

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ, ГИДРОСФЕРЫ И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

УДК 528.81:551.510.534

В.Б. Кашкин*, А.А. Гомонов**, А.И. Сухинин*

О спутниковых измерениях общего содержания озона в ИК-диапазоне

* Красноярский государственный технический университет,

** Институт леса СО РАН, г. Красноярск

Поступила в редакцию 15.10.2001 г.

Рассмотрены достоинства и недостатки спутниковых измерений общего содержания озона на длине волны 9,59 мкм. Сравнивались наземные и спутниковые данные об ОСО за 1998 г. в регионе Сибири. Наземные и спутниковые данные об ОСО в УФ-диапазоне отличаются незначительно, в то время как данные ИК-диапазона, полученные с помощью спутника NOAA, заметно их превосходили, смещение составило 20 е.Д., коэффициент корреляции достиг 0,72. Возможной причиной расхождения УФ- и ИК-данных является влияние воды в атмосфере, край линии поглощения которой приходится на 9,59 мкм. Сделана попытка осуществить коррекцию данных ИК-диапазона с использованием информации о содержании влаги в столбе воздуха, полученной прибором HIRS спутника NOAA.

Изучение озонового слоя Земли относится к числу приоритетных направлений экологических исследований. Основные методы измерения содержания озона в столбе атмосферы – оптические, базирующиеся на оценке поглощения электромагнитного излучения атмосферой на определенных длинах волн в области электронных переходов молекулы озона. На поверхности Земли общее содержание озона в столбе атмосферы определяют, измеряя ослабление ультрафиолетового излучения Солнца в узких интервалах на двух длинах волн с различным показателем ослабления озона, например при $\lambda = 300$ и 348 нм. Спутниковые озонметры ультрафиолетового диапазона регистрируют солнечное излучение, рассеянное назад молекулами озона. В спектрофотометре TOMS (США) для этой цели используются две пары длин волн: 0,3125 и 0,3312 мкм, 0,3175 и 0,3398 мкм [1].

Оперативные данные об ОСО, полученные с помощью прибора TOMS, появляются в сети Internet [2] на следующий день после измерений, каждый файл содержит информацию об ОСО по всему земному шару с разрешением 100–120 км. Через месяц по адресу [3] приводятся откорректированные данные. Корректировка проводится по следующим пунктам:

- учет альbedo поверхности и атмосферы;
- учет поглощения атмосферным аэрозолем;
- калибровка длины волны;
- учет взаимного расположения спутника, Солнца и пункта на поверхности Земли.

На рис. 1 представлены сглаженные с помощью полиномиальной аппроксимации (использовался полином третьей степени) ежедневные оперативные данные TOMS по ОСО за 12 месяцев 1998 г. по Красноярску (1), сглаженные скорректированные (2) и на-

земные (3) данные, полученные с помощью озонметра М-124 в г. Красноярске. По оси абсцисс отложены значения ОСО в единицах Добсона (е. Д.).

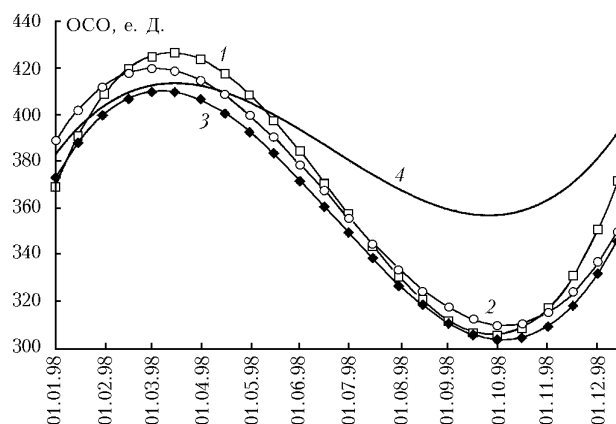


Рис. 1. Ежедневные сглаженные значения ОСО по Красноярску

Смещение ежедневных оперативных данных относительно наземных за 1998 г. составляет 9 е.Д., коэффициент корреляции равен 0,57, смещение ежедневных скорректированных данных относительно наземных равно 8 е. Д. при коэффициенте корреляции 0,92. Сходные результаты получены при сравнении наземных данных по Томску и спутниковых данных TOMS за 1998 г.: смещение оперативных данных относительно наземных равно 11 е. Д., коэффициент корреляции 0,53, смещение скорректированных данных относительно наземных данных равно –0,8 е. Д., коэффициент корреляции составляет 0,95. Наземные и спутниковые методы измерения в УФ-диапазоне считаются устоявшимися и достаточно точными. Однако из-

мерения ОСО возможны в инфракрасном, а также в радиодиапазоне [4].

На спутниках серии NOAA (США) установлен комплект приборов TIROS Operational Vertical Sounder (TOVS), предназначенный для вертикального зондирования атмосферы. Данные, получаемые с помощью прибора HIRS из комплекта TOVS в ИК-диапазоне, позволяют восстанавливать вертикальные профили температуры и влажности воздуха в тропосфере и нижней стратосфере, оценивать ОСО и некоторые другие параметры атмосферы.

В составе программного обеспечения Красноярской станции HRPT приема информации со спутников NOAA имеется пакет программного обеспечения TOVS, служащий для проведения радиометрической калибровки, географической привязки и вычисления путем решения обратной задачи вертикальных профилей атмосферы и ОСО. Выходные данные представлены в виде неравномерной сетки точек, общее число которых для одного прохода спутника составляет 400–600, пространственное разрешение равно 20–80 км.

Для определения ОСО пакет TOVS использует обращение уравнения переноса излучения, в которое подставлены восстановленные температурные профили атмосферы и данные о температуре подстилающей поверхности. По существу, с помощью формулы излучения Планака вычисляется ожидаемая интенсивность излучения поверхности и атмосферы в полосе поглощения озона $\lambda = 9,59$ мкм, разница между вычисленной и измеренной интенсивностью дает оценку ОСО. Длина волны $\lambda = 9,59$ мкм в 30 раз превосходит длины волн, применяемые в УФ-диапазоне. Поэтому в ИК-диапазоне существенно менее сказываются рассеяние электромагнитных волн молекулами воздуха и аэрозолями, а также другие помехи. Работа в ИК-диапазоне возможна в течение всех суток, измерения в УФ-диапазоне реализуемы только на освещенной стороне Земли. Прием информации об ОСО на региональных станциях HRPT со спутников NOAA возможен 6–8 раз в сутки (при наличии двух спутников), в Красноярске можно оценивать ОСО на территории от 80 до 120° в. д. и от 40 до 80° с. ш. При вторичной обработке применялась методика, описанная в [5].

В [5] отмечается, что сведения об ОСО, полученные в ИК-диапазоне, превышают результаты наземных измерений, такой же вывод сделан индийскими исследователями [6]. На рис. 1 (кривая 4) представлены сглаженные ежедневные данные TOVS по ОСО за 1998 г. по Красноярску. Смещение кривой 4 относительно кривой 3 в среднем за год составляет 20 е. Д., коэффициент корреляции ежедневных значений равен 0,72. Наблюдается заметное увеличение ОСО по сравнению с наземными данными, особенно в осенне-летний период. Кроме Красноярска изучалось поведение ОСО за 1998 г. над другими пунктами Сибири: Иркутском, Томском, Турой, Игаркой и Диксоном. По Томску данные об ОСО, полученные в ИК-диапазоне, сравнивались с наземными данными, смещение составило 20 е. Д., коэффициент корреля-

ции 0,72. По Иркутску, Туре, Игарке и Диксону ИК-данные сравнивались с скорректированными данными спектрофотометра TOMS. Во всех этих случаях данные ИК-диапазона превосходили данные УФ-диапазона, смещение и коэффициент корреляции имели тот же порядок, что по Красноярску и Томску.

В [5] было высказано предположение, что причиной расхождения УФ- и ИК-данных является влияние воды в атмосфере, край линии поглощения которой приходится на $\lambda = 9,59$ мкм. К счастью, прибор HIRS позволяет определять содержание влаги в столбе воздуха, причем в тех же точках, что и ОСО. Это, в принципе, дает возможность произвести коррекцию данных HIRS. Возможны два варианта – использование уравнения переноса с подстановкой в него данных о содержании влаги и корректировка на основе регрессионных соотношений. В данной работе приведен пример использования второго подхода.

Для нахождения поправочного коэффициента воспользуемся соотношением

$$y = ap + b,$$

где y – разность между данными HIRS и данными наземной озонметрической станции; p – содержание влаги в столбе воздуха (толщина осажденного слоя воды, мм). Коэффициенты a и b в уравнении были найдены по обучающей выборке по данным за июль 1998 г. в Красноярске (при практически безоблачной атмосфере): $a = -1,3687$ е. Д./мм, $b = 81$ е. Д.

На рис. 2 приведены ежедневные наземные данные об ОСО по Красноярску (кривая 1) за август 1998 г., исходные данные HIRS (кривая 2) и результаты коррекции данных HIRS (кривая 3). Данные

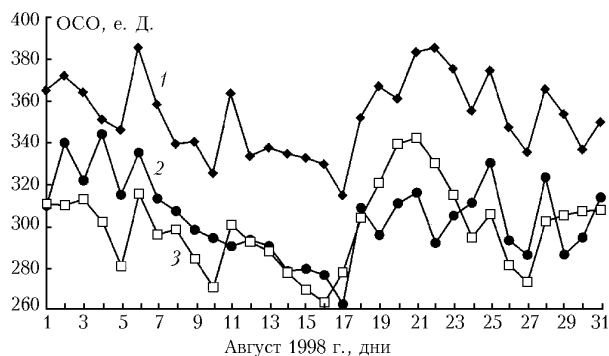


Рис. 2. Коррекция измерений ОСО в ИК-диапазоне

получены приблизительно в одно и то же время – вблизи местного полдня, в основном при безоблачной атмосфере. До коррекции смещение было равно 49 е. Д. (16,1%), коэффициент корреляции 0,64; после коррекции смещение составило –4 е. Д. (–1,3%), коэффициент корреляции 0,51. Смещение скорректированных данных HIRS относительно скорректированных данных TOMS, полученных в это же время, составило –11 е. Д., коэффициент корреляции равен 0,31. Отметим близость скорректированных данных TOMS и наземных: смещение 7 е. Д., коэффициент корреляции 0,91.

Таким образом, учет содержания влаги в атмосфере позволяет заметно уменьшить смещение значений ОСО, полученных в ИК-диапазоне с помощью прибора HIRS, относительно наземных данных, а также относительно спутниковых данных УФ-диапазона. Представляет интерес дальнейшее выяснение причин расхождения данных ИК- и УФ-диапазона, в частности невысокая корреляция ОСО. Анализ спутниковых изображений видимого диапазона показал, что 10 августа над Красноярском, в отличие от остальных дней месяца, наблюдалась плотная облачность, а 5 и 19–22 августа – слабая облачность. Возможно, что в эти дни содержание влаги прибором HIRS было определено со значительной погрешностью (анализ точности вертикального зондирования нижней атмосферы с использованием прибора HIRS рассматривается в [7]).

Авторы выражают благодарность А.С. Тисковой и С.В. Смирнову за предоставление наземных данных по ОСО.

V.B. Kashkin, A.A. Gomonov, A.I. Sukhinin. Investigation of total ozone using the infrared data.

Results of comparison of total ozone investigation using ultra-violet ground/satellite and infrared satellite data of 1998, Siberia, are presented. Ultra-violet ground/satellite data are practically identical but the infrared data have the +20 D.u. bias and the correlation coefficient of 0.72. Assuming that vapour is a possible reason of discrepancy we corrected the infrared satellite data using the NOAA HIRS information.

Работа выполнена при поддержке Красноярского краевого фонда науки.

1. Александров А.Л., Израэль Ю.А., Кароль И.Л., Хргиан А.Х. Озонный щит Земли и его изменения. СПб.: Гидрометеиздат, 1992. 287 с.
2. <http://jwocky.toms.gsfc.nasa.gov>.
3. <http://daac/gsfc.nasa.gov/data/dataset/TOMS>.
4. Кондратьев К.Я., Тимофеев Ю.М. Метеорологическое зондирование атмосферы из космоса. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 279 с.
5. Кашкин В.Б., Ромасько В.Ю., Сальникова О.Е., Сухинин А.И. Озоновый слой в Сибири по данным спутника NOAA летом 1995 г. // Исслед. Земли из космоса. 1997. № 3. С. 93–96.
6. Joshi P.C., Rames V.K. Infrared remote sensing of total ozone content around the Indian region // Int. J. Remote sens. 1996. V. 17. № 2. P. 392–397.
7. Ромасько В.Ю., Кашкин В.Б., Зализняк Е.Л., Сухинин А.И. Исследование точности вертикального зондирования нижней атмосферы с искусственных спутников Земли // Метеорол. и гидрол. 2001. № 4. С. 33–37.