



Изучение атмосферы Земли: эксперимент “КРИСТА”

Д. ОФФЕРМАН,
профессор, доктор
Ф. ОЛЬШЕВСКИЙ
Университет Вупперталя, Германия

Результаты уникальных космических экспериментов по наблюдению характеристик изменчивости средней атмосферы и озоносферы были получены с помощью сверхчувствительной инфракрасной аппаратуры, разработанной в Германии, выводимой на околоземную орбиту и возвращаемой на Землю космическими кораблями “Спейс Шаттл”. Орбитальные эксперименты проводились в ноябре 1994 г. и авгу-



сте 1997 г. и сопровождалась наблюдениями с Земли различных иссле-

довательских групп во многих странах, включая Россию.

ПРОБЛЕМА ИЗМЕНЧИВОСТИ АТМОСФЕРЫ

В 1980-е гг. группа исследователей земной атмосферы Университета Вупперталя совместно с советскими учеными и учеными других стран выполнила множество ракетных экспериментов.

© Офферман Д., Ольшевский Ф.

Немецкие ученые разрабатывали и усовершенствовали инфракрасные спектрометры, измерявшие состав атмосферы в диапазоне высот 50–200 км. Анализ результатов ракетных экспериментов с инфракрасной аппаратурой на борту неожиданно показал зна-

чительное расхождение между измеренными значениями концентрациями озона и водяного пара и теоретическими модельными расчетами. Используемая модель дала лишь общее представление об атмосфере – однородной в горизонтальном направлении, зональной,





то есть не меняющейся в западно-восточном направлении и меняющейся только по вертикали. Ее вариабельность в меридиональной области (север-юг) была не слишком высокой. Измеренные вариации параметров атмосферы были весьма существенными, в том числе на малых масштабах! (Данные полетных наблюдений подтвердили значительную изменчивость свойств атмосферы.)

Чтобы глобально исследовать столь малые структуры, необходимо было бы запускать неразумно много ракет, поэтому решили применить технику дистанционных орбитальных наблюдений.

Известные в то время инфракрасные дистанционные спутниковые ме-

тоды обладали плохим пространственным разрешением и не могли решить эту задачу. Ракетные эксперименты это подтверждали.

Одним из известных примеров ярко выраженной двухмерной атмосферной структуры считается озоновая дыра, которую не смогли выявить до проведения комплексного изучения средней атмосферы по проекту "КРИСТА" ("CRISTA", Cryogenic Infrared Spectrometers and Telescopes for the Atmosphere – криогенные инфракрасные спектрометры и телескопы для атмосферы).

АППАРАТУРНЫЙ КОМПЛЕКС "КРИСТА"

К началу 1990-х гг. немецкие ученые в рам-

ках университетского, то есть сравнительно недорогого, проекта "КРИСТА" разработали спутниковый эксперимент и приборы с высоким пространственным разрешением. Сотрудники и студенты Университета Вупперталя выполнили большую часть проектирования и конструирования, включая работы с комплексом аппаратуры в Центре управления полетами Космического центра им. Дж. Кеннеди (США). При изготовлении приборов они уделяли самое серьезное внимание надежности и следовали правилам известного немецкого конструктора ракетно-космической техники В. фон Брауна – максимальная простота разработки и многочисленными и всесторонними

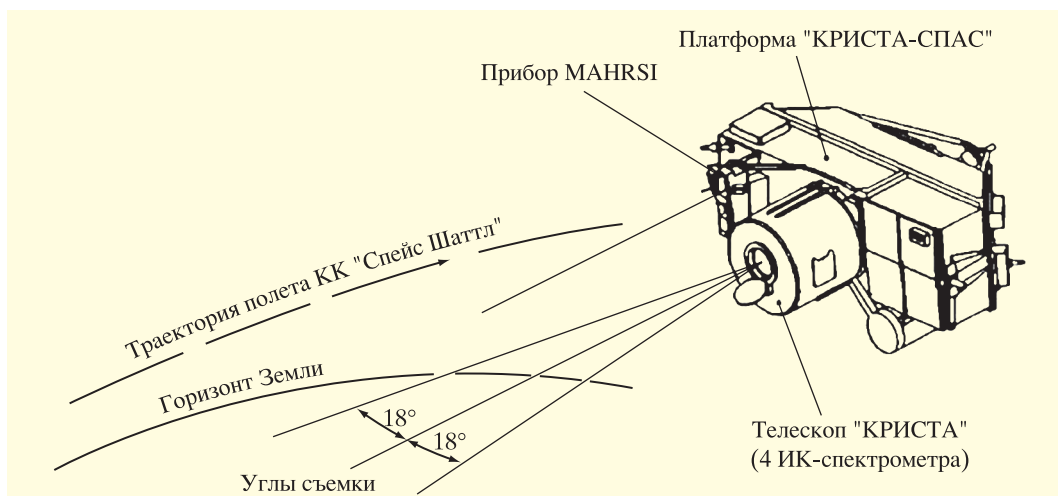


Схема измерений, выполненных с помощью комплекса приборов "КРИСТА" в свободном орбитальном полете. "КРИСТА" состоит из трех телескопов с разделением направлений визирования 18°. Это дает разрешение по горизонтали 650 км в тангенциальной точке при сканировании лимба видимого диска Земли. Рисунок ESA.





Сборка комплекса аппаратуры "КРИСТА" на платформе-носителе "КРИСТА-СПАС" в Центре пилотируемых космических полетов им. Л. Джонсона (штат Флорида). Фото NASA.

испытания. Они выбрали один из самых традиционных типов спектрометров с решетками, для максимальной надежности использовано 26 детекторов. Была создана защита от энергичных частиц магнитосферы, что особенно важно при

полете над Бразильской магнитной аномалией.

Основная идея эксперимента – выявление малых и средних пространственных структур в строении атмосферы и их изменчивости в глобальном масштабе лимбовым спектральным сканированием в области страто-

мезосферы и нижней термосферы с разрешением 1–2 км. Горизонтальное разрешение улучшили, разместив на борту три телескопа со спектрометрами, измерявших с рекордной скоростью параметры атмосферы в трех разных направлениях. Ее существен-



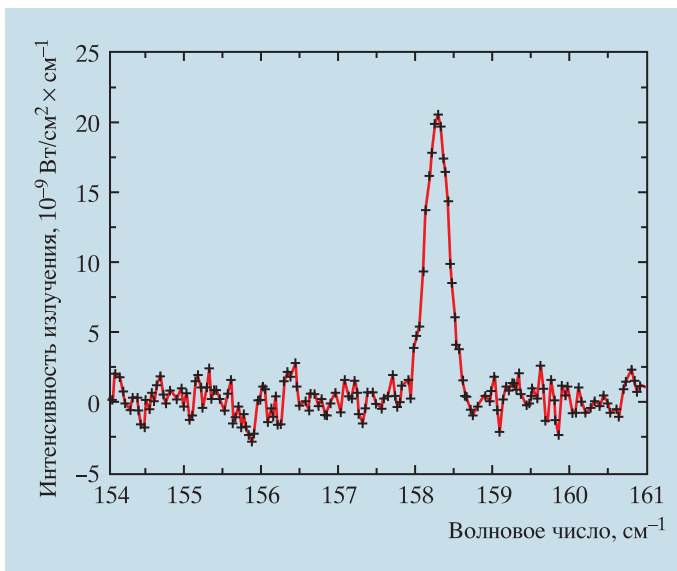


Диаграмма одиночного спектра линии излучения атомарного кислорода ($\lambda = 63$ мкм), по данным эксперимента "КРИСТА". ESA, NASA.

ное увеличение умножало число шагов и частоту измерений вдоль трассы полета по орбите. Это потребовало охлаждения оптических деталей и высокочувствительных инфракрасных детекторов до очень низких температур. Динамические пространственные структуры атмосферы, характеризующие ее динамику, могут быть обнаружены только методом индикации распределения малых (следовых) примесей в трех измерениях. В атмосфере существуют малые примеси, подходящие для этого. Правда, каждая из них ограничена диапазоном высот, поэтому заданное количество различных газовых примесей необходимо измерять одновременно.

В ходе эксперимента по проекту "КРИСТА" были

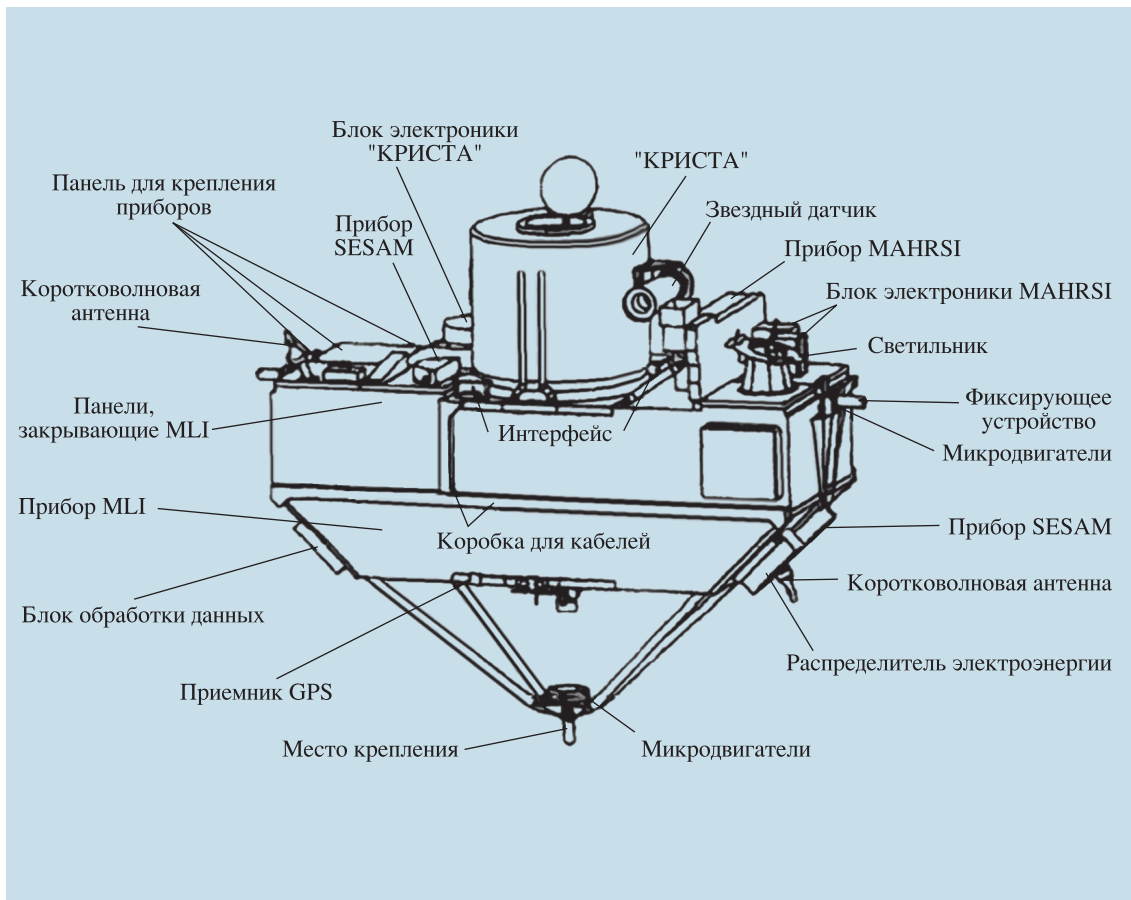
использованы четыре инфракрасных спектрометра (диапазон длин волн – 4–14 мкм и 14–71 мкм) с 26 спектральными каналами, регистрирующими сигналы от 17 различных малых газовых примесей атмосферы. Многие из этих примесей важны не только для исследования динамики атмосферы, но и для изучения ее химических свойств и энергетического баланса. Детекторы спектрометров представляли собой миниатюрные кристаллы объемом 1 мм³, изготовленные на основе кремния, германия, галлия и других элементов и охлаждаемые до очень низких температур с помощью сверхкритического гелия (13 К) и переохлажденного гелия (ниже 3 К). Кроме детекторов до криогенных температур охлаждадали

спектрометры, телескопы и детали оптических систем. Такие меры дали возможность получить желаемую скорость измерений, то есть измерять в секунду все газовые составляющие с пространственным разрешением 2 км в вертикальном направлении (по лимбу) и 400 км – в горизонтальной плоскости.

Криогенное охлаждение приборов позволило расширить измерения в дальнем ИК-диапазоне (до 71 мкм) и измерить эмиссии атомарного кислорода на длине волны 63 мкм в нижней термосфере (100–180 км). Атомарный кислород – важный компонент атмосферы на данных высотах, и его особенно трудно фиксировать. Это связано с тем, что спектральная линия с длиной волны 63 мкм также характерна для астрономических объектов (например, холодных облаков в процессе раннего формирования звезды). Исследовать излучение атомарного кислорода в термосфере важно и по этой причине.

Основная цель проекта "КРИСТА" – проведение





Расположение научных приборов "КРИСТА" и бортовых систем на платформе-носителе "КРИСТА-СПАС". Рисунок ESA, NASA.

глобальных разведочных измерений параметров атмосферы и характеристик их изменчивости. Для этого относительно короткие орбитальные полеты (одна-две недели) на КК "Спейс Шаттл" были вполне достаточными. Объем грузового отсека корабля позво-

лял разместить относительно крупные научные приборы и оборудование, поэтому комплекс аппаратуры "КРИСТА" общей массой 1350 кг разработан по стандартным требованиям для полета "Спейс Шаттла".

Инструменты, размещенные в большом вакуумном резервуаре с криогенным охлаждением, были оснащены эластичными деталями для соединения осей и прерывателей, что обеспечивает надежность перемещения элементов устройства в вакууме.

В комплекс входили цистерны, содержащие 755 л сверхкритического гелия (5–13 К, 5 бар) и 55 л охлажденного гелия (2,5–4,2 К). При возникновении микротечей в сварных швах гелиевых резервуаров индикатор сразу их фиксировал. В гелий добавляли более тяжелый жидкий азот, затем всю систему переворачивали, пока азот не закрывал микротечь. Комплекс приборов "КРИСТА" с бортовыми системами обслуживания устанавливали на выносной платформе





“КРИСТА-СПАС” (“CRISTA-SPAS”) длиной 3 м, диаметром 1,4 м и массой 1900 кг, изготовленной консорциумом DARA/Daimler-Benz Aerospace (Германия). Платформу “КРИСТА-СПАС” оборудовали источниками питания, системами управления, ориентации, связи, регистрации данных и терморегулирования, двигателями маневрирования.

Уникальная особенность эксперимента “КРИСТА” – это исследование атмосферы в свободном полете в течение основной фазы миссии на расстоянии около 100 км позади КК “Спейс Шаттл”, работа двигателей которого не влияла на измерения. Комплекс “КРИСТА” из грузового отсека корабля “Спейс Шаттл” выводили в автономный полет рукой-манипулятором. Полет проходил на круговой околоземной орбите высотой около 300 км с наклоном 57°. После 10 сут исследований комплекс возвращали в грузовой отсек КК “Спейс Шаттл” и затем доставляли на Землю.

Направление сканирования приборами “КРИСТА” участков атмосферы было противоположно направлению орбитального полета корабля “Спейс Шаттл” из-за возможного при высоких скоростях эффекта следа. Измерения охватывали область от 74° с.ш. до 74° ю.ш., информацию записыва-

ли на борту в реальном времени. После посадки челнока ее передавали в Немецкий центр данных глубокой разведки и Центр авиационных и космических полетов в Оберпфaffenхофене (Германия).

При климатических и вибрационных испытаниях аппаратуры “КРИСТА” были некоторые трудности, в основном из-за ее габаритов. Самый большой вибрационный стенд в Германии едва достигал требуемых NASA уровней вибрации. Крупнейшая термокамера смогла вместить аппаратуру “КРИСТА”, но работа ее криогенной системы в течение многочасовых термических и вакуумных испытаний проходила с некоторыми трудностями.

Концепция конструирования и производства приборов подтвердила правильность выбора. Два полета с аппаратурой “КРИСТА” были успешными: в них не было ни одного отказа (кроме потери детектора уже во время приземления челнока в первом полете).

Специальная часть испытаний и проверок приборов “КРИСТА” – их калибровка в специальной камере. Ее осуществляли до и после космического полета для каждого из трех направлений полетного визирования. Используемый источник излучения – черное тело большой площади с переменной температу-

рой, охлаждаемое криогенным методом. Спектральную калибровку выполняли с помощью газовой ячейки, которая содержала активные в инфракрасной области атмосферные газы. Лабораторные спектральные калибровки контролировали в течение полета сравнением с измеряемыми атмосферными спектрами. Направления визирования телескопов определяли в лаборатории с применением точечных источников на значительном расстоянии. Эти направления контролировали в полете по Юпитеру и Марсу.

Погрешности измерения температуры составили 2–8 К, относительной концентрации (отношения смеси углекислого газа) – 15–25% в зависимости от высоты, отношения смеси озона – 3–17% на высоте 40–65 км и 17–47% на высоте 65–90 км в дневное время, 4–15% на высоте 40–70 км и 15–27% на высоте 70–90 км в ночное время.

ЭКСПЕРИМЕНТЫ “КРИСТА”

Инструменты комплекса “КРИСТА” работали на борту космических кораблей “Атлантис” (STS-66) с 3 по 14 ноября 1994 г. и “Дискавери” (STS-85) с 7 по 19 августа 1997 г. Космические исследования проводили днем и ночью в диапазоне высот от 8 км до 180 км. Во вто-





а



б

Платформа "КРИСТА-СПАС" во время контрольной проверки: а) 3 ноября 1994 г., полет КК "Атлантис" (STS-66); б) 8 августа 1997 г., полет КК "Дискавери" (STS-85). Фото NASA.

ром полете использовали также прибор MAHRSI (Морская исследовательская лаборатория, США), регистрирующий в средней атмосфере концентрацию окиси азота (NO) в ультрафиолетовой области спектра.

Группы ученых из разных стран проводили согласованные измерения параметров атмосферы на 46 наземных станциях с запуском 78 шаровозондов и аэростатов и 43 ракет, чтобы контролировать и сопоставлять полученные данные из

космоса и с Земли. Самолет-лаборатория выполнил пять полетов в районе тропопаузы длительностью несколько часов, причем траектории полетов были совмещены с траекторией "КРИСТА". В этой кампании участвовали многие международные научные группы, в том числе из России.

Приборы "КРИСТА" обеспечили более полные, надежные и детальные измерения по сравнению с измерениями, выполненными с помощью приборов, имевшихся в то время в распоряжении ученых.

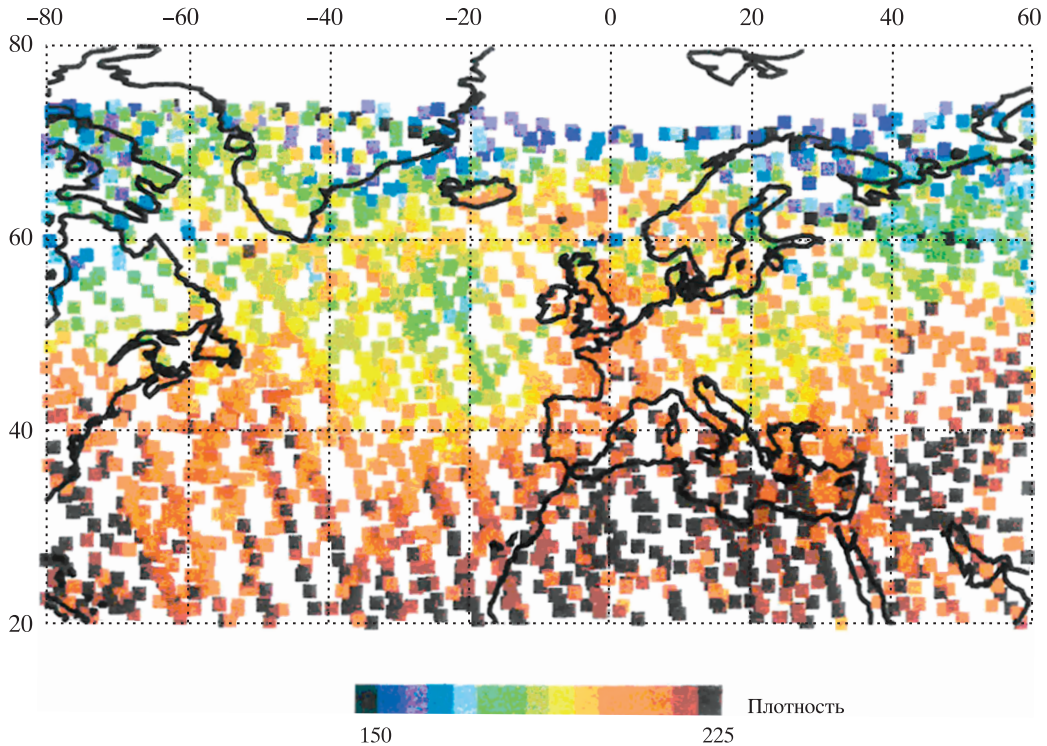
Величины измеренных температур и концентраций газов стали учитывать при анализе атмосферной химии и энергетического ба-

ланса атмосферы. Анализ наблюдений аппаратурой "КРИСТА" решил главную задачу, поставленную исследователями, – выявление деталей структуры и циркуляции атмосферы: перенос воздушных масс, изменчивость ветров, волн, турбулентности и ее сезонные особенности в разных слоях и на разных высотах.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Карта горизонтального распределения в Северном полушарии малой газовой компоненты атмосферы N₂O на высоте около 30 км (6 ноября 1994 г.) показывает большой меридиональный градиент с высокими значениями этого





Карта горизонтального распределения малой атмосферной примеси CFC₁₁ на 16-км высоте над Западной Европой и Атлантикой. Увеличенная плотность этой газовой примеси наблюдается в нижней стратосфере над Великобританией, Францией и Испанией, уменьшенная плотность – к западу и востоку от этого района над Восточной Атлантикой и Восточной Европой. 10–13 августа 1997 г. Рисунок ESA, NASA.

параметра в низких широтах. В полярных широтах его величины оказались очень низкими, что указывает на их связь с циркумполярным вихрем – обширной долговременной вращающейся структурой, внутри которой идет нисходящий поток холодного воздуха. Именно здесь вследствие низких температур формируется озоновая дыра в Южном (а иногда и в Северном) полушарии. Примечательная особенность такой структуры – отклонение

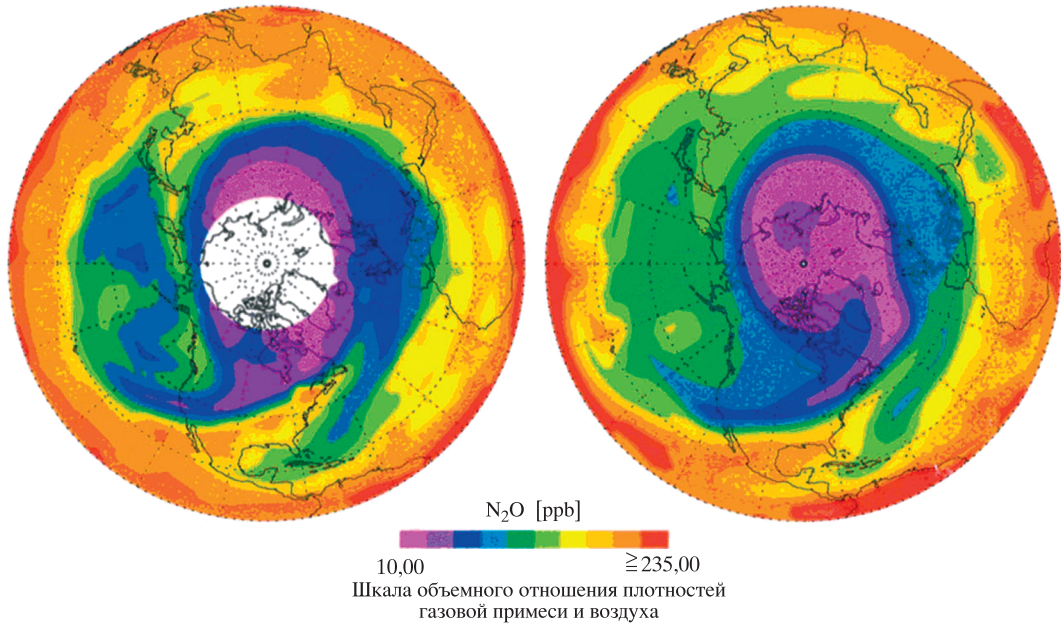
10

горизонтального распределения от зональной симметрии. Два спиральных рукава атмосферной циркуляции, называемые стримерами, с малыми газовыми примесями постепенно увеличиваются от высоких к более низким широтам с перемещением воздушных масс по часовой стрелке. Большой стример образуется в Восточной Азии, стример меньшего размера формируется в южной части США и Мексике и распространяется над Атлантическим океаном

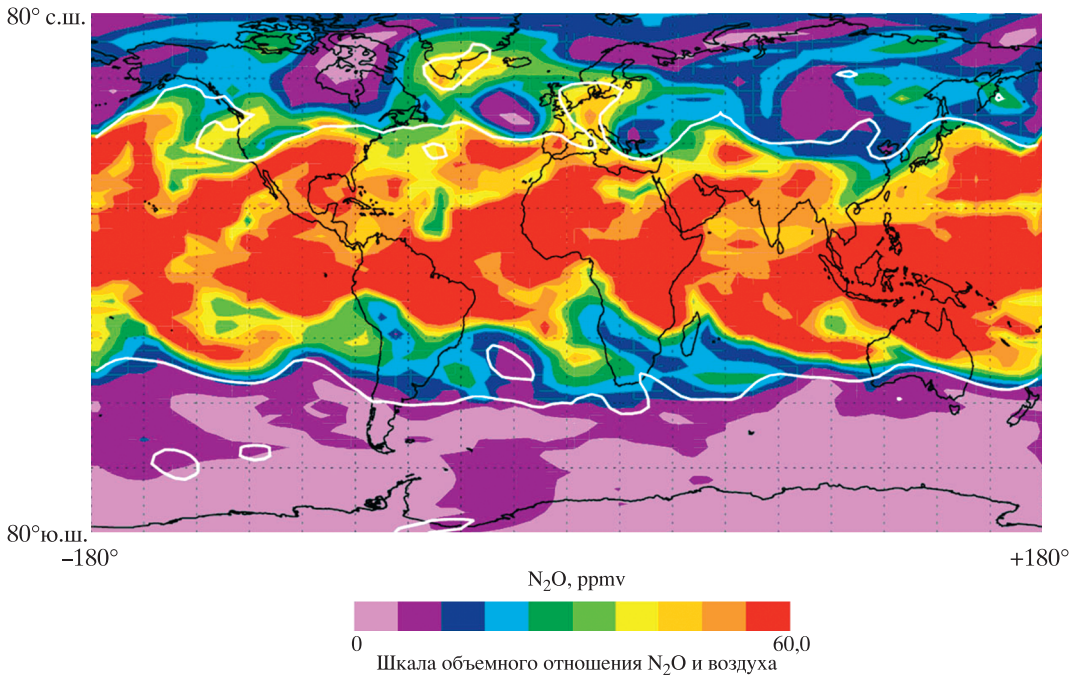
на северо-восток. Чтобы выявить такие структуры, необходима высокая горизонтальная разрешающая способность, свойственная методу “КРИСТА”. Полученные с его помощью данные о структуре были довольно близки к компьютерной модели (опубликована в 1999 г.) и позволили в дальнейшем усовершенствовать.

Другой пример – это два стримера, развивающиеся над Тихим океаном и перемещающиеся



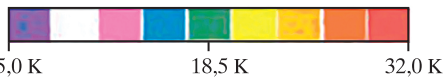
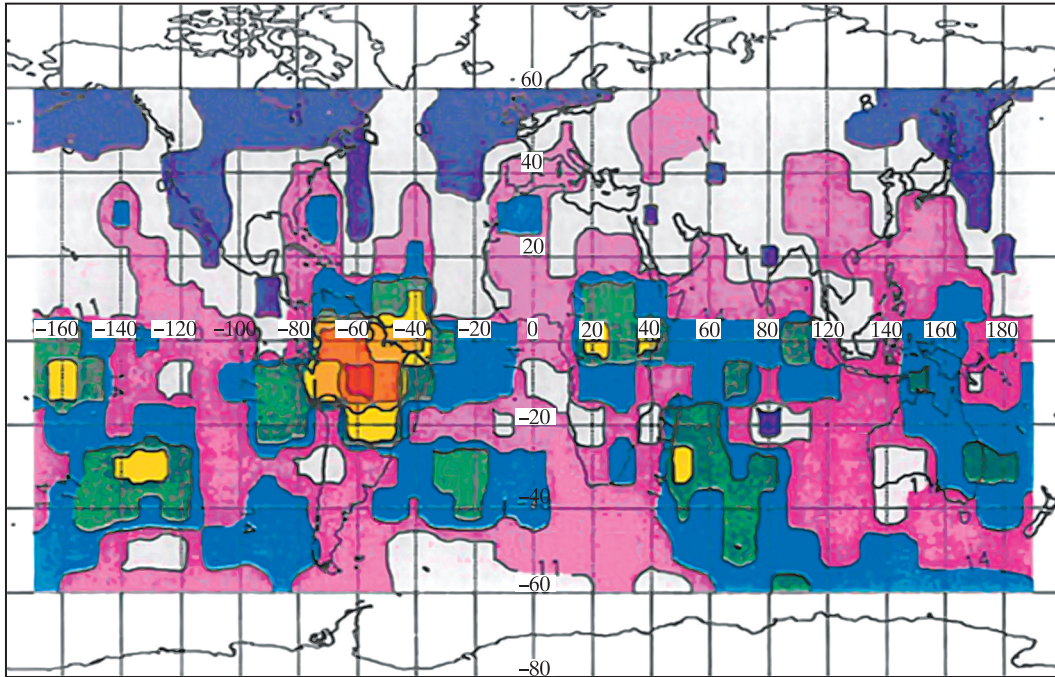


Карты распределения малой газовой примеси N_2O на 30-км высоте в Северном полушарии: слева – данные измерений 6 ноября 1994 г., справа – модельные расчеты. В полярных широтах развивается циркумполярный вихрь (фиолетовый цвет). Рисунки ESA, NASA.



Распределение малой газовой примеси N_2O на высоте 12 км. 12 августа 1997 г. (ассимилированные данные). Тропауза показана белыми линиями. Рисунок ESA, NASA.





Шкала температурных стандартных отклонений от средних значений в горизонтальных ячейках $20^\circ \times 20^\circ$ по широте и долготе

Карта мира с глобальным распределением температурных флуктуаций вблизи мезопаузы на высоте 87 км. Рисунок ESA, NASA.

от тропиков к северным средним широтам. Один стример формируется в южной части США и распространяется на северо-восток, к Атлантическому океану. Второй, гораздо больший, образуется в Восточной Азии, простирается над Алеутскими островами и Аляской на северо-восток, затем поворачивает на юг, движется вдоль побережья Северной Америки

и, наконец, перемещаясь в западном направлении, возвращается к центру Тихого океана. Такой стример, очень “тонкий” по сравнению с его длиной, ученые назвали филаментом (нитью). Он может переносить воздух на значительные расстояния.

Малые примеси как индикаторы выявляют особенности атмосферной динамики на раз-

ных высотах и широтах. В качестве примера рассмотрим распределение на экваторе вблизи тропопаузы 12 августа 1997 г. водяного пара на малых высотах (около 12 км) в тропиках и субтропиках. Изменчивость плотности водяного пара оказалась повышенной на средних и малых пространственных (около 400 км) масштабах. Языки влажных воздушных





масс развивались к югу от экватора и распространялись в юго-восточном направлении. Они, как правило, окружают области сухого воздуха, например к югу от Индонезии. Формирование или исчезновение таких влажных областей может происходить в распространяющихся потоках воздуха.

Результаты наблюдений с высоким пространственным разрешением показали, что горизонтальные атмосферные турбулентные вихри достигают больших размеров. Они ха-

рактеризуются крупными меридиональными и вертикальными структурами, то есть радикальные динамические изменения зависят от широты и высоты.

Самые малые структуры были обнаружены в мезопаузе и проанализированы. На высоте около 80 км изменчивость структур малых масштабов в значительной степени возникает вследствие влияния атмосферных волн, распространяющихся в атмосфере вверх и, как правило, значительно увеличивающих свою

амплитуду при уменьшении плотности с высотой. Установлено, что стандартное отклонение от среднего значения любого параметра, такого, например, как температура, может служить мерой волновой активности. При несложных вычислениях это дает упрощенную оценку температурных амплитуд. Например, на высоте 87 км средние температуры в ячейках $20^\circ \times 20^\circ$ долготы и широты достигают 132 К, волновые амплитуды достигают до 145 К. Это показал анализ измерений во втором полете



Группа сотрудников и студентов Университета Вупперталя (Германия), участвовавших в эксперименте "КРИСТА". На заднем плане – КК "Дискавери" на стартовом комплексе. Космический центр им. Дж. Кеннеди. 7 августа 1997 г. Фото NASA.





“КРИСТА”. Несимметричное распределение данных измерений в долготном и меридиональном направлении указывают на суперпозицию различных типов волн, таких как планетарные, гравитационные волны и/или приливы. Внутренние пятна с максимумами температуры были обнаружены недалеко от района Амазонии, вблизи экватора над Африкой, Индонезией и средней частью Тихого океана. Они расположены почти регулярно в зональном (долготном) направлении и, таким образом, указывают на закономерность в общей хаотической картине.

“КРИСТА” – многосторонний эксперимент, в ходе которого получен солидный объем информации, она активно и эффективно используется исследователями в науках об атмосфере. Ученые из международной группы специалистов сотрудничали при анализе и оценке данных эксперимента “КРИСТА”, их результаты опубликованы более чем в 150 статьях.

ИТОГИ

Два успешных космических эксперимента “КРИСТА” (в первой половине ноября 1994 г. и в первой половине августа 1997 г.) впервые дали возможность детально исследовать атмосферу практически в глобаль-

ном масштабе в течение осенне-зимнего (весенне-летнего) и летнего (зимнего) сезонов в Северном (Южном) полушарии соответственно. Были созданы архивы и банки данных, доступные всем пользователям. Сравнение пространственных распределений параметров атмосферы в разные сезоны указывает на заметное отличие строения и состава атмосферы, увеличивающееся с ростом широты в обоих полушариях. Уменьшение отношения смеси углекислого газа начинается гораздо ниже – в области 70 км – по сравнению с данными большинства современных моделей – 85–90 км. Проанализированы характеристики мезосферных инверсий температуры, проведено сравнение этих характеристик с модельными расчетами общей циркуляции атмосферы HAMMONIA. Сопоставление средних профилей содержания озона (день – ночь) с рядом модельных профилей показало, что данные эксперимента “КРИСТА” намного превышают модельные значения.

Полученная информация о параметрах мезосферы и нижней термосферы уникальна по объему и полноте описания их свойств. Она необходима для совершенствования трехмерных численных химико-климатических моделей, мо-

делей процессов формирования неравновесных колебаний состояния молекул газов, а также при решении различных задач переноса неравновесного излучения в верхней атмосфере. Высокая изменчивость атмосферы – особенность многих планет, если они вращаются с той же скоростью, что и Земля. Особенностью средней и верхней атмосферы Земли считают взаимодействие различных слоев (или высотных режимов), как, например, возможное влияние стратосферы на тропосферу, а фактически – на погоду.

Помимо понимания физических процессов в атмосфере и ее характеристик (параметров) важно определить математические коэффициенты, описывающие их флуктуации, вариабельность. Такие коэффициенты (например, коэффициент Ляпунова) вводятся в атмосферные модели и в конечном итоге способствуют улучшению прогностической способности моделей. Прогноз крупно- и маломасштабных изменений – конечная цель климатических моделей.

Данные дистанционного зондирования с высоким пространственным разрешением, полученные в экспериментах “КРИСТА”, подтвердили более ранние измерения, выполненные с помощью метеорологических баллонов и





ракет: атмосферная изменчивость характерна для всех высот, долгот, широт. Приборы “КРИСТА” обнаружили мелкомасштабные структуры в атмосфере, после чего возникла необходимость выполнять продолжительные климатологические спутниковые наблюдения. NASA пыталось реализовать их в эксперименте HIRDLS, когда наблюдения атмосферных процессов велись в семи простран-

ственных направлениях. Но, к сожалению, этот эксперимент закончился аварией. Таким образом, результативных измерений с высоким разрешением и расширенным географическим и временным охватом до сих пор не было. Остается надеяться, что в будущем проведут соответствующий эксперимент и молодые специалисты команды “КРИСТА” увидят данные долговременных орбитальных измерений

с характеристиками, превышающими рекордные достижения по программе “КРИСТА”.

Сейчас инструменты комплекса “КРИСТА” и космическая платформа-носитель “КРИСТА-СПАС” экспонируются в Музее техники в Мюнхене.

*Перевод с английского
С.П. Перова*

*Иллюстрации
предоставлены
Американским геофизическим союзом и NASA*

Информация

Запуск АМС “Хаябуса-2”

3 декабря 2014 г. с космодрома Танэгасима с помощью ракеты-носителя “Н-2А” запущена японская АМС “Хаябуса-2” (“Hayabusa-2” – Сокол) для исследования астероида (162173) 1999JU3. На станции (1 × 1,5 × 1,6 м; 600 кг) 4 научных прибора: гиперспектральный ИК-микроскоп для исследования минерального состава астероида; мульти-спектральная широкоугольная камера для составления геологической карты

поверхности; радиометр для измерения поверхностной температуры; магнитометр. АМС доставит на астероид посадочный аппарат MASCOT массой 10 кг с научными приборами массой 3 кг, который будет перемещаться по поверхности прыжками. “Хаябуса-2” приземлится на астероид в середине 2018 г. и пробудет там 1,5 года. При приближении к астероиду с расстояния 100 м в него будет выпущен со скоростью 2 км/с металлический снаряд-импактор, который произведет небольшой взрыв на поверхности небесного тела. Собранные с помощью подвижного устройства образцы грунта будут помещены в контейнер. В декабре 2019 г. АМС отправится в обратный путь и вернется на Зем-

лю в декабре 2020 г. Ожидается, что станция сможет передать 0,7 Гбит научной информации со средней скоростью 32 кбит/с.

Астероид 1999JU3 группы Аполлона удален от Земли на 300 млн км (период обращения – 474 сут, период вращения – 7,63 ч). Попасть на тело размером 920 м, движущееся со средней скоростью 27 км/с, сложно. Станции за 6 лет придется преодолеть 5,2 млрд км. Японские ученые считают, что получение проб с астероида позволит узнать, какими были тогда органические вещества и вода, как они взаимодействовали. Это даст возможность вплотную подойти к разгадке возникновения жизни.

Пресс-релиз JAXA,
4 декабря 2014 г.

