.P., Gottwald M., Krieg E., Goede A.P.H., Muller C. Nadir, limb, and occultation measurements with SCIAMACHY // Adv. Space Res. 2002. V. 29. № 11. P. 1819–1824.
- Offermann D., Grossmann K.-U., Barthol P., Knieling P., Riese M., Trant R. Cryogenic infrared spectrometer and telescopes for the atmosphere (CRISTA) experiment and middle atmosphere variability // J. Geophys. Res. 1999. V. 104. № D13. P. 16311–16325. <https://doi.org/10.1029/1998JD100047>
- Polyakov A., Virolainen Y., Nerobelov G., Kozlov D., Timofeyev Y. Six Years of IKFS-2 Global Ozone Total Column Measurements // Remote Sens. 2023. V. 15. 2481. <https://doi.org/10.3390/rs15092481>.
- Postlyakov O.V., Borovski A.N., Makarenkov A.A. First experiment on retrieval of tropospheric NO<sub>2</sub> over polluted areas with 2.4-км spatial resolution basing on satellite spectral measurements // Proc. SPIE – XXIII International Symposium, Atmospheric and Ocean Optics, Atmospheric Physics. 2017. V. 10466. 104662Y. <https://doi.org/10.1117/12.2285794>
- Roche A.E., Kumer J.B., Mergenthaler J.L., Ely G.A., Uplinger W.G., Potter J.F., James T.C., Sterritt L.W. The cryogenic limb array etalon spectrometer (CLAES) on UARS: Experiment description and performance // J. Geophys. Res.: Atmospheres. 1993. V. 98. № D6. P. 10763–10775. <https://doi.org/10.1029/93jd00800>
- Rodgers C.D. Inverse Methods for Atmospheric Sounding. Theory and Practice. New York: World Scientific Publishing, 2000. 238 p.
- Smith N., Barnett C.D. CLIMCAPS Observing Capability for Temperature, Moisture, and Trace Gases from AIRS/AMSU and CrIS/ATMS // Atmos. Meas. Tech. 2020. V. 13. № 8. P. 4437–4459. <https://doi.org/10.5194/amt-13-4437-2020>
- Suto H., Kataoka F., Kikuchi N., Knuteson R.O., Butz A., Haun M., Buijs H., Shiomi K., Imai H., Kuze A. Thermal and near-infrared sensor for carbon observation Fourier transform spectrometer-2 (TANSO-FTS-2) on the Greenhouse Gases Observing Satellite-2 (GOSAT-2) during its first year on orbit // Atmos. Meas. Techn. 2021. V. 14. P. 2013–2039. <https://doi.org/10.5194/amt-14-2013-2021>
- Taylor F.W., Scaddan R.J., Callard L. Improved Stratospheric and Mesospheric Sounder // Proc. SPIE – Optical Systems for Space Applications. 1987. V.0810. <https://doi.org/10.1117/12.941525>
- Taylor T.E., O'Dell C.W., Baker D., Bruegge C., Chang A., Chapsky L., Chatterjee A., Cheng C., Chevallier F., Crisp D., Dang L., Drouin B., Eldering A., Feng L., Fisher B., Fu D., Gunson M., Haemmerle V., Keller G.R., Kiel M., Kuai L., Kurosu T., Lambert A., Laughner J., Lee R., Liu J., Mandrake L., Marchetti Y., McGarragh G., Merrelli A., Nelson R.R., Osterman G., Oyafuso F., Palmer P.I., Payne V.H., Rosenberg R., Somkuti P., Spiers G., To C., Weir B., Wennberg P.O., Yu S., Zong J. Evaluating the consistency between OCO-2 and OCO-3 XCO<sub>2</sub> estimates derived from the NASA ACOS version 10 retrieval algorithm // Atmos. Meas. Tech. 2023. V. 16. P. 3173–3209. <https://doi.org/10.5194/amt-16-3173-2023>
- TEMPO, 2023: A Global Constellation of Satellites Aimed at Measuring Air Quality. [https://tempo.si.edu/blog/2023\\_Feb\\_14.html](https://tempo.si.edu/blog/2023_Feb_14.html)
- Timofeyev Y.M., Uspensky A.B., Zavelevich F.S., Polyakov A., Virolainen Y., Rublev A., Kukharsky A., Kiseleva J.V., Kozlov D., Kozlov I.A., Nikulin A., Pyatkin V., Rusin E. Hyperspectral Infrared Atmospheric Sounder IKFS-2 on “Meteor-M” No. 2-Four Years in Orbit // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf. 2019. V. 238. 106579, <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2019.106579>.
- Timofeyev Yu.M., Vasiliev A.V. Theoretical Fundamentals of Atmospheric Optics. UK: Cambridge International Science Publishing Ltd., 2008. 496 p.
- Uspensky A.B. Atmospheric Greenhouse Gas Distributions: Satellite-Based Measurements // Izv. Atmosph. Ocean. Phys. 2023. V. 59. № 2. P. S232–S241. <https://doi.org/10.1134/S0001433823140141>
- Van Damme M., Clarisse L., Heald C.L., Hurtmans D., Ngadi Y., Clerbaux C., Dolman A.J., Erisman J.W., Coheur P.F. Global distributions, time series and error characterization and trends of atmospheric ammonia (NH<sub>3</sub>) from IASI satellite observations // Atmos. Chem. Phys. 2014. V. 14. № 6. P. 2905–2922. [www.atmos-chem-phys.net/14/2905/2014/](http://www.atmos-chem-phys.net/14/2905/2014/)

- Van Geffen J., Eskes H.J., Boermsa K.F., Veeffkind J.P. TROPOMI ATBD of the Total and Tropospheric NO<sub>2</sub> Data Products. 2021. Available online: <https://sentinel.esa.int/documents/247904/2476257/sentinel-5p-tropomi-atbd-no2-data-products> (accessed on 9 June 2024).
- Watanabe H., Hayashi K., Saeki T., Maksyutov S., Nasuno I., Shimono Y., Hirose Y., Takaichi K., Kanekon S., Ajiro M., Matsumoto Yukio, and Yokota Tatsuya. Global mapping of greenhouse gases retrieved from GOSAT Level 2 products by using a kriging method // *International Journal of Remote Sensing*. 2015. 36. 6. P. 1509–1528. <https://doi.org/10.1080/01431161.2015.1011792>
- Waters J.W., Froidevaux L., Harwood R.S., Jarnot R.F., Pickett H.M., Read W.G., Siegel P.H., Cofield R.E., Filipiak M.J., Flower D.A., Holden J.R., Lau G.K., Livesey N.J., Manney G.L., Pumphrey H.C., Santee M.L., Wu D.L., Cuddy D.T., Lay R.R., Loo M.S., Perun V.S., Schwartz M.J., Stek P.C., Thurstans R.P., Boyles M.A., Chandra K.M., Chavez M.C., Chen G.-S., Chudasama B.V., Dodge R., Fuller R.A., Girard M.A., Jiang J.H., Jiang Y., Knosp B.W., LaBelle R.C., Lam J.C., Lee K.A., Miller D., Oswald J.E., Patel N.C., Pukala D.M., Quintero O., Scaff D.M., Van Snyder W., Tope M.C., Wagner P.A., Walch M.J. The Earth Observing System Microwave Limb Sounder (EOS MLS) on the Aura Satellite // *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.* 2006. V. 44. № 5. P. 1075–1092. <https://ieeexplore.ieee.org/document/1624589>
- Waters J.W., Froidevaux L., Jarnot R.F., Read W.G., Pickett H.M., Harwood R.S., Cofield R.E., Filipiak M.J., Flower D.A., Livesey N.J., Manney G.L., Pumphrey H.C., Santee M.L., Siegel P.H., Wu D.L. An Overview of the EOS MLS Experiment. Version 2.0: 2 September 2004 // JPL D-15745 / CL# 04-2323 EOS MLS DRL 601 (part 1) ATBD-MLS-01 Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology Pasadena, California 91109-8099 JPL D-14421 (nasa.gov)
- WHO, 2024: Air Pollution Available online at: <http://www.who.int/airpollution/en/> (accessed on 10 May 2024).
- WMO, 2006: An Overview of the 2005 Antarctic Ozone Hole: Global Ozone Research and Monitoring Project, Report No. 49 (WMO/TD-No. 1312) [prepared by G.O. Braathen]. Geneva, Switzerland, 2006. 76 p.
- WMO, 2018: Scientific Assessment of Ozone Depletion 2018: Global Ozone Research and Monitoring Project, Report No. 58. Geneva, Switzerland, 588 p.
- WMO, 2023a: Guide to Instruments and Methods of Observation. Volume I – Measurement of Meteorological Variables, WMO-No. 8. Geneva, Switzerland, 574 p.
- WMO, 2023b: Guide to Instruments and Methods of Observation. Volume III – Observing Systems, WMO-No. 8. Geneva, Switzerland, 428 p.
- WMO, 2023c: Guide to Instruments and Methods of Observation. Volume IV – Space-based Observation, WMO-No. 8. Geneva, Switzerland, 195 p. <https://library.wmo.int/idurl/4/68662>
- Wu C., Qi C., Hu X., Gu M., Yang T., Xu H., Lee L., Yang Z., Zhang P. FY-3D HIRAS Radiometric Calibration and Accuracy Assessment // *IEEE Trans. Geosci. Remote. Sens.* 2020. V. 58. P. 3965–3976.
- Yang D., Luo Y., Zeng Y., Si F., Xi L., Zhou H., Liu W. Tropospheric NO<sub>2</sub> Pollution Monitoring with the GF-5 Satellite Environmental Trace Gases Monitoring Instrument over the North China Plain during Winter 2018–2019 // *Atmosphere*. 2021. V. 12. 398. <https://doi.org/10.3390/atmos12030398>
- Yang J., Zhang Z., Wei C., Lu F., Guo Q. Introducing the new generation of Chinese geostationary weather satellites, Fengyun-4 // *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 2017. V. 98. P. 1637–1658, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-16-0065.1>.
- Yang Z., Bi Y.-M., Wang Q., Liu C.-B., Gu S.-Y., Zheng Y., Lin C., Yin Z., Tian L. Inflight Performance of the TanSat Atmospheric Carbon Dioxide Grating Spectrometer // *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.* 2020. V. 58. № 7. P. 4691–4703. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2020.2966113>
- Yee J.-H., Vervack Jr. R.J., DeMajistre R., Morgan F., Carbary J.F., Romick G.J., Morrison D., Lloyd S.A., DeCola P.L., Paxton L.J., Anderson D.E., Kumar C., Meng C.I. Atmospheric remote sensing using a combined extinctive and refractive stellar occultation technique 1. Overview and proof-of-concept observations. *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107. № D14. P. 4213.
- Yu D., Li H., Li B., Ge M., Tuo Y., Li X., Xue W., Liu Y., Wang A., Zhu Y., Luo B. Measurement of the vertical atmospheric density profile from the X-ray Earth occultation of the Crab Nebula with Insight-HXMT // *Atmos. Meas. Tech.* 2022. V. 15. P. 3141–3159. <https://doi.org/10.5194/amt-15-3141-2022>
- Yue J., Russell III J., Jian Y., Rezac L., Garcia R., López-Puertas M., Mlynczak M.G. Increasing carbon dioxide concentration in the upper atmosphere observed by SABER // *Geophys. Res. Lett.* 2015. V. 42. № 17. P. 7194–7199. <https://doi.org/10.1002/2015GL064696>
- Zavelevich F., Kozlov D., Kozlov I., Cherkashin I., Uspensky A., Kiseleva Yu., Golomolzin V., Filei A. IKFS-2 Radiometric Calibration Stability in Different Spectral Bands // *GSICS Quarterly*. 2018. V. 12. № 1. P. 4–6.
- Zeng Z.-Ch., Lee L., Qi Ch. Diurnal carbon monoxide observed from a geostationary infrared hyperspectral sounder: first result from GIIRS on board FengYun-4B // *Atmosph. Meas. Techn.* 2023. V. 16. № 12. P. 3059–3083. <https://doi.org/10.5194/amt-16-3059-2023>

Zhang Ch., Liu Ch., Chan K.L., Hu Q., Liu H., Li B., Xing Ch., Tan W., Zhou H., Si F., Liu J. First observation of tropospheric nitrogen dioxide from the Environmental Trace Gases Monitoring Instrument onboard the GaoFen-5 satellite // *Light Sci Appl.* 2020. V. 9. 66. <https://doi.org/10.1038/s41377-020-0306-z>

Zhao M., Si F., Wang Y., Zhou H., Wang S., Jiang Y., Liu W. First Year On-Orbit Calibration of the Chinese Environmental Trace Gas Monitoring Instrument On-board GaoFen-5 // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2020. V. 58. № 12. 8531–8540. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2020.2988573>

## ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица П1. Примеры затменных спутниковых приборов в методе прозрачности; НВ – настоящее время.

Прибор	Название	Область спектра, каналы измерений	Измеряемые газы	Период измерений	Примечания
SAGE	Stratospheric Aerosol and Gas Experiment	385, 450, 600, 1000 нм	Профили O <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub> ,	1979–1981	Первые глобальные исследования озоносферы
ATMOS	Atmospheric Trace Molecule Spectroscopy	600–4700 см <sup>-1</sup>	Профили более 30 газов	1985, 1992, 1993, 1994, ~10 дней	Измерения с разрешением Ду ~ 0.01 см <sup>-1</sup>
SAGE III	Stratospheric Aerosol and Gas Experiment III	280–1040 нм	Профили O <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O	2002–2005, 2017–НВ	Измерения Солнца и Луны
GOMOS	Global Ozone Monitoring by Occultation of Stars	250–952 нм	O <sub>2</sub> , O <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub> , температура,	2002–2011	Измерения по звездам
ACE	Atmospheric Chemistry Experiment	750–4400 см <sup>-1</sup>	Профили 44 газов и 21 их изотопов	2003–НВ	Спектральное разрешение 0.02 см <sup>-1</sup>

Таблица П2. Примеры надирных ИК приборов тепловой области спектра; НВ – настоящее время.

Прибор	Название	Спектральная область/ разрешение	Газы	Период измерений	Горизонтальное разрешение, км
IASI	Atmospheric Infrared Sounder	645–2760 см <sup>-1</sup> / 0.5 см <sup>-1</sup>	Более 20 газов	2006 – НВ	12–39
CrIS	Cross-track infrared sounder	650–1095, 1210–1750, 2155–2550 см <sup>-1</sup> / 0.625–2.5 см <sup>-1</sup>	H <sub>2</sub> O, O <sub>3</sub> , CO <sub>2</sub> , CO, CH <sub>4</sub> , HNO <sub>3</sub> , N <sub>2</sub> O, SO <sub>2</sub>	2011 – НВ	14–50
ИКФС-2	ИК Фурье-спектрометр-2	660–2000 см <sup>-1</sup> / 0.4 см <sup>-1</sup>	H <sub>2</sub> O, CO <sub>2</sub> , O <sub>3</sub>	2014 – 2022	~35
SEVERI	Spinning Enhanced Visible and InfraRed Imager	12 каналов	H <sub>2</sub> O, O <sub>3</sub>	2014 – НВ	~4
МСУ-ГС	Многозональное сканирующее устройство гидрометеорологического обеспечения	7 ИК каналов	O <sub>3</sub>	2019 – НВ	~4
GIIRS GIIRS-2	Geostationary Interferometric Infrared Sounder	680–1130, 1650–2250 см <sup>-1</sup> / 0.625 см <sup>-1</sup>	CO <sub>2</sub> , HNO <sub>3</sub> и другие газы	2016 – НВ 2021 – НВ	~12

**Таблица П3.** Примеры приборов для спутниковых лимбовых измерений собственного атмосферного излучения; НВ – настоящее время.

Прибор	Название	Спектральная область	Газы	Период измерений	Высотный диапазон, км
CRISTA	CRyogenic Infrared Spectrometers and Telescopes	4–71 мкм	O <sub>3</sub> , N <sub>2</sub> O, CH <sub>4</sub> , CFC11, HNO <sub>3</sub>	1994, 1997	15–150
SABER	The Sounding of the Atmosphere using Broadband Emission Radiometry	10 каналов, 1.27–16.9 мкм	O <sub>3</sub> , N <sub>2</sub> O, NO, NO <sub>2</sub> , CO, CO <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> , OH	2002–2012	10 – 180
MIPAS	Michelson Interferometer for Passive Atmospheric Sounding	14.6 4.15 мкм 685–2410 см <sup>-1</sup>	Более 30 газов	2002–2012	6–70
MLS	The Microwave Limb Sounder	118 – 2500 ГГц	~20 газов	2004 – НВ	0.001 – 300 мб

**Таблица П4.** Примеры надирных спутниковых приборов для измерений газового состава атмосферы (метод ОРСИ); НВ – настоящее время.

Прибор	Название	Спектральная область, нм	Измеряемые газы	Период измерений	Горизонтальное разрешение, км
GOME-2	Global Ozone Monitoring Experiment	240–790	O <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O, HCHO, SO <sub>2</sub>	2006 – НВ	40 × 80
OMI	Ozone Monitoring Instrument	270–500	O <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , BrO, OCIO, CHOCNO, HCHO	2004 – НВ	13 × 24, 28 × 150 36 × 48
TROPOMI	Tropospheric Monitoring Instrument	270–775, 2305–2385	O <sub>3</sub> , HCHO, NO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , CO	2017 – НВ	3.5 × 7
GOSAT GOSAT-2	Greenhouse gases Observing Satellite	Области 1.6, 2.0, 2.3 мкм	CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , CO	2009 – НВ 2018 – НВ	~10
OCO-2 OCO-3	Orbiting Carbon Observatory	Области 0.76, 1.61 и 2.06 мкм	CO <sub>2</sub>	2014 – НВ 2019 – НВ	OCO-2 – 1.29 × 2.25 OCO-3 – 1.6 × 2.2
EMI (CNSA)	Environment Monitoring Instrument	240–710	O <sub>3</sub> , BrO, ClO, H <sub>2</sub> O, HCHO, NO, NO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub>	2018 – НВ	13 × 48 EMI-1 13 × 24 EMI-2

**Таблица П5.** Примеры спутниковых лимбовых приборов и их характеристики; НВ – настоящее время.

Прибор	Название	Спектральная область, нм	Измеряемые газы	Период измерений	Вертикальное разрешение, км
SCIAMACHY	SCanning Imaging Absorption spectroMeter for Atmospheric Cartography	240–2380	O <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O, CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O, BrO, CO, NO, SO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> CO, OCIO	2002–2012	1–15 в зависимости от геометрии измерений
OSIRIS	Optical Spectrograph and InfraRed Imager System	275–810	O <sub>3</sub> , BrO	2001 – НВ	~2
OMPS	Ozone Mapping and Profiler Suite	303–380, 297–420	O <sub>3</sub>	2011 – НВ	1–3

## SATELLITE INVESTIGATION OF ATMOSPHERIC GAS COMPOSITION

Yu. M. Timofeyev<sup>1</sup>, G. M. Nerobelov<sup>1, 2, 3, \*</sup>

<sup>1</sup>*Saint-Petersburg State University, 199034, University Embankment, 7/9, Saint-Petersburg, Russia*

<sup>2</sup>*SPC RAS - Scientific Research Centre for Ecological Safety of the Russian Academy of Sciences,  
187110, Korpusnaya st., 18, Saint-Petersburg, Russia*

<sup>3</sup>*Russian State Hydrometeorological University, 195196, Malookhtinskiy Prospekt, 98, Saint-Petersburg, Russia*

*\*e-mail: akulishe95@mail.ru*

The gas composition of the Earth's atmosphere largely determines numerous weather and climate processes and phenomena. The importance of studying the composition of the atmosphere has stimulated the creation in recent decades of global and regional observation systems for water vapor, ozone and the substances depleting it, carbon dioxide and other greenhouse gases, and dozens of pollutant gases. A significant role in the global monitoring of the gas composition of the atmosphere is played by satellite observation systems, which make it possible to obtain regular, global and regional high-quality (in terms of accuracy and spatial resolution) data on its gas composition. The review is devoted to the analysis of modern remote satellite passive methods for determining the gas composition of the atmosphere and the main results obtained to date. A modern classification of passive and active satellite methods, the physical and mathematical foundations of passive methods, the main characteristics of the used orbits of space carriers and the types of geometry of satellite observations are given.

The advantages and disadvantages of various satellite passive methods using measurements of atmospheric transparency characteristics (eclipse method), Earth's own radiation, as well as reflected and scattered solar radiation are analyzed for various satellite measurement geometries in a wide spectral region from UV to radio waves. A brief history of the creation of special modern satellite equipment is given, as well as their characteristics — information content, altitude measurement ranges, errors and vertical resolution. Numerous results of global and regional monitoring of the atmospheric gas composition and examples of their use in various problems of atmospheric physics and climatology are presented.

**Keywords:** atmospheric gas composition, satellite passive methods, scattered and reflected solar radiation, Earth thermal radiation