

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Тимофеев Ю.М.

**ГЛОБАЛЬНАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ПАРАМЕТРОВ
АТМОСФЕРЫ И ПОВЕРХНОСТИ**

Санкт-Петербург

2010

РЕЦЕНЗЕНТ: д.ф.м.н., профессор УСПЕНСКИЙ А.Б.
(НИЦ «Планета», Москва)

Печатается по решению методической комиссии Физического факультета СПбГУ.

Рекомендовано Ученым советом Физического факультета СПбГУ.

**Глобальная система мониторинга параметров атмосферы и поверхности
– СПб, 2009 – 129 с.**

В учебно-методическом пособии рассмотрена специфика измерений в физике атмосферы (науках о земной атмосфере), цели и задачи этих измерений, различные типы измерений, требования к измерениям различных параметров атмосферы и поверхности, возникающие в метеорологии, климатологии, океанологии и т.д., а также при решении различных прикладных задач. Подробно рассмотрена международная Глобальная Система Наблюдений (ГСН) и ее основные составные части. Приведена информация о системах наземных метеорологических и аэрологических наблюдений, самолетной и судовой системах наблюдений, озонметрической сети, сети наблюдений аэрозольных характеристик и т.д., а также спутниковой системе наблюдений.

Подробно рассмотрены принципы и схемы дистанционных измерений, современная спутниковая система наблюдений, состоящая из оперативных геостационарных и полярных, а также научно-исследовательских спутников. Приведена классификация различных дистанционных методов – активных и пассивных. Рассмотрены современные реализации различных дистанционных методов и характеристики аппаратуры для их реализации.

В заключение приведены примеры различных дистанционных измерений. В приложениях даны таблицы современных и планируемых спутниковых экспериментов, список сокращений и использованная литература.

Автор выражает глубокую благодарность Е.М. Шульгиной за огромную помощь в подготовке рукописи пособия к публикации, а также Наумовой Т.А. и Поберовской Л.Н. за изготовление отдельных рисунков. Особую благодарность автор выражает профессору, доктору ф.-м. наук А.Б. Успенскому за внимательное рецензирование работы и ряд ценных замечаний, позволивших существенно улучшить пособие.

Посвящается академику Кириллу Яковлевичу Кондратьеву, внесшему выдающийся вклад в развитие Глобальной системы мониторинга параметров атмосферы и поверхности.

Список основных монографий К.Я. Кондратьева в области дистанционных методов измерений и глобальной системы мониторинга

Кондратьев К.Я. Метеорологические исследования с помощью ракет и спутников. Л.: Гидрометеиздат, 1962, 252 с.

Кондратьев К.Я. Метеорологические спутники. Л.: Гидрометеиздат, 1963, 312 с.

Кондратьев К.Я., Тимофеев Ю.М. Термическое зондирование атмосферы со спутников. Л.: Гидрометеиздат, 1970, 365 с.

Кондратьев К.Я., Виноградов Б.В. Космические методы землеведения. Переведена на англ. язык. Л.: Гидрометеиздат, 1971, 191 с.

Кондратьев К. Я. и др. Исследования природной среды с пилотируемых орбитальных станций. Переведена на английский язык / Береговой Г. Т., Бузников А. А., Васильев О. Б., Виноградов Б. В., Волков В. Н., Гонин Г.Б./ Л.: Гидрометеиздат, 1972, 400 с.

Кондратьев К.Я., Тимофеев Ю.М. Метеорологическое зондирование атмосферы из космоса. Л.: Гидрометеиздат, 1978, 280 с.

Кондратьев К.Я. и др. Метеорологическое зондирование подстилающей поверхности из космоса / Григорьев А. А., Рабинович Ю. И., Шульгина Е. М./ Л.: Гидрометеиздат, 1979, 274 с.

Кондратьев К.Я. Спутниковая климатология. Л.: Гидрометеиздат, 1983, 264 с.

Кондратьев К.Я., Мелентьев В.В. Космическая дистанционная индикация облаков и влагосодержания атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1987, 264 с.

Кондратьев К.Я. и др. Биосфера. Методы и результаты дистанционного зондирования / Федченко П.П., Козодеров В.В., Топчиев А.Г./ М.: Наука, 1990, 223 с.

Кондратьев К. Я. и др. Космическая дистанционная индикация акваторий и водосборов (микроволновые методы) / Мелентьев В.В., Назаркин В.А./ Л.: Гидрометеиздат, 1992, 248 с.

Kondratyev K.Ya. et al. Optical Properties and Remote Sensing of Inland and Coastal Waters / Bukata R.P., Jerome J.H., Pozdnyakov D.V. et.al./ CRC Press, 1995, 362 pp.

Kondratyev K.Ya. et al. High Latitude Climate and Its Remote Sensing Monitoring / Johannessen O.M., Melentyev V.V./ Praxis Publ. Ltd., Chichester, 1996, 200 pp.

Kondratyev K.Ya. et al. Global Change and Remote Sensing / Buznikov A.A., Pokrovsky O.M./ PRAXIX Publishing Ltd., Chichester, West Sussex, England, 1996, 370 pp.

Kondratyev K.Ya., A. Sumi, Pokrovski O.M. Global change and climate dynamics: Optimization of observing systems. Center for Climate System Research, Univ. of Tokyo, Report N 3, February 1997, 213 pp.

Kondratyev K.Ya., Filatov N.N. Limnology and Remote Sensing: A Contemporary Approach. Springer/PRAXIS, Chichester, U. K. 1999, 395 pp.

Kondratyev K. Ya. et al. Remote Sensing of Soils and Vegetation / Curran P., Foody G. M., Fedchenko P. P., Kozoderov V. V./ Francis & Taylor, 1990, 203 pp.

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. ИЗМЕРЕНИЯ В ФИЗИКЕ АТМОСФЕРЫ (НАУКАХ ОБ АТМОСФЕРЕ).....	5
2. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ В ФИЗИКЕ АТМОСФЕРЫ	8
3. ТРЕБОВАНИЯ К ИЗМЕРЕНИЯМ В ФИЗИКЕ АТМОСФЕРЫ.....	10
<i>Измерения давления, влажности и температуры у поверхности.....</i>	<i>14</i>
<i>Измерения температурного профиля</i>	<i>14</i>
<i>Измерения влажности атмосферы</i>	<i>17</i>
<i>Измерения озона</i>	<i>19</i>
<i>Измерения характеристик аэрозоля</i>	<i>20</i>
<i>Измерения малых газовых составляющих атмосферы.....</i>	<i>21</i>
<i>Измерения характеристик облаков.....</i>	<i>22</i>
<i>Измерения характеристик осадков.....</i>	<i>23</i>
<i>Измерения характеристик поля ветра</i>	<i>24</i>
<i>Измерения характеристик поверхности</i>	<i>25</i>
<i>Требования при мониторинге глобальных изменений.....</i>	<i>25</i>
4. ГЛОБАЛЬНАЯ СИСТЕМА НАБЛЮДЕНИЙ	31
5. СПУТНИКОВАЯ СИСТЕМА НАБЛЮДЕНИЙ	45
6. КЛАССИФИКАЦИЯ ДИСТАНЦИОННЫХ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЙ	51
7. СПУТНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ И ПОВЕРХНОСТИ	56
<i>Приборы геостационарных спутников</i>	<i>57</i>
<i>Приборы оперативных полярных спутников</i>	<i>61</i>
<i>Приборы научно-исследовательских спутников</i>	<i>74</i>
8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ	105
ЛИТЕРАТУРА	111
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. ДЕЙСТВУЮЩИЕ И ПЛАНИРУЕМЫЕ СПУТНИКИ ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ И ПОВЕРХНОСТИ.....	117
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.....	124

На обложке Пособия приведена карта общего содержания озона над Южным полюсом по спутниковым измерениям НАСА (17 сентября 2009 г.)
[<http://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/daily.php?date=2009-09-17>]

1. Измерения в физике атмосферы (науках об атмосфере)

Характерные особенности измерений в физике атмосферы (ФА) обусловлены сложностью самой исследуемой системы и спецификой задач, стоящих перед науками об атмосфере. При изучении этой системы приходится иметь дело с чрезвычайно широким списком физических явлений и процессов (и не только физических, но и химических и биологических), а также их сложным взаимодействием. Можно сказать, что ФА – это, прежде всего, *физика в атмосфере (хотя не только физика!)*. Нам приходится иметь дело с явлениями и процессами, относящимися к таким разделам физики, как механика, молекулярная физика, термодинамика, электричество и магнетизм, ядерная и атомная физика, атомная и молекулярная спектроскопия, электромагнитные явления, фотохимия, гравитация и т.д. Кроме того, при изучении системы “атмосфера-поверхность” приходится иметь дело с огромным диапазоном пространственных масштабов протекающих процессов — от атомного уровня до размеров земного шара. С учетом того, что эта система является открытой, пространственные размеры в ряде задач приходится существенно расширять, например, при изучении влияния солнечной активности, галактических космических лучей и т.д.

Другой особенностью ФА является также очень широкий диапазон временных параметров изучаемых и влияющих на состояние атмосферы процессов – от 10^{-14} с (релеевское и аэрозольное рассеяние) до тысяч и миллионов лет (задачи палеоклиматологии).

В связи с многообразием протекающих в атмосфере процессов, арсенал измерительной техники, используемой в ФА, включает многочисленные методы и средства, разработанные в различных разделах физики, а также в самой физике атмосферы.

Но кроме физики и химии в атмосфере, мы имеем дело и собственно с физикой атмосферы – с рядом специфических явлений и процессов, а также задач, свойственных только ей. Это, прежде всего, общая циркуляция атмосфер планет, прогноз погоды на различные сроки, теория климата и озоносферы и т.д. Это также определяет специфику измерений атмосферных параметров.

Наша жизнь проходит в “воздушном океане”, ограниченном земной поверхностью (сушей или водной поверхностью), и то, что состояние этого океана **в существенной степени влияет на многие стороны нашей жизни** (а в ряде случаев на существование и самой жизни), определяет следующую важнейшую задачу измерений в физике атмосферы

– необходимость регулярного контроля и прогноза состояния атмосферы (ее температурного и ветрового режима, влажности, осадков, содержания озона и т.д.) на различные сроки. Хорошо известными примерами высказанных соображений являются катастрофические погодные явления (тайфуны, смерчи, наводнения и т.д.), приводящие к огромному числу человеческих жертв и наносящие значительный экономический ущерб. Каждый год в различных регионах земного шара гибнут сотни и тысячи людей. Экономический ущерб от катастрофических погодных явлений в различных странах достигает ежегодно миллиардов и десятков миллиардов долларов. Так, даже для США, располагающих современными системами наблюдений, моделирования и прогноза погоды, ураган Катрина в 2005 году привел к гибели 1300 человек и экономическим потерям, оцениваемым в ~ 100 миллиардов долларов (сопоставимо с годовым бюджетом России в 2005 году!). Отметим также, что состояние воздушного океана и без катастрофических погодных явлений в существенной степени определяет эффективность функционирования различных отраслей производства – транспорта, земледелия, лесного и водного хозяйства и т.д.

Как и в других областях физики, измерения в ФА играют решающую роль для познания закономерностей различных процессов и количественного описания разнообразных атмосферных явлений. Таким образом, одно из важнейших назначений измерений в ФА имеет научно-исследовательский характер.

К задаче контроля и прогноза погоды примыкает еще одна важная проблема, требующая долговременных измерений многих параметров атмосферы и поверхности, – анализ изменений состояния системы атмосфера-поверхность, в частности, изменений климата нашей планеты и прогноз этих изменений в будущем. В последние годы чрезвычайно актуальными стали проблемы изменения климата Земли и разрушения озонового слоя нашей планеты [1–3]. Следствия этих процессов еще трудно предсказуемы с достаточной достоверностью, но могут привести к нежелательным экологическим (изменения температуры, осадков, подъем уровня Мирового океана, увеличение ультрафиолетовой (УФ) освещенности земной поверхности и т.д.), экономическим и социальным последствиям. Важность указанных проблем явилась причиной заключения ряда международных соглашений, в том числе:

- Рамочного соглашения ООН по изменению климата Земли (UN Framework Convention on Climate Change – FCCC);
- Венской конвенции об охране озонового слоя;
- Монреальского протокола Венской Конвенции об охране озонового слоя;

- Соглашений об ограничении выбросов парниковых газов и т.д.;
- Киотского протокола.

В связи с указанными особенностями измерений в физике атмосферы и их целями, одним из важных направлений является формирование глобальной системы наблюдений за состоянием суши, океанов и атмосферы. Не существует единственной системы, программы или ведомства, которые могли бы удовлетворить все требования к наблюдениям, необходимым для понимания земной системы, контроля и прогноза ее состояния. Для выполнения всех требований необходим вклад многих различных систем наблюдений – и локальных, и дистанционных (в том числе спутниковых). Оптимальная интеграция этих систем требует тщательного планирования на международном и национальных уровнях для получения максимального эффекта от существующей и планируемых к созданию наблюдательных систем [4]. Таким планированием занимается Всемирная Метеорологическая организация (ВМО), в которую входят 189 стран и территорий, а также другие международные и национальные ведомства.

Важно подчеркнуть, что в настоящее время под атмосферой следует понимать не только тропосферу, но и среднюю атмосферу. Погода у поверхности Земли зависит и от состояния атмосферы на более высоких уровнях. Это давно очевидно в отношении тропосферы, но последние исследования выявляют и интенсивное взаимодействие тропосферы и более высоких слоев атмосферы. Таким образом, нас интересует атмосфера на высотах от поверхности Земли до 100 и более километров. Это обусловлено тем, что состояние атмосферы в существенной степени зависит от внешних факторов – солнечного излучения, космических лучей и т.д. Поэтому измерения в ФА должны включать не только контроль состояния верхней атмосферы, но и исследования внешних факторов – спектральной солнечной постоянной и ее вариаций, интенсивности космических лучей и прочее.

Из всего сказанного выше следует значительная специфика измерений в ФА:

- необходимость измерения огромного количества характеристик состояния атмосферы и поверхности;
- измерения должны охватывать огромный диапазон пространственных масштабов атмосферных процессов и явлений (от молекулярных процессов до глобальной циркуляции);
- исследования и контроль состояния должны осуществляться на огромных территориях, в том числе – глобально;
- необходимость осуществления контроля за внешними космическими факторами;

- огромный диапазон временных масштабов изучаемых явлений и процессов;
- необходимость постоянного долговременного контроля за состоянием системы атмосфера-поверхность и осуществления прогнозов на различные сроки.

Таким образом, цели измерений в физике атмосферы можно сформулировать следующим образом:

1. Контроль за состоянием атмосферы и поверхности, в частности, обнаружение стихийных бедствий и катастроф.
2. Осуществление прогнозов погоды различной долговременности.
3. Исследования климата Земли и прогноз его возможных изменений.
4. Научно-исследовательские задачи.

2. Методы измерений в физике атмосферы

Развитие различных областей физики и химии дали исследователям атмосферы широкий набор методов и средств измерений различных параметров атмосферы и поверхности [5].

Принято подразделять различные типы измерений на прямые (direct), косвенные (in-direct), локальные (in situ) и дистанционные (remote).

Прямых методов измерений в физике, и в физике атмосферы в частности, в настоящее время существует очень мало. Большинство измерений – косвенные. Эти методы используют хорошо изученные законы и соотношения между различными физическими параметрами (например, зависимость сопротивления проводников от температуры). Как правило, при создании и реализации косвенных методов измерений осуществляется специальная градуировка с помощью уже апробированных методов измерений (эталонов).

Локальные (контактные) измерения осуществляются с помощью определенных чувствительных элементов (датчиков), помещенных в исследуемую точку (ограниченный объем) атмосферы. К контактными (локальным) методам измерений можно отнести и метод проб, при котором сами измерения состоят из двух этапов – отбор исследуемой среды в специальные емкости или носители и исследования этих проб в лабораторных условиях. С помощью контактных методов осуществляется большое количество измерений различных параметров атмосферы и поверхности (например, измерения температуры и влажности с помощью регулярно запускаемых радиозондов). Однако, получить с помощью этих методов подробную информацию о состоянии атмосферы Земли в региональном и, тем более, в глобальном масштабах трудно и очень дорого, в

реальности – невозможно. Это тем более справедливо для атмосфер планет солнечной системы, изучение которых представляет не только научный интерес, но и важно с практической точки зрения. Возможностей проведения контролируемых многократных экспериментов в атмосфере в региональном и тем более в глобальном масштабах практически не существует. Природа предоставила нам другие возможности исследования глобальных атмосферных процессов с помощью изучения атмосфер других планет солнечной системы. В последние десятилетия в этом направлении достигнут огромный прогресс с помощью, в основном, дистанционных методов измерений.

Дистанционные методы измерений основаны на регистрации на определенном расстоянии от исследуемого объекта характеристик различных полей – электрических, магнитных, электромагнитных, гравитационных, акустических. Исследуемый объект трансформирует падающие на него поля или генерирует собственные поля, и это позволяет исследовать его состояние. Дело в том, что характеристики взаимодействия объекта с этими полями (или генерация этих полей) зависят от его собственного состояния. Измерения этих полей могут осуществляться на различных расстояниях от объекта. При этом эти расстояния могут быть велики – в случае спутниковых измерений они могут составлять от сотен до десятков тысяч километров. При исследованиях атмосфер планет с поверхности Земли эти расстояния еще больше.

В настоящее время разработаны и используются различные дистанционные методы измерений параметров атмосферы и поверхности. В связи с их многообразием предложены различные классификации этих методов (см. параграф 4). Подчеркнем, что в науках о Земле и, в частности, в физике атмосферы требуется измерять огромное количество разнообразных параметров окружающей среды. Для примера приведем табл. 1, где дан список важнейших параметров климата Земли, которые необходимо контролировать периодически и длительное время [4].

Таблица 1. Важнейшие климатические параметры

Среда	Важнейшие климатические параметры
Атмосфера	<p>Поверхность: температура, осадки, давление, радиационный баланс, скорость и направление ветра, водяной пар</p> <p>Свободная атмосфера: радиационный баланс (включая солнечное излучение), температура (включая данные МКВ радиометра), скорость и направление ветра, водяной пар, характеристики облаков</p> <p>Состав: CO₂, метан, озон, другие долгоживущие газы, характеристики аэрозолей</p>
Океан	<p>Поверхность: температура, соленость, уровень морей, состояние поверхности, лед, течения, цвет океанов, парциальное давление CO₂</p> <p>Подповерхностный слой: температура, соленость, течения, биогенные вещества, углерод, трассеры, фитопланктон</p>
Суша	<p>Сток рек, использование воды, подземная вода, уровень озер, снежный покров, ледники и ледяные шапки, вечная мерзлота и ее сезонные вариации, альбедо, состояние поверхности (тип растительности).</p> <p>Количество поглощенной фотосинтетической активной радиации, листовой индекс. Биомасса, распределение пожаров</p>

3. Требования к измерениям в физике атмосферы

На основе длительной работы большого числа ученых и специалистов в различных областях атмосферной науки, в рамках специальных международных рабочих групп были сформулированы требования к измерениям в ФА для решения различных задач и для различных разделов геофизической науки. Прежде всего отметим, что в ФА сформулированы требования к следующим характеристикам измерений:

- погрешности измерений (случайные и систематические);
- пространственное (горизонтальное и вертикальное) разрешение;
- периодичность (частота) измерений;
- высотный диапазон измерений;
- оперативность представления данных измерений для использования;
- надежность (reliability) данных измерений¹.

¹ надежность (reliability) данных измерений – воспроизводимость результатов измерения в аналогичных условиях, количественно выражаемая с помощью корреляции результатов начальных и повторных

При этом для большинства показателей в разработанных рекомендациях приведены требования и погрешности двух типов – оптимальные и предельные. Под оптимальными понимаются наиболее желательные точности измерений, под предельными погрешностями – погрешности, больше которых измерения не имеют практической ценности для решаемого круга задач. В ряде случаев (см., например, [7,]) формулируются требования трех уровней:

- «threshold» – минимальные (предельные) требования, которые следует выполнять, чтобы измерения были полезны;
- «goal» – идеальные требования, выполнение которых не требует дальнейшего улучшения систем наблюдения;
- «breakthrough» – промежуточный (оптимальный) уровень требований между «breakthrough» и «goal», который при достижении дает значительное улучшение для конкретного применения. Этот уровень можно рассматривать как оптимальный с учетом компромисса между стоимостью и выгодой, когда планируется или создается система наблюдений.

В настоящее время на сайте ВМО [8] можно найти разнообразные требования, сформулированные рабочими группами следующих международных комиссий и программ:

- Всемирная Метеорологическая Организация (ВМО, World Meteorological Organization (WMO)).
- Всемирная исследовательская климатическая программа (WCRP, World Climate Research Programme).
- Программа глобальной системы наблюдений климата (ГЧНК, Global Climate Observing System (GCOS)).
- Программа глобальной системы наблюдений океана (ГЧНО, Global Oceanic Observing System (GOOS)).
- Программа глобальной системы наблюдений за поверхностью суши (ГЧНПС, Global Terrestrial Observing System (GTOS)).
- Международная программа геосферно-биосферных исследований (International Geosphere-Biosphere Programme (IGBP)).
- Международный совет по наукам (International Council for Science (ICSU)).
- Программа окружающей среды ООН (United Nations Environment Programme (UNEP)).

измерений. Эта характеристика зависит от объективности экспериментатора, надежности измерительной аппаратуры и отсутствия неконтролируемой изменчивости исследуемого свойства [6].

- Департамент исследований внешнего космоса ООН (United Nations Office for Outer Space Affairs (UNOOSA)).

Следует отметить значительные усилия ВМО в области создания интегрированной глобальной системы наблюдений (ИГСН) ВМО. Наиболее полный и детальный список требований к измерениям многочисленных параметров атмосферы и поверхности подготовила ВМО для следующих областей использования:

- атмосферная химия;
- глобальный численный прогноз погоды;
- наукастинг (мезомасштабный сверхкраткосрочный прогноз погоды на период 2–3 часа);
- региональный численный прогноз погоды;
- исследования климата;
- синоптическая метеорология;
- авиационная метеорология;
- сельскохозяйственная метеорология;
- гидрология;
- безопасность и предотвращение террористической деятельности.

Требования к измерениям (по пространственному разрешению, характеристикам точности и т.д.) отличаются в зависимости от области использования и сформулированы для различных областей атмосферы – нижняя тропосфера (1000–500 гПа), верхняя тропосфера (500–100 гПа), нижняя стратосфера (100–10 гПа), верхняя стратосфера и мезосфера < 10 гПа; общее содержание в атмосферном столбе (иногда отдельно в тропосфере). Все параметры разбиты на 9 групп:

- температурное и влажностное зондирование атмосферы;
- ветровое зондирование;
- облака и осадки;
- атмосферная энергетика;
- озон и другие малые газовые составляющие (МГС);
- поверхность океана;
- снежный и ледовый покров;
- земная поверхность;
- земля (топография, геоид, литосфера).

Требования ВМО и других ведомств и программ сформулированы для следующих параметров различных областей атмосферы и поверхности:

- температура и влажность воздуха;
- давление атмосферы и давление у поверхности суши и океанов;
- показатель устойчивости атмосферы;
- высота планетарного пограничного слоя, высота и температура тропопаузы;
- тип облаков;
- бальность облачности;
- высота нижней и верхней границ (н.г. и в.г.) облачности;
- температура верхней границы облаков;
- профиль жидкой воды в облаках и общее содержание жидкой воды;
- размеры облачных капель на верхней границе облаков;
- профиль облачных ледяных частиц и их общее содержание;
- характеристики осадков;
- изображения облачного покрова;
- профиль вертикальной и горизонтальной компонент ветра;
- профиль содержания аэрозоля и интегральный (суммарный) аэрозоль;
- профиль и общее содержание озона;
- профили содержания МГС (CO_2 , BrO, CFC-11, CFC-12, CH_4 , ClO, ClONO_2 , CO, COS, HCHO, HCl, HNO_3 , N_2O , NO, NO_2 , OH, SO_2 и т.д.);
- характеристики радиации (потоки солнечного и теплового излучения на поверхности Земли и уходящего излучения на верхней границе атмосферы, фотосинтетической активной радиации);
- излучательная способность и температура суши;
- тип и влажность почв;
- площадь пожаров;
- характеристики растительности;
- характеристики вечной мерзлоты;
- характеристики снежного покрытия;
- топография поверхности океана;
- уровень океана;
- температура и соленость океана;
- течения в океане;
- концентрация взвесей и хлорофилла в океане;

- направление и высота волн;
- скорость ветра у поверхности суши и океана;
- характеристики ледового покрова, и т.д.

Уже один этот список говорит о сложности и грандиозности задачи мониторинга параметров окружающей среды в глобальном масштабе.

Рассмотрим требования для ряда параметров атмосферы и поверхности, сформулированные ВМО для выполнения задач контроля за состоянием атмосферы и поверхности, прогнозов погоды различной заблаговременности и пространственных масштабов, исследований климата Земли, а также использования данных в различных областях жизнедеятельности.

Измерения давления, влажности и температуры у поверхности

Для описания качества измерений часто используется абсолютная (полная, суммарная) погрешность измерений, включающая случайную и систематическую компоненты. Далее мы будем приводить именно эти величины, если тип погрешности не оговаривается дополнительно.

Оптимальная погрешность определения приповерхностного давления составляет 0.5 мб, предельная – 2 мб (для глобальных прогнозов) и 1 мб (для региональных прогнозов). Наблюдения желательно проводить каждые 0.5–1 час, в крайнем случае, каждые 12 часов. Требования к горизонтальному разрешению зависят от области использования и колеблются от 10 км (региональный прогноз) до предельных 250 км (глобальный численный прогноз погоды).

Влажность у поверхности должна измеряться с погрешностями (оптимальная/предельная) 5/15% с той же периодичностью и горизонтальным разрешением, что и давление.

Температура у поверхности должна измеряться с погрешностями 0.5–2.0 К (оптимальные значения) и 1–2 К (предельные погрешности) с периодичностью 0.25–1 часов (оптимально) и 1–12 часов (предельно) в зависимости от области использования.

Измерения температурного профиля

Требования к определению вертикального профиля температуры (оптимальные/предельные) приведены в табл. 2. В различных столбцах таблицы приведены требования для горизонтального и вертикального разрешения, периодичность измерений, погрешности, оперативность представления и области использования данных.

Таблица 2. Требования (оптимальные/предельные) к измерениям вертикального профиля (распределения) температуры атмосферы

Требования	Горизонт. разрешение, км	Вертикал. разрешение, км	Периодичн., ч	Погрешность, К	Оперативность, ч	Использование
Верхняя атмосфера	50/500	1/3	1/12	0.5/5	1/4	Глобальный прогноз
Верхняя тропосфера	10/500	1/3	0.5/12	0.5/3	0.5/2	Региональный прогноз
Верхняя тропосфера	20/200	0.1/2	3/12	0.5/3	1/3	Синоптическая метеорология
Верхняя тропосфера	50/500	1/3	1/12	0.5/3	1/4	Глобальный прогноз
Верхняя тропосфера	5/200	1/3	0.25/1	1/2	0.08/0.5	Наукастинг*
Нижняя стратосфера	50/500	1/3	1/12	0.5/3	1/4	Глобальный прогноз
Нижняя стратосфера	20/200	0.1/2	3/12	0.5/3	1/3	Синоптическая метеорология
Нижняя стратосфера	10/500	1/3	0.5/12	0.5/3	0.5/2	Региональный прогноз
Нижняя тропосфера	5/200	0.5/1	0.25/1	0.5/2	0.08/0.5	Наукастинг
Нижняя тропосфера	10/500	0.3/3	0.5/12	0.5/3	0.5/2	Региональный прогноз
Нижняя тропосфера	20/200	0.1/2	3/12	0.5/3	1/3	Синоптическая метеорология
Нижняя тропосфера	50/100	0.15/0.6	1/3	2/5	1/2	Авиационная метеорология
Нижняя тропосфера	50/500	0.3/3	1/12	0.5/3	1/4	Глобальный прогноз

Отметим, что требования к определению температуры атмосферы заметно меняются в зависимости от области использования и рассматриваемой области атмосферы. Так, максимальное горизонтальное разрешение необходимо при использовании данных в наукастинге и составляет 5/200 км. Для глобального прогноза достаточно иметь горизонтальное разрешение 50/500 км. Максимальное вертикальное разрешение требуется в синоптической метеорологии в нижней и верхней тропосфере – 0.1/2 км и авиационной метеорологии в нижней тропосфере – 0.15/0.6 км. Высокое вертикальное разрешение необходимо также для наукастинга в нижней тропосфере – 0.5/1.0 км. Во многих случаях достаточное вертикальное разрешение измерений температуры составляет 1/3 км.

Необходимая периодичность измерений колеблется от 0.25/1 час (наукастинг, нижняя и верхняя тропосфера) до 3/12 часов в синоптической метеорологии.

Оптимальные погрешности измерений составляют 0.5–2.0 К, причем для региональных и глобальных прогнозов они составляют 0.5 К по всей атмосфере. Предельные погрешности составляют 2–5 К в зависимости от области применения данных. Оперативность представления также сильно варьирует – максимальна для наукастинга – 0.08/0.5 ч и минимальна для глобальных прогнозов – 1/4 часа.

Отметим требования к определению температуры тропопаузы. Они максимальны для наукастинга и составляют по горизонтальному разрешению 10/200 км, по периодичности – 0.5/6 часов, по погрешности измерений – 0.5/2 К. Оперативность представления данных должна составлять 0.5/2 часа.

Измерения влажности атмосферы

Требования к измерениям влажности атмосферы суммированы в табл. 3.

Таблица 3. Требования (оптимальные/предельные) к измерениям влажности атмосферы

Требования	Горизонт. разрешение, км	Вертикал. разрешение, км	Перио- дичн., ч	Погреш- ность, %	Оператив- ность, ч	Использование
Верхняя атмосфера	50/500	1/5	12/72	5/20	72/168	Атмосферная химия
Верхняя тропосфера	5/200	1/3	0.25/1	5/20	0.08/0.5	Наукастинг
Верхняя тропосфера	20/200	0.1/2	3/12	5/20	1/3	Синоптическая метеорология
Верхняя тропосфера	50/500	1/5	12/72	5/20	72/168	Атмосферная химия
Верхняя тропосфера	10/100	1/3	0.5/12	5/20	0.5/2	Региональный прогноз
Верхняя тропосфера	50/250	1/3	1/12	5/20	1/4	Глобальный прогноз
Нижняя стратосфера	50/500	1/5	12/72	5/20	72/168	Атмосферная химия
Нижняя тропосфера	50/100	0.15/0.6	1/3	5/10	1/2	Авиационная метеорология
Нижняя тропосфера	50/500	1/5	6/72	5/20	72/168	Атмосферная химия
Нижняя тропосфера	5/200	0.5/1	0.25/1	5/20	0.08/0.5	Наукастинг
Нижняя тропосфера	10/100	0.4/2	0.5/12	5/20	0.5/2	Региональный прогноз
Нижняя тропосфера	50/250	0.4/2	1/12	5/20	1/4	Глобальный прогноз
Нижняя тропосфера	20/200	0.1/2	3/12	5/20	1/3	Синоптическая метеорология

Требуемые погрешности измерений влажности атмосферы составляют 5/20 % за исключением требований к авиационной метеорологии для нижней тропосферы, где они составляют 5–10 %. Самое грубое горизонтальное разрешение измерений составляет 50/500 км для исследований в области атмосферной химии для всей толщи атмосферы. Наиболее высокое горизонтальное разрешение необходимо для данных, используемых для наукастинга (5/200 км) для нижней и верхней тропосферы и для авиационной метеорологии (50/100 км) для нижней тропосферы.

Наиболее грубое вертикальное разрешение в 1/5 км достаточно для исследований в области атмосферной химии. С другой стороны, для использования данных о влажности атмосферы в тропосфере требуется высокое вертикальное разрешение: для синоптической метеорологии в верхней и нижней тропосфере – 0.1/2 км, для авиационной метеорологии в нижней тропосфере – 0.15/0.6 км. Требуемая периодичность измерений влажности меняется от 12/72 часов для атмосферной химии (за исключением слоя нижней тропосферы – 6/72 часов) до 0.25/1 час для использования в наукастинге в нижней и верхней тропосфере. Оперативность предоставления данных измерений колеблется от 3/7 суток для использования в атмосферной химии до 0.08/0.5 ч для наукастинга (нижняя и верхняя тропосфера).

Общее содержание водяного пара требуется определять с оптимальной и предельной погрешностями 1 кг/м² и 5 кг/м², соответственно, и с горизонтальным разрешением 5/50 км (наукастинг), 10/250 км (региональный прогноз) и 50/500 км (глобальный прогноз).

Отметим, что современные системы радиозондирования атмосферы (регулярные контактные измерения с помощью датчиков температуры, давления, влажности, поднимаемых до высот 25–35 км на воздушных шарах) позволяют определять эти параметры с систематическими и случайными погрешностями, приведенными в табл. 4.

Таблица 4. Типичные погрешности измерений температуры, давления и влажности с помощью радиозондов

Характеристика	Систематические погрешности	Случайные погрешности
Температура	0.5 К	0.1 К
Давление	0.5–1.0 мб	0.03–0.5 мб
Влажность	5%	2%

Измерения озона

Требования ВМО к измерениям содержания озона даны в таблице 5. При измерениях вертикального профиля содержания озона оптимальные погрешности составляют 3–5 %, предельные – 20–25 %. Требуемое горизонтальное разрешение колеблется от 50/500 км (атмосферная химия, глобальный прогноз) до 10/200 км (региональный прогноз). Оптимальное вертикальное разрешение составляет 1 км, предельное – 5–10 км. Необходимая периодичность измерений сильно зависит от области использования данных. Она меняется от 0.5/3 часа (региональный прогноз) до 3/48 часов (верхняя атмосфера) и 3/168 часов для других слоев атмосферы при использовании данных в атмосферной химии.

Оптимальная погрешность измерений общего содержания озона должна составлять 5–6 Добсоновских единиц (Д.Е.)², предельная – 20 Д.Е. Требуемая периодичность очень сильно меняется в зависимости от области использования данных – от 0.25/12 ч (синоптика) и 0.5/6 ч (региональный прогноз) до 6/46 ч (атмосферная химия). Требования к горизонтальному разрешению колеблются от 10 до 100 км.

² Добсоновская единица соответствует 0.001 атм·см.

Таблица 5. Требования ВМО к измерениям содержания озона

Требования	Горизонт. разрешение, км	Вертикал. разрешение, км	Перио- дичн., ч	Погреш- ность, %	Оператив- ность, ч	Использование
Верхняя атмосфера	50/500	1/5	3/48	5/25	72/168	Атмосферная химия
Верхняя тропосфера	50/500	1/10	1/12	5/20	1/4	Глобальный прогноз
Верхняя тропосфера	10/200	1/10	0.5/3	5/20	0.5/2	Региональный прогноз
Верхняя тропосфера	50/500	1/5	3/168	3/20	72/168	Атмосферная химия
Нижняя стратосфера	50/500	1/5	3/168	3/20	72/168	Атмосферная химия
Нижняя стратосфера	10/200	1/10	0.5/3	5/20	0.5/2	Региональный прогноз
Нижняя стратосфера	50/500	1/10	1/12	5/20	1/4	Глобальный прогноз
Нижняя тропосфера	50/500	1/5	3/168	3/10	72/168	Атмосферная химия
Нижняя тропосфера	10/200	1/5	0.5/3	5/20	0.5/2	Региональный прогноз
Нижняя тропосфера	50/500	1/5	1/12	5/20	1/4	Глобальный прогноз

Требования к измерениям содержания озона в атмосфере сформулированы также в рамках “Стратегии интегрированных спутниковых и наземных наблюдений озона” [9] и приведены далее в табл. 9.

Измерения характеристик аэрозоля

В требованиях каталога ВМО не всегда уточнено, относительно каких характеристик аэрозоля они приведены. Более подробно этот вопрос рассматривается в требованиях, сформулированных, например, в каталоге ГСНК (GCOS) [9] (см. далее). Измерения характеристик аэрозоля (как профиля, так и интегральных характеристик) необходимо осуществлять с погрешностями 10/20 %, за исключением случая использования данных в

атмосферной химии в нижней тропосфере (5/20 %). В большинстве случаев при этом достаточное горизонтальное разрешение составляет 50/500 км, кроме случая использования данных по интегральным характеристикам для наукастинга (5/50 км). Высокое вертикальное разрешение требуется для измерений профилей аэрозольных характеристик в нижней тропосфере (0.1/1 км) для глобальных прогнозов. Чаще всего достаточное вертикальное разрешение для измерений аэрозоля – 1/10 км. Высокая периодичность измерений требуется в наукастинге для интегральных характеристик – 0.25/12 ч. В других случаях достаточна периодичность 6/168 ч. Оперативность представления данных измерений колеблется от 0.25/2 часа (наукастинг, интегральные характеристики) до 12/168 часов для большинства потребителей

Измерения малых газовых составляющих атмосферы

Для исследований в области атмосферной химии сформулированы требования к измерениям вертикальных профилей и общих содержаний для ряда атмосферных газов, играющих важную роль в формировании климата Земли и состояния ее озоносферы. При этих измерениях требуется оптимальное горизонтальное разрешение 50–100 км, предельное составляет 500 км. Оптимальное вертикальное разрешение составляет 1 км, предельное – 1.5–4 км для разных газов. Требуемая периодичность измерений для оптимальных и предельных значений составляет, как правило, 6 и 24 часов. Для таких газов как COS и НСНО периодичность составляет 12/72 и 24/48 часов. При измерениях профилей содержания CFC-11, CFC-12, С10, С10NO₂, СО, COS, HNO₃, NO и NO₂ оптимальные и предельные погрешности измерений составляют 5 и 10 %. Для других газов оптимальные и предельные погрешности измерений приведены в табл. 6.

Таблица 6. Оптимальные и предельные погрешности измерений содержания атмосферных газов (в процентах)

Газ	CH ₄	COS	НСНО	НС1	N ₂ O	ОН	SO ₂
Оптимальные	2	15	5	2	2	5	10
Предельные	10	25	15	5	20	30	20

Для содержания углекислого газа в нижней тропосфере оптимальные и предельные погрешности составляют 2 и 5 %, для полного содержания СО₂ приводятся цифры в 0.5 %. Полное содержание двуокиси азота и НСНО необходимо измерять с погрешностями 5–15 %.

Измерения характеристик облаков

Подробные требования в каталогах ВМО приведены для измерений различных характеристик облаков. Они даны применительно к использованию данных в глобальном и региональном прогнозе, наукастинге, авиационной и синоптической метеорологии. Для примера в таблице 7 приведены требования к измерениям характеристик облаков при использовании данных в региональном прогнозе.

Требования к горизонтальному разрешению различных характеристик облаков составляют, как правило, 10/250 км. Исключением являются требования к изображениям облаков – 1/50 км. Требования к вертикальному разрешению измерений в нижней тропосфере составляют 0.3\5 км, в верхней тропосфере – 1\10 км. Требуемая периодичность измерений почти одинакова для различных параметров и колеблется в диапазоне (0.5/6 – 0.5\12) ч. Требования к погрешностям измерений различных параметров облаков приведены в пятом столбце табл. 7. Например, высоту нижней границы облаков (основание) следует определять с погрешностями 0.5/1 км, покрытие облаков (бальность облачности) с погрешностями 5/20 %. Требуемая оперативность представления данных измерений колеблется в диапазоне (0.5/2–0.5/12) ч.

Таблица 7. Требования к измерениям характеристик облаков

Требования	Горизонт. разрешение, км	Вертикал. разрешение, км	Периодичн., ч	Погреш- ность	Операти- вность, ч
Высота основания облаков	10/250		0.5/12	0.5/1 км	0.5/3
Покрытие облаков	10/250		0.5/12	5/20 %	0.5/2
Размеры частиц на в.г. облаков	10/250		0.5/12	0.5/2 мкм	0.5/2
Профиль ледяных частиц в верхней тропосфере	10/250	1/10	0.5/12	5/20 %	0.5/2
Профиль ледяных частиц в нижней тропосфере	10/250	0.3/5	0.5/12	5/20 %	0.5/2
Общее содержание ледяных частиц	10/250		0.5/12	10/20 г/м ²	0.5/2
Изображение облаков	1/50		0.5/6		0.5/2
Высота верхней границы	10/250		0.5/12	0.5/1 км	0.5/2
Профиль водяных частиц (<100мкм) в верхней тропосфере	10/250	1/10	0.5/12	5/20 %	0.5/2
Профиль водяных частиц (<100мкм) в нижней тропосфере	10/250	0.3/5	0.5/12	5/20 %	0.5/12
Общее содержание водяных частиц (<100мкм)	10/250		0.5/12	10/50 кг/м ²	0.5/12
Профиль водяных частиц (>100мкм) в верхней тропосфере	10/250	1/10	0.5/12	5/20 %	0.5/2
Профиль водяных частиц (>100мкм) в нижней тропосфере	10/250	0.3/5	0.5/12	5/20	0.5/2
Общее содержание водяных частиц (>100мкм)	10/250		0.5/12	10/50 кг/м ²	0.5/4

Измерения характеристик осадков

В каталоге ВМО сформулированы требования к измерениям дневного количества и интенсивности жидких и твердых осадков (количество осадков в единицу времени) для использования этих данных в глобальном и региональном прогнозах, наукастинге, синоптической и сельскохозяйственной метеорологии. Необходимое горизонтальное разрешение измерений (оптимальное/предельное) составляет 5/50 км для степени жидких и твердых осадков при использовании данных в наукастинге. Требуемая периодичность

измерений колеблется от 0.08/1 ч для степени жидких осадков (наукастинг) до 24/72 часа для суммарного индекса осадков (сельскохозяйственная метеорология). Рекомендуемые погрешности измерений для суммарного индекса осадков составляют 0.5/5 мм/день (глобальный и региональный прогнозы) и 2/10 мм/день для сельскохозяйственной метеорологии. Погрешности измерений степени жидких и твердых осадков должны находиться в пределах 0.1–1 мм/час.

Измерения характеристик поля ветра

Горизонтальная и вертикальная компоненты ветра должны измеряться до высоты 30 км.

Для горизонтальных компонент скорости ветра необходимое горизонтальное разрешение измерений колеблется от 5/200 км до 50/500 км в зависимости от области использования. Требования к вертикальному разрешению измерений горизонтальных компонент варьируют от 0.1–0.15/0.6–2.0 км (для авиационной и сельскохозяйственной метеорологии) до 1/10 км (например, для глобального прогноза). Требуемая периодичность измерений может быть очень большой, например, 0.0833/0167 ч для авиационной метеорологии. Для синоптической метеорологии достаточны измерения через 3/12 часов. Погрешности измерений должны находиться в пределах 1–2/5–8 м/с для различных областей применения данных. Оперативность представления результатов измерений может быть также очень высокой – 0.08/0.5 часа для наукастинга. Для глобального прогноза достаточно 1/4 часа.

Требования к горизонтальному разрешению измерений вертикальной компоненты скорости ветра составляют 10–50/500 км. В этом случае максимальное горизонтальное разрешение требуется для наукастинга в нижней тропосфере – 5/200 км. Для глобального прогноза достаточно разрешение 50/500 км. Оптимальное вертикальное разрешение составляет 0.5 км, предельные находятся в диапазоне 2–10 км (2 км требуется для наукастинга). Оптимальная периодичность меняется от 0.25 ч (наукастинг) до 1 часа (глобальный прогноз). Предельные периодичности находятся в диапазоне 1–12 часов. Требуемые погрешности измерений вертикальной компоненты скорости ветра – 1/5 см/с. Требования к оперативности представления данных для пользователей аналогичны требованиям для горизонтальных компонент скорости ветра.

Особые требования в каталоге ВМО сформулированы для измерений скорости ветра у поверхностей моря и суши. В этом случае требования сформулированы для скорости и направления ветра. Оптимальные погрешности этих величин должны находиться в

пределах 0.5–2 м/с, предельные – 3–5 м/с в зависимости от области использования. При аэрологическом зондировании атмосферы скорость ветра должна определяться с погрешностями 1–2 м/с, а направление ветра – с погрешностями 2.5–5 градусов (в зависимости от высоты в атмосфере) [10].

Измерения характеристик поверхности

В каталогах ВМО сформулированы требования к измерениям температуры поверхности суши и океана, длинноволновой излучательной способности суши, индексу вегетации (NDVI – Normalized Difference Vegetation Index), типу почв, ее влажности, ледяному и снежному покрову и т.д. Для океанов сформулированы также требования для измерений топографии поверхности, вектора течений, содержания хлорофилла, солености, концентрации взвешенных и желтой субстанций.

Требования при мониторинге глобальных изменений

Рассмотрим более подробно требования к измерениям в задаче **мониторинга глобальных изменений**. Требования к измерениям параметров атмосферы и поверхности для изучения глобальных изменений, происходящих на Земле, в том числе климатических, океанских и ландшафтных, были сформулированы в рамках различных программ. Для эффективного мониторинга климата и его изменений система наблюдений должна обеспечивать:

- мониторинг параметров климата и климатообразующих факторов;
- обнаружение климатических изменений и их влияния на окружающую среду;
- получение граничных и начальных условий для построения климатических моделей;
- валидацию климатических моделей;
- проверку гипотез о причинах глобальных и региональных изменений климата.

Для достижения существенного прогресса в климатических исследованиях чрезвычайно важно обосновать и реализовать глобальную систему наблюдений климата. Для этого в 1992 году четырьмя международными организациями (WMO, International Oceanographic Commission (IOC), United Nations Environmental Programme (UNEP), International Council of Scientific Unions (ICSU)) была создана программа Глобальной Климатической Наблюдательной Системы (ГКНС, GCOS). Цели GCOS состоят в определении и конкретизации оперативной системы климатических наблюдений XXI века и важнейших неопределенностей климата и стимулировании разработки программ исследований с целью создания улучшенных оперативных программ [9].

При мониторинге глобальных изменений, происходящих на Земле, в качестве объектов наблюдения за атмосферой выступают температура, влажность атмосферы, облачный покров, радиационный баланс Земли, озоновый слой, содержание аэрозоля и малых газовых компонент в атмосфере, характеристики динамики атмосферы, потоки заряженных частиц и электромагнитные поля в околоземном пространстве [10]. Кроме того, требуется получение данных о параметрах подстилающей поверхности, включая границы природно-климатических зон, земные растительные покровы, температура и цветность Мирового океана, массы морских ледовых образований, форма геоида и т.д.

Основные требования к информационному обеспечению работ в этом направлении – накопление длинных многолетних рядов данных, непрерывность измерений, совместимость информации, получаемой разными методами и приборами, и хранение информации в форматах и стандартах, принятых в международной практике. Важная роль для выполнения этих требований отводится спутниковым системам наблюдений.

Изменения климата являются одним из важнейших проявлений глобальных изменений состояния нашей планеты. Климат нашей планеты в значительной степени определяется содержанием радиационно-активных составляющих атмосферы. Эти составляющие включают в себя парниковые газы, прежде всего водяной пар, CO_2 , O_3 , CH_4 , N_2O , CFC_S^3 , облака и аэрозоли, определяющие термический режим атмосферы за счет поглощения солнечной и атмосферной радиации. Мониторинг этих параметров должен осуществляться на долговременной основе. Эти данные, в частности, используются для создания климатологических баз данных, валидации и совершенствования численных моделей атмосферы.

Отметим, что оптимальные и предельные погрешности определения содержания ряда газов, как и других параметров атмосферы, а также другие требования могут отличаться в разных документах и по-прежнему уточняются. Так в отчете комитета ВМО по спутникам наблюдения Земли (CEOS – Committee on Earth Observation Satellites) [8] предлагается кроме основных газов, таких как O_3 , H_2O , N_2O , CH_4 , CO , CO_2 , HCl , HNO_3 , BrO , ClO , NO_2 , NO , эпизодически измерять следующие газы (табл.8). При этом эти измерения не предполагается проводить с высокой частотой и высоким (рекомендуемым для других компонент) пространственным разрешением.

³ CFC_S – хлорфторуглероды.

Таблица 8. Дополнительные газы, рекомендуемые для измерений в отчете WMO/CEOS

Классификация	Малые газовые составляющие
Газы – источники	CFC-11, CFC-12, CFC-22, CH ₃ Cl, CH ₃ Br, H1201, H1311, CF ₄ , SF ₆
Газы – резервуары	HBr, ClONO ₂ , HOCl, OClO, H ₂ O ₂
Свободные радикалы	OH, HO ₂ , NO ₃

В этом отчете приведены таблицы, описывающие различные требования к измерениям содержания следующих газов: O₃, H₂O, N₂O, CH₄, CO, CO₂, HCl, HNO₃, BrO, NO. Приведем для примера требования по погрешностям измерений для содержания озона (табл. 9).

Таблица 9. Требования к погрешностям измерений содержания озона (WMO/CEOS)

Высоты	Случайные погрешности, относительные/по объему		Систематические погрешности, относительные/по объему	
	Предельные	Оптимальные	Предельные	Оптимальные
Нижняя тропосфера	20 %/4 ppb	3 %/1 ppb	30 %/6 ppb	5 %/2 ppb
Верхняя тропосфера	20 %/4 ppb	3 /1 ppb	30 %/6 ppb	5 %/2 ppb
Нижняя стратосфера	15 %/100 ppb	3 %/20 ppb	20 %/150 ppb	5 %/40 ppb
Верхняя стратосфера и мезосфера	15 %/75 ppb	3 %/20 ppb	20 %/100 ppb	5 %/30 ppb
Общее содержание	5 %/6 DU	1 %/3 DU	5 %/6 DU	1 %/3 DU
Общее содержание в тропосфере	15 %/6 DU	5 %/3 DU	15 %/6 DU	5 %/3 DU

Как видно из приведенной таблицы, оптимальная относительная погрешность измерений общего содержания озона – 1 %. Аналогичные таблицы для других газов показывают, что для них ряд требований является более «мягким», однако, для многих газов общее содержание необходимо измерять с погрешностями 1–2 % . Для общего содержания углекислого газа оптимальные случайные погрешности не должны превышать

0.5 ppm, что составляет доли процента. Это обусловлено его относительно малыми пространственно-временными вариациями и необходимостью изучения кругооборота углерода в природе.

Требуемое горизонтальное разрешение для измерений общего содержания озона и общего содержания озона в тропосфере составляют: оптимальное – 10 км, предельное – 100 км. Для содержания на различных высотах предельное горизонтальное разрешение 250 км для всех слоев, оптимальное – меньше 10 км для нижней тропосферы и 50 км для более высоких слоев атмосферы. Вертикальное разрешение – оптимальное – 0.5 км, предельное – 5 км для тропосферы, 3 км – для нижней стратосферы, 6 км – для верхней атмосферы. Оптимальный период измерений составляет 3 часа для всех слоев атмосферы, а для общих содержаний – 6 часов. Предельный период измерений меняется от 24 часов для общих содержаний до 7 дней в трех нижних слоях атмосферы.

Атмосферные аэрозоли оказывают существенное влияние на климат Земли как прямым, так и косвенным образом. Суммарное влияние аэрозолей, по современным представлениям, приводит к охлаждению и может оказывать компенсирующее действие на потепление, вызываемое антропогенными парниковыми газами. Для объективной оценки влияния аэрозоля необходимы наблюдения над ним как в тропосфере, так и в стратосфере.

Для изучения влияния аэрозолей на радиационные характеристики атмосферы, радиационный баланс планеты, различные физические и химические атмосферные процессы необходимо измерять следующие параметры аэрозолей:

- общая аэрозольная оптическая толщина;
- профиль аэрозольного ослабления (или, по крайней мере, соответствующие значения для тропосферы и стратосферы);
- функция распределения частиц по размерам;
- коэффициент преломления аэрозольных частиц;
- индикатриса рассеяния;
- альbedo однократного рассеяния;
- содержание SO₂, как аэрозоле-образующего соединения;
- парциальное давление водяного пара.

Аэрозольная оптическая толщина – важнейший параметр, который существенно определяет радиационные эффекты аэрозолей, – должен измеряться с высокой точностью и хорошей периодичностью. Глобальные изменения аэрозольной толщи над океанами в

0.01 (видимая область) могут вызвать глобальное радиационное возмущение в 0.25 ватт/м² [12]. Это означает, что относительная точность измерений аэрозольной оптической толщи должна быть лучше 10 %. Горизонтальные расстояния между измерениями могут быть порядка 100 км. Тем не менее, для изучения аэрозолей в облаках горизонтальное разрешение не должно превышать нескольких километров.

Требования к измерениям характеристик аэрозоля, сформулированные в рамках программы GCOS даны в табл. 10. Эти измерения необходимо осуществлять в четырех слоях атмосферы – от нижней тропосферы до верхней атмосферы, включительно.

Таблица 10. Требования GCOS к измерениям характеристик аэрозоля в инфракрасной (ИК) и видимой областях (ВИД) спектра

Требования	Горизонт. разрешение	Вертикал. разрешение	Периодичн.	Погрешность	Оперативность
Оптическая толщина (ИК+ВИД)	1/10 км		1 день	0.01/0.02	7/60 дней
Коэффициент ослабления (ВИД)	10/100 км	0.5/1 км	7 дней	0.01/0.02 км ⁻¹	7/60 дней
Оптическая толщина поглощения (ВИД)	1/10 км		1 день	0.004/0.02	7/60 дней

Отметим, что в этом же каталоге приведены требования к измерениям профилей содержания водяного пара, метана и углекислого газа для четырех стандартных высотных слоев атмосферы, а также для общего и тропосферного содержания этих газов. Для водяного пара горизонтальное разрешение должно для различных слоев атмосферы составлять от 5/25 км (нижняя тропосфера) до 50/200 км (верхняя атмосфера), вертикальное разрешение – от 0.1/1 км (нижняя тропосфера) до 2/5 км (верхняя атмосфера). Периодичность измерений должна быть 1 час для верхней и нижней тропосферы и для общего содержания и 1 день для остальных характеристик. Наибольшая точность измерений требуется для общих содержаний – 1/3 %. Для верхней атмосферы достаточно погрешности в 5/20 %. Характеристики содержания углекислого газа необходимо измерять с погрешностями 1/2 % с учетом их относительно малой пространственной и временной изменчивости.

Информация об облаках чрезвычайно важна для исследований радиационного баланса. Облака очень изменчивы во времени и пространстве. Поэтому для изучения облаков размеры пикселя в идеале должны быть порядка $1 \times 1 \text{ км}^2$, а сами наблюдения должны проводиться по крайней мере один раз в сутки. Фазовое состояние облаков и размеры частиц можно определить из спектральных и поляризационных измерений уходящего излучения. Для получения полезной информации размеры пикселя должны быть не больше $50 \times 50 \text{ км}^2$. Для исследовательских целей информация о характеристиках облаков может поступать за период недели.

В области атмосферной динамики необходимо изучение особенностей стратосферно-тропосферного обмена, динамики тропопаузы и структуры полярных вихрей, что может быть сделано на основе данных о пространственных распределениях содержания озона, водяного пара и соединений азота. Стратосферно-тропосферный обмен происходит в широком диапазоне пространственных масштабов. Этот диапазон включает большемасштабные подъемы и опускания воздуха, синоптические масштабы и перенос волн и турбулентность. Определенные механизмы переноса можно изучать с помощью измерений пространственных распределений содержаний озона и водяного пара, которые имеют значительные градиенты вблизи тропопаузы, и их время жизни достаточно большое, чтобы использовать их как трассеры. В общем содержании озона отражается часть динамических процессов тропосферной динамики, а изменения в профилях содержания озона содержат информацию о вертикальной структуре ветра. Измерения необходимо осуществлять с довольно высокими горизонтальными и вертикальными разрешениями, т.к. эти процессы переноса осуществляются на уровне достаточно малых пространственных масштабов [13]. Диапазон горизонтальных масштабов составляет от десятков километров в конвективных процессах до сотен километров в циклонах. Вертикальные масштабы составляют от нескольких километров до сотен метров.

Приведенные выше данные о различных требованиях к измерениям параметров атмосферы и поверхности можно использовать в дальнейшем для оценки качества и полезности информации, получаемой с помощью различных дистанционных методов измерений. Полный перечень разнообразных требований ВМО к измерениям различных параметров атмосферы и поверхности со спутников приведен на сайте [14].

4. Глобальная система наблюдений

Глобальная система наблюдений (GOS – Global Observing System) осуществляет измерения многочисленных параметров атмосферы и поверхности для решения научных и прикладных проблем в интересах различных наук о Земле – метеорологии, океанологии, климатологии и т.д. Отметим, что эта система постоянно совершенствуется и дополняется в связи с тем, что многие оптимальные требования по измерениям различных характеристик атмосферы и поверхности в настоящее время еще не удается выполнить.

Основные составляющие этой системы состоят из следующих подсистем (рис. 1):

- наземных метеорологических и автоматических метеорологических станций;
- аэрологических станций (станций радиозондирования);
- сети метеорологических радиолокационных наблюдений,
- систем морских наблюдений (коммерческие и научно-исследовательские суда (судна-погоды), буи различного типа);
- систем самолетных наблюдений;
- спутниковой системы (оперативные полярные и геостационарные спутники, исследовательские спутники, международная космическая станция (МКС));
- других систем наблюдений;
- станций приема спутниковой информации;
- центров обработки, систематизации и хранения данных измерений;
- центров метеослужбы (национальных, региональных и международных).

В настоящее время в систему глобальных наблюдений входят более чем 10000 наземных станций наблюдений (в том числе автоматических), ~ 1000 станций аэрологического зондирования, более 7000 судов, 100 стационарных и ~ 1000 плавающих буйев, сотни радиолокационных станций и более 3000 коммерческих самолетов со специальным оборудованием измеряют ключевые параметры атмосферы, суши и океана ежедневно. Эти измерения дополняются измерениями из космоса с помощью оперативных полярных и геостационарных спутников, а также научно-исследовательских спутников.

Система наземных (метеорологических) наблюдательных станций на конец 2004 года включала около 11000 станций на суше, измеряющих периодически (через 1–3 часа) приземные давление, температуру, относительную влажность, скорость и направление ветра, а также ряд характеристик поверхности. Часть этих станций автоматические, а часть – обслуживаемые. Порядка 1000 специально отобранных станций

проводят наблюдения в рамках Глобальной системы наблюдений климата. На рис. 2 приведены составные части метеорологической станции.

Погрешности различных современных систем наблюдений подробно описаны в отчете ВМО [16]. Эти погрешности зависят от методов измерений, используемых приборов, состояния атмосферы, времени экспозиции и т.д. В настоящее время основные метеорологические величины измеряются у поверхности земли с погрешностями: температура – 0.1–0.2 К, давление – 0.1–0.3 мб, относительная влажность 3–5 %

Система наземных климатических наблюдений (GCOS) иллюстрируется рис. 3.

Указанные климатологические станции были выбраны из многих тысяч существующих метеорологических станций наблюдения для измерений основных параметров, прежде всего, температуры и осадков.

Система аэрологических (радиозондовых) станций включает около 1000 станций, осуществляющих от 1–2 раза до 4-х раз в сутки измерения вертикальных профилей давления, температуры, влажности, скорости и направления ветра до высот ~ 30 км. Две трети этих станций осуществляют измерения в 0000 UTC and 1200 UTC (UTC – Universal Time, Coordinated; время по Гринвичу). Примерно 100–200 станций осуществляют измерения 1 раз в сутки. Автоматической радиозондовой системой (ASAP – Automated Shipboard Aerological Programme) оборудованы примерно 15 кораблей в Северной Атлантике. На рис. 4 указаны положения станций этой системы наблюдений. Часть станций аэрологического зондирования включена в сеть Глобальной системы наблюдений климата.

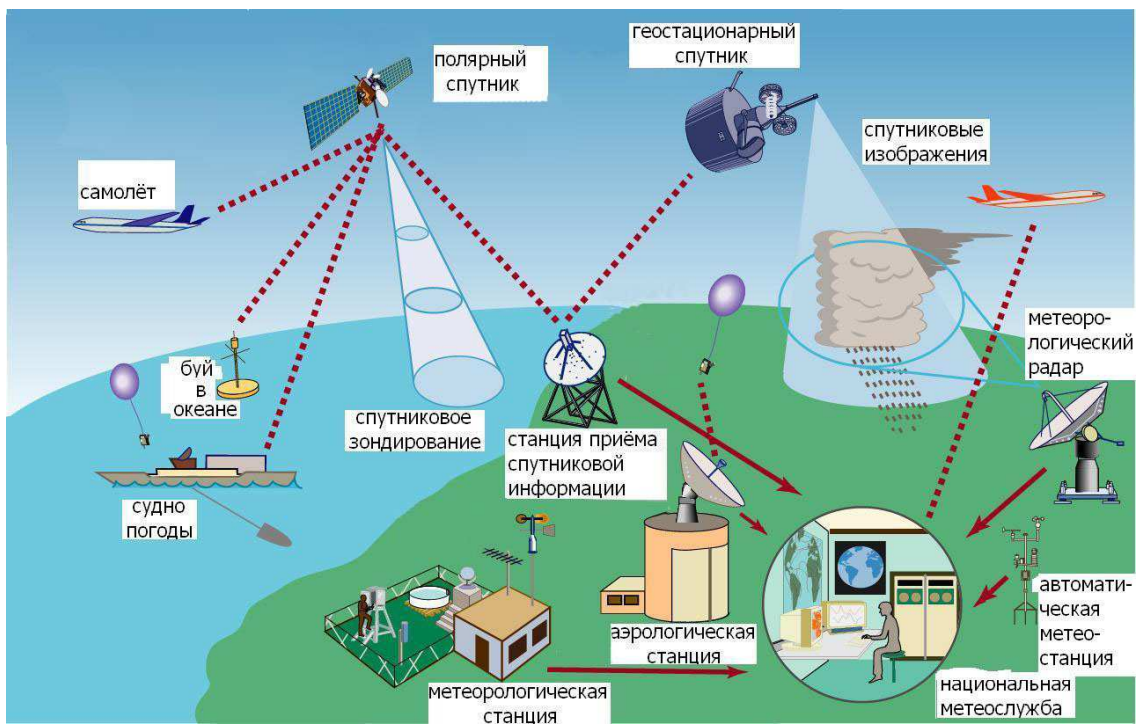


Рис. 1. Система глобальных наблюдений.



Базовый блок.

Блок станции имеет интерфейс RS 232 для вывода данных на компьютер



Корпус

с датчиками температуры и влажности воздуха



Анемометр

с датчиками скорости и направления ветра



Осадкомер

Рис. 2. Основные элементы метеостанции TFA Master Touch 01313 [15].

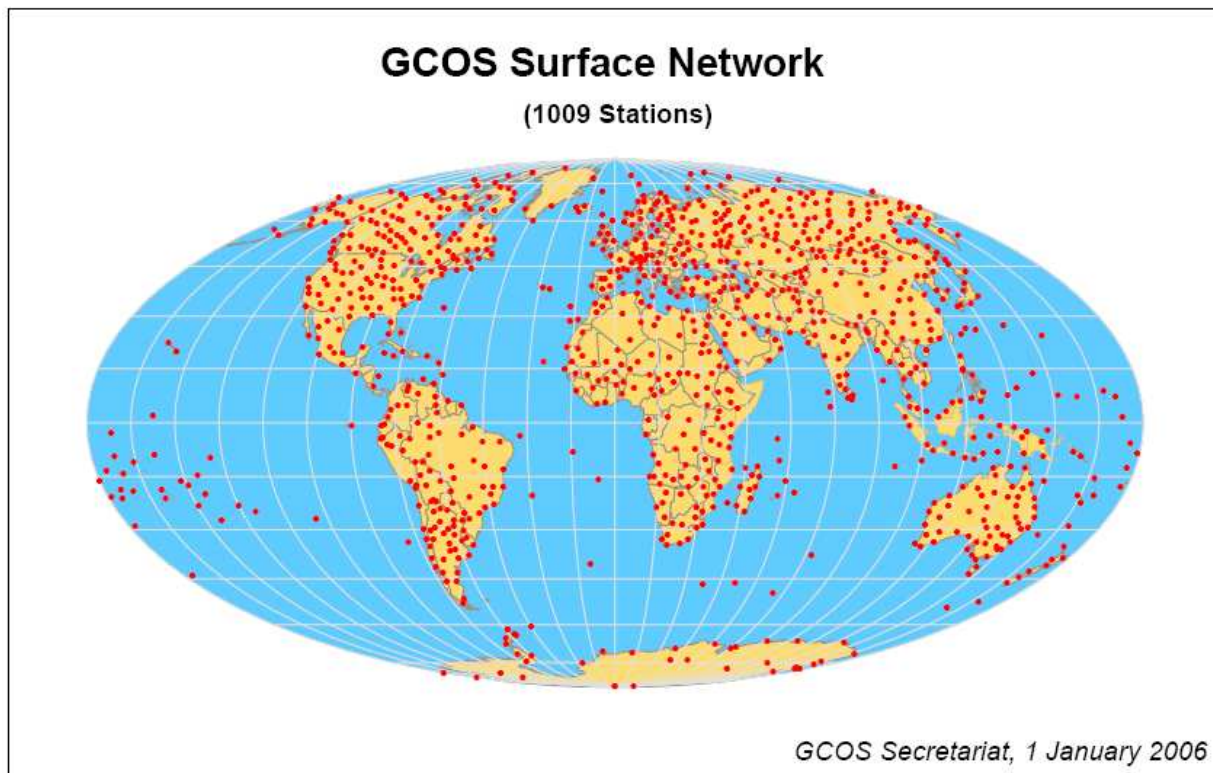


Рис. 3. Положение наземных станций для исследований климата Земли.



Рис. 4. Расположение систем аэрологического (радиозондового) зондирования атмосферы.

Международные сравнения измерений различными радиозондами [17] показали, что наиболее совершенные радиозонды измеряют профиль температуры в ночное время с погрешностью ± 0.2 С относительно выбранного стандарта. Примерно такая же картина наблюдается и при измерениях днем в тропосфере, но в стратосфере рассогласования достигают 0.5 С. Случайные погрешности измерений температуры меньше 0.2 К ночью и менее 0.3 К днем в тропосфере и нижней стратосфере. Солнечное нагревание приводит к существенным систематическим ошибкам, которые трудно исключить при давлении менее 100 мб.

Достигнут значительный прогресс в измерениях атмосферного давления. Относительные рассогласования измерений различных радиозондов составляют ± 0.1 % на высотах до 5 км, ± 0.3 % на 16 км (~ 100 мб) и достигают ± 12 % на высоте 31 км (~ 10 мб).

Точные измерения влажности атмосферы являются наиболее трудными. Их погрешности зависят от величины относительной влажности, температуры солнечного облучения, возмущений, обусловленных как водяными каплями, так и растворимыми органическими компонентами. Кроме того, возникают трудности измерений в связи с быстрыми изменениями влажности, особенно при прохождении радиозондами облаков. В отчете [17] указывается, что измерения с наиболее надежными радиозондами дали согласие в значениях относительной влажности в пределах ± 2 % до высот 14 км. Однако наблюдаются большие систематические отличия относительной влажности и в ночное, и в дневное время. При температурах выше 40° С максимальные отличия от измерений выбранным стандартом могут составлять 10 %. В дневное время многие радиозонды имеют систематические отличия в 10–20 % при температурах менее 40° С. Стандартные отклонения в значениях относительной влажности обычно относительно невелики при температурах выше 40° С – менее 5 %, что говорит о том, что случайные погрешности в измерениях относительной влажности много меньше, чем систематические.

Приведем, в качестве конкретного примера, основные характеристики измерений основных метеовеличин с помощью радиозонда Vaisala Radiosonde RS92-SGP [18].
Температура: диапазон измерений: (+ 60 ÷ – 90) С, разрешение: 0.1 С, абсолютная точность (общая неопределенность): 0.5 С, повторяемость (воспроизводимость) при калибровке: 0.15 С, воспроизводимость при зондировании: 0.2 С (в диапазоне 1080–100 мб); 0.3 С (в диапазоне 100–20 мб); 0.5 С (в диапазоне 20–3 мб).

Влажность: диапазон измерений: 0–100 %, разрешение: 1 %, общая неопределенность: 5 %, повторяемость при калибровке: 2 %, повторяемость при зондировании: 2 %.

Давление: диапазон измерений: 1080–3 мб, разрешение: 0.1 мб, полная неопределенность: 1 мб (в диапазоне 1080–100 мб); 0.6 мб (в диапазоне 100–3 мб), повторяемость при калибровке: 0.4 мб (в диапазоне 1080–100 мб), 0.3 мб (в диапазоне 100–3 мб).

Наконец, отметим, что современные радиозонды (например, радиозонд Vaisala RS 80-15 L) измеряют **скорость ветра** с погрешностями 1–2 м/с, направление ветра ~ 5° [19].

Более полная информация о погрешностях метеорологических наземных и радиозондовых измерений содержится, например, в отчетах [16, 20].

Система морских наблюдений включает измерения на дрейфующих и закрепленных буях, всплывающих буях, стационарных платформах, а также на кораблях. Кроме метеорологических измерений, аналогичных проводимым на наземных наблюдательных станциях, они поставляют такую важную информацию, как температура поверхности воды, период, высота волн и т.д. На рис. 5 приведены карты расположения буев в 2003 и 2009 гг. В феврале 2009 года действовало 549 буев, измерявших давление у поверхности из общего числа 1122 буй. Красные индикаторы показывают буи, измеряющие температуру воды, синие – температуру и давление, желтые – температуру, давление и ветер.

Типичные погрешности измерений различных метеорологических величин на буях приведены в [16]. Они составляют: температура поверхности воды – 0.5° С, давление воздуха – 1 мб, температура воздуха – 1° С, скорость ветра – 1 м/с или 10 %, направление ветра – 15 градусов, температура воды под поверхностью – 0.5° С, скорость течений – 2 см/с. Приведем также для примера погрешности измерений различных параметров с помощью буя Met. Satellite 2300 фирмы Marine Data Service [21]: направление ветра: ± 2 градуса, скорость ветра: ± 2 %, влажность: ± 2 %, температура воздуха: ± 0.5° С, давление воздуха: ± 0.15 мб, скорость течений: ± 1 %, направление течений: ± 3 %.

Эти буи в ряде случаев проводят также измерения количества растворенного кислорода в воде, проводимость воды, ее соленость, температуру воды, значения кислотности (водородный показатель рН), мутность воды, содержание нитратов, аммонитов, хлоридов и т.д.

С начала 2000-х годов функционирует система всплывающих буев (программа ARGO) в которой участвуют более 50 ведомств из 26 стран [22]. В настоящее время число этих буев превышает 3000. Функционирование этой системы скоординировано с топографическими исследованиями спутников Topex/Poseidon и Jason 1. Буи ARGO дрейфуют на глубине около 1000 м в течение 10 дней. Далее в течение примерно 2 часов

они осуществляют вертикальное сканирование толщи воды от 2000 м до поверхности и измеряют вертикальные профили давления, температуры и солености воды. Затем они остаются на поверхности в течение ~ 10 часов и передают собранные данные измерений с помощью спутников на наземные станции, позволяя также спутникам определять их движения. После этого они снова опускаются на глубину ~ 1000 м, и цикл повторяется. Ряд буев этой системы имеет дополнительное оборудование, например, для измерений количества растворенного в воде кислорода.

Число кораблей, участвующих в океанических наблюдениях в настоящее время, около 7000. Примерно 40 % из них осуществляют наблюдения непрерывно. Плавающие буи – их около 1200 – дают более 27 000 наблюдений температуры поверхности моря в день. Половина из этих буев дает также давление у поверхности морей – 14000 отчетов за день. На рис. 6 приведена карта всех океанических наблюдений, включающих различные типы измерений.

Система самолетных наблюдений включает более 3000 коммерческих самолетов, осуществляющих измерения давления, ветра и температуры во время полетов. Количество таких измерений существенно увеличилось за последние годы – от 78000 измерений в 2000 году до 300000 измерений в 2005 году. Наибольшая плотность самолетных измерений наблюдается над Атлантикой, благодаря многочисленным коммерческим полетам.

Спутниковая система наблюдений включает оперативные полярные и геостационарные спутники и ряд научно-исследовательских спутников.

Полярные спутники поставляют регулярную оперативную информацию о вертикальных профилях температуры и влажности, геостационарные – о характеристиках поля ветра в тропиках и многих других параметров. С геостационарных спутников поступает информация о состоянии атмосферы и поверхности в средних и тропических широтах с высокой периодичностью (15–30 мин.). Кроме данных, поступающих с оперативных спутников, значительное количество разнообразной информации собирается с научно-исследовательских спутников (НИС) различных стран. Разнообразные приборы НИС позволяют определять многочисленные параметры атмосферы и поверхности в научно-исследовательских целях. К ним можно отнести различные характеристики облачности, вертикальные профили и общее содержание озона и ряда малых газовых составляющих, оптические и микрофизические характеристики аэрозолей, водность облаков, интенсивность осадков и т.д. Более подробно спутниковая система наблюдений будет рассмотрена далее.

Другие системы наблюдательных станций и платформ осуществляют наблюдения различных характеристик поля излучения (актинометрические станции), грозовых разрядов, характеристик облаков, интенсивности осадков и их химического состава, характеристик поля ветра (ветровые зондировщики и доплеровские радары), характеристик газового и аэрозольного состава атмосферы, радиоактивности и т.д. Упомянем в связи с этим сеть станций GAW (Global Atmospheric Watch), осуществляющих в основном локальные измерения многочисленных характеристик газового и аэрозольного состава приземной атмосферы, осадков и солнечной радиации. Квазиоперативная наблюдательная система GAW включает глобальную систему наблюдений озона (140 станций), систему наземных станций измерений приземных содержаний углекислого газа и метана, атмосферных загрязнений (около 200 станций), контролирующих состав атмосферы и осадков, солнечную радиацию и атмосферную прозрачность и т.д. На рис. 7 приведено расположение наземных станций для измерений общего содержания озона (ОСО), использующих спектрометры Добсона и Брюера, а также фотометры М-124.

В рамках программы глобальных атмосферных наблюдений (The Global Atmosphere Watch (GAW)) ВМО осуществляются измерения различных параметров окружающей среды, включая исследования биохимических циклов CO_2 , CH_4 , N_2O , и других долгоживущих газов и содержания некоторых парниковых газов. Так измерения содержаний таких парниковых газов, как CO_2 , CH_4 , CFCs, N_2O , и т.д., а также химически активных газов (O_3 , CO, NO_x , SO_2 , VOC – volatile organic compounds, летучие органические газы и т.д.) в атмосфере и океане собираются и распространяются Мировым центром парниковых газов (World Data Centre for Greenhouse Gases (WDCGG)) метеослужбы Японии. Имеются специальные сети наблюдений концентраций важнейших парниковых газов – CO_2 и метана

Важную роль в исследовании и контроле состояния озоносферы имеет сеть озонозондных станций, осуществляющая периодические (в среднем один раз в неделю) измерения вертикальных профилей содержания озона. В настоящее время эту сеть составляют примерно около 100 станций вертикального зондирования. На рис. 8 приведен пример, иллюстрирующий подготовку к запуску озонозонда над Антарктидой. Начиная с 1970-х годов, с самого момента обнаружения разрушений озонового слоя над Антарктидой, там регулярно проводятся измерения профиля озона несколькими различными способами (фото NOAA).

Различные параметры верхней атмосферы измеряются на относительно немногочисленных станциях ракетного зондирования. Многие из упомянутых систем измерений используются для валидации спутниковых дистанционных измерений различных параметров атмосферы и поверхности.

Огромное значение имеют данные гидрологических станций, измеряющих такие параметры, как осадки, испарение, водосток, уровни воды, качество воды, перенос взвесей, подземный уровень воды, массу ледников, размеры, толщину и водный эквивалент снежного покрова и т.д.

Упомянем сеть станций наблюдений изменений стратосферы (NDSC, Network for the Detection of Stratospheric Change), которая теперь называется Сеть наблюдений изменений атмосферного состава (The Network for the Detection of Atmospheric Composition Change, NDACC) [23].

Основными целями этой системы измерений являются:

- исследования пространственных и временных вариаций состава и структуры атмосферы для раннего обнаружения и мониторинга долговременных изменений физических и химических характеристик стратосферы и нижней тропосферы с целью изучения причин этих изменений;
- изучение взаимосвязей между изменениями стратосферного озона, УФ радиации на поверхности, тропосферной химией и климатом;
- калибровка и валидация спутниковых приборов и получение дополнительных данных измерений;
- участие в программах натуральных исследований различных процессов и явлений в различные сезоны и в разных широтных поясах;
- обеспечение достоверной информацией для тестирования и усовершенствования численных моделей стратосферы и тропосферы различной размерности.

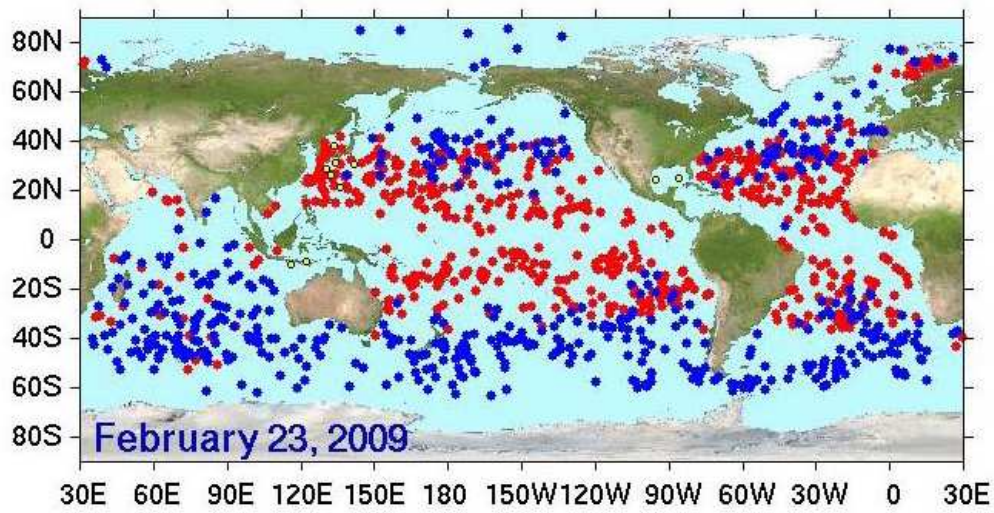
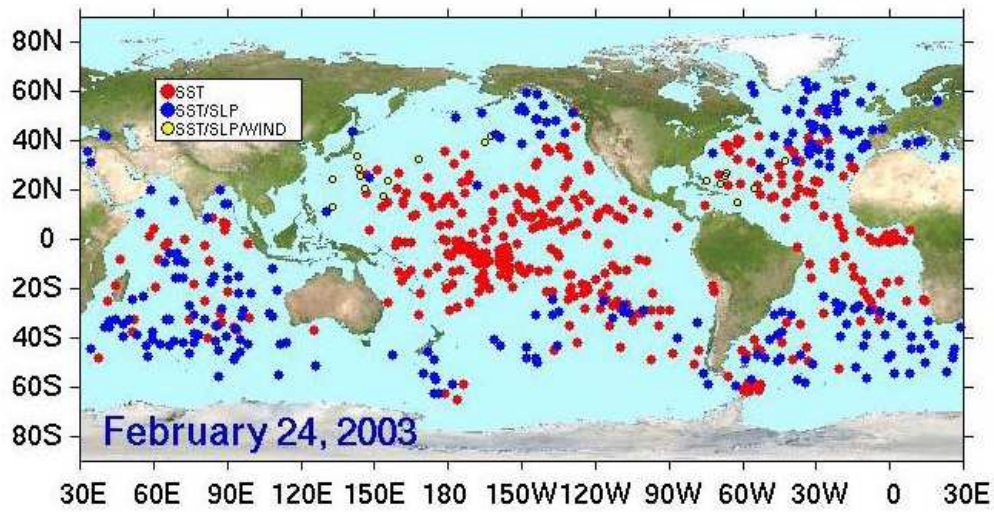


Рис. 5. Расположение различных типов буев в 2003 и 2009 годах.



Рис. 6. Расположение океанических наблюдений различного типа.

WOUDC Active Data in Archive Map View of Platforms

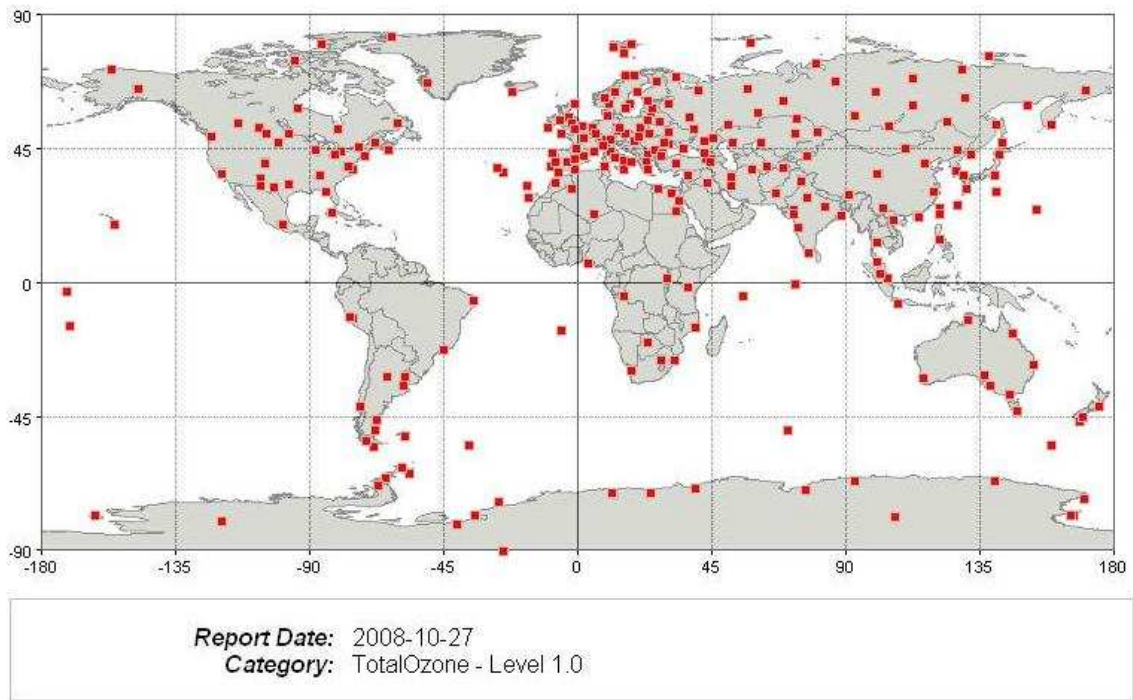


Рис. 7. Расположение озонметрических станций.



Рис. 8. Подготовка к запуску озонозонда над Антарктидой.

Для примера приведем список основных приборов, используемых на типичных станциях NDAAC, и измерений, проводимых на них:

- озонный лидар – измерения вертикальных профилей содержания озона от тропопаузы до высот, по крайней мере, 40 км (в ряде случаев осуществляются измерения содержания озона в тропосфере);
- лидар температурного зондирования – измерения профиля температуры на высотах 30–80 км;
- аэрозольный лидар – измерения вертикальные профилей аэрозольной оптической толщины в нижней стратосфере;
- лидар для измерений содержания водяного пара в нижней стратосфере;
- МКВ радиометр для определения содержания озона на высотах 20–70 км;
- МКВ радиометр для измерений содержания водяного пара на высотах 20–80 км;
- МКВ радиометр для измерений содержания ClO на высотах 25–45 км (в зависимости от широты измерений);
- спектрометр для УФ и ВИД областей спектра – измерения общего содержания озона, NO₂ (на некоторых широтах – содержания OCIO и BrO);
- ИК Фурье-спектрометр высокого спектрального разрешения – измерения общих содержаний различных МГС, включая озон, HCl, NO, NO₂, ClONO₂, HNO₃ и др.;
- спектрометры Добсона и Брюера для измерений общего содержания озона;
- озонозонды для измерений вертикальных профилей температуры и содержания озона от поверхности до 30 км.

Для систематических исследований аэрозольных характеристик создана и функционирует наземная сеть AERONET (**AE**rosol **RO**botic **NET**work), которая включает более 200 станций наблюдений, распределенных по всему земному шару, и оборудована автоматическими фотометрами, измеряющими прямое и рассеянное солнечное излучение в видимой и ближней инфракрасной (БИК) областях спектра (рис. 9) [24].

Данные измерений этой сети позволяют осуществлять долговременные исследования оптических и микрофизических характеристик атмосферного аэрозоля, валидировать спутниковые измерения этих характеристик. В последние годы приборы сети AERONET стали эффективно использоваться и для исследования водных поверхностей и водных сред.

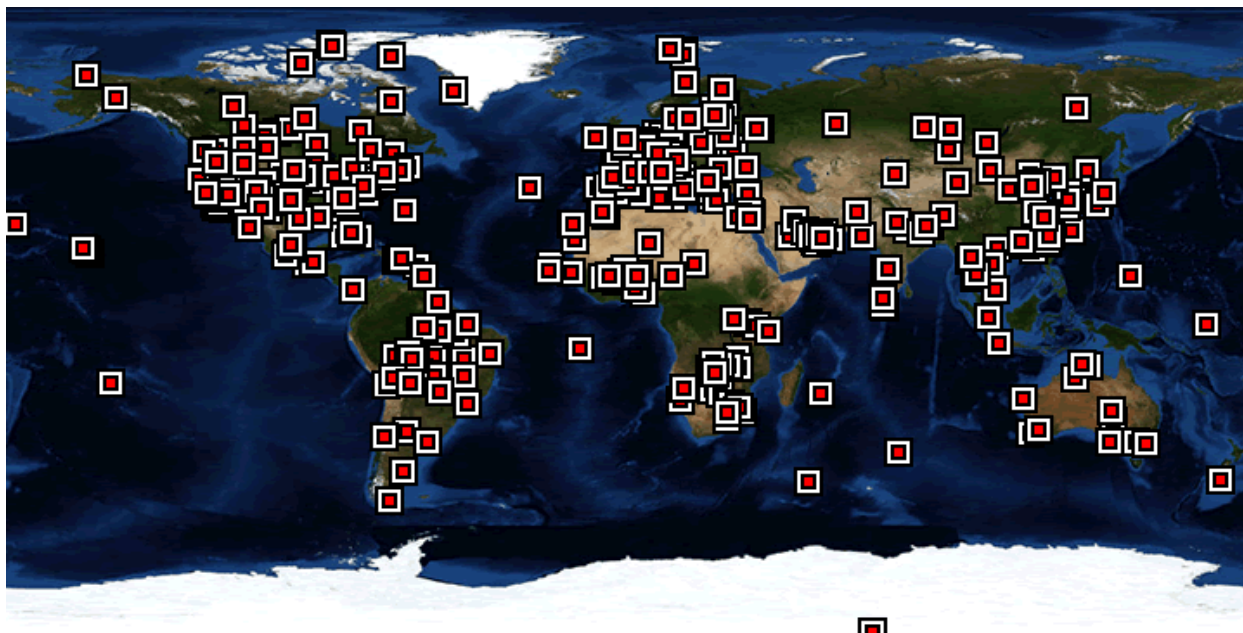


Рис. 9. Расположение станций сети AERONET.

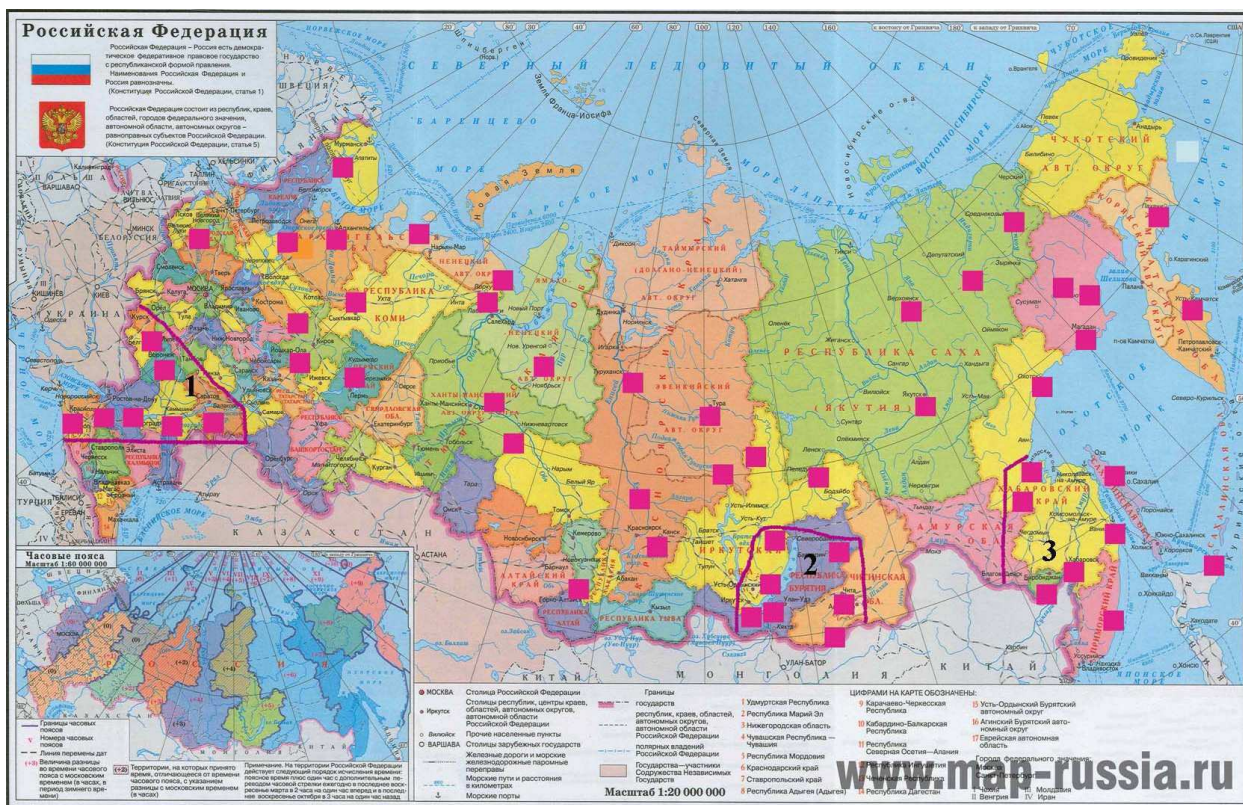


Рис. 10. Карта расположения актинометрических станций в России [29].

Значительное количество данных о состоянии атмосферы позволяют получать наземные лидарные станции. Например, европейская сеть лидарных станций (EARLINET, European Aerosol Research Lidar Network), была сформирована в 2000 году для осуществления регулярных измерений распределения аэрозолей над континентом. Она включала 25 станций от Мадрида до Бельска и от Андои до Афин. На станциях использовались 7 стандартных лидаров обратного рассеяния, 9 рамановских лидаров и 9 многоволновых рамановских лидаров. Лидары осуществляли измерения практически одновременно три раза в неделю по согласованной программе [25, 26]. Кроме регулярных измерений, которые позволяли создать климатологические базы данных, сеть лидаров позволяла исследовать особенности таких явлений, как пылевые облака из Сахары, лесные пожары, вулканические извержения и фотохимический смог. Базы данных измерений, начатых в 2000 году, включают 17000 профилей аэрозольных коэффициентов ослабления, рассеяния назад и лидарного отношения. Данные измерений описаны подробно на сайте [26].

В 2004–2007 гг. была создана лидарная сеть СНГ (CIS-LiNet) [27]. Она включает 7 лидарных станций, расположенных в Минске, Томске, Москве, Владивостоке, Сургуте, в районе озер Байкал и Иссык-Куль. Измерения в рамках сетей EARLINET и CIS-LiNet впервые показали, что пылевые бури пустынь Африки, Гоби и Средней Азии загрязняют атмосферу в различных регионах и, в частности, в Беларуси, Восточной Сибири, Приморском крае и альпийской зоне Тянь-Шаня.

Значительное количество уникальной информации о параметрах атмосферы и атмосферных процессах получается с помощью научно-исследовательских самолетных и аэростатных программ измерений. Часто эти программы организуются также для валидации измерений новых спутниковых приборов.

Обширную информацию об интенсивности осадков, характеристиках облачности и поля ветра поставляют региональные и национальные системы радиолокационных наблюдений. При этом используются погодные (Weather radar) и доплеровские радары [28].

Систематические наблюдения атмосферной радиации осуществляются на всемирной сети актинометрических станций. В настоящее время в эту сеть входят примерно 500 станций в 30 странах мира. На этих станциях измеряются потоки солнечной (прямой, рассеянной и отраженной) и тепловой радиации. На рис. 10 приведена карта расположения актинометрических станций в России [29].

5. Спутниковая система наблюдений

В условиях относительно ограниченной плотности сети локальных наблюдений в ряде стран, как на суше, так и над океанами, и необходимости получения глобальной информации о состоянии атмосферы и поверхности с высокой периодичностью и пространственным разрешением, измерения дистанционными методами становятся регулярным и часто важнейшим видом наблюдений характеристик атмосферы и поверхности [30]. Так, например, гидродинамические модели объективного анализа и прогноза в качестве исходных данных используют, наряду с данными гидрометеорологической сети наблюдений, информацию, получаемую дистанционными методами, в том числе с помощью ИСЗ. Значительна роль спутниковых наблюдений в климатических исследованиях, а также в изучении закономерностей разнообразных процессов и явлений, происходящих в системе атмосфера-поверхность, и потоков э.м. и корпускулярного излучения, приходящих на верхнюю границу атмосферы. Над океанами ИСЗ являются, в большинстве случаев, важнейшими источниками информации. Такая же картина в ряде районов на материках (Сибирь, приполярные районы). На рис. 11 приведена для иллюстрации современная международная конфигурация различных спутников, используемых для изучения состояния атмосферы и поверхности.

На приведенном рисунке указаны геостационарные спутники различных ведомств и стран (Meteosat, MSG, GOES, GMS, GOMS, COMS, INSAT), полярные спутники (Metop, METEOP 3M, FY-1/3, NPOESS и т.д.), научно-исследовательские спутники (ENVISAT/ERS-2, Meteor-3M No.1, SPOT-5, TERRA, Aqua, TRMM, Quicksat, Jason-1, Ocean series и т.д.). Для иллюстрации на рис. 12 изображены геостационарные спутники MSG (ESA) и GOES-8 (NASA).

Прежде чем переходить к рассмотрению различных типов современных спутников и приборов для измерений параметров атмосферы и поверхности, установленных на спутниках, напомним некоторые полезные определения [31].

Геосинхронная орбита – орбита вокруг Земли, для которой период обращения находящегося на ней спутника равен звёздному периоду вращения Земли – 23 час. 56 мин. 4.1 с. Спутник на геосинхронной орбите, наклонённой к экваториальной плоскости Земли, в течение суток описывает в небе восьмёрку.

Если такая орбита круговая и лежит в плоскости земного экватора, то спутник в небе практически неподвижен, и в этом случае его орбита называется **геостационарной**. **Геостационарная орбита** (ГСО) проходит на высоте 35 786 км. Это круговая орбита, расположенная над экватором Земли (0° широты), находясь на которой, искусственный

спутник обращается вокруг планеты с угловой скоростью, равной угловой скорости вращения Земли вокруг оси, и постоянно находится над одной и той же точкой на земной поверхности. Геостационарная орбита является разновидностью геосинхронной орбиты и используется для размещения искусственных спутников (коммуникационных, телетрансляционных, метеорологических и т. п.). На рис. 13 приведено изображение геостационарной орбиты.

В табл. П.1 (Приложение 1) приведены действующие на 29 июня 2009 года оперативные спутники, находящиеся на геостационарных орбитах (на высоте примерно 36 000 км), а в табл. П.2 – примеры запланированных к запуску. Расшифровка сокращенных названий приборов приведена в Приложении 2.

Геостационарные спутники позволяют получать информацию о состоянии системы атмосфера-поверхность на огромных площадях с высокой периодичностью (каждые 15–30 минут). Приборы на геостационарных спутниках измеряют уходящее излучение в широкой области спектра с хорошим пространственным (горизонтальным) разрешением (1–10 км и меньше, см. далее) за счет углового сканирования или использования видеоприборов (многоэлементных линеек или матриц приемников излучения). Кроме этого, спутники этого типа имеют специальную аппаратуру для приема информации с различных систем измерений и передачи ее в наземные центры приема информации. Как видно из приведенной табл. П 1 (см. Приложение 1), в настоящее время в разных фазах использования находятся геостационарные спутники США (NOAA), Европейского сообщества (EUMETSAT), России, Японии и Китая. Геостационарные спутники позволяют осуществлять периодический мониторинг состояния атмосферы и поверхности на широтах $\sim 0 \pm 60$ градусов.

Значительной проблемой современной гидрометеорологии является отсутствие достоверной, обновляемой с высокой периодичностью информации о состоянии полярных районов земного шара. Для преодоления этих недостатков современной космической системы наблюдения было предложено создать новую систему наблюдений параметров окружающей среды – высокоэллиптическую космическую систему [32] – рис. 14.

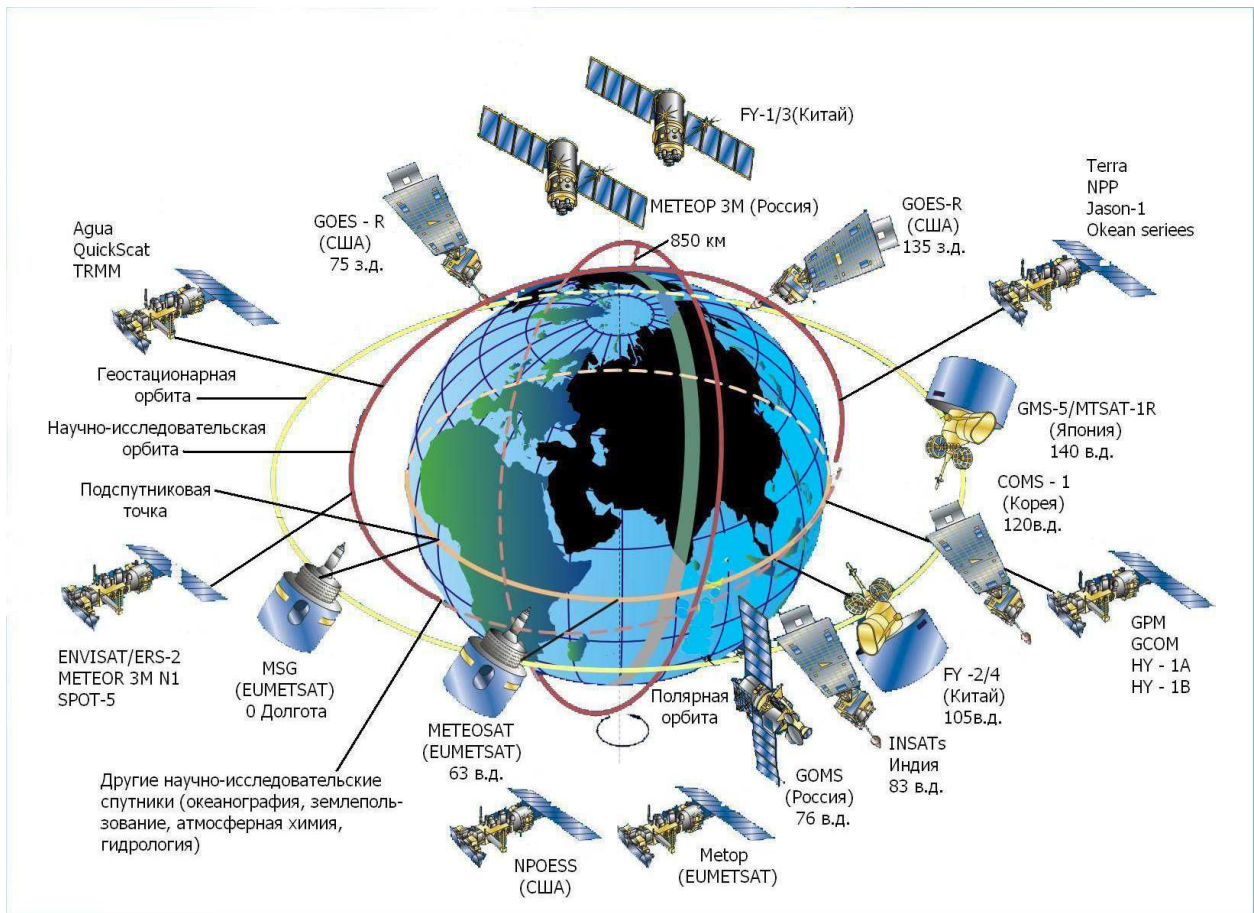


Рис. 11. Спутниковая система наблюдений [7].

а)

б)



Рис. 12. Геостационарные спутники: а) MSG (ESA) и б) GOES-8 (NASA).

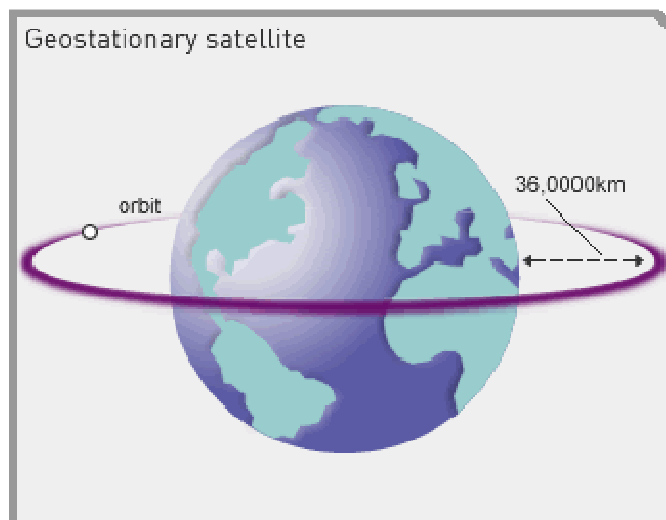


Рис. 13. Орбита движения геостационарных спутников.

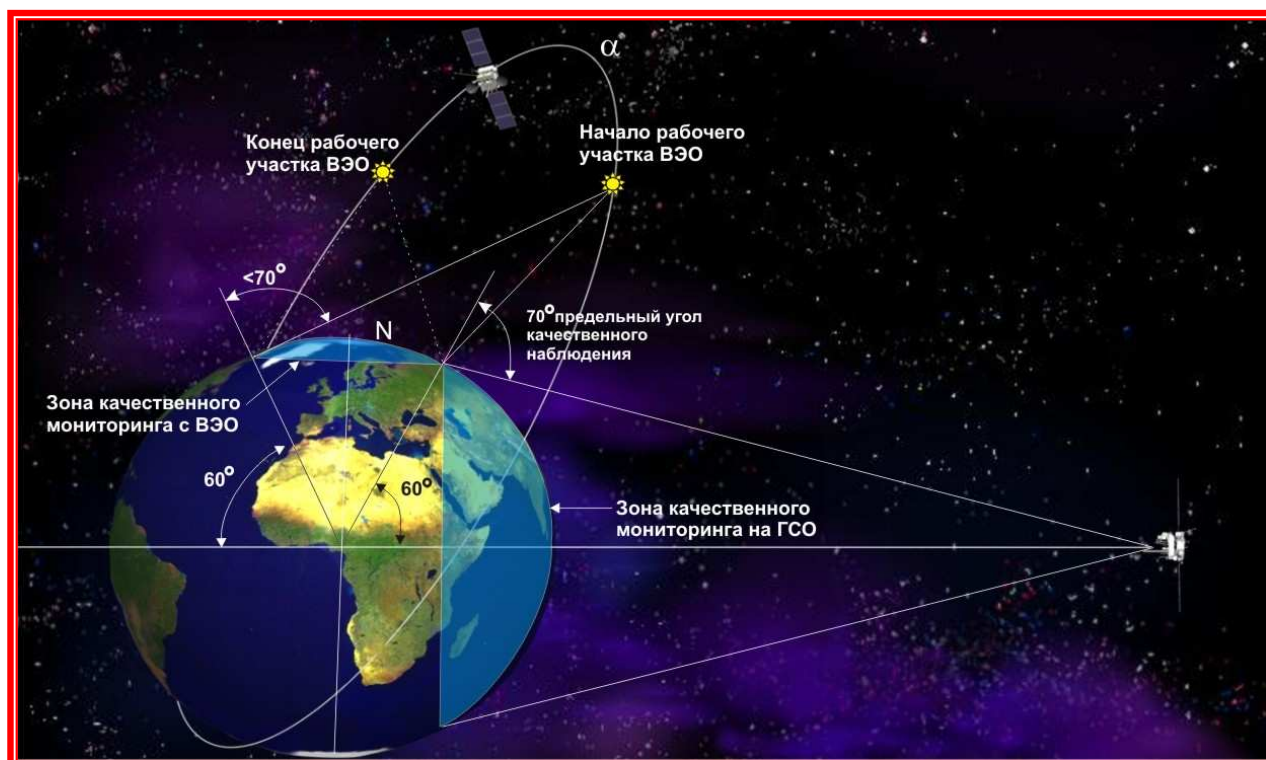


Рис. 14. Сравнение областей измерений с помощью высокоэллиптических и геостационарных спутниковых орбит [32].

Для обеспечения гидрометеорологического мониторинга северных территорий с периодичностью обзора и качеством данных, аналогичных геостационарной системе, предлагается космическая система в составе двух космических аппаратов на высокоэллиптических орбитах со следующими характеристиками: высота апогея ~ 40000 км, высота перигея ~ 1000 км, наклонение ~ 63°, период обращения – 2 часа.

Основная задача такой космической системы будет состоять в оперативном получении скорости и направления ветра, параметров облачности, осадков, ледовой обстановки и т.д. по Арктическому региону для информационного обеспечения анализа и прогноза погоды.

Полярные спутники обеспечивают более глобальный охват наблюдениями Земли. Их орбиты имеют наклон к экваториальной плоскости близкой к 90°. Высота таких спутников от поверхности Земли составляет обычно 800–1000 км (рис. 15). Различные полярные спутники проходят экватор в различное время. Например, спутники на солнечно-синхронных орбитах проходят экватор и каждую широту в одно и то же местное солнечное времени каждый день. Орбитальная плоскость солнечно-синхронной орбиты должна вращаться примерно на один градус в день, чтобы сохранять положение на поверхности Земли.

Наконец укажем на спутники, имеющие наклонную орбиту. Это чаще всего научно-исследовательские спутники, а также космические станции. В этом случае угол между плоскостью орбиты и экваториальной плоскостью имеет промежуточное значение в диапазоне от 0 до 90 градусов. Например, Международная Космическая Станция имеет наклонную орбиту с углом 51.6 градуса. В табл. П.3 и П.4 (Приложение 1) приведена информация о действующих (табл. П.3) и планируемых к запуску (табл. П.4) оперативных полярных спутниках для наблюдений параметров атмосферы и поверхности. Отметим, что приведенные в таблицах сроки запусков могут пересматриваться по разным причинам.

Программа NOAA полярных оперативных спутников предусматривает наличие двух основных спутников, одного вспомогательного, двух ожидающих (standby, запасных) и одного неоперативного спутника [33]. Эти спутники находятся на орбите с углом наклона примерно 98 градусов и движутся в направлении, обратном вращению Земли.

На рис. 16 представлена создающаяся в настоящее время российская спутниковая гидрометеорологическая система, в которой будут функционировать два геостационарных спутника (Электро No. 1 и 2), два высокоэллиптических спутника (Арктика No. 1 и 2) и несколько полярных спутников «Метеор» – метеорологических и океанографических [32, 34].

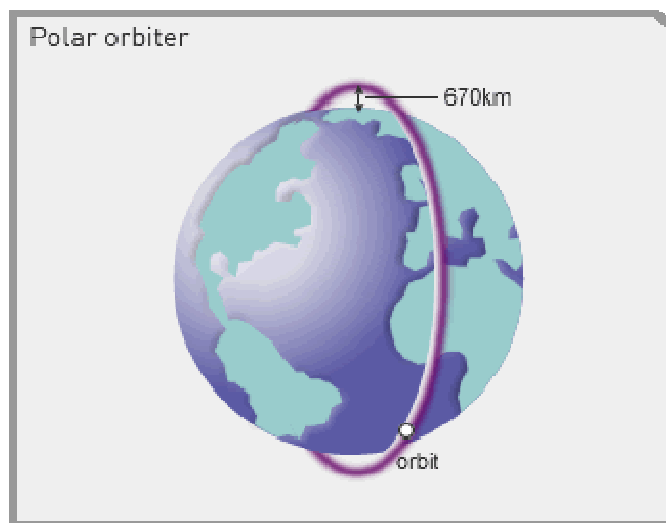


Рис. 15. Орбита движения полярных спутников.



Рис. 16. Перспективная российская гидрометеорологическая система спутников.

Значительное количество важной информации о различных характеристиках атмосферы и поверхности получается с помощью разнообразной аппаратуры, функционирующей на многочисленных **научно-исследовательских спутниках (Research and Developed Satellites, R&D satellites)**. Кроме того, на научно-исследовательских спутниках отрабатываются новые методики и аппаратура дистанционного зондирования, которые затем используются на оперативных спутниках. В табл.П.5 и П.6 (Приложение 1) приведена основная информации о действующих и планируемых к запуску научно-исследовательских спутниках, осуществляющих исследования разнообразных характеристик атмосферы и поверхности.

Приведенные в таблицах Приложения 1 данные наглядно свидетельствуют о широте и многообразии использования различных дистанционных методов и аппаратуры для измерений параметров окружающей среды на спутниках различного типа.

6. Классификация дистанционных методов измерений

Мы будем рассматривать далее дистанционные методы измерений, основанные на использовании электромагнитного (э.м.) излучения. Эти методы измерений параметров окружающей среды принято классифицировать по различным признакам [35]:

- по используемому излучению (природе излучения, источнику излучения);
- по основным процессам взаимодействия излучения с исследуемой средой;
- по условиям освещения (времени суток);
- по области спектра э.м. излучения;
- по определяемому параметру;
- по геометрии или схеме измерений;
- по используемому носителю.

Прежде всего, принято дистанционные методы измерений подразделять на пассивные и активные (по природе используемого излучения). К пассивным методам, использующим измерения характеристик естественных полей излучения, относятся методы:

- ослабления и поглощения (методы прозрачности), прежде всего, солнечного излучения, но и излучения Луны и звезд;
- собственного излучения (равновесного и неравновесного) атмосферы и поверхности;
- рассеянного излучения (солнечного и отраженного от Луны);
- отраженного излучения;
- рефракции.

Часто третий и четвертый пассивные методы объединяют в один – метод рассеянного и отраженного излучения (например, солнечного излучения).

Активными методами зондирования, использующими искусственные источники электромагнитного (э.м.) излучения, являются:

- лазерное зондирование;
- радиолокационное зондирование;
- метод рефракции;
- метод ослабления и поглощения.

Классификация дистанционных методов измерений по основным процессам взаимодействия излучения с исследуемой средой близка приведенной выше. В этой классификации выделяются методы:

- рассеяния (различных типов – молекулярного (релеевского), аэрозольного, комбинационного и т.д.);
- ослабления (поглощения);
- собственного излучения;
- рефракции и т.д.

В этой классификации методы поглощения, рассеяния и рефракции могут использоваться и в пассивных и активных методах измерений.

По условиям освещения (времени суток) дистанционные методы можно подразделить на:

- дневные (над освещенной стороной планеты);
- ночные;
- методы, используемые в области терминатора (область перехода от дневной к ночной стороне планеты).

Последние методы, особенно при наземной схеме измерений, часто называют методами сумеречного зондирования. Первый и третий методы связаны с использованием солнечного излучения как источника информации о состоянии среды и применимы для дневной стороны планеты и области терминатора, второй метод – собственного излучения (свечения) атмосферы можно использовать в любое время суток, по крайней мере, для ИК и МКВ диапазонов (влияние «мешающего» солнечного излучения в этих областях спектра очень мало). В ночное время дистанционные методы, кроме того, могут быть основаны на измерениях излучения звезд и отраженного от Луны солнечного излучения, а также различных свечений атмосферы. Использование излучения звезд, в принципе, возможно и

в дневное время, но при этом необходимо исключать компоненту солнечного излучения с высокой точностью.

Активные методы зондирования можно, в принципе, также использовать в любое время суток. Однако наличие днем значительного уровня отраженного и рассеянного солнечного излучения в определенной степени затрудняет использование, например, лазерных методов в видимой и ближней инфракрасной областях спектра.

Существует классификация дистанционных методов, основанная на используемой области спектра, т.е. методы, использующие:

- ультрафиолетовую (УФ),
- видимую (ВИД),
- ближнюю инфракрасную (БИК),
- инфракрасную (ИК),
- микроволновую (МКВ),
- сантиметровую (СМ) области спектра.

С точки зрения используемого носителя дистанционные методы подразделяются на наземные, самолетные, аэростатные, ракетные и космические.

По геометрии измерений космические методы обычно подразделяют на методы надирного и касательного (лимбового, на горизонт планеты) зондирования. На рис. 17 изображены различные типы геометрии и различные методы космических измерений параметров атмосферы и поверхности.

Диапазон углов сканирования, угловая апертура приборов, тип сканирования и высота космического носителя определяют пространственную область и горизонтальное разрешение дистанционных измерений. Эти характеристики очень важны, так как определяют возможность осуществления глобальных наблюдений, периодичность наблюдений, подробность исследования состояния атмосферы и подстилающей поверхности и, следовательно, перспективность их использования при решении различных научных и прикладных задач.

При **надирной геометрии измерений** (или близкой к ней наклонной) уходящее излучение регистрируется в направлениях вблизи местного вертикала. При этом большинство современных спутниковых приборов осуществляет угловое сканирование вблизи надира (в большинстве случаев перпендикулярно плоскости орбиты), что позволяет получать горизонтальные поля исследуемых характеристик. Аналогичный результат может быть получен при использовании специальных приемников излучения – линейчатого или матричного типов. На рис. 18 приведен пример пространственного сканирования радиометром SSM/I, установленного на спутниках серии DMSP [36].

Решение обратных задач атмосферной оптики позволяет осуществлять вертикальное сканирование атмосферы и, тем самым, благодаря определенной геометрии измерений, получать трехмерные поля параметров атмосферы и поверхности.

Касательная геометрия спутниковых измерений используется, в основном, для всех пассивных методов – методе прозрачности, собственного излучения и отраженного солнечного излучения. При этом сканирование горизонта (измерения при разных прицельных расстояниях – минимальных расстояниях от поверхности Земли) позволяет получать информацию о вертикальных профилях различных атмосферных параметров с хорошим пространственным, но относительно грубом горизонтальным разрешением. Недостатком подхода являются трудности получения информации о параметрах тропосферы (наличие облаков, большая оптическая плотность) и низкое горизонтальное разрешение.

Для некоторых спутниковых пассивных методов можно использовать оба типа геометрии измерений, для методов прозрачности и рефракции – только лимбовую геометрию (касательные трассы). Активные методы зондирования осуществляются при различной геометрии измерений, но лазерные и радиолокационные методы используют в основном надирную и наклонную (наблюдения под определенным углом к местному вертикалу) геометрию измерения, а методы поглощения и рефракции – касательную.

Дистанционные методы измерений параметров атмосферы и подстилающей поверхности можно классифицировать по определяемому параметру. По этой классификации выделяются дистанционные методы для определения:

- температуры, плотности и давления атмосферы;
- характеристик облаков – бальности, высоты верхней и нижней границ (вертикальной структуры), температуры верхней границы (в.г.), водности, фазового состава, микрофизики облаков;
- интенсивности осадков;
- содержания поглощающих газов – водяного пара, озона и других малых газовых составляющих (МГС);
- поля ветра;
- характеристик аэрозолей (оптических и микрофизических);
- свойств подстилающей поверхности – температуры, влажности и оптических характеристик подстилающих поверхностей (отражательных и излучательных способностей).

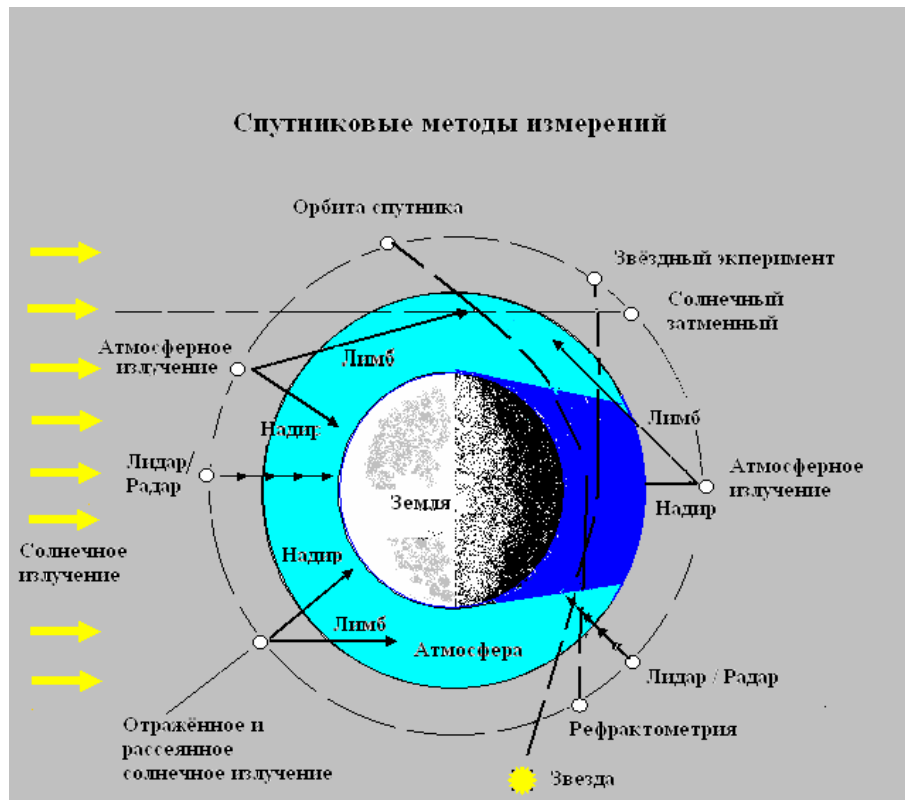


Рис. 17. Спутниковые дистанционные методы измерений – геометрия и различные методы.

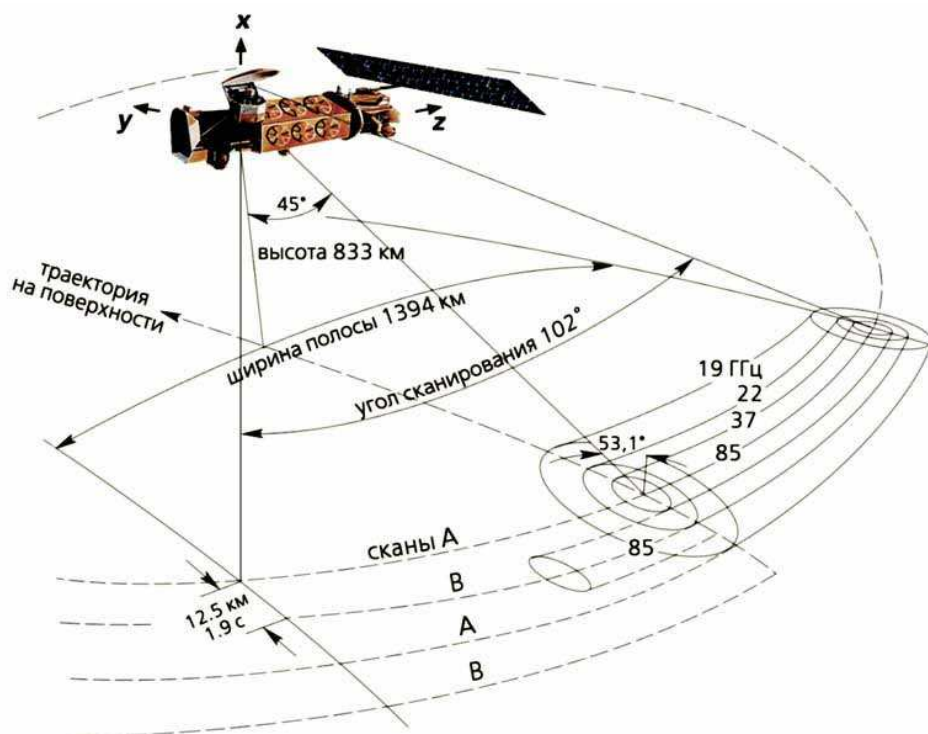


Рис. 18. Схема полосы сканирования многоканального радиометра SSM/I (микроволнового сканера), установленного на спутниках серии DMSP.

7. Спутниковые приборы для дистанционного зондирования атмосферы и поверхности

В настоящее время на спутниках для зондирования атмосферы и поверхности используются различные дистанционные методы, различные спектральные области измерений от УФ области до радиодиапазона и многочисленные, часто уникальные, приборы. Подробному описанию космических систем и приборов посвящена, например, объемная монография-справочник Крамера [37]. В табл. 11 приведена сводка различных дистанционных спутниковых методов и используемой аппаратуры для определения параметров атмосферы и поверхности.

Таблица 11. Спутниковые методы измерений параметров атмосферы и поверхности

Методы	Определяемые параметры	Примеры аппаратуры	Примечание
Пассивные методы			
Прозрачность атмосферы (затменный метод, occultation method)	Газовый состав, коэффициент аэрозольного ослабления, микроструктура аэрозолей и облаков, температура, населенности состояний	SAM II, SAGE I, II, III, Озон-Мир, POAM II, III, ILAS I, II, HALOE, ATMOS, ACE, MAESTRO, SCIAMACHY, UVISI/MSX	Использование излучения Солнца, Луны, звезд в УФ, ВИД и БИК областях спектра. Касательные трассы, восходы и заходы источника.
Собственное излучение атмосферы и поверхности (atmospheric radiation method)	Температура, газовый состав, аэрозоли, облака, микроструктура аэрозолей и облаков, колебательные температуры, оптические и физические характеристики поверхностей.	LIMS, ISAMS, SSM/I, MAS, TOVS, MLS, CIRRIS 1A, CLAES, MIPAS, TES, HIRDLS, MSU, CRISTA, TMI, SEVIRI, SABER	Собственное равновесное и неравновесное излучение атмосферы в ИК и МКВ областях, а также свечения верхней атмосферы в УФ, ВИД и БИК областях спектра. Надирная и касательная геометрия.
Рассеянное солнечное излучение (scattered solar radiation method)	Газовый состав, характеристики аэрозолей и облаков, оптические и физические характеристики поверхностей.	AVHRR, TOMS, SBUV, GOME, SCIAMACHY, OMI, MODIS, POLDER, LORA,	Рассеянное излучение в УФ, ВИД и БИК областях спектра. Надирная и касательная геометрия
Рефракция (refraction method)	Температура и плотность, содержание водяного пара, характеристики турбулентности, гравитационных волн,	ЭФО-1, ЭФО-2, UVISI/MSX, GOMOS	Измерения изображений Солнца, измерения углов рефракции для излучения внешних источников
Активные методы			
Лидарное зондирование Lidar	Аэрозоли, облака, высота облачности, поле ветра, оптические и физические характеристики поверхностей.	ALISSA, LITE, GLAS, ELISE	Проведены первые успешные спутниковые эксперименты
Рефракция Refraction	Температура, влажность в тропосфере, характеристики турбулентности, гравитационных волн, ионосферы.	Microlab-1, GPS системы	Использование GPS и специальных спутников
Радиолокация Radar	Скорость ветра, характеристики облаков, осадков и поверхности	AMI, NSCAT, SeaWinds, ASCAT, PR (TRRM), РЛС БО	Высокое пространственное разрешение при использовании радаров с синтезированной апертурой

Приборы геостационарных спутников

Приведем примеры приборов, установленных на различных спутниках, и укажем определяемые ими параметры [38].

Прибор SEVIRI на геостационарном спутнике Meteosat-8 (MSG) измеряет уходящее излучение в 12 спектральных каналах в видимой и ИК областях спектра. Эти измерения позволяют изучать характеристики облачности, океанов и суши, содержание водяного пара в тропосфере, поля ветра в тропосфере, дают информацию об общем содержании озона, температуре поверхности. При этом эта информация может быть получена с высоким временным разрешением (каждые 15 минут) на огромных территориях (± 60 градусов от подспутниковой точки с пространственным разрешением 1–3 км в надире). На рис. 19 показано поле обзора геостационарного спутника MSG, расположенного на гринвичском меридиане, включающее всю Европу, всю Африку и все территории, для которых высота спутника над горизонтом превышает или равна 10 градусов.

В качестве примера использования данных измерений SEVIRI приведем карту общего содержания озона (в единицах Добсона), определенную с помощью прибора SEVIRI 16 февраля 2006г в 11 час. 45 мин. в области, ограниченной экватором, параллелью 5° с.ш и долготами 40 и 50° в.д. [39] (рис. 20).

Сканер (имаджер) геостационарного спутника GOES (I-M Imager) имеет 5 спектральных каналов (1 – в видимой области и 4 – в ИК) и позволяет изучать характеристики океанов и суши, облачность и т.д. Горизонтальное разрешение в различных каналах варьируется от 1 до 8 км.

Зондировщик (Sounder) GOES имеет 19 каналов в широкой спектральной области от видимой до 15 мкм. Этот прибор предназначен для получения вертикальных профилей температуры и влажности, температур поверхности и верхних границ облаков, содержания озона [40]. В таблице 12 приведены основные характеристики параметров, определяемых с помощью этого прибора.

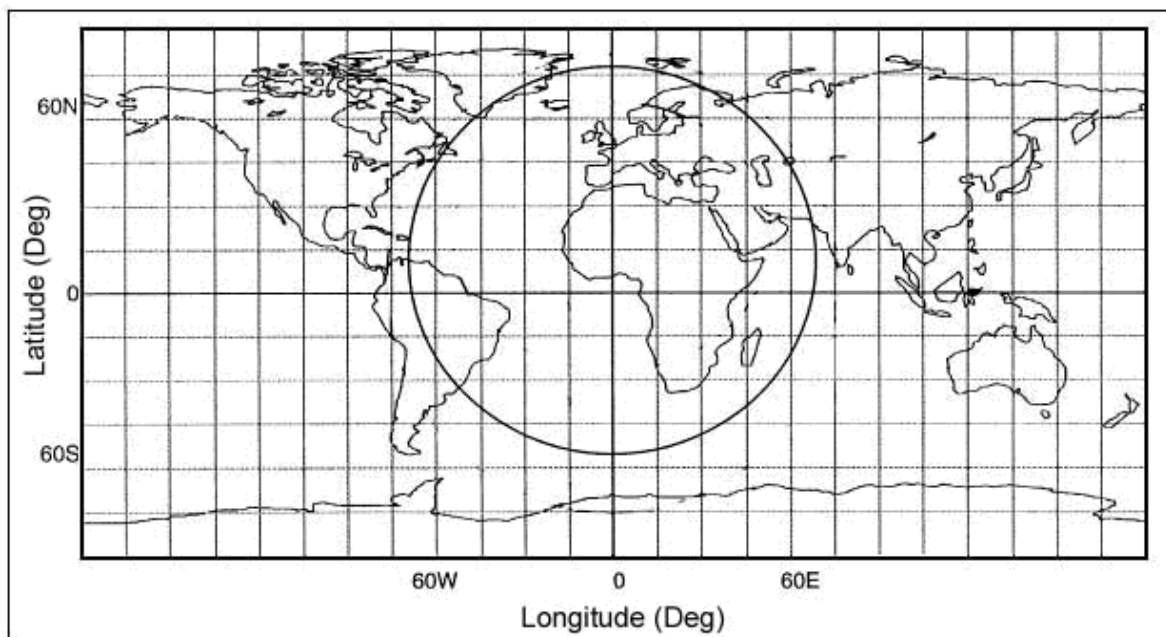


Рис. 19. Поле обзора спутника MSG (круг).

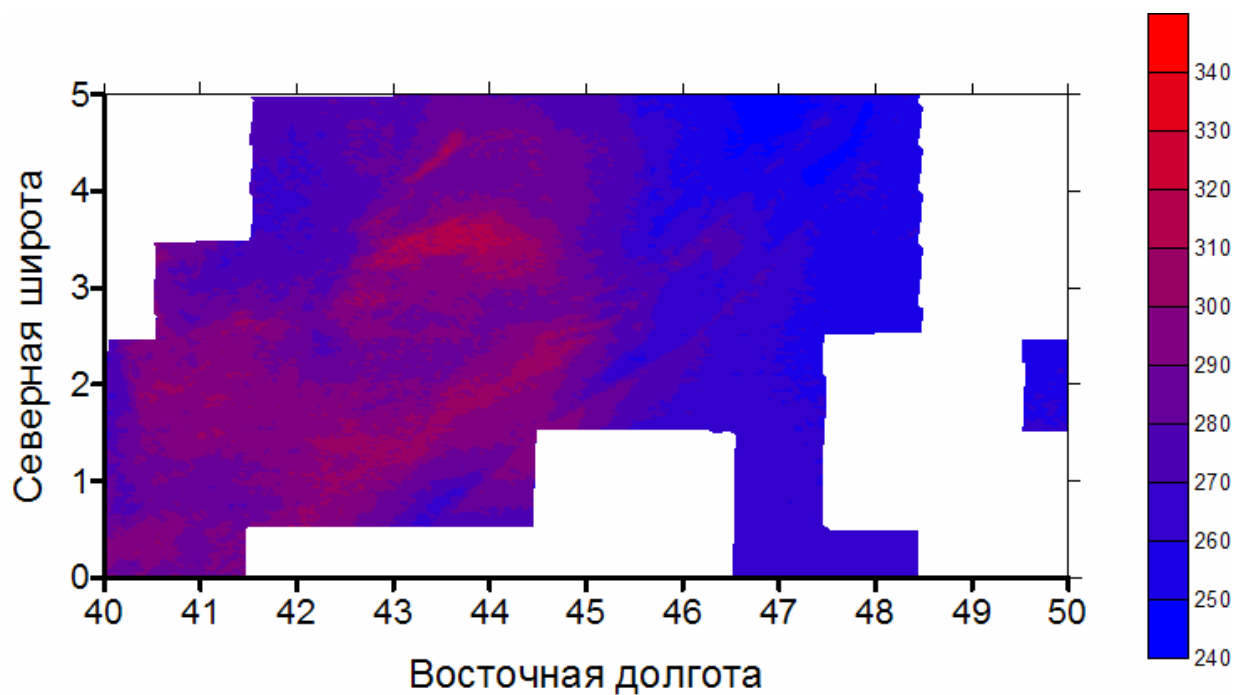


Рис. 20. Распределение ОСО 16 февраля 2006г в 11 час. 45мин. в области, ограниченной экватором, параллелью 5°с.ш. и долготами 40 и 50° в.д.

Таблица 12. Характеристики параметров, определяемых с помощью зондировщика GOES

Параметр	Вертикальное разрешение, км	Горизонтальное разрешение, км	Абсолютные погрешности	Относительные погрешности
Профиль температуры	3–5	50	2–3 К	1 К
Температура суши		10	2 К	1 К
Температура океана		10	1 К	0.5 К
Профиль влажности	2–4	50	30 %	20 %
Общее содержание H ₂ O		10	20 %	10 %
Движение облаков H ₂ O	3 слоя	50	6 м/с	3 м/с
Высота облаков	2 слоя	10	50 мб	25 мб
Количество облаков	общее	10	15 %	5 %
Общее содержание O ₃ *		50	30 %	15 %
Движение облаков O ₃ *	1 слой	50	10 м/с	5 м/с
Поток ИК излучения*		50	10 ватт/м ²	3 ватт/м ²

* потенциально определяемые параметры.

В будущем геостационарные спутники планируется оснастить более информативными приборами для зондирования атмосферы и поверхности. Например, предполагается использовать Фурье–спектрометр GIFTS (Geostationary Imaging Fourier Transform Spectrometer) [41]. Прибор для регистрации уходящего теплового ИК излучения

использует матрицу ИК приемников (128x128 элементов) и будет иметь довольно высокое спектральное (0.6 см^{-1}) и горизонтальное (4 км) разрешения на области измерений 512x512 км за время измерений 11 с. Имаджер в видимой области спектра будет давать информацию об облаках на той же площади с горизонтальным разрешением 1 км. ИК измерения позволят определять вертикальные профили температуры и влажности с вертикальным разрешением 1–2 км. Эти данные будут получаться с горизонтальным разрешением 4 км для каждого пространственного скана. Период наблюдений над исследуемой областью будет составлять от минут до часа, в зависимости от спектрального разрешения измерений и выбранной области. Последовательные по времени карты облаков и влажности на различных уровнях будут давать оценки скорости ветра на различных уровнях. В результате этих измерений полученная информация о температуре, влажности и ветре с очень высоким пространственным разрешением будет использоваться в анализе и прогнозе погоды. Спектральные особенности в спектрах ИК уходящего излучения позволят также оценивать содержания O_3 и CO и изучать перенос этих газов в атмосфере. Дистанционная методика определения скорости ветра была опробована в самолетных экспериментах и при сравнениях с измерениями доплеровского ветрового лидара (Doppler Wind Lidar) и показала возможности определять скорость ветра с погрешностью 4 м/с. Описанный прибор будет давать более чем 80000 вертикальных атмосферных зондирований за 1 минуту с высоким горизонтальным разрешением (4 км) и эти данные будут очень полезны при изучении и прогнозировании торнадо, тропических штормов и ураганов.

Российский геостационарный спутник «Электро» будет осуществлять многоспектральные снимки облачности и подстилающей земной поверхности в пределах всего наблюдаемого диска Земли (общее число спектральных каналов 10 в диапазоне длин волн от 0.5 мкм до 12 мкм, разрешение на местности: 1 км в видимом и ближнем ИК диапазоне и 4 км в ИК диапазоне, частота (периодичность) получения информации 0.5 ч (штатный режим) и 15 мин (учащенный режим) [42]. Дополнительно будет измеряться интегральная солнечная постоянная в диапазоне длин волн 0.2–100.0 мкм.

Функционируют и создаются оперативные геостационарные спутники Японии, Китая, Индии и Кореи (см. Приложение 1).

Приборы оперативных полярных спутников

На современном оперативном метеорологическом спутнике США NOAA-17 имеется следующая аппаратура для изучения атмосферы и поверхности [43].

Усовершенствованный радиометр высокого разрешения AVHRR/3 (The Advanced Very High Resolution Radiometer) – 6-ти канальный имаджер, измеряющий уходящее излучение в видимой и БИК областях спектра. Эти измерения дают информацию о состоянии растительности, облаков, озер, береговых линий, снежного и ледового покровов и аэрозолях с высоким горизонтальным разрешением (~ 1 км). На рис. 21, для примера дано изображение урагана Изабель по данным измерений прибора AVHRR.

Инфракрасный зондировщик высокого разрешения HIRS/3 (The High Resolution Infrared Sounder), измеряющий уходящее излучение в ИК области спектра. Эти измерения позволяют определять вертикальный профиль температуры до высот порядка 40 км, температуру поверхности океанов, общее содержание водяного пара и озона, бальность и высоту облаков, излучение поверхности. Подобный же прибор устанавливается на серии оперативных полярных спутниках МЕТОР (см. далее).

Усовершенствованный микроволновый зондировщик AMSU-A (The Advanced Microwave Sounding Unit-A), измеряющий уходящее микроволновое излучение и позволяющий совместно с прибором HIRS осуществлять глобальное вертикальное температурное и влажностное зондирование от поверхности земли до высот в верхней стратосфере (примерно до высоты 48 км или давления 2 мб). Измерения прибором AMSU-A используются также совместно с данными прибора AMSU-B, который предназначен для определения профиля влажности атмосферы от поверхности до высот порядка 12 км (давлений порядка 200 мб). Данные этих приборов также используются для оценок осадков, и ряда параметров поверхности – снежного покрова, сплоченности морского льда, влажности почв.

Спектрометр для измерений уходящего рассеянного солнечного УФ излучения SBUV/2 (The Solar Backscattered Ultraviolet Spectral Radiometer) используется для определения вертикального профиля и общего содержания озона. Пример измерений содержания озона приведен на рис. 22.

К полярным спутникам относится система **метеорологических спутников Министерства обороны США DMSP**, которые имеют следующую аппаратуру для зондирования атмосферы и поверхности [44]:

Оперативный сканер OLS (Operational Linescan System [45]) используется для глобального изучения распределения облаков и температур их верхних границ дважды в день. Измерения уходящего излучения осуществляются в двух спектральных каналах – 0.47–0.95 мкм и 10.0–13.4 мкм. Используемые в приборе телескопы позволяют достичь горизонтального разрешения 0.55 км (высокое разрешение) и 2.7 км (грубое разрешение). Скан, перпендикулярный орбите, имеет горизонтальные размеры в 3000 км. Коротковолновый канал прибора измеряет отраженное солнечное и лунное излучение от облаков и поверхности, а также излучение атмосферы в БИК области. Регистрируются также определенные источники излучения в атмосфере и на поверхности Земли, такие как северные сияния и пожары. ИК канал регистрирует тепловое излучение поверхности и атмосферы. Кроме информации об облаках OLS обнаруживает в ночное время различные атмосферные эмиссии, городское освещение и пожары. На рис. 23 приведены данные измерений OLS в ночное время. Видно расположение городов в Европе [45].

Прибор SSM/T (Atmospheric Temperature Profiler) предназначен для определения вертикального профиля температуры по данным измерений в 7-ми каналах в области микроволновой полосы поглощения кислорода [46].

Зондировщик водяного пара SSMT/2 (Special Sensor Microwave / Temperature) представляет собой 5-ти канальный микроволновый радиометр (три канала в контуре линии поглощения водяного пара при 183.31 ГГц и два канала в окне прозрачности) [47]. Прибор позволяет определять содержание водяного пара в глобальном масштабе. Данные измерений этого прибора полезны при исследованиях тропических и внетропических циклонов и фронтов, субтропических антициклонов, морских льдов и снежного покрова.

Микроволновый сканер (имаджер) SSM/I (Special Sensor Microwave / Imager) имеет 7 каналов измерений в 4-х спектральных интервалах (19.35, 22.235, 37.0 и 85.5 ГГц) для разных поляризаций [48]. Данные его измерений используются для получения важнейших параметров атмосферы, океанов и суши в глобальном масштабе – скорости приводного ветра, ледовитости, возраста ледяного покрова, границ льда, осадков над сушей и водной поверхностями, температуры суши и водной поверхности, содержания водяного пара и жидкокапельной влаги в облаках, влажности почв, снежного покрова.

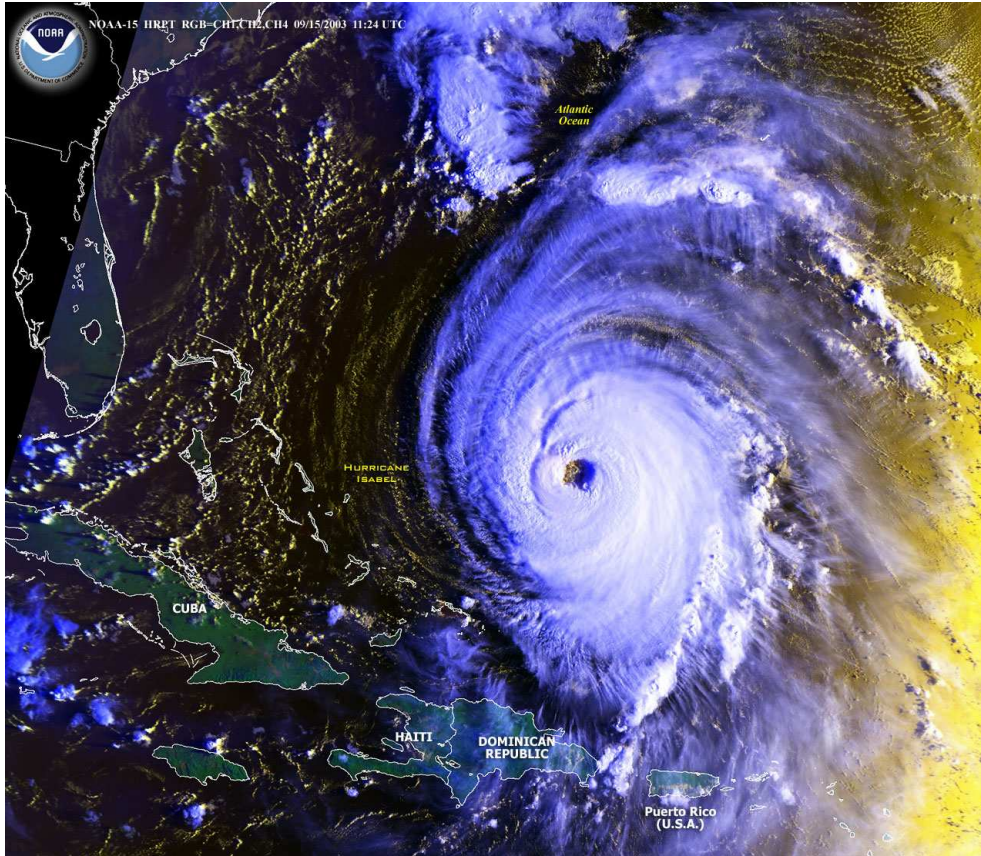


Рис. 21. Изображение урагана Изабель по данным измерений прибора AVHRR.

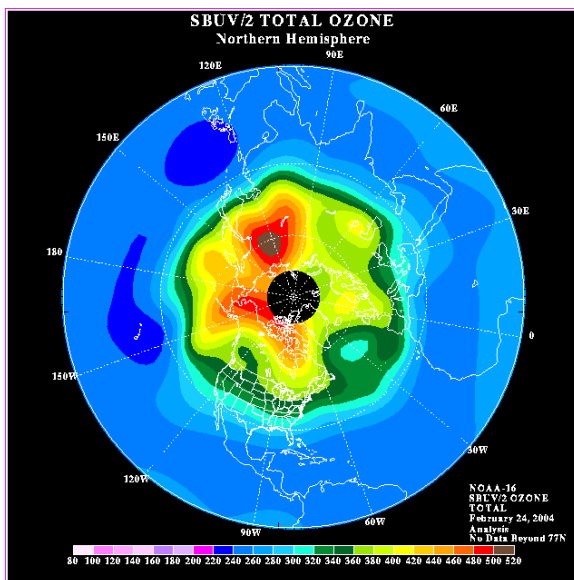


Рис. 22. Поле общего содержания озона в северном полушарии по данным измерений спутника NOAA-16 (прибор SBUV/2).

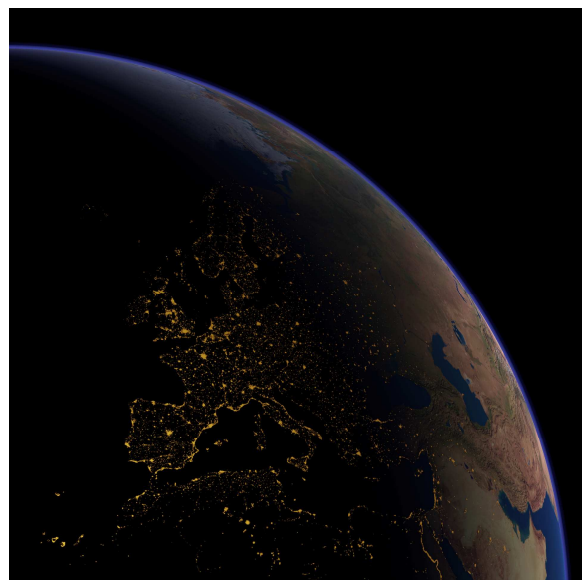


Рис. 23. Огни городов Европы по данным измерений OLS (спутник DMSP).

На европейском полярном спутнике **МЕТОР** (рис. 24) функционирует различная аппаратура для дистанционного зондирования атмосферы и поверхности [49].

Микроволновые спектрометры AMSU-A1 и AMSU-A2 измеряют уходящее МКВ излучение в 17 каналах и совместно с ИК аппаратурой HIRS/4 (20 спектральных каналов – 1 – в видимой области, 7 – в БИК области и 12 – в средней ИК области спектра) определяют вертикальные профили температуры и влажности до высот 40–50 км. Прибор HIRS/4 дает также информацию о температуре поверхности океанов, общем содержании озона и водяного пара, высоте и бальности облачности, альбедо поверхности.

Скаттерометр (радар) ASCAT измеряет отраженное радиоизлучение от поверхности и позволяет определять приводный ветер, характеристики снежного покрова, льда и влажность почв.

Спектрометр GOME-2 (спектральные измерения отраженного и рассеянного солнечного излучения в УФ и видимой областях спектра) определяет содержание озона, двуокиси азота, двуокиси серы и т.д.

Прибор GRAS предназначен для зондирования атмосферы с помощью метода радиоокультации. Его измерения позволяют получать порядка 500 измерений (в день) вертикальных профилей температуры и влажности с высоким вертикальным разрешением (от нескольких сотен метров до 1.5 км) и горизонтальным разрешением в несколько сот километров.

ИК интерферометр IASI измеряет спектры уходящего ИК излучения с высоким спектральным разрешением в области 3.4–15.5 мкм и позволяет определять вертикальные профили температуры и влажности в тропосфере и стратосфере, содержание озона, СО, СН₄ и других газовых компонентов. Прибор также позволяет определять температуру океанов, температуру и излучательную способность суши, различные характеристики облаков (высоту и температуру верхней границы), содержание других парниковых газов. В табл. 13 приведены пространственное разрешение и погрешности определения основных атмосферных параметров с помощью прибора IASI [49].

Таблица 13. Изменяемые атмосферные параметры, пространственное разрешение и погрешности измерений прибором IASI

Параметры атмосферы	Вертикальное разрешение	Горизонтальное разрешение	Погрешность
Профиль температуры	1 км в нижней тропосфере	25 км в безоблачной атмосфере	1 К в безоблачной атмосфере
Профиль влажности	1–2 км в нижней тропосфере	25 км в безоблачной атмосфере	10 % в безоблачной атмосфере
Общее содержание озона		25 км в безоблачной атмосфере	5 % в безоблачной атмосфере
Общее содержание CO, CH ₄ , N ₂ O		100 км	10 % в безоблачной атмосфере

Пятиканальный микроволновый влажностный зондировщик MHS (Microwave Humidity Sounder) предназначен для определения влажности атмосферы и температуры поверхности.

Большинство упомянутых приборов позволяет измерять параметры атмосферы и поверхности с хорошим горизонтальным разрешением и обеспечивает глобальное покрытие измерениями в течение суток.

На российском спутнике Метеор-3М в 2002–2005 гг. был проведен российско-американский эксперимент по затенному зондированию атмосферы с аппаратурой SAGE III [50]. Эти исследования позволили получить большое количество информации о вертикальных профилях содержания O₃ и NO₂, оптических и микрофизических характеристиках стратосферных аэрозолей и полярных стратосферных облаков [51–54]. В качестве примера приведем на рис. 25 широтно-долготные поля интегральных площадей *S* стратосферных аэрозолей для слоя 20–25 км и различных периодов измерений. Приведенный рисунок наглядно иллюстрирует сильную пространственно-временную изменчивость этой важной характеристики даже для фонового аэрозольного состояния стратосферы.

На российских оперативных полярных спутниках **Метеор-3М** используется и запланировано функционирование разнообразной аппаратуры для изучения атмосферы и

поверхности [34]. 17 сентября 2009 г. с космодрома Байконур был успешно запущен КА "МЕТЕОР-М" № 1 – перспективный космический аппарат (КА) гидрометеорологического назначения. В состав российской группировки будут входить 2 КА метеорологического назначения и один океанографический ("МЕТЕОР-М" № 3). В табл. 14 приведены основные характеристики приборов спутника Метеор-3М №1, №2 [34].

Таблица 14. Характеристики основной аппаратуры спутников МЕТЕОР-М №1, №2

Прибор	Применение	Спектр. диапазоны	Полоса обзора (км)	Разрешение (км)
МСУ-МР	Глобальное и региональное картирование облачности, ТПО, ТПС...	0.5–12.5 мкм (6 каналов)	3000	1x1
КМСС	Мониторинг земной поверхности	0.4–0.9 мкм (3+3 канала)	1000	0.05/0.1
МТВЗА-ГЯ	Профили температуры и влажности атмосферы, параметры приводного ветра	10.6–183.3 ГГц (26 каналов)	2600	12–75
ИКФС-2* Усовершенствованный ИК-зондировщик	Профили температуры и влажности атмосферы	5–15 мкм	2000	35
«Северянин-М» Радиолокатор с синтезированной апертурой	Ледовый мониторинг	9500–9700 МГц	600	0.4x0.5
БРК ССПД	Сбор данных с платформ			
ГГАК-М	Гелиогеофизический мониторинг			

* Входит в состав полезной нагрузки КА «МЕТЕОР-М» №2



Рис. 24. Европейский оперативный полярный спутник МЕТОР.

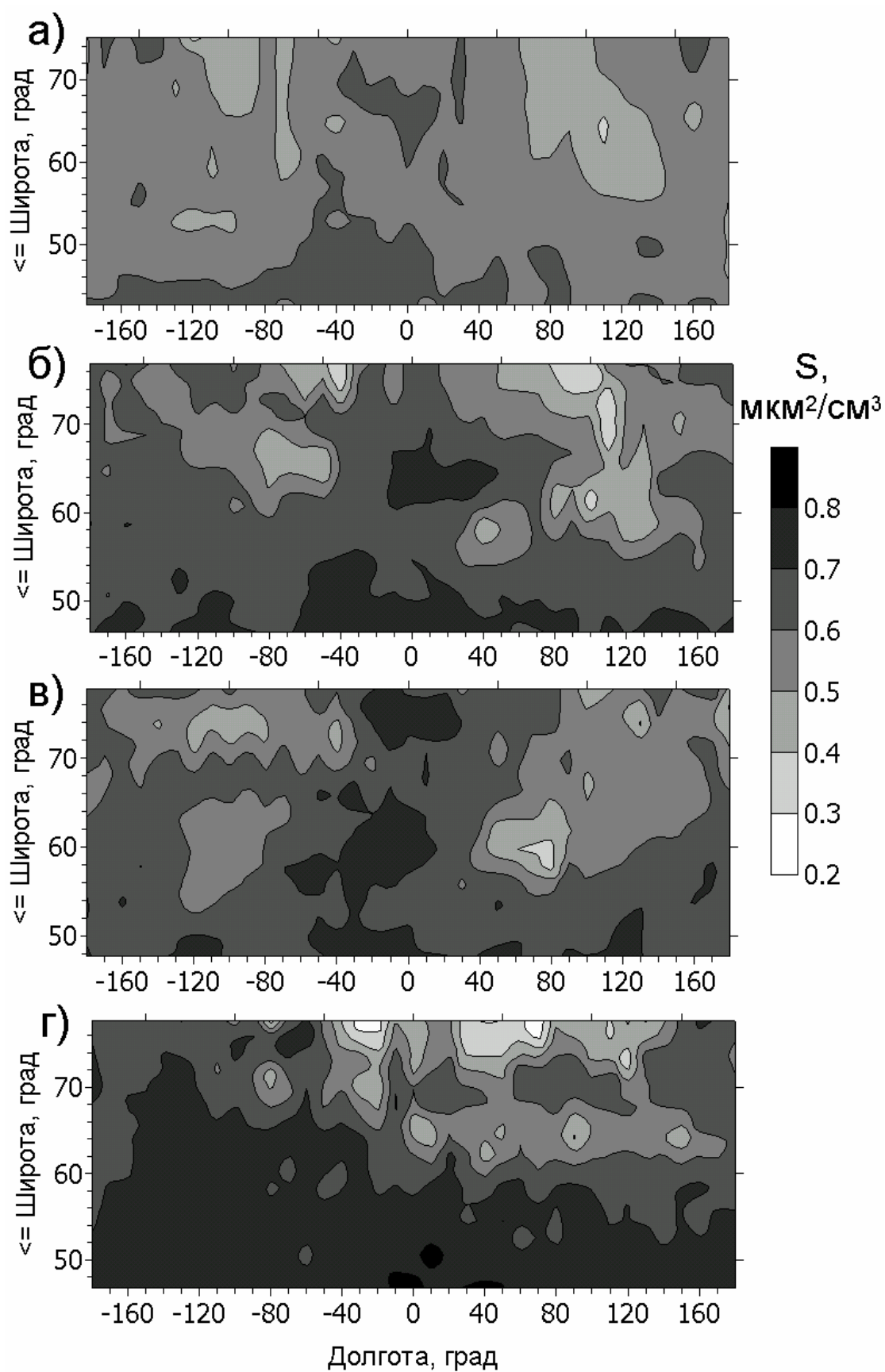


Рис. 25. Широтно-долготные поля интегральных площадей S стратосферных аэрозолей для слоя 20–25 км и различных периодов измерений. а) 27.02–30.06.2002; б) 02.03–29.06.2003; в) 28.02–30.06.2004; г) 27.02–25.06.2005.

Спутники гидрометеорологического назначения выводятся на солнечно-синхронную орбиту со средней высотой над поверхностью Земли 832 км. Прибор МСУ-МР (могоканальное сканирующее устройство малого разрешения) по своему назначению и характеристикам выходных данных во многом подобен широко известному сканирующему радиометру AVHRR/3, устанавливаемому на оперативных метеоспутниках серии NOAA и европейском полярно-орбитальном метеоспутнике MetOp. Прибор предназначен для широкозахватной съемки вдоль трассы полета (полоса захвата не менее 2800 км) и получения изображений облачности, земных, ледовых и снежных покровов в трех диапазонах видимого (0.5–0.7; 0.7–1.10; 1.6–1.8 мкм) и трех диапазонах теплового (ИК) спектра (3.5–4.10; 10.5–11.5; 11.5–12.5 мкм). Прибор МСУ-МР позволит получать карты облачного покрова, карты нефанализа, данные для климатологии облачного покрова, макро (бальность, высота ВГО) и микрофизические (оптическая толщина, фазовый состав и др.) параметры облачности, оценки температуры подстилающей поверхности (с наибольшей точностью – оценки температуры водной поверхности (ТВП)), состояния растительного покрова (индекс NDVI, листовой индекс LAI, площадь проективного покрытия), альбедо подстилающей поверхности, коротко- и длинноволновой составляющих РБ, очаги пожаров и многое другое.

Вторым основным прибором является бортовой радиолокационный комплекс (БРЛК) «Северянин-М». Прибор БРЛК предназначен для:

- исследований ледяных покровов в приполярных акваториях Мирового океана (в частности, в арктических морях), детектирования льда на внутренних замерзающих морях и озерах;
- мониторинга наводнений;
- обнаружения и оценки площади разливов нефтепродуктов на водной поверхности, мониторинга динамики загрязнений акватории Мирового океана и решения многих других задач.

Решение многих из перечисленных задач облегчается тем, что в составе бортового информационного комплекса (БИК) КА "МЕТЕОР-М" № 1 синхронно с БРЛК работает ряд пассивных приборов оптического и инфракрасного (КМСС – комплекс многоканальной спутниковой съемки, МСУ-МР), а также микроволнового диапазонов спектра (МТВЗА-ГЯ). Такой синергизм во многих случаях позволяет повысить качество выходных информационных продуктов или даже производить новые выходные продукты.

К важным компонентам БИК безусловно относится СВЧ сканер-зондировщик МТВЗА-ГЯ (модуль температурного и влажностного зондирования атмосферы). К числу основных задач решаемых на основе информации МТВЗА-ГЯ, относятся:

- определение вертикальных профилей температуры и влажности безоблачной и облачной атмосферы;
- мониторинг ледовых и снежных покровов;
- оценки интегральной влажности и водозапаса облаков, детектирование зон осадков над водной поверхностью;
- оценки модуля скорости «приводного» ветра, температуры поверхности океана.

Данные ТВЗА, получаемые по информации МТВЗА-ГЯ, являются всепогодными (на их достоверность слабо влияет облачность в поле зрения прибора), но имеют недостаточно высокое вертикальное разрешение (не лучше 3–6 км), поэтому для получения данных ТВЗА улучшенного вертикального разрешения будут использоваться и измерения ИК-зондировщика высокого спектрального разрешения (ИКФС-2 – инфракрасный Фурье-спектрометр).

Помимо перечисленных, в БИК КА "МЕТЕОР-М" № 1 включен прибор КМСС (комплекс многозональной спутниковой съемки). Комплекс обеспечивает получение изображений земной и водной поверхности в нескольких каналах видимой области спектра в суммарной полосе обзора около 900 км с пространственным (линейным) разрешением 50 и 100 м. Получающиеся многозональные изображения Земли и Мирового океана могут использоваться при решении целого ряда задач гидрометеорологического и экоприродного мониторинга.

Важной составляющей БИК является аппаратура БРК ССПД – бортовой радиокомплекс системы сбора и передачи данных. БРК является составной частью ССПД – системы сбора и передачи данных с платформ. В состав БИК входит также гелиогеофизический аппаратурный комплекс ГТАК-М (гелиогеофизический аппаратурный комплекс), предназначенный для глобального мониторинга гелиогеофизических параметров околоземного космического пространства (ОКП) [34].

Основным назначением океанографического КА (например, «МЕТЕОР-М» № 3) является оперативное получение информации о состоянии морской поверхности, ледовых и ветровых условиях, опасных атмосферных процессах на акваториях морей и океанов в любое время суток. Такая информация оказывается крайне необходимой, учитывая ограниченность сети морских наблюдательных буев и сравнительно небольшой объем судовых наблюдений.

Перечислим основные задачи, которые можно будет решать с помощью специализированного КА типа «МЕТЕОР-М» № 3:

а). Картирование ледовой обстановки с целью определения границ и площади ледовых полей, их возраста (толщины), сплоченности и формы, а также наличия во льдах трещин и разводий. Для дистанционного картирования ледовой обстановки предполагается использовать радиолокатор X-диапазона и скаттерометр (С или Ku – диапазона), см. табл. 15.

б). Картирование загрязненности поверхности морей, определение площади разлива нефтяных пятен и других антропогенных загрязнений, положения их границ. Для решения этой задачи используются радиолокаторы и многоспектральные сканеры оптического диапазона.

в). Картирование цветности верхнего слоя морской воды, детектирование районов концентрации хлорофилла (фитопланктона), растворенных и взвешенных веществ в приповерхностном слое океана. Указанная информация используется для изучения биологических процессов в океане, исследования влияния этих процессов на изменение концентрации CO₂ в океане и потока углерода из атмосферы в океан. Особую ценность имеют измерения цветности в прибрежной зоне. Для получения данных о цветности океана предполагается использовать сканер цветности океана и сканер береговой зоны (Табл. 15).

В дополнение к перечисленной выше аппаратуре в состав БИК «МЕТЕОР-М» № 3 включена в экспериментальном порядке аппаратура радиопросвечивания для дистанционного определения вертикальных профилей температуры атмосферы с улучшенным вертикальным разрешением (~ 150 м) при достаточно грубом горизонтальном разрешении (порядка 300 км).

Особенностью космических аппаратов российской оперативной **спутниковой природно-ресурсной системы "Ресурс-О1"** является наличие в составе бортовых информационных комплексов сканеров высокого пространственного разрешения (типа МСУ-Э, с разрешением ~ 40 м) и сканеров среднего разрешения (типа сканера с конической разверткой МСУ-СК, с разрешением ~ 160 м). Данные приборы (табл. 16) позволяют получать цифровые изображения подстилающей поверхности в нескольких спектральных диапазонах и предназначены для решения широкого круга задач дистанционного зондирования: мониторинг почвенного, растительного, снежного и ледового покровов, экологический мониторинг; обнаружение, мониторинг и оценка последствий чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера (наводнения,

пожары, аварии на газо-нефтепроводах и т.д.), изучение геологических структур и др. [42].

Функционируют и создаются оперативные полярные спутники Китая и других стран (см. Приложение 1).

Таблица 15. Характеристики основной аппаратуры океанографического спутника МЕТЕОР-М №3

Аппаратура	Спектральный диапазон	Пространственное разрешение	Полоса обзора (км)
Радиолокатор	X-диапазон	Обзорная съемка 50, 200, 500 м Маршрутная съемка 5 м Съемка по районам ЧС 1 и 5 м	130, 600, 750 30 10 и 50
Скаттерометр	C или Ku-диапазон	25×25 км	1800
Сканер цветности океана	1к – 0.402–0.422 мкм 2к – 0.433–0.453 мкм 3к – 0.480–0.500 мкм 4к – 0.510–0.530 мкм 5к – 0.555–0.575 мкм 6к – 0.660–0.680 мкм 7к – 0.740–0.760 мкм 8к – 0.845–0.885 мкм	1 км	3000
Сканер береговой зоны	1к – 0.410–0.420 мкм 2к – 0.485–0.495 мкм 3к – 0.550–0.565 мкм 4к – 0.772–0.786 мкм	80 м	800
Аппаратура радиопросвечивания атмосферы	1160–1600 МГц (до 16 каналов)	Вертикальное разрешение 150 м Горизонтальное разрешение 300 км	
Бортовая информационная система СМ-диапазона	8.025–8.4 ГГц (2 канала)	Информационная скорость 15.36–122.88 Мбит/с	
Бортовая информационная система ММ-диапазона	25.5 – 27 ГГц	Информационная скорость 600–1200 Мбит/с	

Таблица 16. Приборы КА "РЕСУРС-01" № 4

Аппаратура	Спектральный диапазон, мкм	Пространственное разрешение, м	Полоса обзора, км
Многоканальный оптико-электронный сканер высокого разрешения МСУ-Э (2 комплекта)	0.5–0.6	40 (поперек	60
	0.6–0.7	направления полета);	800
	0.8–0.9	30 (вдоль	110
Многоканальное оптико-механическое сканирующее устройство среднего разрешения с конической разверткой МСУ-СК (2 комплекта)	0.5–0.6	160	720
	0.6–0.7	160	
	0.7–0.8	160	
	0.8–1.1	160	
	10.4–12.6	700	
Сканирующий радиометр радиационного баланса СРРБ	0.55–0.65	60	2200
	0.2–4.0		
	0.2–50.0		
	10.5–12.5		
Измеритель солнечной постоянной ИСП-2	0.2–10.5	–	–
	0.3–3.0		
Телевизионная метеорологическая аппаратура МР-900М	Видимый и ближний ИК диапазон Разрешение 1.6x1.8 км Передача данных по радиолинии 137 МГц		

Приборы научно-исследовательских спутников

Важную роль для исследований атмосферы и поверхности сыграли и продолжают играть многие **научно-исследовательские спутники**. Приведем описания некоторых из них.

Спутник **Nimbus-7** (1978–1994 гг.) имел на борту ряд приборов для измерений газового состава атмосферы. Надирные приборы **TOMS** и **SBUV** для измерений вертикальных профилей и общего содержания озона, лимбовые приборы **LIMS** и **SAMS** для измерений содержания озона, водяного пара, метана, окислов азота, HNO_3 и вертикальных профилей температуры.

Спутник **TOPEX/Poseidon**, запущенный в 1992 год и проработавший более 12 лет (при запланированном времени работы 3–5 лет), решал различные океанографические задачи: измерения уровней океанов с точностью 5 см, исследования их топографии, изменчивости течений и их влияния на климат планеты, крупно-масштабных явлений (волн Россби и Кельвина, приливов, явлений El Nino и т.д.) [55]. В дальнейшем эти исследования были продолжены с помощью спутников **Jason-1** (2001 г.) и **Jason-2** (2008 г.). На борту этих спутников функционировали радиоальтиметры (радиовысотомеры), микроволновая аппаратура для измерений содержания водяного пара и коррекции показаний высотомера и ряд приборов, позволявших определять с высокой точностью положения спутников [56].

Спутник **ADEOS** (1996–1997 гг.) проводил измерения вертикальных профилей температуры и содержания важных атмосферных газов с помощью надирного интерферометра относительно высокого спектрального разрешения (**IMG**) для измерений уходящего теплового излучения и затменного прибора (**ILAS**), предназначенного для измерений ИК солнечного излучения при восходах и заходах Солнца [57]. Другими приборами на спутнике были: **AVNIR** (Advanced Visible and Near-Infrared Radiometer); **NSCAT** – радиолокатор (скаттерометр) в спектральной полосе Ku; **OCTS** (Ocean Color Temperature Scanner) и **POLDER** (Polarization and Directionality of the Earth's Reflectance). На этом же спутнике определялось общее содержание озона с помощью прибора **TOMS** [58].

Значительное количество космических экспериментов и научных исследований были проведены с помощью регулярных запусков космических **Шаттлов**. Упомянем в связи с этим важные эксперименты по затменному зондированию с помощью **интерферометра ATMOS** (измерения около 40 профилей различных атмосферных газов), **спектрометра**

CRISTA для измерений собственного излучения горизонта Земли в ИК области спектра с охлаждением приемников излучения до гелиевых температур. Измерения вертикальных профилей содержания МГС с помощью прибора **ATMOS** были осуществлены в 1985, 1992, 1993 и 1994 гг. Рис. 26 иллюстрирует погрешности определения высотных профилей содержания различных МГС с помощью аппаратуры **ATMOS** [59].

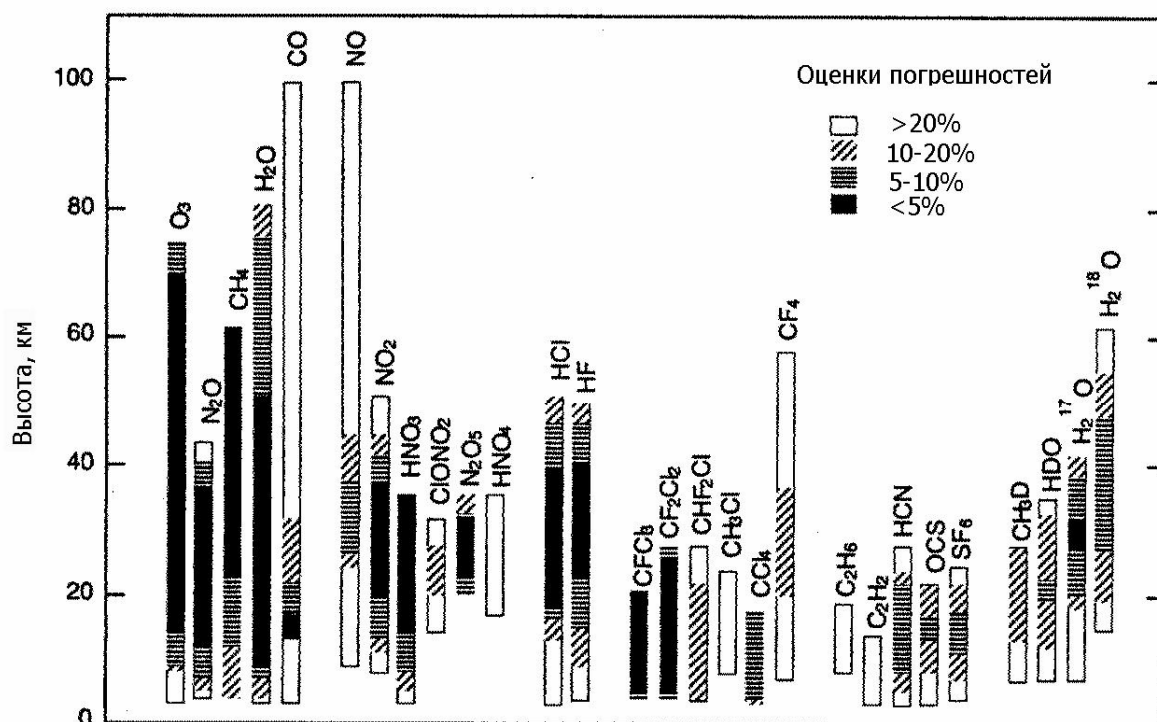


Рис. 26. Погрешности определения вертикальных профилей различных атмосферных газов с помощью аппаратуры **ATMOS** (различный тип штриховки характеризует погрешности измерений) [59].

Измерения с высокой точностью собственного ИК излучения горизонта Земли спектрометром **CRISTA** позволили осуществить определение вертикальных профилей температуры, содержания O_3 , H_2O , CO_2 и других атмосферных газов, параметров неравновесного состояния верхней атмосферы [60].

В качестве результатов, полученных в СПбГУ в рамках интерпретации эксперимента с аппаратурой **CRISTA**, приведем рис. 27, где даны примеры восстановления вертикальных профилей кинетической и колебательных температур атмосферы и содержания важного парникового газа CO_2 в верхней атмосфере [61, 62].

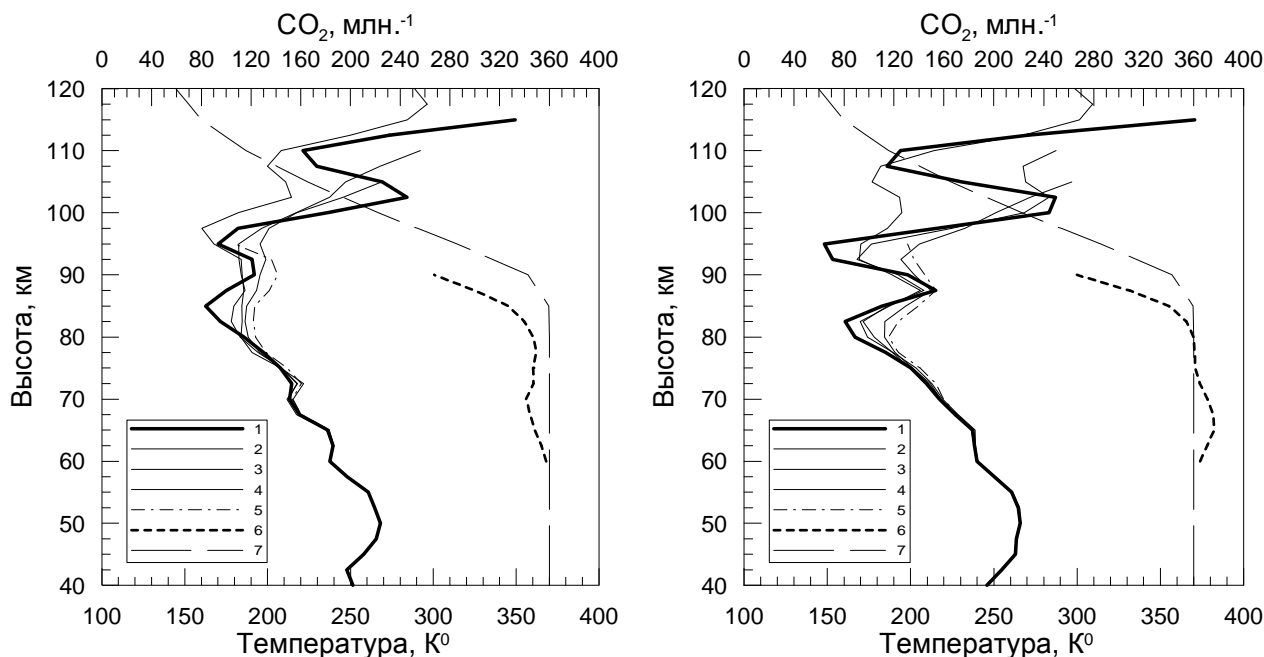


Рис. 27. Результаты восстановления профилей атмосферных параметров для двух сканирований горизонта Земли – сканов 185 (вверху) и 193 (внизу). 1 – кинетическая температура, 2,3,4,5 – колебательные температуры для изотопов 626, 636, 628 и 627 соответственно, 6 – отношение смеси CO₂, 7 – априорный профиль отношения смеси CO₂.

Приборы **SOLSE** и **LORE** на Шаттлах измеряли спектры рассеянного солнечного излучения горизонта Земли и исследовали характеристики озоносферы. Прибор **MAS** измерял уходящее миллиметровое излучение горизонта Земли и определял вертикальные профили температуры и характеристики газового состава атмосферы.

Спутники **SPOT (Франция)** с приборами US Naval Research Laboratory POAM-2 и 3 осуществляли затменное зондирование озоносферы (определение вертикальных профилей содержания озона, двуокси азота, характеристик аэрозолей).

Упомянем также об экспериментах на спутнике **Midcourse Space Experiment (MSX, США)** с прибором UVISI, измерявшем свечения верхней атмосферы и осуществившим первые затменные эксперименты по излучению звезд (определение вертикальных профилей содержания озона, температуры и т.д.).

На научном модуле **«Природа» космической станции «Мир»** находилась разнообразная научная аппаратура для измерений уходящего излучения в видимой, БИК, ИК и микроволновом диапазонах. Например, на этом модуле функционировал спектрометр **«Озон-Мир»** для исследований газового состава затменным методом (измерения солнечного излучения при восходах и заходах Солнца). Для примера приведем на рис. 28 профили содержания озона, восстановленные по данным измерений прибора

«Озон-Мир» [63]. Горизонтальные линии на рисунке – погрешности восстановления содержания озона аппаратурой «Озон-Мир».

Целый ряд научно-исследовательских спутников был запущен Европейским космическим агентством [64]. Так, в 1991 году был запущен **спутник ERS-1** (European Remote Sensing satellite). На его борту функционировал радар с синтезированной апертурой, радар-альтиметр (высотомер), и ряд других приборов для измерений температуры поверхности и приводный ветер. Вторым **спутник ERS-2** был запущен в 1995 г. с дополнительным прибором для исследования озоносферы (прибор GOME). Длительное время оба спутника функционировали вместе. Эти эксперименты позволили получить огромное количество ценной информации о различных характеристиках поверхностей суши и океана, полярных шапках, стихийных бедствиях (наводнениях, землетрясениях и т.д.). Спутник ERS-1 прекратил свои измерения в марте 2000 г.

Следующий научно-исследовательский спутник ESA – спутник **ENVISAT (ESA)** (рис. 29) – продолжал обширную программу космических исследований, ранее проводимых спутниками ERS-1 и -2. Этот спутник предназначался для исследований научного и прикладного значения в различных областях физики атмосферы – метеорологии, океанологии, гидрологии и т.д. [66]. В табл. 17 охарактеризованы различные задачи, решаемые с помощью измерений аппаратуры спутника, определяемые параметры и их области применения.

Таблица 17. Задачи, решаемые с помощью измерений аппаратуры спутника ENVISAT

Среда	Задачи, определяемые параметры, области использования
Атмосфера	Исследования облаков и аэрозолей, водяного пара, радиационного баланса, вертикальных профилей температуры и содержания газов, параметров турбулентности
Суша	Температура поверхности, растительность, сельское хозяйство и лесоводство, топография, геология, гидрология, наводнения, пожары
Океан	Цвет, температура поверхности, топография, мутность, характеристики волн, приводный ветер, течения, форма геоида, глобальная циркуляция, океанические фронты, динамика побережья, нефтяные загрязнения, судоходство.
Криосфера	Картирование и динамика морских льдов, процессы трансформации, навигация, температура, снежный покров, топография

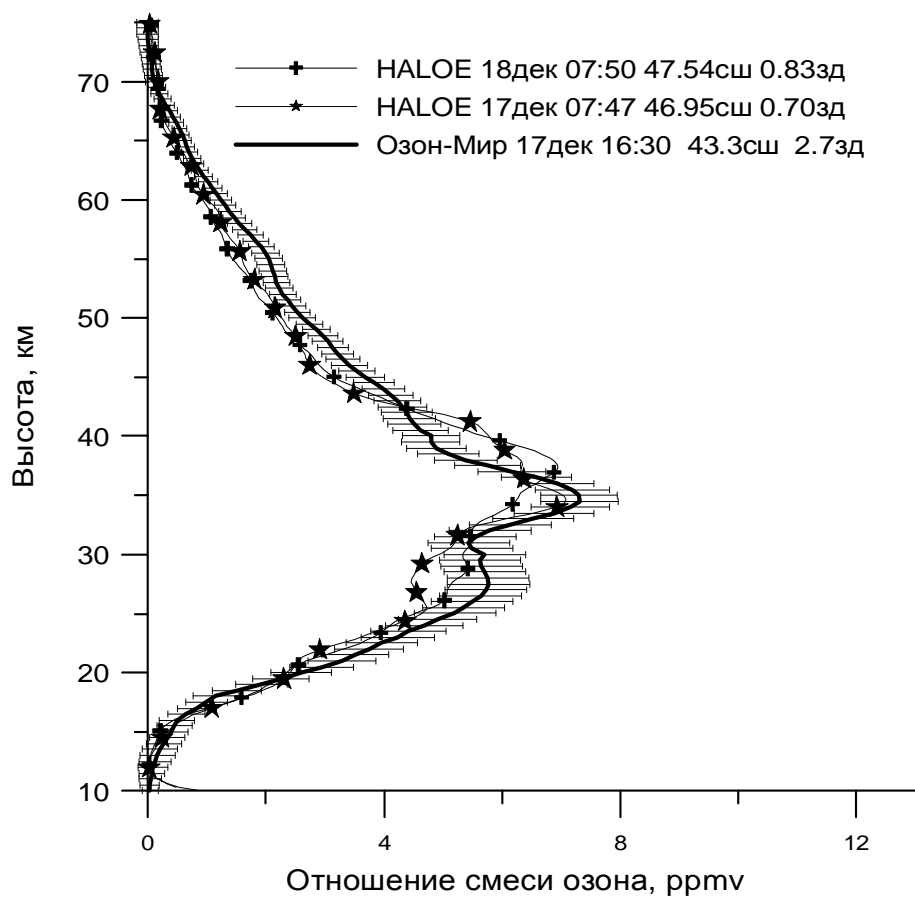


Рис. 28. Сопоставление результатов восстановления профилей содержания озона по данным измерений аппаратуры «Озон-Мир» и аппаратуры HALOE.



Рис. 29. Спутник ENVISAT (ESA).

На спутнике **ENVISAT (ESA)** функционировало девять приборов.

1. Радар ASAR (Advanced Synthetic Aperture Radar) осуществлял измерения отраженного радиоизлучения на частотах от 4 до 8 ГГц и позволял с высокой точностью изучать топографию поверхности.

2. Спектрометр MERIS (MEdium Resolution Imaging Spectrometer) регистрировал отраженное и рассеянное солнечное излучение и изучал цвет океана, его мутность, содержание хлорофилла и твёрдых взвесей, различные характеристики поверхности.

3. Радиометр AATSR (Advanced Along Track Scanning Radiometer) предназначен для измерений температуры морской поверхности. На рис. 30 приведен пример определения температуры воды.

4. Радар RA-2 (Radar Altimeter 2) с помощью измерений в двух спектральных диапазонах – (Ku и S –2–4 ГГц) позволял изучать топографию океанов, ледовый покров и топографию суши.

5. Радиометр MWR (Microwave Radiometer) измерял содержания водяного пара и жидкой воды в атмосфере.

6. Система DORIS (Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite) осуществляла точное определение положения спутника.

7. Прибор GOMOS (Global Ozone Monitoring by Occultation of Stars), предназначенный для изучения газового и аэрозольного состава атмосферы и характеристик турбулентности и волновых движений методом звездной оккультации (затменный метод) [66–68]. Прибор измерял излучение различных звезд при их восходах и заходах за горизонт Земли. Измерения осуществлялись в большом числе спектральных каналов УФ, видимой и БИК областях спектра (250–950 нм). Использование различных звезд позволяло проводить в течение суток несколько сотен измерений (в отличие от 25–26 измерений при использовании солнечного затменного метода). В течение 2003 года, например, было проведено более 100000 измерений, которые позволили определить вертикальные профили содержания озона, NO₂, NO₃ (ночью), O₂, плотность воздуха, характеристики аэрозолей. Прибор GOMOS также осуществлял высокочастотные измерения излучения звезд с помощью двух фотометров в видимой области спектра для исключения влияния мерцания звезд и определения профиля температуры. Эти же измерения фотометров позволяли определять характеристики гравитационных волн в атмосфере [68].

8. Фурье-спектрометр MIPAS (Michelson Interferometer for Passive Atmospheric Sounding) на основе измерений лимбовых спектров собственного излучения атмосферы с высоким спектральным разрешением исследовал содержания парниковых и озоноразрушающих газов, оптические и микрофизические характеристики полярных стратосферных облаков, параметры неравновесного состояния верхней атмосферы. С помощью Фурье-спектрометра MIPAS осуществлялись комплексные исследования температуры и газового состава атмосферы. Кроме вертикальных профилей температуры он измерял вертикальные профили многих климатически активных газов – O_3 , H_2O , CH_4 , N_2O , N_2O_5 , HNO_3 , ClO , $HOCl$, $ClONO_2$, NO , HNO_4 , NH_3 , HCN , CCl_4 , COF_2 , H_2O_2 , C_2H_2 , C_2H_6 , OCS , SO_2 , CFC's, – а также характеристики аэрозолей и полупрозрачных облаков в средней атмосфере [69, 70].

9. Спектрометр SCIAMACHY (SCanning Imaging Absorption spectroMeter for Atmospheric CHartographY) функционировал в УФ, видимой и БИК областях спектра в трех режимах измерений: измерял отраженное и рассеянное солнечное излучение в надир и на горизонт планеты, а также осуществлял затменные измерения (по излучению Солнца и Луны) для определения характеристик газового и аэрозольного состава, характеристик поверхности и свойств облаков [71].

Значительное внимание в рамках исследований с помощью спутника ENVISAT уделялось атмосфере и, в частности, вопросам атмосферной химии. На рис. 31 приведен пример использования спектрометра MERIS для изучения пожаров [72]. Хорошо виден дым от пожаров, распространяющийся от области Грамматикос (к северу от Афин). Северный ветер переносит дым далеко на юг на расстояние до 200 км. Отметим, что информацию о различных стихийных бедствиях, получаемых с помощью спутниковых систем можно получать с сайта [73].

Карта атмосферных загрязнений NO_2 над Европой (максимальное содержание – красный цвет, минимальное – синий) по данным измерений прибора SCIAMACHY представлена на рис. 32 [74]. На рис. 33 приведен пример определения приводного ветра с помощью радара ASAR [75]. Рис. 34 иллюстрирует результаты определения общего содержания озона в районе Южного полюса по данным измерений прибора SCIAMACHY [76].

Использование серий длительных измерений с помощью аппаратуры GOME (ERS-2) и SCIAMACHY (ENVISAT) позволяет исследовать долговременную динамику загрязнений атмосферы. На рис. 35 приведены оценки трендов содержания тропосферного NO_2 по данным измерений указанных выше приборов за период 1996–2004 гг.

Наибольшие тренды наблюдаются в восточной части Китая, в районах с интенсивным индустриальным и экономическим развитием, в частности в районе Шанхая [77].

На спутнике **ODIN** (разработка Швеции, совместно с Канадой, Финляндией и Францией, запуск 2001 г.) осуществлялись исследования озоносферы и аэрономии верхней атмосферы [78]. Для этого на спутнике функционировали два прибора: микроволновый спектрометр, измерявший собственное излучение горизонта Земли в спектральных областях 486–580 ГГц и 119 ГГц; спектрометр **OSIRIS** (Optical Spectrograph and InfraRed Imaging System), измерявший рассеянное солнечное излучения горизонта в УФ/ВИД (280–800 нм и БИК (1.27 мкм) областях спектра. С помощью указанных приборов осуществлялись измерения газового состава в стратосфере и мезосфере. В задачи эксперимента входило:

- изучение стратосферного озона, в частности, механизмов образования «озонных дыр»;
- изучение мезосферного озона и, в частности, роли химии нечетного водорода, процессов переноса и корпускулярного излучения;
- исследования мезосферных полярных процессов в летнее время, в частности, изменчивости содержания водяного пара и образования аэрозольных слоев;
- изучение взаимосвязей между нижней и верхней атмосферой, в том числе, нисходящих потоков NO и его влияния на фотохимию озона и вертикальный обмен МГС (нечетного кислорода, CO и H₂O) [79].

Значительное количество приборов дистанционного зондирования функционировало в последние годы на научно-исследовательских спутниках NASA – TIMED, Aqua, Terra и т.д. Приведем некоторые примеры использованной аппаратуры.

На спутнике **TIMED** (Thermosphere Ionosphere Mesosphere Energetics and Dynamics), предназначенном для исследований верхних слоев атмосферы (60–180 км), установлены приборы **GUVI** (Global Ultraviolet Imager), **SABER** (Sounding of the Atmosphere using Broadband Emission Radiometry), **SEE** (Solar Extreme Ultraviolet Experiment), **TIDI** (TIMED Doppler Interferometer). Основные научные цели экспериментов на спутнике **TIMED** были сформулированы следующим образом [80]:

- исследования сезонных, широтных и временных вариаций параметров мезосферы и нижней термосферы (МНТ);
- изучение энергетики и распределения радиационно-активных компонент в неравновесной атмосфере для понимания вкладов радиационных, химических и динамических источников и стоков энергии;

- анализ химии соединений O_y и HO_y и их связей с энергетикой и динамикой района МНТ;
- исследование динамики и процессов переноса и их роли в энергетическом балансе;
- создание климатологии ключевых параметров района МНТ.

Прибор GUVI представлял собой пространственно сканирующий спектрометр для дальнего УФ диапазона спектра и позволял определять температуру и газовый состав МНТ.

Многоканальный лимбовый ИК радиометр **SABER** предназначался для исследований энергетического баланса, температурного режима и протекающих химических процессов, а также динамики района МНТ. Прибор **SABER** измерял уходящее излучение горизонта планеты в широкой ИК области спектра – от 1.27 мкм до 17 мкм. Измерения в полосе 15 мкм CO_2 позволяли определять вертикальные профили температуры, измерения в полосе кислорода 1.27 мкм – вертикальные профили содержания озона, а также концентрации атомарного кислорода [81].

Прибор **SEE**, состоящий из спектрометра и набора фотометров, измерял солнечное коротковолновое излучение (рентгеновское и УФ излучения), приходящее в область МНТ. В ряде случаев эксперимент проходил при заходах Солнца, что позволяло определять плотность атмосферы.

Прибор **TIDI** позволял определять вертикальные профили ветра и температуры в МНТ из измерений эмиссии атмосферы в линии O (557.7 нм) полосе (O-O) кислорода.

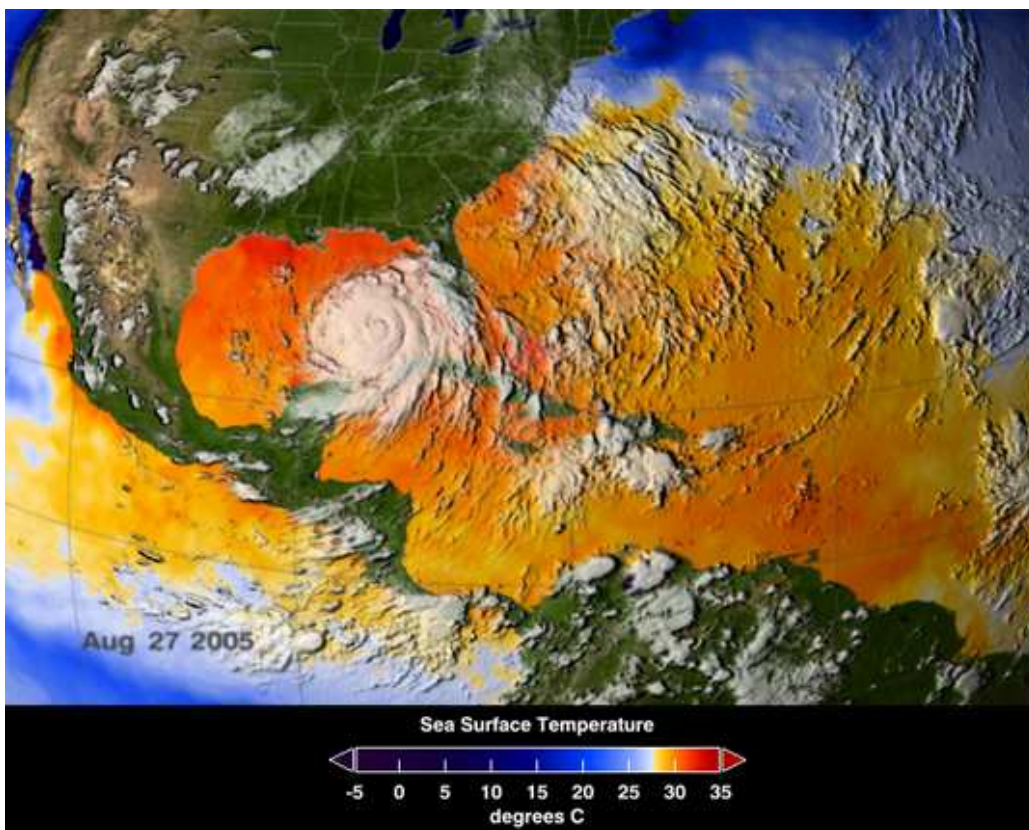


Рис. 30. Температура океана по данным спутниковых измерений 27 августа 2005 г.



Рис. 31. Пожары в Греции по данным спектрометра MERIS 22 августа 2009 (08:37 UTC).

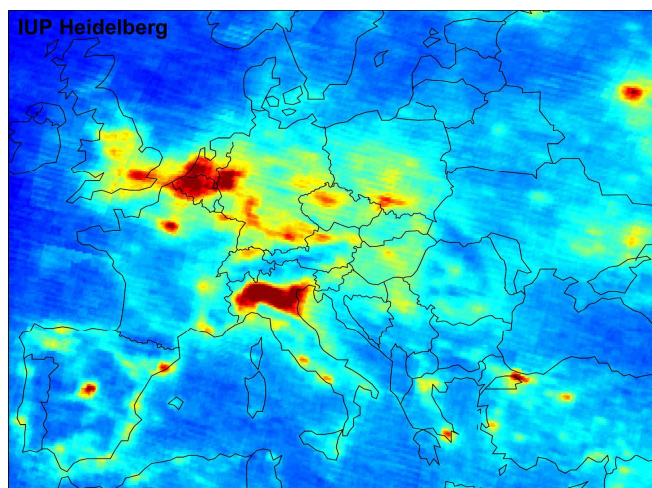


Рис. 32. Карта содержания тропосферного NO_2 по данным спектрометра SCIAMACHY, построенная за период январь 2003–июнь 2004 г.

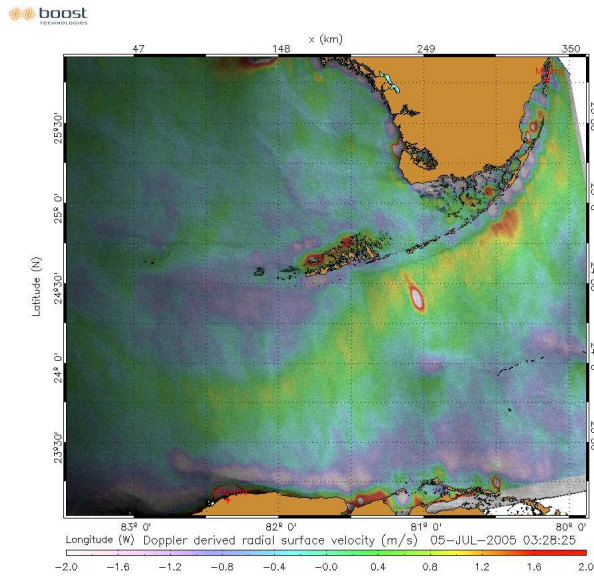


Рис. 33. Карта распределения скорости приводного ветра (м/с) в районе Флорида, США по данным радиолокатора ASAR (5 июля 2005 г.).

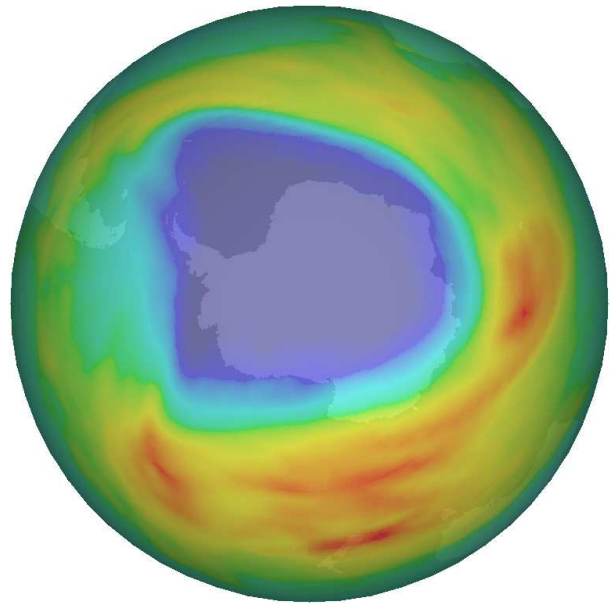


Рис. 34. Пример распределения общего содержания озона по данным прибора SCIAMACHY в районе Южного полюса 7 октября 2008 г. Синий цвет – минимальное содержание O_3 .

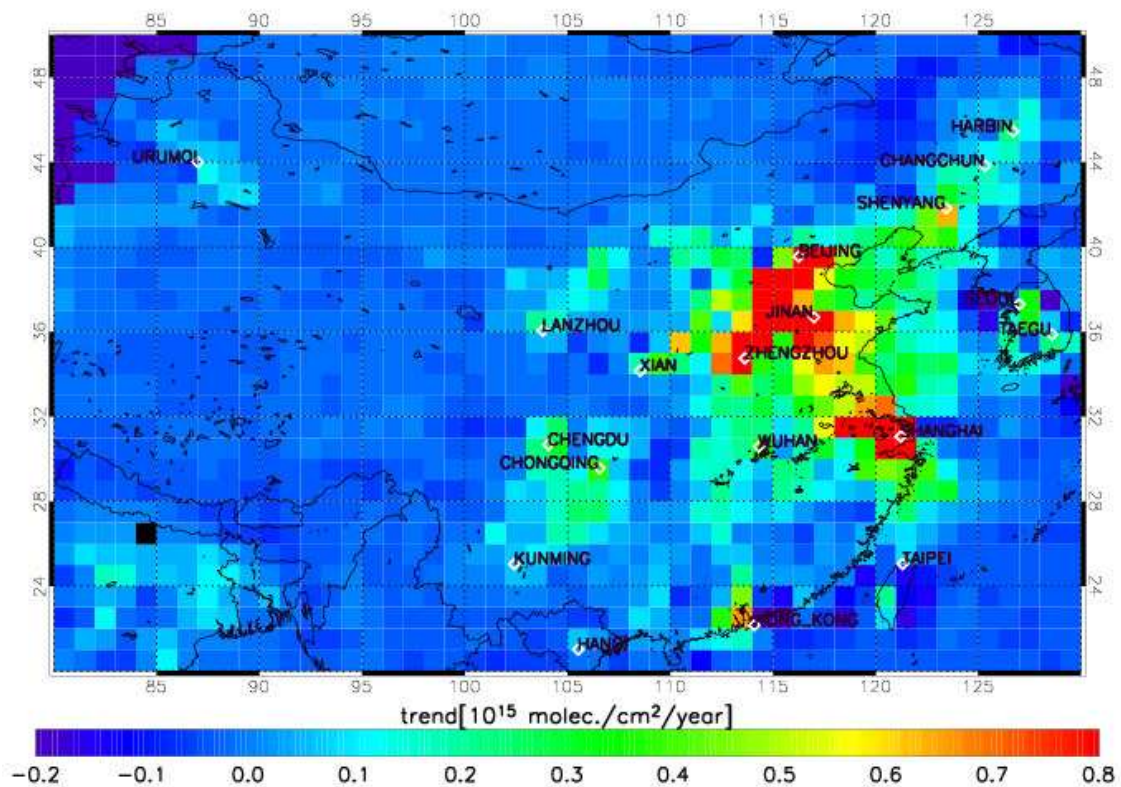


Рис. 35. Тренды содержания тропосферного NO_2 над Китаем за период 1996–2004 гг. по данным измерений спутниковых приборов GOME и SCIAMACHY [77].

На спутнике **TRMM** (Tropical Rainfall Measuring Mission), являвшемся совместным проектом NASA и Космического агентства Японии (Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA)) для исследования осадков в тропиках (35° с.ш.–35° ю.ш.) [82], функционировал ряд приборов:

- **Радар для измерений осадков** (Precipitation Radar) позволял получать трехмерную информацию об интенсивности и распределении дождей, их типов, наличия твердой фазы в облаках и т.д. Он имел горизонтальное разрешение измерений ~ 5 км и полосу обзора ~ 250 км. Важной его особенностью была способность изучать вертикальную структуру дождей и снегопадов от поверхности до высоты ~ 20 км.
- **Микроволновый имаджер TRMM** (Microwave Imager (TMI)) позволял получать пассивным методом количественную информацию об интенсивности осадков, водяном паре, жидкой воде в облаках в широкой полосе пространственного обзора. Этот прибор подобен использовавшему ранее прибору SSM/I, рассмотренному ранее.
- **Сканнер ИК и видимой области VIS** (Visible and Infrared Scanner) позволял получать информацию о температуре поверхности или верхней границе облаков, оценивать высоту их верхней границы и интенсивность осадков с помощью специальных ИК методик.
- **Имаджер-измеритель молний LIS** (Lightning Imaging Sensor).

Спутник NASA Aqua был оснащен шестью приборами [83]:

- ИК атмосферным зондировщиком **AIRS** (Atmospheric Infrared Sounder),
- усовершенствованным МКВ зондировщиком **AMSU-A** (Advanced Microwave Sounding Unit),
- Бразильским влажностным зондировщиком **HSB** (Humidity Sounder for Brazil),
- усовершенствованным МКВ сканирующим радиометром **AMSR-E** (Advanced Microwave Scanning Radiometer for EOS),
- видеоспектрорадиометром среднего разрешения **MODIS** (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer),
- прибором исследований облаков и атмосферной радиации **CERES** (Clouds and the Earth's Radiant Energy System).

Эти приборы позволяли осуществлять широкий комплекс исследований в различных областях – изучение цикла воды, включая испарения с поверхности океанов, водяного пара в атмосфере, облаков, осадков, влажности почв, льда и снега на океанах и суши. Дополнительно эти приборы исследовали радиационные потоки в атмосфере, аэрозоли,

параметры растительности на суше, фитопланктон и растворенные органические вещества в океанах, температуры атмосферы, поверхности суши и океанов.

Прибор AIRS представляет собой многоканальный дифракционный спектрометр, измеряющий уходящее излучение в спектральных областях 0.4–1.0 мкм (четыре канала) и 3.7–15.4 мкм (2378 каналов). Во второй спектральной области разрешение ($\lambda / \Delta\lambda$) составляет 1200. Прибор позволяет получать информацию о вертикальных профилях температуры, влажности, содержания различных газов и характеристиках поверхности. Сравнения данных AIRS по температуре и влажности с данными радиозондирования, объективного анализа, восстановления параметров по данным оперативных спутников [84] показали высокое качество спутниковых данных. Так, данные температурного спутникового зондирования с помощью AIRS согласовались с данными радиозондирования в пределах 1 К в слоях толщиной 1 км и 15 % для относительной влажности в слоях толщиной 2 км в безоблачных случаях. Относительно высокое спектральное разрешение и высокие радиометрические характеристики прибора позволили получать информацию также об общих содержаниях O_3 , CO, CO_2 , CH_4 , вулканического SO_2 , характеристиках аэрозолей и облаков [85]. На рис. 36 приведен пример измерений общих содержаний угарного газа с помощью AIRS.

Прибор **MODIS** (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) функционировал на спутниках Terra и Aqua [86]. Высокую информативность измерений прибора характеризует табл. 18, где даны положения 36 измерительных спектральных каналов, определяемые параметры и характеристики, а также требуемые чувствительности (погрешности) измерений уходящего излучения. Отметим относительно высокое горизонтальное разрешение данных прибора MODIS: 250 м для каналов 1–2, 500 м для каналов 3–7, 1 км для каналов 8–36.

Таблица 18. Характеристики прибора MODIS и измеряемые параметры атмосферы и поверхности

Основные определяемые параметры	Номер канала	Используемые спектральные каналы	Излучение, ватт/м ² ·мкм ср	Требуемое отношение сигнал/шум	
Границы суши, облаков, аэрозоли	1	620–670	21.8	128	
	2	841–876	24.7	201	
Характеристики суши, облаков, аэрозолей	3	459–479	35.3	243	
	4	545–565	29.0	228	
	5	1230–1250	5.4	74	
	6	1628–1652	7.3	275	
	7	2105–2155	1.0	110	
Цвет океана, фитопланктон, биогеохимия	8	405–420	44.9	880	
	9	438–448	41.9	838	
	10	483–493	32.1	802	
	11	526–536	27.9	754	
	12	546–556	21.0	750	
	13	662–672	9.5	910	
	14	673–683	8.7	1087	
	15	743–753	10.2	586	
Водяной пар	16	862–877	6.2	516	
	17	890–920	10.0	167	
	18	931–941	3.6	57	
	19	915–965	15.0	250	
	Основные определяемые параметры	Номер канала	Используемые спектральные каналы, мкм	Излучение, ватт/м ² ·мкм ср (при температуре)	Требуемая чувствительность, К
	Температура поверхности, облаков	20	3.660–3.840	0.45 (300К)	0.05
21		3.929–3.989	2.38 (335К)	2.00	
22		3.929–3.989	0.67 (300К)	0.07	
23		4.020–4.080	0.79 (300К)	0.07	
Температура атмосферы	24	4.433–4.498	0.17 (250К)	0.25	
	25	4.482–4.549	0.59 (275К)	0.25	
Перистые облака, водяной пара	26	1.360–1.390	6.00	150 (SNR*)	
	27	6.535–6.895	1.16 (240К)	0.25	
	28	7.175–7.475	2.18 (250К)	0.25	
Характеристики облаков	29	8.400–8.700	9.58 (300К)	0.05	
Озон	30	9.580–9.880	3.69 (250К)	0.25	
Температура поверхности, облаков	31	10.780–11.280	9.55 (300К)	0.05	
	32	11.770–12.270	8.94 (300К)	0.05	
Высота облаков	33	13.185–13.485	4.52 (260К)	0.25	
	34	13.485–13.785	3.76 (250К)	0.25	
	35	13.785–14.085	3.11 (240К)	0.25	
	36	14.085–14.385	2.08 (220К)	0.35	

*SNR (Signal to Noise Ratio) – отношение сигнал/шум

Прибор CERES (Clouds and the Earth's Radiant Energy System) функционировал на различных спутниках – TRMM (1997), Terra (1999) и Aqua (2002) – и предназначен для исследований радиационного баланса Земли и влияния на него облаков [87].

В табл. 19 и на рис. 37 представлена информация об атмосферных параметрах (профили температуры, общее содержание и профили различных газов) и высотные диапазоны их измерений приборами спутника **AURA** [88]. Из приведенного рисунка следует, что приборы спутника позволяют определять вертикальные профили многих атмосферных газов, исследовать различные характеристики аэрозолей и облаков.

Таблица 19. Приборы спутника Aura и измеряемые параметры

Прибор	Определяемые параметры	Примечание
HIRDLS	Профили T, O ₃ , H ₂ O, CH ₄ , N ₂ O, NO ₂ , HNO ₃ , N ₂ O ₅ , CF ₃ Cl, CF ₂ Cl ₂ , ClONO ₂ , аэрозоль	Лимбовый ИК радиометр с каналами от 6.2 до 17.76 мкм Вертикальное разрешение 1.2 км до 50 км
MLS	Профили T, H ₂ O, O ₃ , ClO, BrO, HCl, OH, HO ₂ , HNO ₃ , HCN, N ₂ O, CO, ледяные облака.	Спектральная область: 118 ГГц–2.5 ТГц Вертикальное разрешение 1.5–3 км
OMI	Общее содержание O ₃ , SO ₂ , аэрозоль, NO ₂ , BrO, OCIO, HCHO, давление на верхней границе облаков, профили O ₃ , УФ-В радиация.	Мультиспектральный надирный имиджер (270–500 нм), 13x24 км горизонтальное разрешение для озона и аэрозоля
TES	Профили T, O ₃ , NO ₂ , CO, HNO ₃ , CH ₄ , H ₂ O.	Лимбовый и надирный Фурье-спектрометр (3.2–15.4 мкм). Горизонтальное разрешение (надир) 5.3x8.5 км, вертикальное разрешение (лимб) 2.3 км

Прибор TES (Tropospheric Emission Spectrometer) представляет собой Фурье-спектрометр, измеряющий уходящее ИК тепловое излучение (650–3050 см⁻¹) при различной геометрии наблюдений – в надир, в наклонных направлениях и на горизонт планеты [89]. Измерения излучения могут осуществляться со спектральным разрешением ~ 0.1 см⁻¹ (надир) и 0.025 см⁻¹ (лимб). Высокое спектральное разрешение измерений

позволяет зарегистрировать спектральные особенности многих газовых компонент – CO₂, HNO₃, CFC₁₁, NO₂, HNO₃, NH₃, CFC₁₁, CFC₁₂, O₃, N₂O, SO₂, CH₄, H₂O, HDO, NO, CO, OCS, N₂, HCl. Стандартные данные уровня 3 включают вертикальные профили температуры, содержания H₂O, HDO, O₃, CO, CH₄, HNO₃.

Надирные и наклонные (в пределах $\pm 45^{\circ}$ от надира) измерения позволяют исследовать определенные области для валидации спутниковых измерений, изучать районы интенсивного сжигания биомассы, большого воздушного загрязнения, вулканов и т.д. Так, детальные измерения прибором TES распределений в тропосфере CO, O₃, H₂O, окислов азота позволяют исследовать влияние сжигания биомассы на загрязнение атмосферы и климат. Приведем пример карт распределения тропосферных содержаний CO и O₃, полученных с помощью прибора TES (рис. 38). Высокие содержания CO в тропиках связаны со сжиганием биомасс. Из приведенных карт видно, что осенью и зимой области высоких тропосферных содержаний O₃ и CO совпадают. Летом в тропиках наблюдается такая же картина, но в северном полушарии высокие содержания тропосферного озона не совпадают с областями высоких содержаний CO.

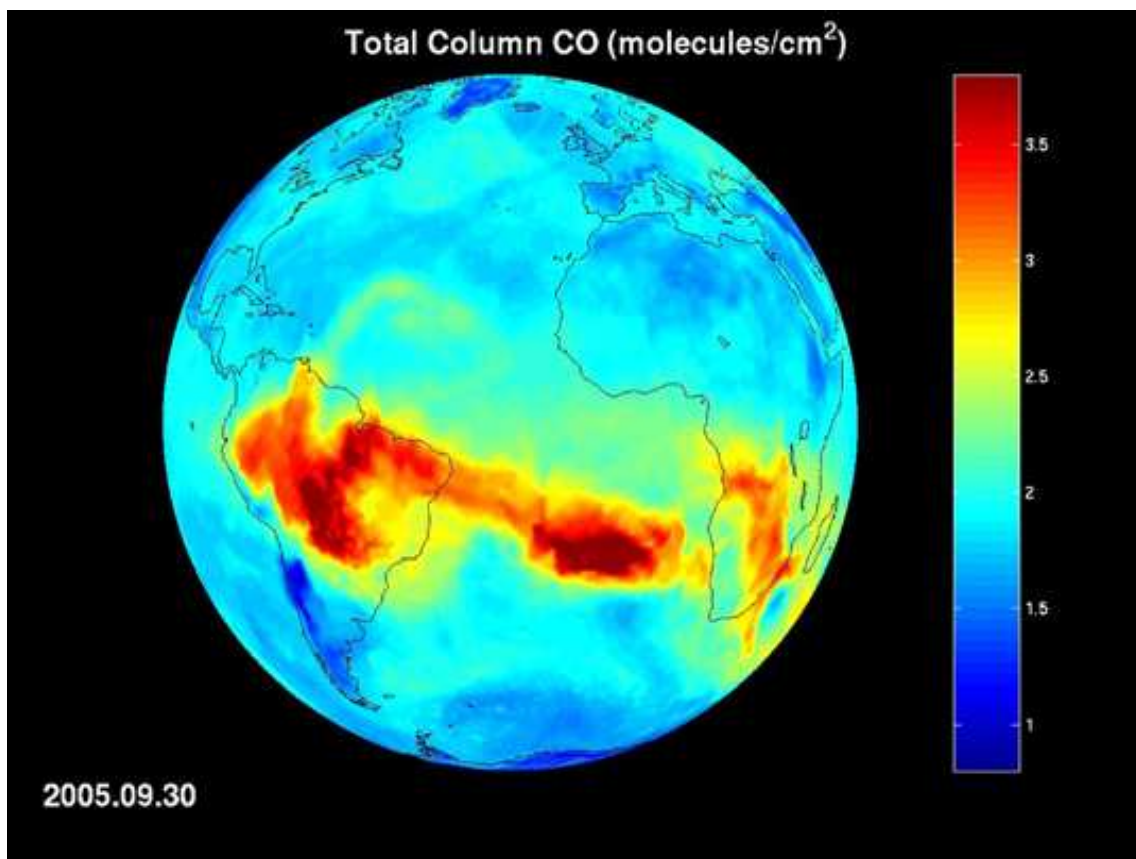


Рис. 36. Карта распределения содержания CO по данным прибора AIRS 30 сентября 2005 г.

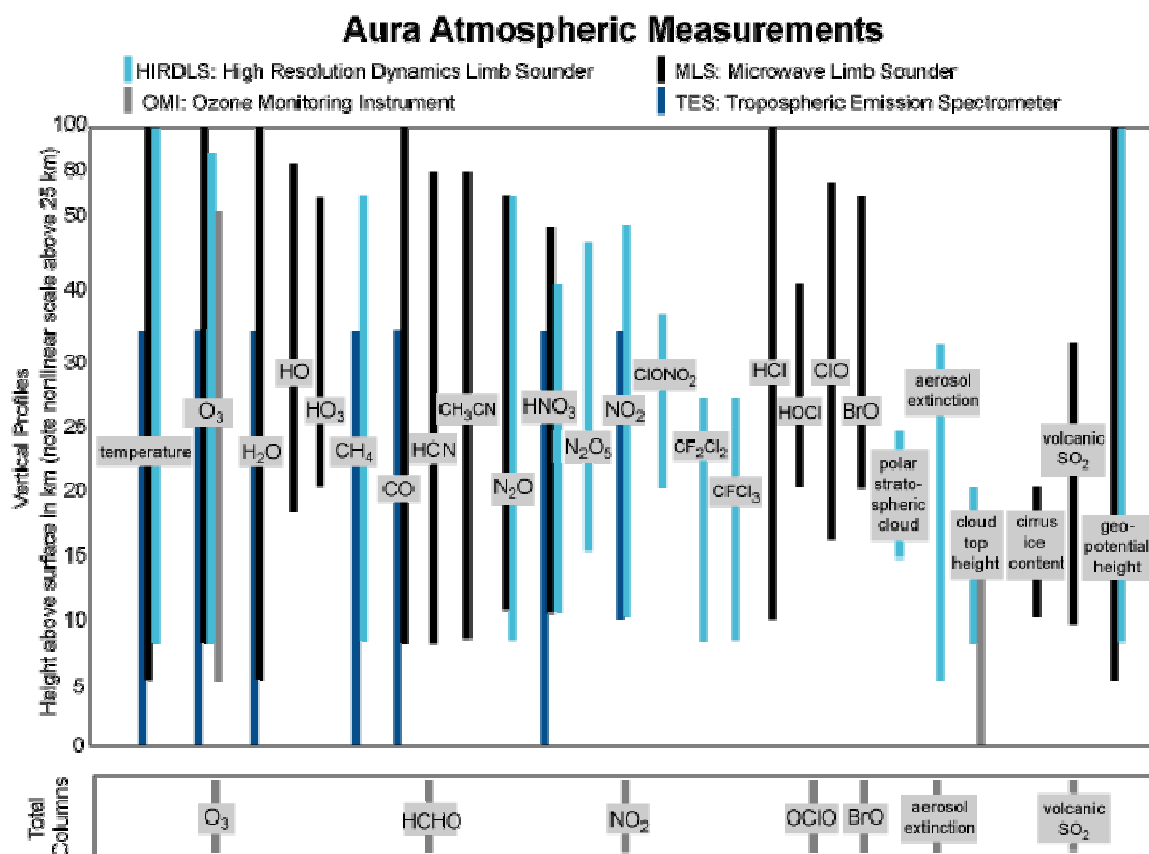


Рис. 37. Атмосферные параметры и высотные диапазоны их измерений для различных приборов спутника AURA. Голубой цвет – прибор HIRDLS, серый – OMI, черный – MLS, синий – TES.

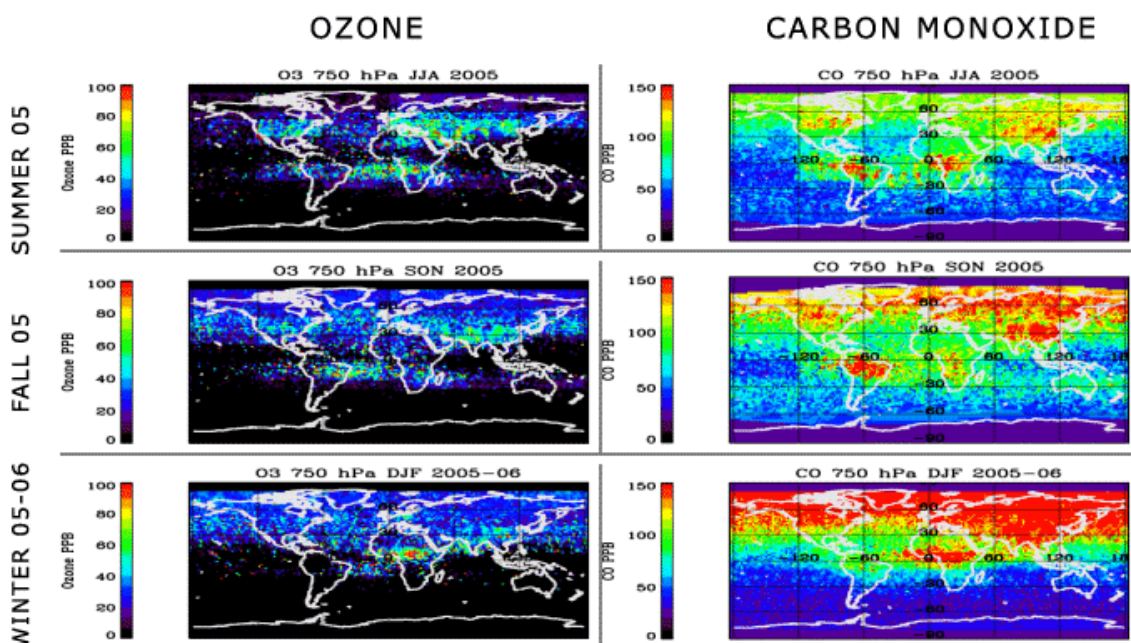


Рис. 38. Карты распределения содержания CO и O₃ на различных уровнях в тропосфере по данным прибора TES, летом, осенью и зимой 2005 г.

Важное значение имеют исследования изотопного состава атмосферных газов, позволяющие изучать характеристики динамики атмосферы, источники и стоки различных газов, биохимические циклы, интенсивности тропосферно-стратосферного обмена и т.д. Для примера приведем рис. 39 с данными измерений отношения изотопов воды с помощью аппаратуры TES. На рисунке черные значки указывают положения измерений TES. Карта демонстрирует широтный эффект, при котором в высоких широтах отношение изотопов HDO/H₂O больше. Значение отношения HDO/H₂O дано по отношению к стандартным величинам для воды океанов (standard mean ocean water (SMOW)), в терминах величины $\delta = \delta D(\text{‰}) = 1000 \times \{ ([\text{HDO}]/[\text{H}_2\text{O}]) / ([\text{HDO}]/[\text{H}_2\text{O}]_{\text{smow}}) - 1 \}$ [90].

Прибор HIRDLS (High Resolution Dynamics Limb Sounder) представляет собой 21-канальный лимбовый ИК радиометр (спектральные каналы расположены в области от 6 до 17 мкм). Прибор позволяет получать глобальные трехмерные поля температуры и важнейших климатически активных газов, характеристики облаков и на основе этих данных – поля ветра в геострофическом приближении [91]. Пространственное разрешение на лимбе составляет 1 км по вертикали и 10 км по горизонтали. По данным на 28 февраля 2009 г. прибор HIRDLS позволяет получать вертикальные профили температуры, содержания O₃, H₂O, CH₄, N₂O, NO₂, HNO₃, N₂O₅, CFC11, CFC12, характеристики аэрозолей, определять положение полярных стратосферных облаков и их верхних границ. Существенное внимание при анализе данных измерений прибора уделяется исследованиям динамики атмосферы при использовании двумерных и трехмерных численных моделей атмосферы. Возможность проведения таких исследований, в частности, обусловлена высоким горизонтальным и вертикальным разрешением данных измерений прибора HIRDLS.

Зондирование атмосферы в МКВ области спектра осуществляется на спутнике Aura с помощью лимбового **спектрометра MLS** (Microwave Limb Sounder) [92]. Отметим, что предыдущий прибор такого типа успешно использовался на спутнике UARS [93]. В табл. 20 приведены данные о параметрах атмосферы, исследуемых этим прибором.

Спектральные МКВ измерения излучения горизонта Земли с помощью прибора MLS позволяют определять профили температуры (высоты 5–90 км, погрешность – 1–2 К), влажности (5–90 км), озона (3–90 км), N₂O (10–60 км), CO (8–90 км), OH (18–30 км), HO₂ (30–80 км), BrO (20–60 км), ClO (15–60 км), HCl (12–90 км), HOCl (20–50 км), HNO₃ (10–50 км), HCN (8–80 км), вулканического SO₂ (10–40 км) с погрешностью 5–10 %, а также содержание ледяных частиц перистых облаков. За сутки прибор получает 3500 профилей атмосферных характеристик.

В качестве примера данных прибора MLS приведем рис. 40, где даны широтно-высотные распределения различных параметров атмосферы – содержания озона, водяного пара, CO, N₂O, HNO₃, ClO, HCl, OH, HCN [94].

Таблица 20. Основные и дополнительные параметры, определяемые по измерениям 4-х радиометров MLS

Радиометр	Основные параметры	Дополнительные параметры
118 ГГц	Температура геопотенциал	Давление, параметры перистых облаков
190 ГГц	H ₂ O HNO ₃ HCN	Параметры перистых облаков, ClO (невысокое качество по сравнению с 640 гГц), N ₂ O (невысокое качество по сравнению с 640 гГц), O ₃ (но не в верхней тропосфере), вулканический SO ₂ , CH ₃ CN
240 ГГц	O ₃ CO	Повышает качество восстановления H ₂ O в верхней тропосфере
640 ГГц	HCl ClO HOCl HO ₂ BrO N ₂ O volcanic SO ₂	Параметры перистых облаков, стратосферный озон с лучшим вертикальным разрешением, чем для 240 GHz (но не для верхней тропосферы), повышенное качество в верхней тропосфере, CH ₃ CN
2.5 ТГц	OH	O ₃ (низкое качество по сравнению с другими радиометрами)

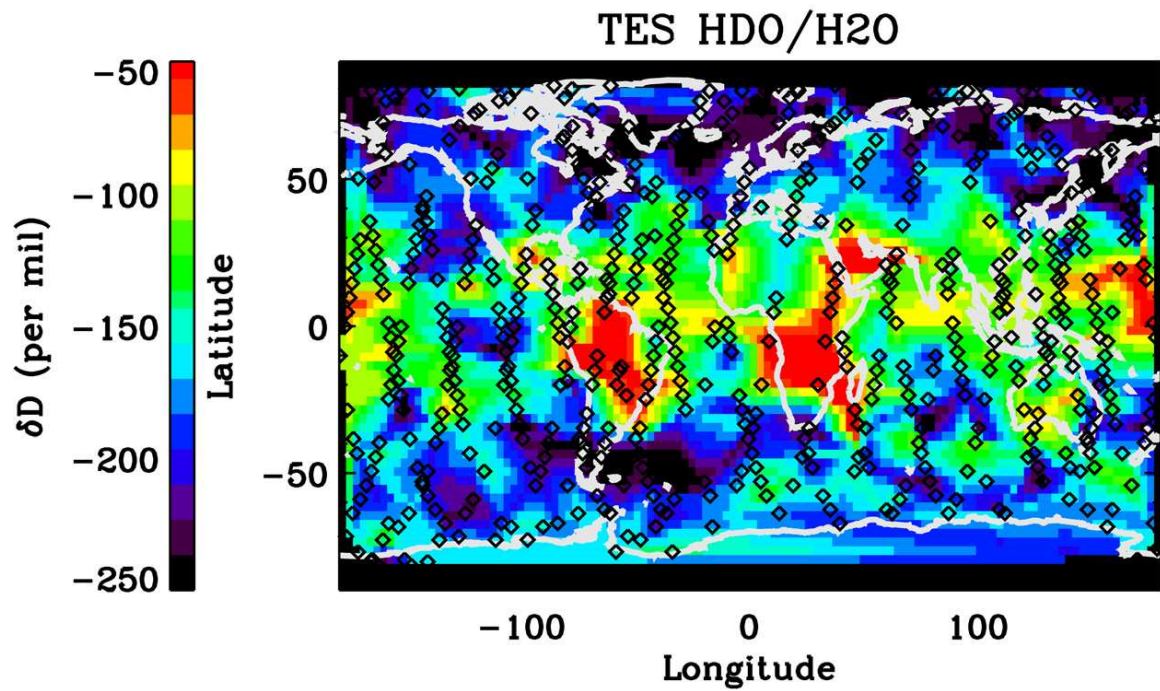


Рис. 39. Отношения HDO/H₂O в слое поверхность–550 мб, усредненные по 2.5x2.5 градусной сетке по данным измерений TES.

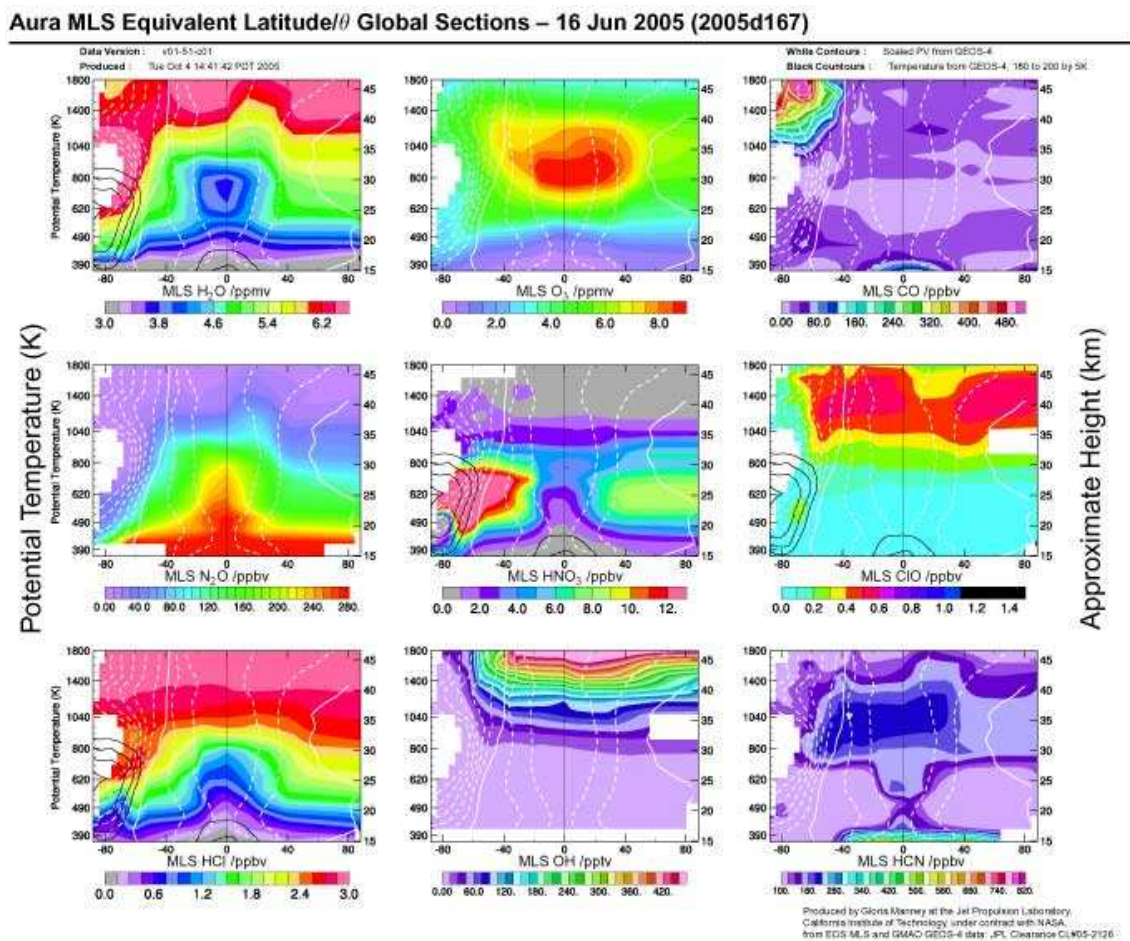


Рис. 40. Широтно-высотные распределения различных параметров атмосферы – содержания озона, водяного пара, CO, N₂O, HNO₃, ClO, HCl, OH, HCN.

Прибор ОМІ (Ozone Monitoring Instrument) предназначен для исследований газового и аэрозольного состава атмосферы и отражательных характеристик поверхности [95]. Прибор измеряет отраженное и рассеянное солнечное излучение в спектральной области 270–500 нм и использует надирную геометрию измерений. Данные, предоставляемые этим прибором включают:

- характеристики аэрозолей (УФ и многоспектральные оптические толщины и альbedo однократного рассеяния),
- бальность облаков и давление на их верхних границах,
- вертикальный профиль и общее содержание озона, содержание озона в тропосфере,
- общее и тропосферное содержание NO_2 ,
- общие содержания SO_2 , BrO , HCHO , OCIO ,
- значения УФ-Б излучения и эритемные дозы излучения на поверхности,
- отражательные характеристик поверхностей.

В качестве примера приведем информацию, полученную с помощью прибора ОМІ о распространении дыма от пожаров в Калифорнии, США (рис. 41).

Другой пример результатов, полученных прибором ОМІ (рис. 42) демонстрирует карту распределения двуокси азота, важного газа, участвующего в образовании тропосферного озона в Балтийском регионе [96]. Красный цвет показывает повышенные содержания NO_2 .

Подобное же картирование содержания этого важного газа осуществлялось регулярно во время олимпийских игр в 2008 года в Китае (рис. 43). На приведенной карте видны обширные районы загрязнений в промышленных районах Китая.

Для комплексных исследований характеристик атмосферы и поверхности, а также их временных вариаций, используется комбинация спутников, последовательно проходящих в одних районах в течение относительно небольшого времени. В табл. 21 приведены очередность прохождения различных спутников, основные цели исследований и используемые приборы **последовательности спутников A-train** [97] (рис. 44).

Таблица 21. Последовательность спутников A-train и цели их исследований

Спутник	Взаимное положение	Цели	Приборы
Aqua	Первый спутник в последовательности	Климатические исследования, с акцентом на изучение круговорота воды в системе атмосфера–Земля	AIRS/AMSU-A/HSB, AMSR-E, CERES, MODIS
CloudSat	Следует за Aqua через 30–120 с	Исследования облаков и определение их роли в формировании климата	CPR
CALIPSO	Следует за CloudSat через 15 с.	Наблюдения с помощью лидара и пассивного видеоприбора позволят лучше понять роль облаков и аэрозолей в формировании климата.	CALIOP IIR WFC
PARASOL	Следует за CALIPSO через 1 мин. 45 с	Поляризационные измерения излучения позволят лучше определять характеристики облаков и аэрозолей, в частности, различать естественные и антропогенные аэрозоли.	POLDER
Aura	Следует за Aqua через 15 мин.	Исследования в области атмосферной химии – определение трехмерных полей содержания парниковых и загрязняющих газов	HIRDLS MLS OMI TES

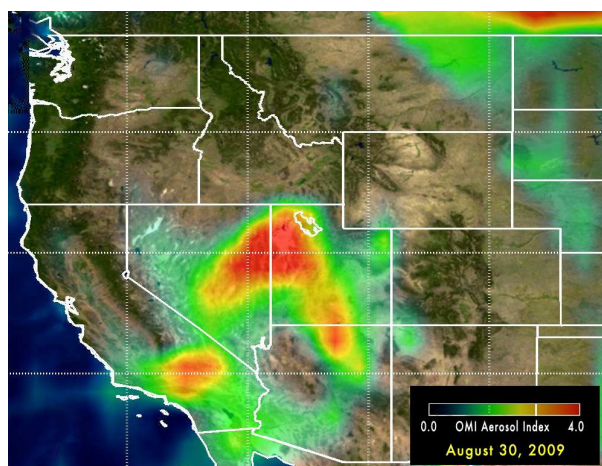


Рис. 41. Облака аэрозолей от пожаров в Калифорнии (США) по данным прибора OMI 22 августа 2009 г.

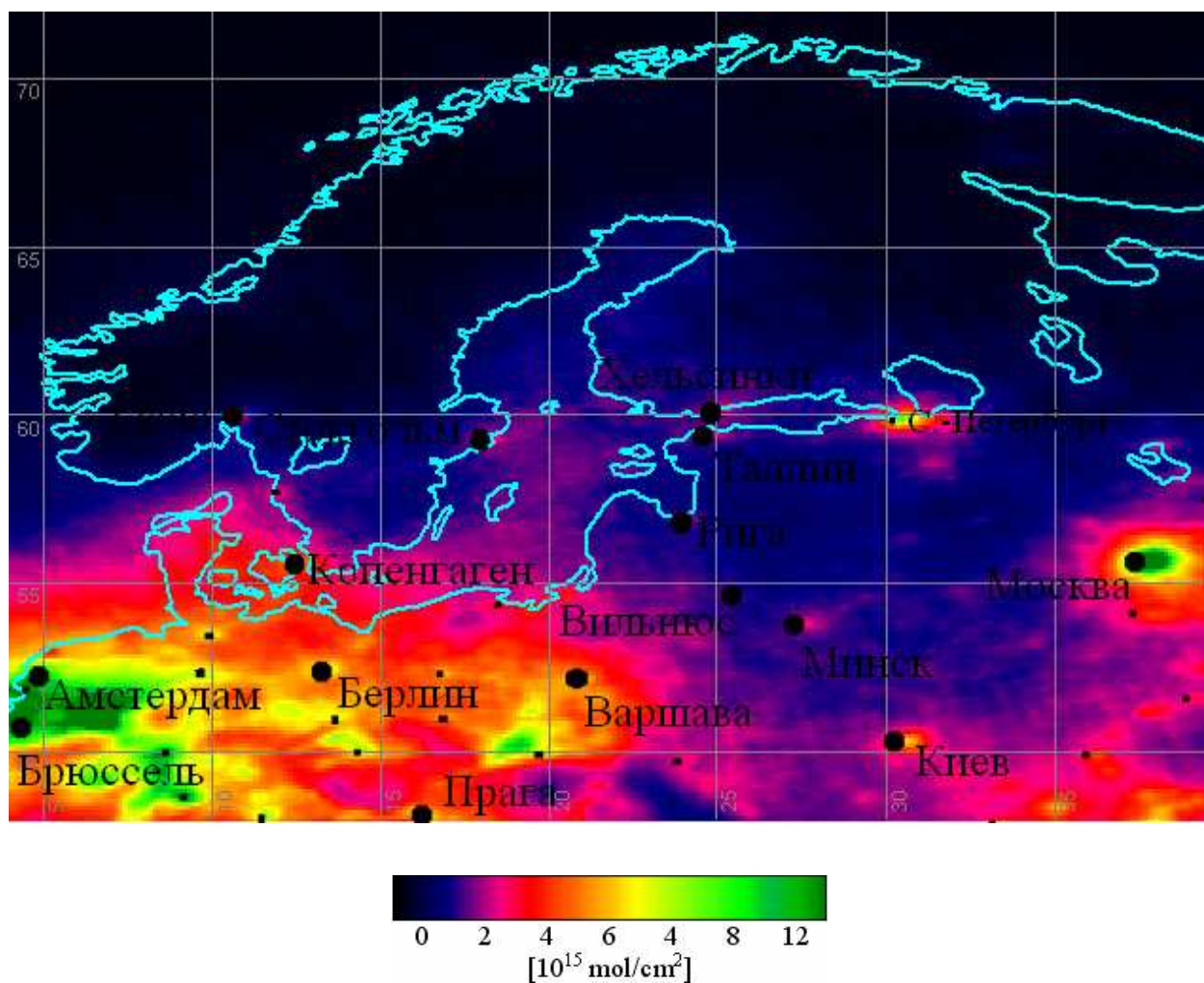


Рис. 42. Среднегодовое распределение тропосферного содержания NO_2 в Балтийском регионе по данным спутниковых измерений AURA OMI в 2004–2008 гг.

Aura/OMI Tropospheric Column N₂O: Averaged from 13 August, 2008 to 19 August, 2008

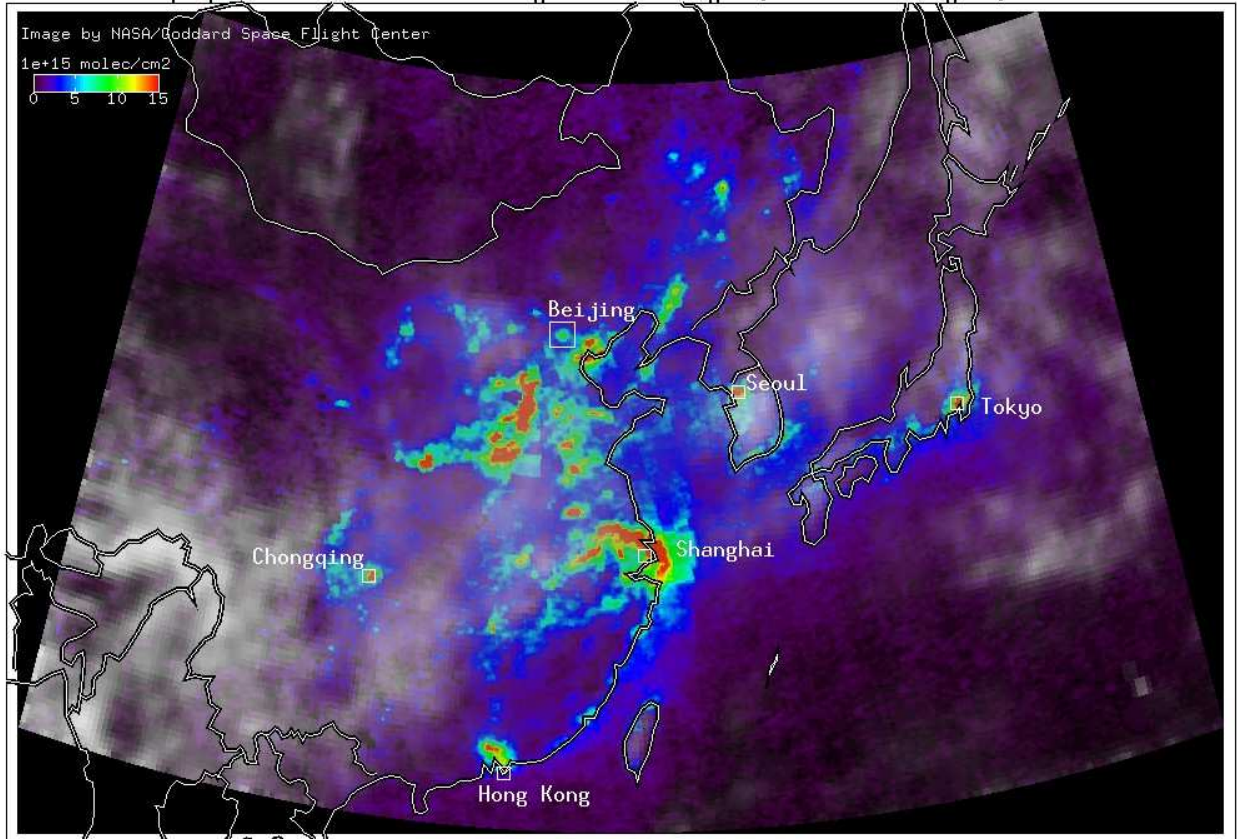


Рис. 43. Карта содержания двуокси азота над Китаем (13–19 августа 2008 г.) по данным прибора OMI.

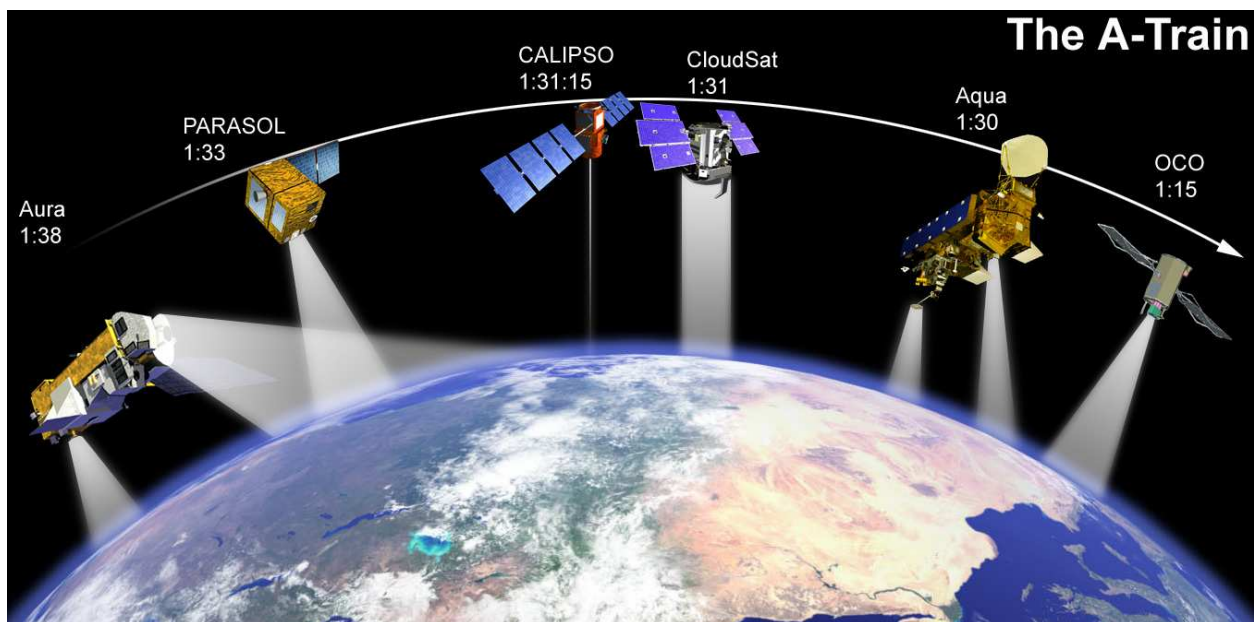


Рис. 44. Последовательность спутников A-Train

Использование пассивных и активных дистанционных методов на спутниках A-train позволяет определять характеристики атмосферных аэрозолей, облаков и содержания различных газов. При этом используются измерения излучения от УФ области до микроволновой. Приборы AIRS и AMSU позволяют в 70 % случаев в дневное и ночное время определять вертикальные профили температуры и влажности, делать оценки общих содержаний в различных областях тропосферы таких газов как CO, CH₄, CO₂, O₃ и SO₂. Широкий горизонтальный обзор прибора AIRS (спутник Aqua) хорошо дополняется более детальными измерениями прибора TES по вертикали на борту спутника Aura. В дневное время прибор OMI на борту спутника Aura дает информацию о тропосферных содержаниях SO₂, NO₂, HCHO, а также OCO O₃, характеристиках аэрозолей в тропосфере. Информация об аэрозоле получается также с помощью прибора MODIS на спутнике Aqua. Дополнительная информация о вертикальном распределении характеристик аэрозоля поступает от лидара на борту спутника CALIPSO. Подобные совместные измерения позволяют изучать экологическое состояние различных областей, например, в г. Мехико, континентальных районах США, Китае, Индонезии и т.д. [98].

На спутнике **Cloudsat** впервые использовался миллиметровый радар (частота излучения 94 ГГц) для исследования характеристик облаков и осадков. Использование миллиметровых длин волн позволяло исследовать капли облаков, по сравнению с радаром сантиметровой области спектра, удобных для изучения капель осадков [99].

На канадском спутнике **SCISAT**, проводившем исследования газового состава и впервые осуществившем измерения прозрачности атмосферы на касательных трассах с высоким спектральным разрешением от УФ до среднего ИК области спектра, функционировали два прибора, использовавших затменный метод.

Прибор ACE-FTS (Atmospheric Chemistry Experiment-Fourier Transform Spectrometer) измерял солнечные спектры со спектральным разрешением 0.02 cm^{-1} в области $750 \text{ and } 4400 \text{ cm}^{-1}$ ($2.2\text{--}13 \text{ }\mu\text{m}$) [100]. Типичные отношение сигнал/шум составляли более 300 в спектральной области $900\text{--}3700 \text{ cm}^{-1}$. Второй **прибор ACE-MAESTRO** (Measurement of Aerosol Extinction in the Stratosphere and Troposphere Retrieved by Occultation) измерял солнечное излучение в области $400\text{--}1010 \text{ nm}$ со спектральным разрешением $1.5\text{--}2 \text{ nm}$ [101]. Приборы спутника позволяли измерять вертикальные профили многих МГС, характеристик аэрозолей и облаков. Космические эксперименты с этой аппаратурой можно рассматривать как продолжение экспериментов с интерферометром **ATMOS** (в 1985, 1992, 1993 и 1994 годах). При этом технологические

достижения прошедших лет позволили сделать приборы существенно меньшего веса и размеров, что важно при спутниковых исследованиях.

На борту научно-исследовательского спутника Японии GOSAT, предназначенного для детального изучения источников и стоков важнейших парниковых газов, функционируют два прибора: интерферометр **TANSO-FTS** и видеоприбор **TANSO-CAI** (Thermal And Near infrared Sensor for carbon Observations-Cloud and Aerosol Imager). Интерферометр измеряет уходящее излучение в четырех спектральных областях (12900–13200, 5800–6400, 4800–5200 и 700–1800 см⁻¹) со спектральным разрешением 0.2 см⁻¹. Измерения в этих спектральных областях позволяют определять приземное давление атмосферы, наличие перистых облаков (полоса поглощения кислорода), содержание углекислого газа, метана, водяного пара и других газов [102]. В качестве примера на рис. 45 и 46 приведены первые результаты спутниковых измерений содержаний CO₂ и CH₄ [103]. Прибор TANSO-CAI позволяет получать информацию о характеристиках поверхности и облаков с хорошим горизонтальным разрешением (0.5–1.5 км).

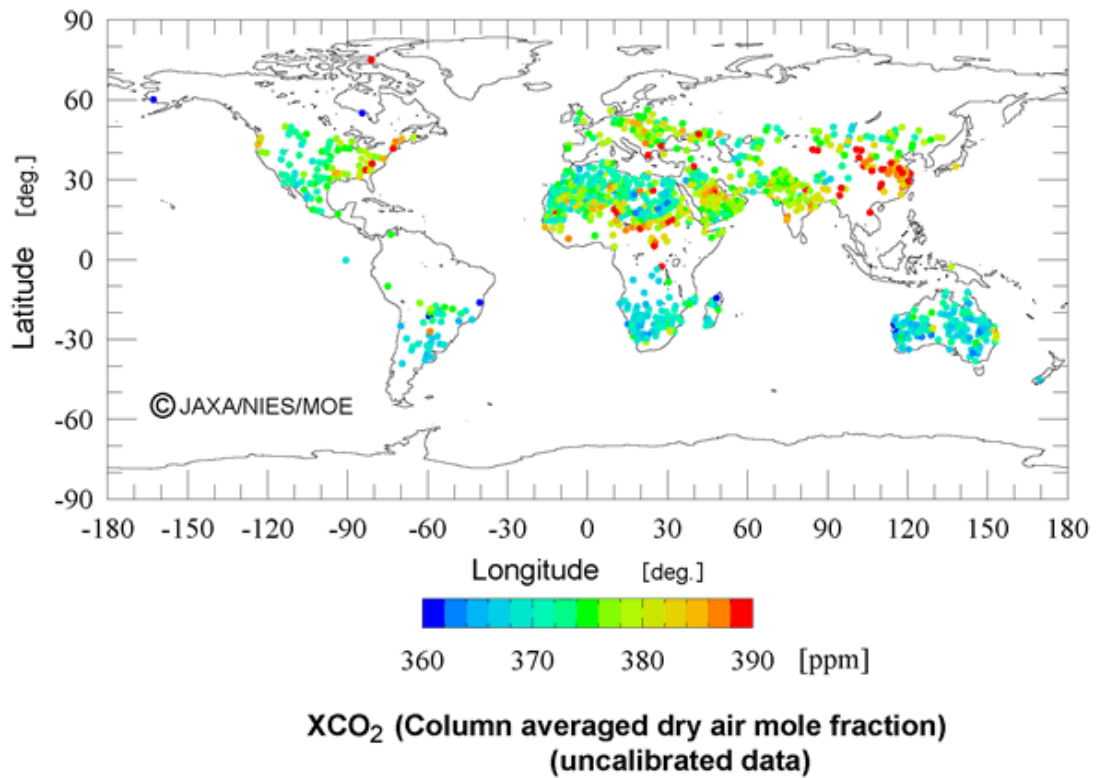


Рис. 45. Содержание CO₂ для случаев измерений в безоблачной атмосфере по данным спутниковых измерений в БИК области спектра (в единицах отношения смеси к сухому воздуху – ppm) [103].

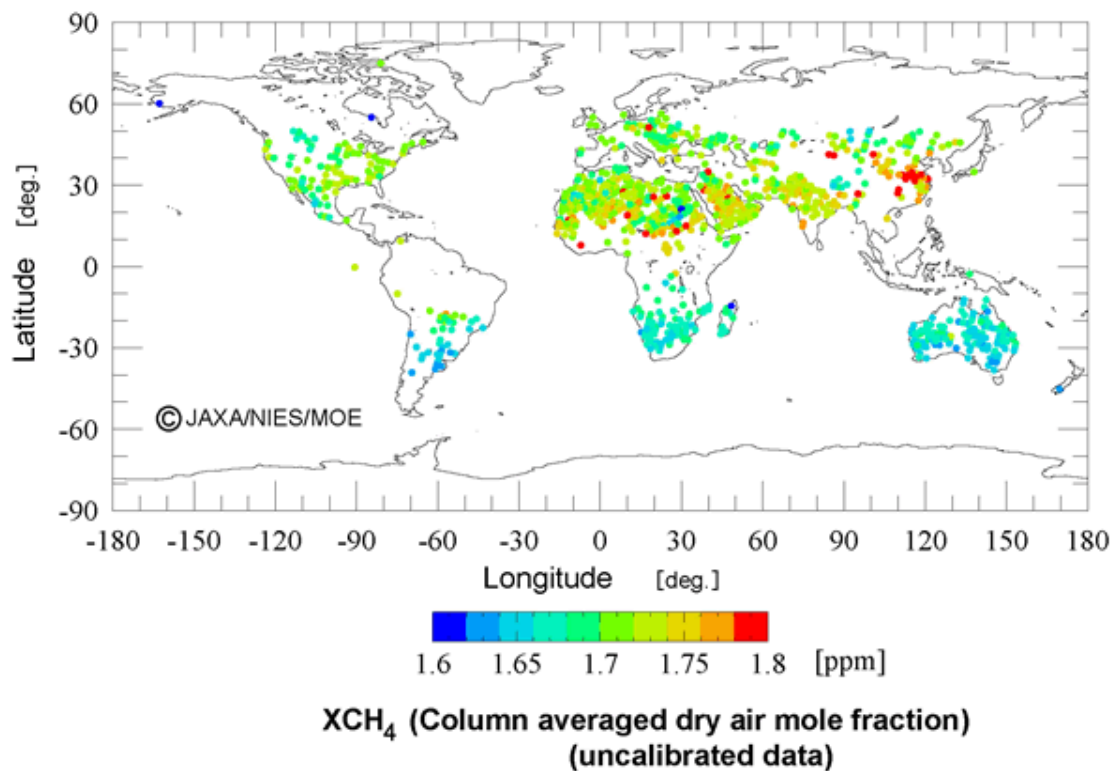


Рис. 46. Средние отношения смеси метана для безоблачных ситуаций по данным спутниковых измерений в БИК области спектра (ppm) [103].

В последние годы интенсивно развиваются активные методы определения вертикальных профилей температуры с помощью метода радиоокультации с использованием космической системы навигации GPS и специализированных спутников [104]. В отличие от пассивной дистанционной рефрактометрии в этом методе используют искусственные источники э.м. излучения. Главная задача навигационных систем **GPS** и **ГЛОНАСС** – точное определение координат для навигации. Однако эти системы также дают возможность дистанционного зондирования земной атмосферы для определения ее параметров. Это возможно, потому что скорость распространения радиосигналов от GPS спутников в атмосфере уменьшается, поскольку коэффициент преломления воздуха $n > 1$. Кроме того, траектории движения радиолучей искривляются из-за экспоненциального уменьшения плотности атмосферы и показателя преломления с высотой. Эти два фактора увеличивают время распространения радиосигналов между GPS спутником и приемником в атмосфере по сравнению с аналогичным временем в вакууме. В связи с этим, возникло новое направление исследований, иногда называемое «GPS метеорология», целью которого является извлечение полезной информации об атмосферных параметрах из указанного временного запаздывания GPS радиосигналов в атмосфере. На рис. 47 приведена схема спутниковой системы GPS, включающая большое количество навигационных спутников и позволяющая осуществлять периодические радиозатменные измерения параметров атмосферы.

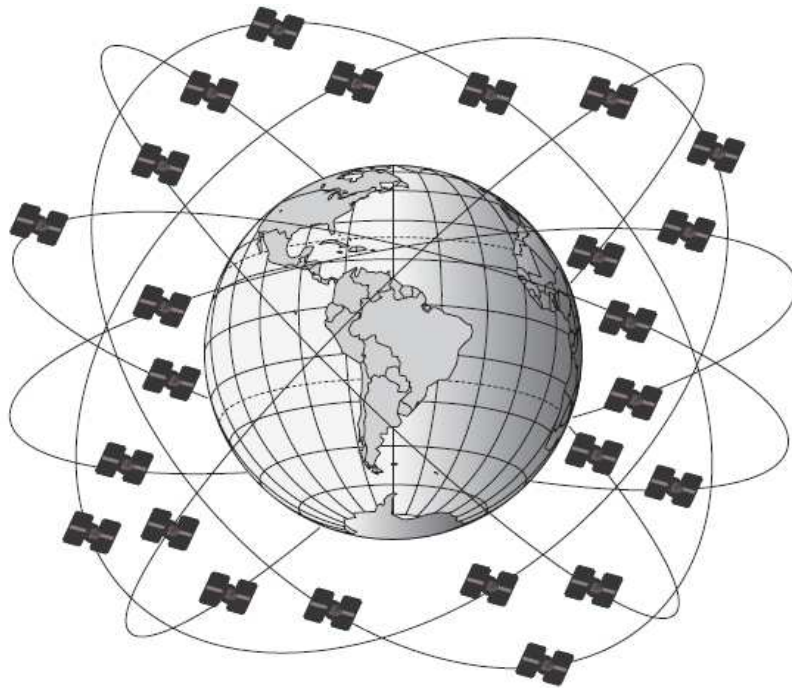


Рис. 47. Схема орбит спутников американской системы GPS.

Можно выделить два основных направления GPS метеорологии: 1) спутниковое радиопросвечивание атмосферы, 2) наземные GPS наблюдения [105]. Спутниковые наблюдения проводятся с помощью приемников, установленных на борту низкоорбитальных (высоты 200–1000 км) спутников. Эти приемники получают сигналы с геостационарных GPS спутников на касательных трассах, которые затем используются для определения искривления траектории и угла отклонения радиолуча в атмосфере. При некоторых предположениях (например, сферическая симметрия) изменения угла отклонения радиолуча с высотой может дать информацию о вертикальных профилях показателя преломления, плотности и температуры в средней атмосфере. В стратосфере, где влияние на рефракцию водяного пара очень мало, определяют вертикальный профиль температуры. В тропосфере, если известен профиль температуры, определяют вертикальный профиль влажности.

Наземные GPS измерения дают, в частности, возможность определения полного содержания водяного пара в вертикальном столбе атмосферы. Многие идеи в этой области исследований родились из работ геодезистов и геофизиков, которые потратили значительные усилия, чтобы исключить атмосферный «шум» при точном определении географических координат GPS приемников [105].

На рис. 48 приведена карта местоположений спутниковых измерений профилей температуры, полученная с помощью GPS метода за 20 июня 2008 г с использованием различных спутников.



ECMWF Data Coverage (All obs DA) - GPSRO
20/JUN/2008; 12 UTC
Total number of obs = 651

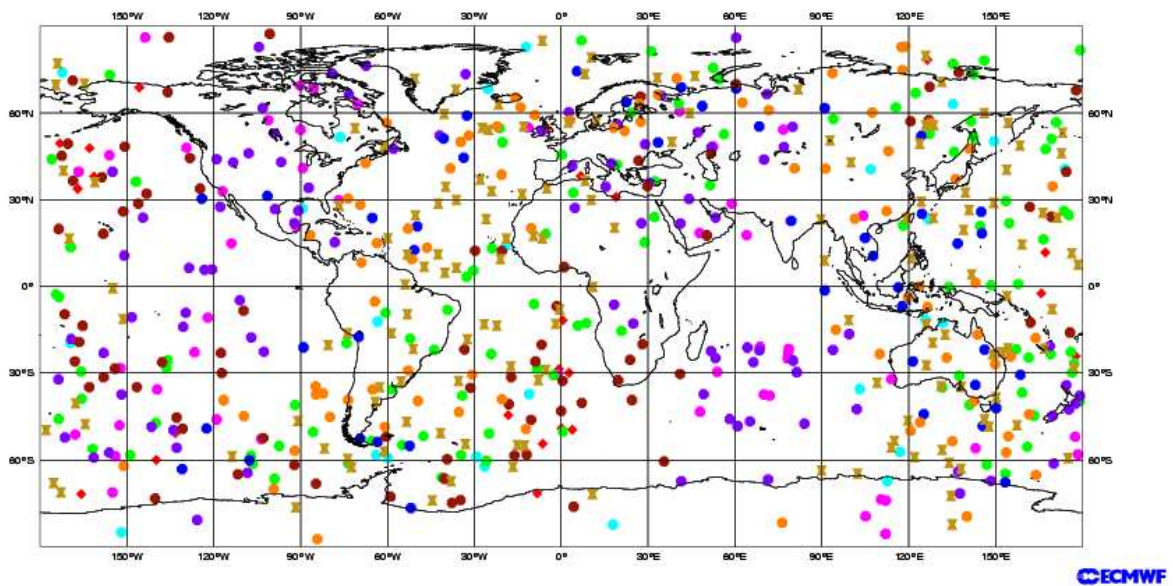


Рис. 48. Карта распределения измерений с помощью метода радиоокультации в течение 20 июня 2008 г с использованием различных спутников. Измерения различных спутников указаны цветными точками. Общее число измерений – 651.

8. Заключение

Глобальная Система Наблюдений (ГСН) предназначена для мониторинга огромного количества параметров атмосферы и поверхности, необходимых для решения различных научных и прикладных задач в области физики атмосферы, метеорологии, океанологии, гидрологии, климатологии и т.д. При этом в различных задачах предъявляются различные требования к измерениям по точности, пространственному разрешению, периодичности и т.д. Поэтому создание ГСН, удовлетворяющей всем этим требованиям, является очень сложной и дорогостоящей задачей, в которой принимают участие многие страны. Координация этой деятельностью осуществляется ВМО.

Основные принципы создания и особенности современной глобальной системы наблюдений можно сформулировать следующим образом:

1. Использование различных типов наблюдений (локальных и дистанционных), привлечение к измерениям большого количества стран и территорий, различных ведомств, государственных и коммерческих компаний и фирм, различных носителей.
2. Постоянный анализ и контроль качества измерений различных параметров с целью получения согласованных по различным характеристикам длительных рядов наблюдений.

В настоящее время в рамках ГСН широко используются разнообразные дистанционные методы измерений – пассивные и активные, наземные, самолетные, аэростатные и спутниковые – в рамках различных подсистем наблюдений, взаимно дополняющих друг друга. Характерными особенностями создаваемой ГСН являются:

1. Взаимокалибровка различных подсистем наблюдений.
2. Применение различных приборов, использующих различные принципы измерений, и использование различной геометрии измерений.
3. Синергетика различных систем и методов наблюдений для измерений конкретного параметра.

Так температура атмосферы измеряется с помощью локального радиозондового метода измерений, локальных ракетных измерений, различных дистанционных измерений – ИК и МКВ измерений уходящего теплового излучения со спутников при различной геометрии измерений, лидарных измерений, радиозатменных спутниковых измерений и т.д.

Для примера рассмотрим современную систему измерений такого важного параметра как содержание озона. Измерения содержания озона производятся в настоящее время различными методами – наземными, самолетными, спутниковыми и т.д. Мы уже

приводили информацию о различных спутниковых методах измерений содержания озона. Для наглядности приведем рис. 49, где проиллюстрированы различные системы измерения содержания озона:

1. Наземные измерения общего содержания озона (спектрометры Добсона и Брюера, фотометр М-124).
2. Измерения вертикальных профилей (точнее элементов вертикальных профилей) содержания озона – методика Umkehr – интерпретация наземных измерений рассеянного солнечного излучения при заходах и восходах Солнца.
3. Лидарные измерения вертикальных профилей содержания озона.
4. Микроволновые измерения вертикальных профилей озона.
5. Озонозондовые измерения вертикальных профилей.
6. Спутниковые методы определения вертикальных профилей и ОСО с помощью различных методов и при различной геометрии измерений (см. табл. 22).
7. Наземные ИК методы определения элементов вертикальных профилей и общего содержания озона (по данным измерений спектров солнечного излучения и спектров нисходящего теплового излучения).
8. Самолетная система измерений содержания озона.

В таблице 22 дана информация о различных дистанционных спутниковых методах и соответствующих приборах, использовавшихся для решения этой задачи.

Таблица 22. Спутниковые методы измерений содержания озона

Метод	Определяемые параметры	Аппаратура	Примечание
Прозрачность атмосферы	Вертикальный профиль 10–100 км, вертикальное разрешение $\Delta z=1-2$ км	SAM II, SAGE I, II, III, Озон-Мир, POAM II, III, ILAS I, II, HALOE, ATMOS, ACE, MAESTRO, SCIAMACHY, UVISI/MSX,	Использование излучения Солнца, Луны, звезд в широкой спектральной области. Касательные трассы, восходы и заходы источника.
Собственное излучение	Лимб: вертикальный профиль 10–70 км, $\Delta z=2-4$ км. Надир: общее содержание, вертикальный профиль 20–40 км, $\Delta z=4-6$ км	LIMS, ISAMS, SSM/I, MAS, TOVS, MLS, CIRRIS 1A, CLAES, MIPAS, TES, HIRDLS, MSU, CRISTA, TMI, SEVIRI, SABER	Равновесное и неравновесное излучение атмосферы в ИК и МКВ областях. Надирная и касательная геометрия.
Рассеянное солнечное излучение	Надир: общее содержание, вертикальный профиль 20–60 км, $\Delta z=4-8$ км. Лимб: вертикальный профиль 10–50 км, $\Delta z=2-3$ км	AVHRR, TOMS, SBUV, GOME, SCIAMACHY, OMI, MODIS LORA, SOLSE, SCIAMACHY, SAGE III, OSIRIS	Рассеянное излучение в УФ и видимой областях спектра. Надир и лимб/

Указанные методы имеют различные преимущества и недостатки, но только их совокупное использование может позволить добиться выполнения всех требований к данным измерений и решить многочисленные задачи научного и прикладного характера, связанные с содержанием озона в земной атмосфере.

Аналогичная ситуация наблюдается и при измерениях других параметров атмосферы и поверхности (влажности, скорости ветра, характеристик газового и аэрозольного состава атмосферы и т.д.). Если говорить о современных тенденциях в развитии одной из важнейших подсистем ГСН, спутниковой, то их можно охарактеризовать следующим образом:

1. Использование различных орбит космических носителей аппаратуры – с различными высотами от поверхности Земли (от ~ 300 км до 36000 км и более), различными наклонениями и временем прохождения экватора.
2. Использование как пассивных, так и активных методов зондирования.
3. Реализация различной периодичности наблюдений (от несколько минут до 2–4 раз в сутки).
4. Применение различной геометрии измерений (надирной, наклонной и касательной).
5. Глобальность измерений.
6. Высокое пространственное, особенно горизонтальное, разрешение (от долей метра в видимой области спектра, до сотен метров и километров в ИК области).
7. Использование измерений уходящего излучения в широкой области спектра – от жесткого УФ до радиоволн.
8. Применение дистанционных методов, использующих разнообразные механизмы взаимодействия излучения с исследуемой средой – отражение, рассеяние различных типов, ослабление, поглощение, рефракция, доплеровские смещения, генерация теплового и неравновесного излучения. свечения и т.д.
9. Использование различных естественных источников свет – Солнца, Луны, звезд.
10. Измерения угловых, спектральных, временных и поляризационных характеристик уходящего излучения и количественных характеристик рефракции в земной атмосфере. В задачах радиоокультации происходят измерения фаз радиоволн.

11. Постоянное повышение информативности дистанционных измерений путем совершенствования аппаратуры, повышения качества априорной информации, методик интерпретации, синергетики различных методов и т.д.
12. Увеличение периодов непрерывных, однородных спутниковых наблюдений.
13. Осуществление обширных программ валидации результатов дистанционных измерений.
14. Взаимокалибровка измерений различных типов.

Широким международным сотрудничеством и кооперацией при создании аппаратуры, проведении различных космических экспериментов и в обмене спутниковой информацией.

Measuring Ozone in the Atmosphere

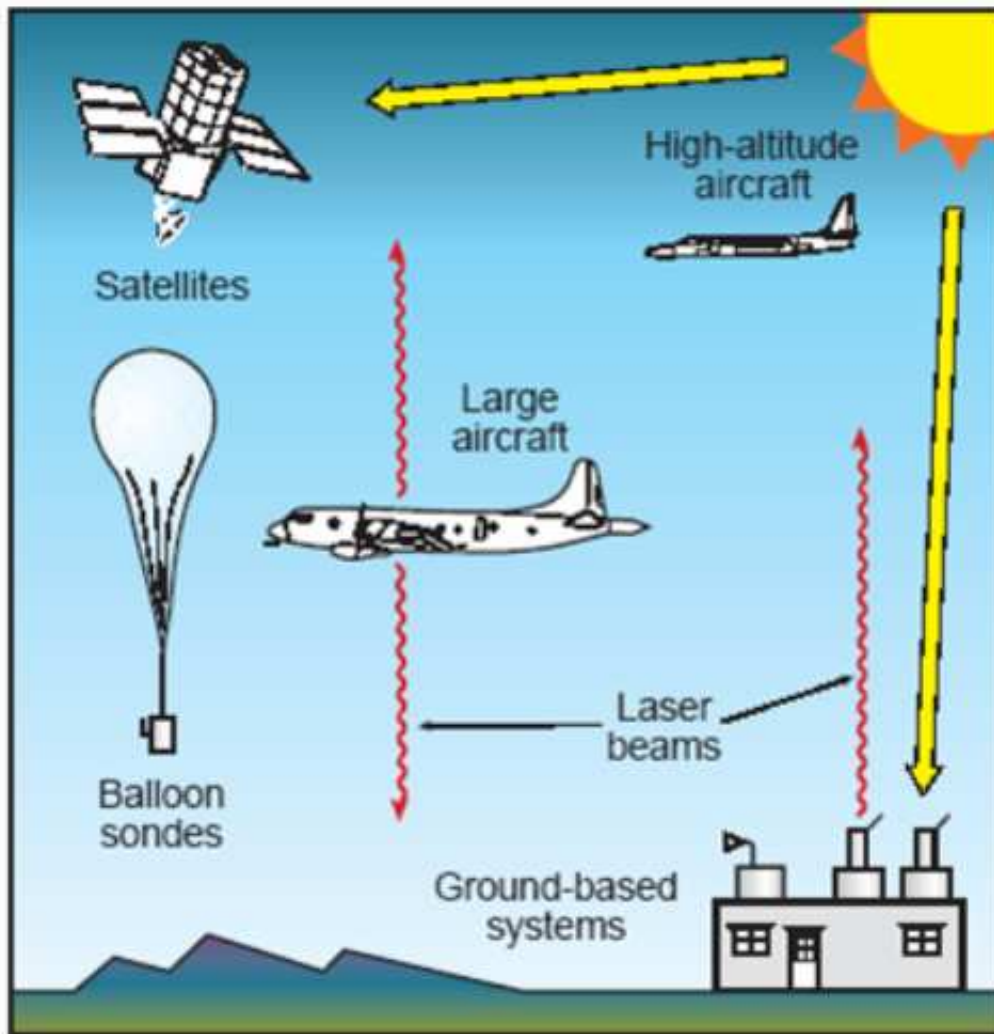


Рис. 49. Различные системы измерения содержания озона.

Литература

1. IPCC, 2007. Climate change, 2007: The Physical Science Basis. Summary for Policy Makers), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007, 996 pp.
2. Solomon, S., D. Qin, M. Manning, et al. (eds). Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007, 996 pp.
3. *Scientific Assessment of the Effects of Global Change on the United States*. A Report of the Committee on Environment and Natural Resources National Science and Technology Council, 2008, 271 pp.
4. *Towards an Integrated Global Observing Strategy*. European Space Agency, Committee on Earth Observation Satellites, CEOS Yearbook, Paris, 1997.
5. Кароль И.Л., Розанов Е.В., Тимофеев Ю.М. Газовые примеси в атмосфере. Л., Гидрометеоиздат, 1983. 192 с.
6. <http://dic.academic.ru/dic.nsf/psihologic/1126>
7. <http://www.wmo.int/pages/prog/www/IMOP/publications/CIMO-Guide/CIMO%20Guide%207th%20Edition,%202008/Part%20I/Chapter%201.pdf>
8. http://www.wmo.int/pages/themes/observations/index_en.html
9. Progress Report on the Implementation of the Global Observing System for Climate in Support of the UNFCCC 2004-2008, GCOS-129, WMO-TD/No. 1489, GOOS-173, GTOS-70), August 2009, 112 pp.
10. <http://www.wmo.ch>; <http://www.wmo.int>
11. WMO/CEOS Report on a Strategy for Integrated Satellite and Ground-based Observations of ozone. WMO No. 140, January 2001, 147 pp.
12. Hansen J., W. Rossow, and I. Fung (Eds.). Long-term monitoring of global climate forcing and feedbacks, NASA Conf. Publ., 3234, 1993.
13. Van Velthoven, P.F.J., and H.M. Kelder. Estimation of stratosphere-troposphere exchange: Sensitivity to model formulation and horizontal resolution. *J. Geophys. Res.*, 1996, **101**, 1429–1434.
14. <http://www.gosic.org/ios/GCOS-main-page.htm>
15. <http://www.fotomarket.ru/product/01313/>, <http://bortovan.ru/professionalnye-meteostancii-TFA-Master-Touch-013131.html>

16. WMO-8 (Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation). WMO, 2006, 596 pp.
17. *Pierre Jeannet, Carl Bower, and Bertrand Calpini*. 2008 Global Criteria for Tracing the Improvements of Radiosondes over the Last Decades. WMO/TD No.1433, 32 pp.
18. <http://www.vaisala.com/files/Vaisala%20Radiosonde%20RS92-SGP%20brochure%202005.pdf>
19. <http://www.ofcm.gov/fmh3/text/chapter2.htm>,
<http://www.ofcm.gov/fmh3/text/rawinson.htm>
20. Federal Meteorological Handbook No. 1 – Surface Weather Observations and Reports, September 2005, FCM-H1-2005, Washington, D.C., 104 pp. Federal Meteorological Handbook No.3 – Rawinsonde and Pibal Observations, FCM-H3-1997 Washington, DC, May 1997, pp.191.
21. <http://www.marinedataservice.com/Weather%20Data%20Buoy.pdf>
22. [http://en.wikipedia.org/wiki/Argo_\(oceanography\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Argo_(oceanography))
23. <http://www.ndsc.ncep.noaa.gov/>
24. <http://www.nasa.gov/vision/earth/everydaylife/aeronet.html>
25. <http://cerberus.rivm.nl/ISTP/data/1660975.pdf>
26. <http://www.earlinet.org>
27. *Чайковский А.П., Иванов А.П. и др.* Лидарная сеть CIS-LINET для мониторинга аэрозоля и озона: Методология и аппаратура. *Оптика атмосферы и океана*, 2005, **18**, 12, 1066–1072; <http://innosfera.org/node/494>
28. <http://www.accuweather.com/index-radar.asp?partner=netWeather>
29. *Луцько Л.В., Махоткина Е.Л., Клеванцова В.А.* Развитие наземных актинометрических наблюдений. Юбилейный сборник “Современные исследования Главной Геофизической обсерватории”. СПб.: Гидрометеиздат, 2001, 184–202.
30. *Успенский А.Б., Романов С.В., Троценко А.Н.* Применение метода главных компонент для анализа ИК–спектров высокого разрешения, измеренных со спутников. *Исслед. Земли из космоса*, 2003, 3, 1–8.
31. <http://en.wikipedia.org/wiki/Satellite>
32. *Асмус В.В. и др.* Высокоэллиптическая космическая система для гидрометеорологического мониторинга Арктического региона Земли. *Бюллетень ВМО* 56 (4), 2007, 293–296.
33. *Report to the 32nd meeting of the Coordination Group for Meteorological Satellites (CGMS)*, May 2004, CGMS XXXII Sochi, Russian Federation, 17–20 May 2004,

- 127 pp. Report edited on behalf of CGMS by: CGMS Secretariat EUMETSAT Postfach 10 05 55 D-64295 Darmstadt Germany.
34. Дядюченко В.Н., Селин В.А., и др. Развитие космического комплекса гидрометеорологического и океанографического обеспечения на базе системы полярно-орбитальных ИСЗ серии «МЕТЕОР-М». Иссл. Земли из космоса, 2010 (в печати)
 35. Тимофеев Ю.М., Васильев А.В. Теоретические основы атмосферной оптики. СПб.: Наука, 2003, 475 с.
 36. Астафьева Н.М., М.Д.Раев, Е.А.Шарков. Портрет Земли из космоса. Глобальное радиотепловое поле. *Природа*, 2006, No. 9;
http://vivovoco.rsl.ru/VV/JOURNAL/NATURE/09_06/RADIO.HTM
 37. Kramer, Herbert J. Observation of the Earth and Its Environment, Survey of Missions and Sensors. Windows-/Macintosh-Version 4th ed., 2002, 1510 pp. ISBN: 978-3-540-42388-1.
 38. <http://www.wmo.int/pages/prog/sat/Ongoingactivities.html>
 39. Поляков А.В., Тимофеев Ю.М. Определение общего содержания озона с геостационарных спутников Земли. *Изв. РАН, ФАО*, 2008, **44**, 6, 1–8.
 40. http://goespoes.gsfc.nasa.gov/goes/instruments/i_m_sounder.html;
<http://goespoes.gsfc.nasa.gov/poes/products/index.html#>
 41. Smith W.L., H. Revercomb, G. Bingham et al. Evolution, current capabilities, and future advance in satellite nadir viewing ultra-spectral IR sounding of the lower atmosphere. *Atmos. Chem. Phys.*, 2009, 9, 5563–5574.
 42. <http://planet.iitp.ru/index1.html>
 43. <http://www.oso.noaa.gov/poesstatus/spacecraftStatusSummary.asp?spacecraft=17>
 44. <http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/heasarc/missions/dmsp.html>
 45. <http://jtintle.wordpress.com/category/satellite/operational-linescan-system>
 46. <http://www.ngdc.noaa.gov/dmsp/sensors/ssmt.html>
 47. <http://www.ngdc.noaa.gov/dmsp/sensors/ssmt2.html>
 48. http://www.ssmi.com/ssmi/ssmi_description.html
 49. http://www.esa.int/esaLP/SEM_TSEG23IE_LPmetop_0.html
 50. <http://www-sage3.larc.nasa.gov/>
 51. Polyakov A.V., Yu.M. Timofeyev, et al. Retrieval of ozone and nitrogen dioxide concentration from Stratospheric Aerosol and Gas Experiment III (SAGE III) measurement using a new algorithm. *J.G.R.*, 2005, **110**, D06303, doi:10.1029/2004JD005060.

52. Поляков А.В., Тимофеев Ю.М., Ионов Д.В., Стил Х., Ньючерч М. Новая интерпретация измерений прозрачности спутниковым спектрометром SAGE III. *Изв. РАН, ФАО*, 2005, **41**, 3, 410–422.
53. Чайка А.М., Тимофеев Ю.М., Поляков А.В. Интегральные микрофизические параметры фонового стратосферного аэрозоля в 2002–2005 гг. (спутниковый эксперимент с аппаратурой SAGE III). *Изв. РАН, ФАО*, 2008, **44**, 2, 206–220.
54. Поляков А.В., Тимофеев Ю.М., Виролайнен Я.А. Полярные стратосферные облака по данным спутниковых наблюдений прибора SAGE III. *Изв. РАН, ФАО*, 2008, **44**, 4, 448–458.
55. <http://topex-www.jpl.nasa.gov/mission/topex.html>
56. http://ilrs.gsfc.nasa.gov/satellite_missions/list_of_satellites/jas2_general.html
57. <http://www.astronautix.com/craft/adeos.htm>
58. <http://jwocky.gsfc.nasa.gov/adeos/adeos.html>
59. ATMOS on ISS. Scientific Objectives. Prepared by Gunson M.R. JPL Propulsion Lab., November 20, 1995
60. Grossmann K.U., Gusev O., Kaufmann M., Kutepov A., Knieling P., A review of the scientific results from the CRISTA missions. *Adv. Space Res.*, 2004, **34**, 1715–1721.
61. Косцов В.С., Тимофеев Ю.М., Гроссманн К., Кауфман М., Оберхайде Й. Интерпретация спутниковых измерений уходящего неравновесного ИК излучения в 15 мкм полосе CO₂: 2. Примеры обработки данных эксперимента CRISTA. *Изв. РАН, ФАО*, 2001, **37**, 6, 801-810.
62. Косцов В.С., Тимофеев Ю.М. Содержание углекислого газа в мезосфере по результатам интерпретации данных эксперимента CRISTA-1. *Изв. РАН, ФАО*, 2003, **39**, 3, 359-370.
63. Поляков А.В., Поберовский А.В., Тимофеев Ю.М. Определение вертикальных профилей содержания озона методом затменного зондирования с ДОС «МИР». 2. Сравнение результатов измерений с независимыми данными. *Изв. АН, ФАО*, 1999, **35**, 3, 322–328.
64. http://www.esa.int/esaEO/SEMGWH2VQUD_index_0_m.html
65. <http://envisat.esa.int/object/index.cfm?fobjectid=3762>
66. Vanhellemont F., D. Fussen, et al. A first comparison of GOMOS aerosol extinction retrievals with other measurements. *Adv. Space Res.*, 2005, **36**, 5, 894–898.
67. Kurolo E., et al. GOMOS on Envisat. *Adv. Space Res.*, 2004, **33**, 1020–1028.

68. Sofieva V.F., A.S. Gurvich, F. Dalaudier. Gravity wave spectra parameters in 2003 retrieved from stellar scintillation measurements by GOMOS. *Geoph. Res. Lett.*, 2009, **36**, L05811, doi:10.1029/2008GL036726.
69. <http://www.atm.ox.ac.uk/group/mipas>
70. Fischer, H., and H.Oelhaf. Remote sensing of vertical profiles of atmospheric trace constituents with MIPAS limb-emission spectrometers. *Applied Optics*, 1996, **35**, 16, 2787–2796.
71. <http://envisat.esa.int/instruments/sciamachy/>
72. <http://envisat.esa.int/instruments/meris/>
73. <http://www.disasterscharter.org/home>
74. http://www.esa.int/esaEO/SEM340NKPZD_index_0.html
75. http://www.esa.int/esaEO/SEMKZSMVGJE_economy_1.html
76. http://www.esa.int/esa-cgi/esasearch.pl?r=observing_the_earth&q=ozone&Submit=GO
77. <http://www.knmi.nl/bibliotheek/knmipubTR/TR281.PDF>
78. <http://www.snsb.se/en/Home/Space-Activities-in-Sweden/Sattelites/Odin/>
79. http://smc.cnes.fr/ODIN/lien2_scie.htm
80. <http://saber.gats-inc.com/>
81. Mlynczak, M. G., B. T. Marshall, F. J. Martin-Torres, et al. Sounding of the Atmosphere using Broadband Emission Radiometry observations of daytime mesospheric O₂(1D) 1.27 mm emission and derivation of ozone, atomic oxygen, and solar and chemical energy deposition rates. *J. Geophys. Res.*, 2007, **112**, D15306, doi:10.1029/2006JD008355.
82. http://trmm.gsfc.nasa.gov/overview_dir/lis.html
83. <http://www.aqua.nasa.gov/reference/publications.php>
84. Divakarla, M. G., C. D. Barnet, M. D. Goldberg, et al. Validation of Atmospheric Infrared Sounder temperature and water vapor retrievals with matched radiosonde measurements and forecasts. *J. Geophys. Res.*, 2006, **111**, D09S15, doi:10.1029/2005JD006116.
85. http://airs.jpl.nasa.gov/data_products/data_products_toc/
86. <http://modis.gsfc.nasa.gov/about/specifications.php>
87. <http://science.larc.nasa.gov/ceres/>
88. <http://aura.gsfc.nasa.gov/>
89. <http://aura.gsfc.nasa.gov/instruments/tes.html>

90. Worden, J., et al. Tropospheric Emission Spectrometer observations of the tropospheric HDO/H₂O ratio: Estimation approach and characterization. *J. Geophys. Res.*, 2006, **111**, D16309, doi:10.1029/2005JD006606.
91. <http://www.eos.ucar.edu/hirdls/>
92. <http://mls.jpl.nasa.gov/index-eos-mls.php>
93. <http://uars.gsfc.nasa.gov/>
94. <http://mls.jpl.nasa.gov/data/gallery.php>
95. <http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/Aura/data-holdings/OMI>
96. Ионо́в Д.В., Тимофе́ев Ю.М. Региональный космический мониторинг содержания двуокиси азота в тропосфере. *Изв. РАН, ФАО*, 2009, **45**, 3, 1–11; www.temis.nl
97. <http://www-calipso.larc.nasa.gov/about/atrain.php>
98. McMillan, W. W., Barnet, C. et al. Air Quality Observations from the A-Train: A Synergistic View. American Geophysical Union, Spring Meeting 2008, abstract #U21A-04.
99. Tanelli S., Durden S.L. et al. CloudSat's cloud profiling radar after two years in orbit: Performance, Calibration, and Processing. *IEEE Trans. Geos. Rem. Sens.*, 2008, **46**, 11, 3560–3573.
100. Bernath et al. Atmospheric Chemistry Experiment (ACE): Mission overview. *Geophys. Res. Lett.*, 2005, **32**, L15S01, doi:10.1029/2005GL022386.
101. McElroy et al. The ACE-MAESTRO instrument on SCISAT: Description, performance, and preliminary results. *Appl. Optics*, 2007, **46**, 20, 4341–4356.
102. http://www.gosat.nies.go.jp/eng/proposal/download/GOSAT_RA_2nd_A_en.pdf
103. http://www.jaxa.jp/press/2009/05/20090528_ibuki_e.html#at2
104. Kursinski et al. Observing the Earth's atmosphere with radio occultation measurements using the Global Positioning System. *J. Geophys. Res.*, 1997, **102**, 23.429–23.465.
105. Гаврилов Н.М. Методические вопросы измерений динамических характеристик атмосферы. Изд. Физ. фак. СПбГУ, 2010 (в печати), 132 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Действующие и планируемые спутники для дистанционного зондирования атмосферы и поверхности

Таблица П1.1. Действующие геостационарные оперативные спутники Земли для изучения состояния атмосферы и поверхности

Сектор	Спутники	Агентство /Страна	Положение	Время запуска	Основные приборы для зондирования атмосферы и поверхности
Восточная часть Тихого океана (180°W-108°W)	GOES-11	USA/NOAA	135°W	05/2000	5-канальный видеорадиометр, 19-канальный зондировщик
	GOES-O	USA/NOAA	135°W или 75°W	28/06/2009	Аналогичные приборы
Западная часть Атлантики (108°W-36°W)	GOES-13	USA/NOAA	105°W	05/2006	Аналогичные приборы
	GOES-12	USA/NOAA	75°W	0720/2001	Аналогичные приборы
	GOES-10	USA/NOAA	60°W	04/1997	Аналогичные приборы
Восточная Атлантика (36°W-36°E)	Meteosat-9	EUMETSAT	0°	21/12/2005	12-канальный видеорадиометр SEVIRI
	Meteosat-8	EUMETSAT	9.5°E	28/08/2002	12-канальный видеорадиометр SEVIRI
	Kalpana-1	INDIA	74°E	12/09/2002	3-канальный видеоприбор
	FY-2D	CHINA/CMA	86.5°E	8/12/2006	5-канальный видеорадиометр
	INSAT-3A	INDIA	93.5°E	10/04/2003	3-канальный видеорадиометр
FY-2C	CHINA/CMA	105°E	19/10/2004	5-канальный видеорадиометр	
Западная часть Тихого океана (108°E-180°E)	FY-2E	CHINA/CMA	123°E	23/12/2008	5-канальный видеорадиометр
	Himawari-6	JAPAN	140°E	26/02/2005	5-канальный видеорадиометр

Таблица П.2. Примеры запланированных геостационарных спутников (данные на 2 сентября 2009 г.)

Сектор	Спутники	Агентство /Страна	Положение	Время запуска	Основные приборы для зондирования атмосферы и поверхности
Восточная часть Тихого океана (180°W-108°W) и Западная Атлантики (108°W-36°W)	GOES-R	USA/NOAA	135°W или 75°W	2015	16-канальный видеорадиометр
	Meteosat-10 (MSG-3)	EUMETSAT	0°	01/2012	12-канальный видеорадиометр
Индийский океан (36°E-108°E)	Electro-L N2	РОССИЯ	14.5°E	2010	MSU-GS, HMS, DCS, GeoSAR
	Electro-L N1	РОССИЯ	76°E	2009	MSU-GS, HMS, DCS, GeoSAR
	Electro-M N1	РОССИЯ	76°E	2015	
	INSAT-3D	INDIA	TBD	8/12/2009	6-канальный видеоприбор и 19-канальный зондировщик
	FY-2F	CHINA/CMA	86.5°E	2011	5-ти канальный VISSR, DCS, SEM
	<u>FY-2G</u>	CHINA/CMA	123°E	2013	5-ти канальный VISSR, DCS, SEM
Западная часть Тихого океана (108°E-180°E)	<u>FY-2G</u>	CHINA/CMA	123°E	2013	5-ти канальный усоверш. VISSR, DCS, SEM.
	COMS-1	KOREA/KMA	128.2°E	Конец 2009	5-канальный метвидеоприбор (MI), видеоприбор для океана (GOCI).
	Himawari-8 (MTSAT follow-on)	JAPAN	140°E	2014	

Таблица П1.3. Действующие оперативные полярные спутники Земли для изучения состояния атмосферы и поверхности (данные на 25 июня 2009)

Тип орбиты	Спутники	Страна / Ведомство	Время запуска	Приборы дистанционного зондирования
Утренняя солнечно- синхронная	FY-3A	Китай/СМА	27/05/2008	VISR, MERIS, MWRI, MWTs, MWHS, IRAS, TOU/SBUS, ERM/SIM.
	NOAA-17	США/NOAA	24/06/2002	AVHRR/3, HIR/3, AMSU- B, SBUV, SEM/2, AMSU- A1.
	Metop-A	EUMETSAT	19/10/2006	AVHRR/3, HIRS/4, AMSU-A, MHS, IASI, GRAS, ASCAT, GOME-2, SEM
	DMSP-F16	США/NOAA	18/10/2003	Спутник Министерства обороны. Данные SSMIS доступны через NOAA
Ранне- утренняя солнечно- синхронная	FY-1D (Op)	Китай/СМА	15/05/2002	VIRR, SEM.
	NOAA-16 (B)	США/NOAA	21/09/2000	Функционирует, нет АРТ. Периодические проблемы с прибором AVHRR.
	DMSP-F17 (Op)	США/NOAA	11/2006	Спутник Министерства обороны. Данные SSMIS доступны через NOAA.
Полуденная солнечно- синхронная	NOAA-15 (B)	США/NOAA	05/1998	Периодические проблемы с приборами AVHRR, AMSU-B, HIRS
	DMSP-F14 (B)	США/NOAA	10/04/1997	Спутник Министерства обороны. Не функционируют SSMT1 и SSMT2. Только один работающий бортовой магнитофон. Данные доступны через NOAA.
	NOAA-18 (B)	США/NOAA	20/05/2005	AVHRR/3, AMSU-A, MHS, SBUV, SEM/2
	NOAA-19 (Op)	США/NOAA	06/02/2009	AVHRR/3, AMSU-A, MHS, HIRS, SBUV, SEM/2

Таблица П1.4. Планируемые к запуску оперативные полярные спутники для наблюдений параметров атмосферы и поверхности (данные на 2 сентября 2009 г.)

Тип орбиты	Спутники	Страна / Ведомство	Время запуска	Приборы дистанционного зондирования
Утренняя солнечно- синхронная	FY-3C	Китай/СМА	2013	AHRPT/MPT, VIRR,
	FY-3E	Китай/СМА	2017	MERSI, MWRI, IRAS,
	FY-3G	Китай/СМА	2021	MWTS, MWHS, TOU/SBUS, SEM
	Metop-B (Metop-1)	EUMETSAT	04/2012	AVHRR, HIRS, MHS, AMSU-A, IASI, ASCAT, GRAS GOME.
	Metop-C (Metop-3)	EUMETSAT	Конец 2016	AVHRR, MHS, AMSU-A, IASI, ASCAT, GRAS GOME
	METEOR M-N1	Россия	2009	HRPT, LRPT
	METEOR M-N3	Россия	2012	HRPT, LRPT
	DMSP F-18	США/NOAA	08/2009	SSM/I/S
Ранне- утренняя солнечно- синхронная	DMSP-F19	США/NOAA	Конец 2012	
	DMSP-F20	США/NOAA	Конец 2014	
	NPOESS- C2	США/NOAA	2016/2017	VIIRS, MIS. Телевидение LRD (AHRPT), HRD.
	NPOESS- C4	США/NOAA	2021/2022	VIIRS, MIS. Телевидение LRD (AHRPT), HRD.
Полуденная солнечно- синхронная	METEOR M-N2	Россия	2010	HRPT, LRPT
	FY-3B	Китай/СМА	2010	AHRPT/MPT, VIRR,
	FY-3D	КИТАЙ/СМА	2015	MERSI, MWRI, IRAS,
	FY-3F	Китай/СМА	2019	MWTS, MWHS, TOUS/SBUS, SEM
	NPP	США/ NOAA/NASA	2011	VIIRS, CrIS, ATMS, OMPS, CERES
	NPOESS- C1	США/NOAA	2014	VIIRS, CrIS, ATMS, CERES, OMPS/Nadir, TSIS, SEM-N.
	NPOESS- C3	США/NOAA	2020	VIIRS, CrIS, ATMS, MIS, OMPS/Nadir

Отметим, что приведенные выше сроки запусков могут пересматриваться по разным причинам.

Таблица П1.5. Примеры действующих научно-исследовательских спутников (по данным на 2 июня 2009 г.)

Спутник	Агентство	Время запуска	Приборы	Примечания, исследуемые параметры
PARASOL	CNES	18/12/04	POLDER	Оптические и микрофизические характеристики облаков и аэрозолей
HY-1B	CNSA	04/2007	4-полосная CCD камера, сканер OCTS	Параметры океана
ERS-2	ESA	04/95	Высотомер SAR, SAR-wave, ATSR-2, скаттерометр GOME	Параметры океана и атмосферы
ENVISAT	ESA	03/2002	ASAR, RA-2, MIPAS, GOMOS, AATSR, MERIS MWR, SCIAMACHY	Задачи атмосферной химии. Радиолокационное зондирование
Resourcesat-1	ISRO	10/2003	AWIFS	4-х канальный сканер для исследования поверхности
<u>GOSAT</u> (IBUKI)	JAXA & Министер. окружающей среды Японии	23/01/2009	TANSO/FTS, TANSO/CAI	Содержание CO ₂ и парниковых газов
<u>Orbview-2</u> (ранее SeaStar)	NASA / Geoeye	01/08/97	SeaWiFs	8-канальный радиометр для исследования океанов, суши и аэрозолей
Jason-1	NASA/ CNES	07/12/01	LRA, Poseidon-2, DORIS, Jason микроволновый радиометр, BlackJack GPS приемник	Топография поверхности океанов, океанические течения
CALIPSO	NASA/ CNES	28/04/06	CALIOP, WFC, IIR	Лидарное зондирование облаков и аэрозолей
CloudSat	NASA/ CSA	28/04/06	CPR	Радиолокационные исследования облаков
GRACE	NASA/ DRL	17/03/02	Star Camera Assembly GPS BlackJack Receiver Instruments Processing Unit Laser Retro-Reflector Assembly K-Band Ranging Instruments SuperSTAR Accelerometers	Радио-рефракционное зондирование атмосферы и ионосферы
TRMM	JAXA/ NASA	28/11/97	PR, TMI (TRMM MW Imager) CERES, VIRS, LIS	Исследования осадков и радиации
Landsat 7	NASA	15/04/99	ETM+	Исследования океанов и суши
QuickSCAT	NASA	19/06/99	SeaWinds	Направление и скорость приводного ветра
Terra	NASA	18/12/99	CERES, MISR, MODIS, MOPITT, ASTER	Исследования атмосферы, суши и океанов
Aqua	NASA	04/05/02	AMSU-E, AIRS, HSB, AMSU-A, CERES, MODIS	Исследования атмосферы, суши и океанов, кругооборота воды

ICESat	NASA	12/01/03	GLAS, GPS BlackJack receiver	Исследования топографии ледяного покрова и его изменений, облаков и аэрозолей, топографии суши и характеристик растительности.
SORCE	NASA	25/01/03	XPS, TIM, SIM, SOLSTICE	Измерения интегральных и спектральных потоков солнечной радиации
Aura	NASA	15/07/04	HIRDLS, MLS, OMI, TES	Детальные исследования в области атмосферной химии и динамики атмосферы
Monitor-E	Роскосмос	27/08/05	LOS	Картирование поверхности ждя целей мониторинга загрязнений и стихийных бедствий.
Compass-2	Роскосмос	26/05/06	Радиоволновый анализатор	Мониторинг аномальных явлений в ионосфере
<u>Resurs-DK</u>	Роскосмос	15/06/06		Спутник обзора Земли-

Таблица Пб. Планируемые научно-исследовательские спутники (по данным на 2 сентября 2009 г.)

Спутник	Агентство	Время запуска	Примечания, измеряемые параметры
Resourcesat-2	ISRO	2008/2009	Мониторинг поверхности суши
Oceansat-2	ISRO	09/2009	Цветность океана, радиоаккультация, скаттерометр
SMOS	ESA	11/2009	Соленость океанов, влажность почв
CRYOSAT-2	ESA	11/2009	Мониторинг полярных льдов
HJ-1C	CNSA	2009/2010	Мониторинг параметров суши с помощью
Kanopus-V N1	Роскосмос	2009	Мониторинг естественных и антропогенных экстремальных событий.
Megha-Tropiques	ISRO + CNES	02/2010	Мониторинг конвективных систем, цикла воды и энергетического баланса в тропической атмосфере
Glory	NASA	04/2010	Исследования глобального распределения естественных и антропогенных аэрозолей
Aquarius (SAC-D)	NASA/ CONAE	05/2010	Глобальные исследования солености поверхности океанов.
<u>SARAL-Altika</u>	ISRO + CNES	2010	Альтиметрические исследования. ADCS – система сбора информации
CBERS-3	CNSA+ AEB	2010	Мониторинг параметров суши
<u>SWARM</u>	ESA	10/2010	Геомагнитные исследования
HY-2A	CNSA, NSOAS	2010	Мониторинг океанов (альтиметр, МКВ радиометр, скаттерометр)
ADM-Aeolus	ESA	2011	Доплеровский лидар (ALADIN) для исследований поля ветра по измерениям аэрозолей, облаков и молекулярного рассеяния
LDCM	NASA/US Geolog. Survey	01/2011	Расширение исследований поверхности типа Landsat (многоспектральные с разрешением 30 м)
Kanopus-V N2	Роскосмос	2011	Мониторинг естественных и антропогенных экстремальных событий
CBERS-4	CNSA+ AEB	2012	Мониторинг параметров суши
<u>GCOM-W1</u>	JAXA	2012	Исследования глобальных циклов воды и энергии
EarthCare	ESA-JAXA	09/2013	Исследования облачных, радиационных и аэрозольных процессов
<u>SMAP</u>	NASA	2010–2013	Пассивный и активный мониторинг влажности почв
<u>GPM</u> (Core Observatory)	NASA / JAXA	07/2013	Глобальный мониторинг осадков
<u>GPM</u> (Low-Inclination Observatory)	NASA	11/2014	Глобальный мониторинг осадков
<u>GCOM-C1</u>	JAXA	2014	Цикл углерода и радиационный баланс
CBERS-5	CNSA + AEB	2015	Мониторинг параметров суши

Приложение 2. Список сокращений

AATSR – Advanced Along Track Scanning Radiometer
ACE-FTS – Atmospheric Chemistry Experiment-Fourier Transform Spectrometer
ADEOS – ADvanced Earth Observing Satellite
AERONET – AErosol RObotic NETwork
AHRPT/MPT – Advanced High Resolution Picture Transmission/Medium-resolution Picture Transmission
AIRS – Atmospheric Infrared Sounder
ALADIN – Atmospheric Laser And Doppler Instrument
AMSR – Advanced Microwave Scanning Radiometer
AMSU – Advanced Microwave Sounding Unit
AMSR-E – Advanced Microwave Scanning Radiometer for EOS
ASAP – Automated Shipboard Aerological Programme
ASAR – Advanced Synthetic Aperture Radar
ASCAT – Advanced Scatterometer
ASTER – Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection radiometer
ATMOS – Atmospheric Trace MOlecule Spectroscopy
ATMS – Advanced Technology Microwave Sounder
ATSR – Along Track Scanning Radiometer
AVHRR – Advanced Very High Resolution Radiometer
AVNIR – Advanced Visible and Near-Infrared Radiometer
AWIFS – Advanced Wide Field Sensor
CALIOP – Cloud-Aerosol LIdar with Orthogonal Polarization
CALIPSO – Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations
CBERS – China-Brazil Earth Resource Satellite
CCD – Charge Coupled Device
CEOS – Committee on Earth Observation Satellites
CERES – Clouds and the Earth's Radiant Energy System
CGMS – Coordination Group for Meteorological Satellites
CMA – China Meteorological Administration
CNSA – China National Space Administration
CPR – Cloud Profiling Radar
CrIS – Crosstrack Infrared Sounder
CRISTA – Cryogenic Infrared Spectrometers and Telescopes for the Atmosphere
DCS – Data Collection System
DLR – Germany's national research centre for aeronautics and space
DMSP – Defense Meteorological Satellite Program

DORIS – Doppler Orbitography & Radiopositioning Integrated by Satellite
EARLINET – European Aerosol Research Lidar Network
ENVISAT – Environmental Satellite
ERM – Earth Radiation measurement
ERS – European Remote Sensing Satellite
ESA – European Space Agency
ETM – Enhanced Thematic Mapper
EUMETSAT – European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites
FCCC – Framework Convention on Climate Change
FY – Fengine-Chinese meteorological satellite
GAW – Global Atmospheric Watch
GCOS – Global Climate Observing System
GeoSAR – Geographic Synthetic Aperture Radar
GLAS – Geoscience Laser Altimeter System
GOCI – Geostationary Ocean Color Imager
GOES – NOAA's Geostationary Operational Environmental Satellites
GOME – Global Ozone Monitoring Experiment
GOMOS – Global Ozone monitoring by Occultation of Stars
GOOS – Global Oceanic Observing System
GOS – Global Observing System
GOSAT (IBUKI) – Greenhouse gases Observing SATellite
GPM – Global Precipitation Mission
GPS – Global Position System
GRACE – Gravity Recovery and Climate Experiment
GRAS – Global navigation satellite system Receiver for Atmospheric Sounding
GTOS – Global Terrestrial Observing System
GUVI – Global Ultraviolet Imager
HIR/3 – High-resolution Infrared Radiation sounder
HIRDLS – High-Resolution Dynamics Limb Sounder
HIRS – High Resolution Infrared Sounder
HMS – Hazard Mapping System
HRD – High Rate Data
HRPT – High Resolution Picture Transmission
HSB – Humidity Sounder for Brazil
IASI – Infrared Atmospheric Sounding Interferometer
ICESat – Ice, Cloud, and land Elevation Satellite
ICSU – International Council of Scientific Unions

IGBP – International Geosphere-Biosphere Programme

IIR – Imaging Infrared Radiometer

ILAS – Improved Limb Atmospheric Spectrometer

IMG – Interferometric Monitor for Greenhouse Gases

INSAT – Indian National Satellite

IOC – International Oceanographic Commission

IRAS – Infrared Atmospheric Sounder

ISRO – Indian Space Research Organisation

JAXA – Japan Aerospace Exploration Agency

LAI – Leaf Area Index

LDCM – Landsat Data Continuity Mission

LIMS – Limb Infrared Monitor of the Stratosphere

LIS – Lightning Imaging Sensor

LORE – Limb Ozone Retrieval Experiment

LRA – Laser Retroreflector Array

LRD – Low Rate data

LRPT – Low-Resolution Picture Transmission

LRPT – Low-Rate Picture Transmission

MAESTRO – Measurement of Aerosol Extinction in the Stratosphere and Troposphere Retrieved by Occultation

MAS – Millimeter-Wave Atmospheric Sounder

MERIS – MEdium Resolution Imaging Spectrometer Instrument

MERSI – Medium Resolution Spectral Imager

Meteosat – European Meteorological satellite series EUMETSAT

Metop – Meteorological operational satellite

MHS – Microwave Humidity Sounder

MIPAS – Michelson Interferometer for Passive Atmospheric Sounding

MISR – Multiangle Imaging SpectroRadiometer Instrument

MLS – Microwave Limb Sounder

MODIS – MODerate resolution Imaging Spectroradiometer

MOPITT – Measurement of Pollution in the Troposphere

MSG-3 – METEOSAT Third Generation (Satellite)

MSU-GS – Microwave Sounding Unit

MSX – Midcourse Space Experiment

MWHS – Microwave Humidity Sounder

MWR – Microwave Radiometer

MWRI – Microwave Radiation Imager

MWTS – Microwave Temperature Sounder

NASA – National Aeronautics and Space Administration's

NDACC – Network for the Detection of Atmospheric Composition Change

NDSC – Network for the Detection of Stratospheric Change

NDVI – Normalized Difference Vegetation Index

NOAA – National Oceanic and Atmospheric Administration

NPP – NPOESS Preparatory Project

NPOESS – National Polar-orbiting Operational Environmental Satellite System

NSCAT – NASA Scatterometer

NSOAS – National Satellite Ocean Application Service (China)

OCTS – Ocean Colour and Temperature Scanner

OLS – Operational Linescan System

OMI – Ozone Monitoring Instrument

OMPS – Ozone Mapping and Profiler Suite

OSIRIS – Optical Spectrograph and InfraRed Imaging System

PARASOL – Polarization and Anisotropy of Reflectances for Atmospheric Sciences

POAM – Polar Ozone and Aerosol Measurements

POLDER – Polarization and Directionality of Earth's Reflectances

Poseidon-2 – радиолокационный высотометр

PR – Precipitation Radar

R & D satellites – Research and Developed Satellites

RA-2 – Radar Altimeter 2

SABER – Sounding of the Atmosphere using Broadband Emission Radiometry

SAMS – Stratospheric Aerosol Measurement Sounder

SAR – Synthetic Aperture Radar

SBUS – Solar backscatter Ultraviolet Sounder

SBUV – Solar Backscattered Ultraviolet spectral radiometer

SCIAMACHY – Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Cartography

SCISAT – Canadian scientific satellite

SeaWiFs – Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor

SeaWinds – Sea-viewing Wide Field-of-View Sensor

SEE – Solar Extreme Ultraviolet Experiment

SEM – Space Environment Monitor

SEVIRI – Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager

SIM – Spectral Irradiance Monitor

SOLSE – Shuttle Ozone Limb Sounding Experiment

SOLSTICE – Solar Stellar Irradiance Comparison Experiment

SORCE – Solar Radiation and Climate Experiment

SPOT – Satellite Pour l'Observation de la Terre

SSM/I – Special Sensor Microwave / Imager

SSMIS – Special Sensor Microwave Imager/Sounder

SSMIS – Special Sensor Microwave Imager/Sounder

SSMT – Special Sensor Microwave / Temperature

TANSO/CAI – Thermal And Near infrared Sensor for carbon Observations/Cloud and Aerosol Imager

TANSO/FTS – Thermal And Near infrared Sensor for carbon Observations/Fourier Transform Spectrometer

TES – Tropospheric Emission Spectrometer

TIM – Total Irradiance Monitor

TIMED – Thermosphere Ionosphere Mesosphere Energetics and Dynamics

TIDI – TIMED Doppler Interferometer

TMI – TRMM MW Imager

TOMS – Total Ozone Mapping Spectrometer

TOU/SBUS – Total Ozone Unit and Solar Backscatter Ultraviolet Sounder

TRMM – Tropical Rainfall Measuring Mission

TSIS – Total Solar Irradiance Sensor

UNEP – United Nations Environment Programme

UNOOSA – United Nations Office for Outer Space Affairs

UTC – Universal Time, Coordinated

UVISI – Ultraviolet and Visible Imagers and Spectrographic Imagers

VIIRS – Visible Infrared Imaging spectroRadiometer Suite

VIRR – Visible and Infrared Radiometer

VIRS – Visible and Infrared Scanner

VISR – Visible and Infrared Scanning Radiometer

VISSR – Visible/Infrared Spin Scan Radiometer

WCRP – World Climate Research Programme

WDCGG – World Data Centre for Greenhouse Gases

WFC – Wide Field Camera

WMO – World Meteorological Organization

БИК – ближний инфракрасный

БИК – бортовой информационный комплекс

БРК ССПД – бортовой радиокомплекс системы сбора и передачи данных

БРЛК – бортовой радиолокационный комплекс

в.г. – верхняя граница
ВИД – видимый
ВМО – Всемирная метеорологическая организация
ГГАК-М – гелиогеофизический аппаратный комплекс
ГКНС – глобальная климатическая наблюдательная система
ГСНК – глобальная система наблюдений климата
ГСНО – глобальная система наблюдений океана
ГСНПС – глобальная система наблюдений за поверхностью суши
ГСО – геостационарная орбита
Д.Е. – Добсоновская единица
ИГСН – интегрированная глобальная система
ИК – инфракрасный
ИСЗ – искусственный спутник Земли
ИСП – измеритель солнечной постоянной
КА – космический аппарат
КМСС – комплекс многоканальной спутниковой съемки
МГС – малые газовые составляющие
МКВ – микроволновый
МКС – международная космическая станция
МНТ – мезосфера и нижняя термосфера
МСУ-В – многоканальное сканирующее устройство высокого разрешения
МСУ-М – многоканальное сканирующее устройство малого разрешения
МСУ-С – многоканальное сканирующее устройство среднего разрешения
МСУ-СК – Многоканальное сканирующее устройство среднего разрешения с конической разверткой
МТВЗА – модуль температурного и влажностного зондирования атмосферы
н.г. – нижняя граница
НИС – научно-исследовательский спутник
ОКП – околоземное космическое пространство
СМ – сантиметровой
СРРБ – сканирующий радиометр радиационного баланса
РЛС БО – радиолокационная станция бокового обзора
ТПО – температура поверхности океана
ТПС – температура поверхности суши
УФ – ультрафиолетовый
ФА – физика атмосферы