

ОПТИКА АТМОСФЕРЫ И КЛИМАТ

К.Я. Кондратьев

ВОЗМОЖНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ О ПАРАМЕТРАХ КЛИМАТА ПО ДАННЫМ АМЕРИКАНСКИХ СПУТНИКОВ ОПЕРАТИВНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Дан обзор информации о параметрах климата, которая уже используется или может быть получена в ближайшем будущем по данным наблюдений при помощи американских спутников оперативного назначения.

Уже на первоначальном этапе наблюдений при помощи метеорологических спутников (напомню, что первый метеорологический спутник Tiros-1 запущен 1 апреля 1960 г.) оказалось возможным располагать не только информацией качественного характера в форме изображений облачного покрова и подстилающей поверхности в видимой и ИК-областях спектра, но и количественными данными о ряде параметров (количество и высота верхней границы облаков, влагосодержание атмосферы, температура поверхности океана и др.) [1–9].

На пороге четвертого десятилетия спутниковых метеорологических наблюдений возникает интерес проанализировать возможности интерпретации данных имеющихся в настоящее время спутников оперативного назначения, что очень важно в связи с усиливающимся вниманием к проблеме изменением климата. В отчете [10], например, такого рода анализ сделан по отношению к аппаратуре, устанавливаемой на американских спутниках оперативного назначения: 1) усовершенствованный радиометр очень высокого разрешения (AVHRR), используемый на спутниках NOAA; 2) аппаратура оперативного дистанционного зондирования атмосферы (TOVS, спутники NOAA); 3) радиометр для измерений рассеянной назад УФ-радиации (SBUV, спутники NOAA); 4) радиометр для видимой и ИК-областей спектра (VISSR, геостационарные спутники GOES); 5) СВЧ-аппаратура SSM/I, SSM/T и SSMR, применяемая на метеорологических спутниках министерства обороны США (DMSP). Достаточно подробное описание перечисленной аппаратуры можно найти в [5–8]. В монографии [7] обсуждены информационные возможности советских метеорологических спутников. Следуя [10], охарактеризуем потенциал американских спутников оперативного назначения по основным разделам наблюдений.

1. Радиационный баланс Земли (РБЗ), облачность и аэрозоль

В получении информации о параметрах климата ключевую роль играет проведение однородных циклов наблюдений, продолжительность которых уже сейчас в некоторых случаях превосходит два десятилетия. Это означает необходимость (при архивации массивов данных) обеспечения надежности калибровок, учета изменения характеристик аппаратуры, параметров орбит и др. Известно, например, [5,6], что потребности проблемы изменения климата определяют необходимость располагать данными о среднеглобальных значениях компонентов РБЗ с погрешностью не более 1 Вт/м^2 , тогда как в случае региональных средних погрешность может возрастать до 5 Вт/м^2 , а погрешности выявления долговременных трендов не должны превосходить 1 Вт/м^2 . Отсюда вытекают очень строгие требования к устойчивости чувствительности аппаратуры и надежности калибровки.

Важной частью исследований, проводимых в настоящее время сотрудниками NOAA, является разработка алгоритма восстановления количества и радиационных свойств облаков по данным 5-канального сканирующего радиометра AVHRR, а также алгоритма восстановления температуры и давления на уровне верхней границы облаков и водосодержания облаков по данным TOVS. Начиная с 1989 г. осуществляется регулярное восстановление аэрозольной оптической толщины (АОТ) атмосферы над океаном по данным для одного коротковолнового канала AVHRR, а в дальнейшем планируется использовать результаты наблюдений на 2–3 длинах волн для определения не только АОТ, но и микроструктуры аэрозоля. Важные задачи состоят в дальнейшей разработке и усовершенствовании алгоритмов восстановления: 1) компонентов РБЗ, включая спектральное распределение уходящей длинноволновой радиации (УДР) и лучистого притока тепла по данным TOVS; 2) компонентов радиационного баланса подстилающей поверхности; 3) характеристик облачного покрова (количество, температура и давление на уровне верхней границы, водо- и ледосодержание); 4) общего содержания и микроструктуры аэрозоля (не только над океаном, но и над сушей). Особенно важное значение имеет удовлетворение требований Глобального эксперимента по круговороту энергии и воды (GEWEX) и Эксперимента по изучению тропического океана и атмосферы (TOGA) к данным наблюдений [6–7].

2. Стратосфера

В части, касающейся стратосферы, речь идет об определении общего содержания озона (ОСО), температуры воздуха и потока УФ солнечной радиации, а главные требования к надежности данных

наблюдений состоят в том, чтобы погрешности выявления трендов ОСО в масштабах десятилетия не превышали 1÷1,5%, вертикального профиля концентрации озона 3÷5%, а температуры стратосферы 1÷1,5%. Поскольку динамика слоя озона зависит от внеатмосферной изменчивости УФ солнечной радиации в интервале длин волн 170–240 нм (радиация на этих длинах волн ответственна за образование атомарного кислорода в верхней стратосфере), то особая задача состоит в слежении за вариациями УФ-радиации, которые могут достигать 20% в ходе 11-летнего солнечного цикла. Надежное выявление природно обусловленной изменчивости содержания озона в верхней стратосфере создает основу для достоверного распознавания антропогенных воздействий.

Одним из наиболее трудноопределяемых параметров стратосферы является ее температура, поскольку потолок радиозондов ограничен, как правило, высотами меньше 30 км, запуски ракетных зондов очень редки, а методики дистанционного (в частности, — лидарного) зондирования пока еще недостаточно разработаны. Между тем сведения о тренде температуры стратосферы очень важны: как показало численное моделирование изменений климата, обусловленных интенсификацией парникового эффекта атмосферы, наиболее чувствительной реакцией, которая должна проявиться в похолодании, обладает стратосфера [6]. При этом очень важное значение имеет учет интерактивности изменений содержания озона и температуры.

На спутнике NOAA-9 была впервые запущена в марте 1985 г. аппаратура SBUV/2 для получения данных об ОСО. Усовершенствованный блок этой аппаратуры был затем установлен на спутнике NOAA-11 в январе 1989 г. Хотя эти наблюдения были задуманы как оперативные (вслед за предшествующими наблюдениями при помощи использованной на спутнике Nimbus-7 аппаратуры SBUV), но, ввиду ряда трудностей интерпретации данных, они не могут рассматриваться как климатические. Новый этап озонметрических наблюдений связан с запуском спутника UARS и аппаратуры TOMS на спутнике «Метеор-3» в 1991 г.

Начиная с 1978 г. в комплекс научной аппаратуры спутников NOAA входит аппаратура дистанционного зондирования TOVS, попутным продуктом функционирования которой являются и данные об ОСО, получаемые с применением методики линейной регрессии по данным добсоновских наземных наблюдений, которая позднее была заменена физически обоснованной методикой восстановления.

Первые данные дистанционного термического зондирования атмосферы были получены в 1969 г. при помощи спектрометра SIRS, который был разработан для спутников серии Nimbus. С тех пор с этой целью использовалась различная аппаратура, но только в 1978 г. началось оперативное термическое зондирование атмосферы со спутников серии TIROS-N (NOAA). Применяемая в настоящее время аппаратура TOVS состоит из трех блоков: ИК-зондировщика высокого разрешения (HIRS-2), блоков СВЧ-зондирования (MSU) и стратосферного зондирования (SSU). Каждый из этих приборов осуществляет сканирование в плоскости, перпендикулярной орбите, при пространственном разрешении не менее 200 км. Это обеспечивает восстановление вертикального профиля температуры в толще атмосферы 1000–0,4 гПа (0–54 км) при вертикальном разрешении порядка 10 км. Разумеется, центральной является проблема погрешностей восстановления и надежного выявления трендов. Сравнения с данными ракетных зондирований показали, что средние расхождения температуры (по отношению к ракетным данным) на уровнях 5, 2, 1 и 0,4 гПа достигали соответственно 6, –3, –7 и 6°С при наличии значительной временной изменчивости расхождений (так, например, на уровне 2 гПа расхождения варьируют от 0 до 6°С).

Важным средством исключения дрейфа чувствительности спутниковой аппаратуры (как при наблюдениях озона, так и температуры) являются опорные наземные наблюдения. С этой целью в США разработан план мониторинга стратосферы в 1988–1997 гг., главная задача которого — обеспечение однородности ряда спутниковых наблюдений с использованием данных наземных наблюдений в различных точках земного шара (к 1993/94 гг. должны функционировать 5 станций, включая тропики, средние широты обоих полушарий, Арктику и Антарктику), полученных при помощи надежно калиброванной аппаратуры. Основным источником контрольной информации о температуре стратосферы должно стать лидарное зондирование, но предполагается одновременно осуществлять дистанционное зондирование в УФ-, видимом, ИК- и СВЧ-диапазонах.

Поскольку данные SBUV/TOMS позволяют восстанавливать содержание сернистого газа в стратосфере (во всяком случае, после вулканических извержений, когда содержание SO₂ значительно), поставлена задача разработки нового алгоритма восстановления, который позволит получать информацию не только об озоне, но и о сернистом газе.

3. Тропосфера

С точки зрения мониторинга динамики климата ключевое значение имеют спутниковые наблюдения характеристик общей циркуляции атмосферы, включая данные о водяном паре и облачном покрове. В этой связи предусмотрено получение данных трех уровней:

- 1) непосредственные данные наблюдений интенсивности уходящего излучения (как коротковолнового, так и длинноволнового) с обеспечением однородности рядов (прежде всего имеется в виду устранение расхождений, обусловленных спецификой различной аппаратуры);
- 2) восстановленные значения геофизических параметров;

3) данные четырехмерного усвоения. Наличие такого рода данных позволит (в случае необходимости, вызванной появлением более надежных алгоритмов восстановления) осуществлять повторную обработку результатов наблюдений.

Накапливаемые (подвергающиеся архивации) с 1969 г. данные дистанционного зондирования атмосферы включают результаты наблюдений при помощи следующей аппаратуры: SIRS-A (спутник Nimbus-3, спектральный интервал 11–15 мкм, пространственное разрешение в надире 250 км, период наблюдений 1969–1972 гг.); VTPR (NOAA-2 ... 5, 12–19 мкм, 7–14 км, 1972–1978 гг.); TOVS (TIROS-N, NOAA-6 ... 11, с октября 1978 г. по настоящее время); HIRS-2 (NOAA, 4–15 мкм, 145 км), MSU (NOAA, 50–60 ГГц, 109 км).

Полученный с помощью перечисленной аппаратуры массив данных включает следующую информацию (при номинальном горизонтальном разрешении, равном 60 км): вертикальные профили температуры и влажности, ОСО, давление на уровне верхней границы и эффективное количество облаков, температура поверхности океана и суши, УДР, обусловленное облачностью, длинноволновое радиационное вынуждающее воздействие, интенсивность осадков, СВЧ-излучательная способность снежного и ледяного покрова, поле ветра (по дрейфу облаков или неоднородностей распределения водяного пара).

Центральная задача интерпретации данных наблюдений параметров тропосферы — исследования взаимодействия облачности и радиации в контексте глобального энергетического баланса [6, 8], что требует, в частности, надежной информации о содержании водяного пара и характеристик облачного покрова. Имеющиеся массивы спутниковых данных включают информацию об общем влагосодержании атмосферы над океанами (SSM/I, SSMR), относительной влажности верхней тропосферы (6,7-мкм канал спутников GOES) и эквивалентные данные TOVS). Важное значение для интеркалибровок имеет использование данных для канала № 2 аппаратуры MSU. А так как в прошлом могли наблюдаться изменения чувствительности аппаратуры в зависимости от времени, то необходима повторная обработка соответствующих данных для обеспечения однородности рядов.

4. Характеристики поверхности суши

Характеристики растительного, снежного и ледяного покрова служат интеграторами воздействия погоды и климата на окружающую среду, а также могут использоваться как косвенные индикаторы термического и гидрологического режимов. Важное значение имеет проблема параметризации процессов на поверхности суши при численном моделировании климата. Так же, как и в случаях дистанционного зондирования, рассмотренных выше, ключевую роль играет наличие высококачественных данных спутниковых измерений интенсивности уходящего излучения на различных длинах волн. Важнейшими компонентами обсуждаемого массива данных являются сведения о вегетационном индексе, а также о протяженности, толщине и водном эквиваленте снежного покрова.

Информация о вегетационном индексе использовалась для решения широкого круга задач, связанных с изучением биогеохимических круговоротов и экосистем. В качестве примеров можно назвать: мониторинг пастбищ, полупустынь и тропических лесов, классификацию земель, оценки фотосинтетической активности и первичной продукции, а также эмиссии газов при сжигании биомассы и др. С целью накопления данных для определения параметров суши осуществляется архивация данных AVHRR двух категорий: 1) с пространственным разрешением $1,1 \times 1,1 \text{ км}^2$, обеспечивающим решение локальных задач (локальные массивы LAC); 2) с разрешением $4,4 \times 1,1 \text{ км}^2$ (глобальный массив GAC). Начиная с февраля 1982 г. данные GAC регулярно использовались для расчетов вегетационных индексов (как правило, нормированного вегетационного индекса NDVI) и последующего картирования.

Также по данным AVHRR регулярно осуществлялось построение еженедельных карт распределения снежного покрова. Хотя с 1978 г. имеется возможность глобального картирования снежного покрова по СВЧ-данным, однако в этой области до сих пор продолжают проводиться лишь методические разработки. То же самое относится и к использованию СВЧ-данных для восстановления толщины и водного эквивалента снежного покрова.

Большой интерес представляют разработки методик восстановления фотосинтетически активной радиации и компонентов радиационного баланса подстилающей поверхности [3].

5. Мировой океан

Информация о Мировом океане, представляющая интерес для исследований климата, может быть классифицирована на две категории: 1) мониторинг; 2) оценки различных вынуждающих воздействий и достоверность результатов численного моделирования климата (разумеется, обе эти категории тесно взаимосвязаны). В число параметров, относящихся к первой категории, входят: температура и высота уровня поверхности океана, протяженность ледяного покрова (ПЛО), альбедо, а вторую категорию составляют, в частности, ТПО и ПЛО, скорость и направление ветра у поверхности океана, компоненты теплового баланса поверхности, разность испарения и осадков.

В настоящее время NOAA осуществляет архивацию различных категорий информации по ТПО. По данным GAC AVHRR при разрешении 4 км составляются глобальные массивы для дневного и

ночного времени с осреднением по квадратам $8 \times 8 \text{ км}^2$. В дневное время источником информации для восстановления ТПО служат данные для каналов № 4 и 5 (длины волн 11 и 12 мкм), тогда как измерения для канала № 2 (0,9 мкм) используются с целью отфильтровывания облачности. При обработке ночных наблюдений обе эти задачи решаются по данным для каналов № 3 (3, 723 мкм), 4 и 5. Среднеквадратические погрешности восстановления ТПО, определенные путем сравнения с данными буйковых наблюдений, варьируют в пределах $0,3-0,7^\circ\text{C}$. Ежедневные результаты глобального объективного анализа выдаются в виде карты с сеткой 1° широты \times 1° долготы в диапазоне $70^\circ\text{с. ш.} - 70^\circ\text{ю. ш.}$, а дважды в неделю строятся региональные карты (главным образом для прибрежных вод США) с разрешением $0,5$ и $0,125^\circ$, а также пробные глобальные карты с разрешением $0,5^\circ$. Все имеющиеся данные по ТПО обобщаются в форме среднемесячных глобальных полей на сетке $2,5 \times 2,5^\circ$. Используются и другие формы представления данных: например, еженедельные поля ТПО на сетке $1 \times 1^\circ$, которые строятся с применением методики оптимальной интерполяции. Для снижения погрешности восстановления до $0,3-0,5^\circ$ необходимо повысить точность измерения и их верификацию по данным буев; усовершенствовать калибровку и географическую привязку; повысить надежность атмосферной коррекции с учетом аэрозоля; вводить поправки на разность температур поверхности и верхнего слоя океана; унифицировать методики обработки дневных и ночных данных; осуществлять раздельное построение среднемесячных полей ТПО по дневным и ночным данным.

Источниками информации о скорости ветра у поверхности океана служат данные пассивных СВЧ-наблюдений (SSM/I), а для восстановления сдвига ветра необходимы результаты активного радиолокационного зондирования. Использование данных активного СВЧ-зондирования при помощи скаттерометров и РЛС с синтезированной апертурой все еще находится на стадии испытаний (значительного прогресса следует ожидать в результате обработки данных спутников ERS-1 и Алмаз-1, запущенных в 1991 г.), тогда как на основе обработки данных SSM/1, океанографическим центром ВВС США уже предпринят первый опыт построения глобальных полей ветра. Не вышли за рамки экспериментов попытки восстановления высоты уровня океана по данным радиовысотометров.

Трудную задачу составляет восстановление компонентов теплового баланса поверхности океана [5, 6, 8]. Достигнуты заметные успехи в использовании данных AVHRR для восстановления суммарной радиации и альбедо, но сделаны лишь первые шаги в решении задач восстановления потоков скрытого и явного тепла.

6. Заключение

Ниже в таблице представлена общая характеристика возможностей определения параметров климата с использованием результатов наблюдений при помощи аппаратуры, устанавливаемой на американских спутниках оперативного назначения.

Параметры климата	Аппаратура							
	AVHRR	TOVS	SBUV	PRE-TOVS	COES	SSM/I	SSM/T	SSMR
Усовершенствованные имеющиеся параметры								
Вертикальный профиль температуры		+		+	+			+
Вертикальный профиль и общее содержание озона		+	+					
Поток солнечной радиации		+		+				
Уходящая длинноволновая радиация (УДР)	+	+						
Альбедо Земли	+							
Параметры облачного покрова	+	+			+	+		
Общее содержание аэрозоля	+	+				+		
Вегетационный индекс	+					+		
Протяженность снежного покрова	+							+
Температура поверхности океана	+							
Новые параметры								
База данных по интенсивности уходящего излучения	+	+		+	+			
Температура поверхности суши	+				+			
Глубина снежного покрова							+	+
Водный эквивалент снежного покрова							+	

Параметры климата	Аппаратура							
	AVHRR	TOVS	SBUV	PRE-TOVS	COES	SSM/I	SSM/T	SSMR
Лесные пожары	+							
Потоки уходящей радиации при ясном небе	+	+						
Водосодержание облаков	+						+	
Влагосодержание отдельных слоев атмосферы		+		+				
Климатология водяного пара					+	+		
Ветер по дрейфу водяного пара					+			
Ветер у поверхности океана						+		
Протяженность и сплоченность ледяного покрова						+		
Потоки тепла между атмосферой и океаном	+					+		
Параметры аэрозоля	+						+	
Гистограммы интенсивности уходящего излучения	+	+						
Многоспектральная УДР		+						
Лучистый приток тепла в атмосфере		+						
Противоизлучение атмосферы		+						
Альbedo подстилающей поверхности	+							
Индекс градиента радиации	+							

1. Кондратьев К. Я. Спутниковая климатология. Л.: Гидрометеониздат, 1983. 264 с.
2. Кондратьев К. Я. Вулканы и климат. Итоги науки и техники. Сер. метеорология и климатология. Т. 14. М.: ВИНТИ, 1985. 204 с.
3. Кондратьев К. Я. Радиационный баланс Земли. Л.: Гидрометеониздат, 1988. 350 с.
4. Кондратьев К. Я. Глобальная динамика озона. Итоги науки и техники. Сер. геомагнетизм и высокие слои атмосферы. Т. II. М.: ВИНТИ, 1989. 212 с.
5. Кондратьев К. Я. Ключевые проблемы глобальной экологии. Итоги науки и техники. Сер. теорет. и общие вопросы географии Т. 9. М.: ВИНТИ, 1990. 454 с.
6. Кондратьев К. Я. Глобальный климат. Л.: Наука, 1992. 361 с.
7. Кондратьев К. Я., Бузников А. А., Покровский О. М. Глобальная экология: дистанционное зондирование. Итоги науки и техники. Сер. метеорология и климатология. Т. 12. М.: ВИНТИ, 1992. 471 с.
8. Марчук Г. И., Кондратьев К. Я. Приоритеты глобальной экологии. М.: Наука, 1992. 317 с.
9. Марчук Г. И., Кондратьев К. Я., Козодеров В. В., Хворостьянов В. И. Облака и климат. Л.: Гидрометеониздат, 1986. 512 с.
10. Product Development Plans for Operational Satellite Products. NOAA Climate and Global Change Program. Special Reports № 5. UCAR, Boulder. 1991. 78 p.

Санкт-Петербургский НИИ,
 Центр экологической безопасности

Поступила в редакцию
 20 марта 1992 г.

K. Ya. Kondratyev. Possibilities to Get Information on Climate Parameters from the American Operational Satellites.

A review has been made on the information about climate parameters which have been already utilized or may be deduced in the near future on the basis of observational data from American operational satellites.