

Анализ результатов наземных и спутниковых микроволновых измерений озона и температуры в атмосфере над Томском с использованием данных лидарного термического зондирования

Ю.Ю. Куликов¹, Д.А. Бочковский², В.Н. Маричев², В.Г. Рыскин¹

¹Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, E-mail: yuyukul@appl.sci-nnov.ru

²Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, E-mail: marichev@iao.ru

Представлены результаты совместных наземных измерений вертикальной структуры озона и температуры с использованием микроволновой и лидарной техники в декабре-январе 2012-2013 гг. и в декабре-феврале 2013-2014 гг. Во время зимних потеплений зарегистрированы заметные вариации концентрации озона и температуры в средней атмосфере. Выполнено сопоставление с данными спутникового инструмента MLS AURA.

Results of joint ground-based measurements of vertical structures of ozone and temperature with the use microwave and lidar technical equipment in December-January 2012-2013 and in December-February 2013-2014 are presented. During winter warming appreciable variations of ozone concentrations and temperature in the middle atmosphere are registered. Comparison to data of satellite instrument MLS AURA is executed.

В последнее время для изучения количественного состава средней атмосферы широко используют средства микроволнового дистанционного зондирования как орбитального, так и наземного базирования [1,2]. Для интерпретации результатов этих измерений необходимо привлекать данные о температурной зависимости от высоты, которые могут быть представлены как в виде зональных моделей [3], так и в виде измеренных данных [4]. Помимо прикладного аспекта знание о профиле температуры необходимо для изучения взаимосвязи полей озона и температуры в области средней атмосферы, учитывая зависимость теплового режима этой части атмосферы от поглощения озоном солнечного ультрафиолетового излучения.

Следует подчеркнуть, что наиболее сильное влияние изменений температурного профиля как непосредственно на содержание озона, так и на точность результатов микроволновых наблюдений будет проявляться во время так называемых внезапных стратосферных потеплений (ВСП), когда на высотах 20 – 60 км наблюдается рост температуры на десятки градусов. Поэтому важно во время этих событий при измерениях количественного состава атмосферы регистрировать ее температурный профиль. С другой стороны, результаты микроволновых измерений озона, проводимых непрерывно, могут служить хорошим индикатором начала зимних ВСП [2], которые, как правило, сопровождаются разрушением полярного стратосферного циклона. Известно, что в стратосфере высоких широт в течение зимы формируется обширный циркумполярный вихрь циклонического типа. Высокая волновая активность, характерная для атмосферы Северного полушария [5], часто в течение зимы приводит к его деформации и разрушению. Хотя зимняя атмосфера Западной Сибири отличается большей стабильностью в сравнении с Европейской частью, последствия разрушения полярного стратосферного циклона и возмущение температурного режима стратосферы проявляются и здесь. Поэтому, одновременные измерения изменений, происходящих в атмосфере с использованием микроволновой и лидарной техники, могут дать возможность на ранней стадии диагностировать процессы перестройки атмосферной циркуляции. В настоящей работе рассмотрены результаты совместных измерений озона и температуры средней атмосферы в Томске, которые были получены с помощью микроволнового озонметра и рэлеевского лидара в декабре-январе 2012-2013 гг. и в декабре-феврале 2013-2014 гг. По-

дробное описание аппаратуры и методик измерений, которые были использованы в совместных наблюдениях, изложены в работе [6].

Время наблюдений было выбрано в связи с тем, что по данным нескольких лет лидарного зондирования температуры над Томском (56° с.ш., 85° в.д.), стратосферные потепления, как правило, происходят с декабря по февраль. В обсуждении результатов были использованы данные лидарных измерений температурного профиля над Томском и бортовых наблюдений OMI/AURA (суммарный озон) и MLS/AURA (озон и температура) [7,8]. Наземные микроволновые измерения начинались, как правило, до захода Солнца и продолжались в течение несколько часов. В это же самое время измерялись температурные профили с помощью лидара.

Зимой 2012-2013 гг. наблюдалось мощное стратосферное потепление во всей средней атмосфере над Западной Сибирью. Максимум положительного отклонения температуры от ее среднемесячного значения достигал ~ 70 K на высоте 30 км [8,9]. Во время этих событий зарегистрированы значительные изменения концентрации озона от 1.5 до 2 раз на высотах от 25 до 60 км. При сравнении измерений температуры лидаром и MLS необходимо отметить, что наибольшее расхождение между ними было обнаружено в интервале высот 25-30 км. Это связано с тем, что в декабре 2012 г. в стратосфере над Томском регистрировалось повышенное содержание мешающей в измерениях аэрозольной компоненты вплоть до высот 30 км. Результаты измерений температуры лидаром и MLS на высотах от 30 до 40 км находились в хорошем согласии. Основные результаты, полученные в сезоне 2012 – 2013 годов изложены в [9].

В следующем зимнем сезоне были продолжены микроволновые наземные измерения вариаций озона и температуры в стратосфере над Томском. На рис.1. представлены результаты этих измерений на высотах 25, 40 и 60 км с конца ноября 2013 по февраль 2014 годов.

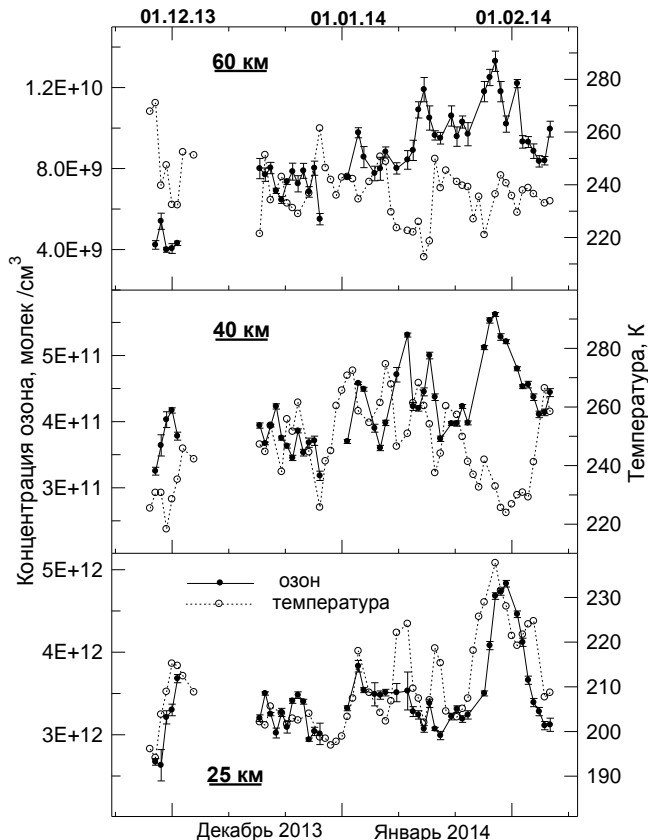


Рис.1.

К сожалению, постоянная облачность над Томском позволила провести лишь четыре отдельных ночных измерений с помощью лидара – 26 декабря 2013 г., 26 января, 2 и 4 февраля 2014 г. К тому же, во время проведения сеансов зондирования в отсутствии облачности атмосфера была замутненной, что значительно ослабляло лидарные сигналы и сокращало высотный интервал измерений температуры за счет возрастания коридора ошибки стандартного отклонения по высоте. Поэтому данные о температурном профиле были использованы из измерений с помощью орбитального инструмента MLS, установленного на платформе спутника AURA [8]. Прежде всего, следует отметить значительные колебания температуры и озона на всех высотных уровнях в течение зимы. Причем на высоте около 25 км эти колебания происходили в фазе. Коэффициент корреляции между изменениями содержания озона и температуры на этой высоте был положительным и достигал 0,73 при уровне значимости 5%. Причем наиболее очевидным подтверждением такой положительной связи явился период потепления, которое наблюдалось в нижней стратосфере в конце января – начале февраля 2014 года [10]. Это потепление минорного типа было связано лишь с деформацией полярного вихря, а не с его разрушением, которое обычно вызывает мажорное потепление в стратосфере. В средней и верхней части стратосферы (высоты 40 и 60 км) изменения озона и температуры в этот временной отрезок происходили в противофазе. Однако для всего периода наблюдений лишь на верхнем уровне был отмечен значимый отрицательный коэффициент корреляции -0,41. Этот факт согласуется с данными измерений и выводами, следующими из фотохимической теории озонового слоя, которые свидетельствуют об отрицательной обратной связи между изменениями озона и температуры в верхней стратосфере [11].

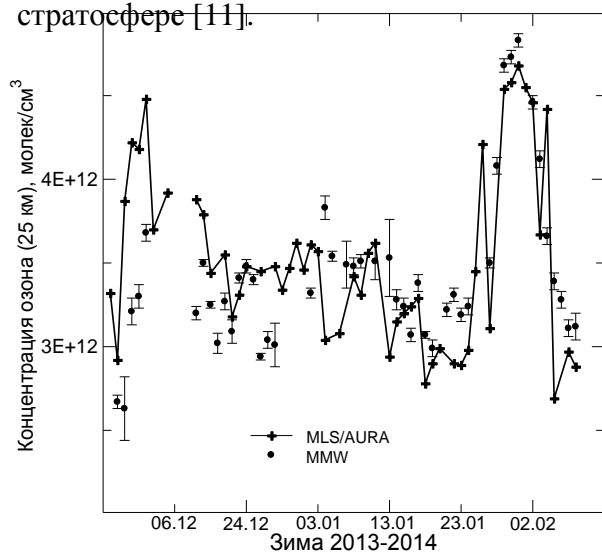


Рис. 2.

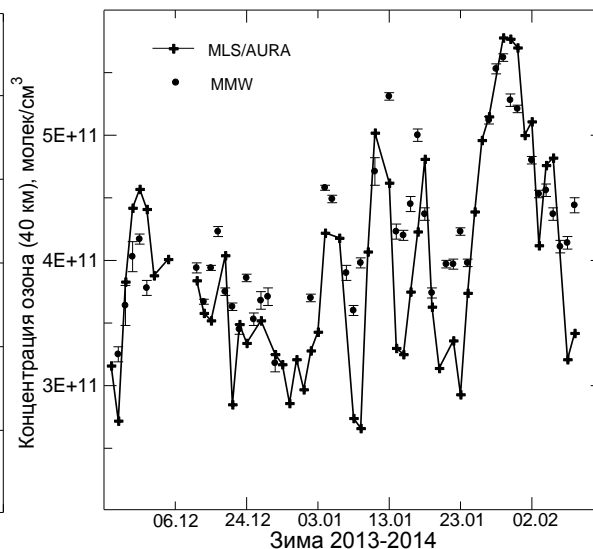


Рис. 3.

Результаты наземных микроволновых измерений стратосферного озона были сопоставлены с данными спутникового микроволнового прибора MLS AURA. Этот прибор использует лимбовый метод измерения параметров атмосферы. Поэтому для сравнения нами отобраны данные, соответствующие времени пролета спутника над Томском. С этой целью был выбран домен с координатами $(56 \pm 1,5)^\circ$ с.ш. и $(85 \pm 5)^\circ$ в.д.. На рис. 2 и 3 приведены результаты сопоставления для высотных уровней 25 и 40 км соответственно. Заполненными кружками отмечены данные наземного зондирования озонового слоя, а крестами – данные, полученные с земной орбиты. В целом очевидно удовлетворительное согласие полученных результатов. Количественные отличия, которые

наблюдались в отдельные дни, возможно, связаны с методикой лимбовых измерений, которая обеспечивает горизонтальное разрешение несколько сот километров, зависящее от высоты. В случае возникновения атмосферных неоднородностей спутниковые данные будут содержать дополнительную погрешность, вызванную усреднением вдоль луча зрения сигнала, пришедшего от двух различных по составу областей атмосферы. Качественный ход вариаций содержания озона в течение всего периода наблюдений совпадает при измерениях как с поверхности Земли, так и с ее орбиты. Особенно заметен рост озона в конце января 2014 года, зарегистрированный обоими средствами.

В заключение, нами выполнено сопоставление наземных и бортовых измерений общего содержания озона в зимний сезон 2013 – 2014 гг.

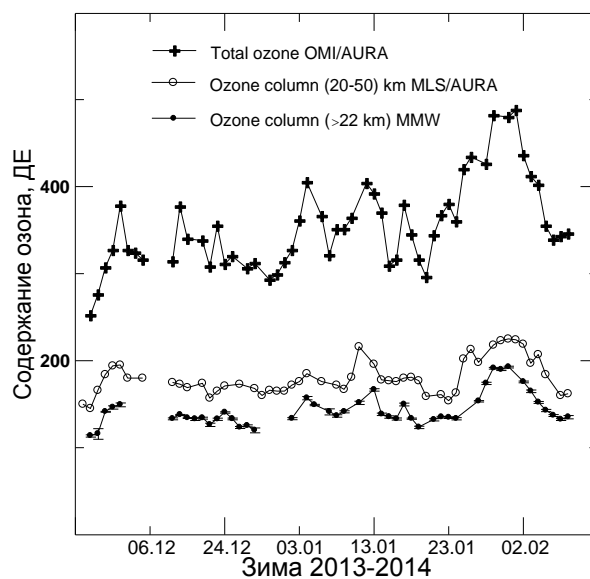


Рис. 4.

На рис. 4. приведены результаты измерений содержания озона в атмосферном столбе выше 22 км с помощью наземной микроволновой аппаратуры (прибор MMW), обозначенные заполненными кружками. Там же изображены данные, полученные с орбиты – количество озона в интервале высот от 20 до 50 км (прибор MLS/AURA, полые кружки) и общее содержание озона (прибор OMI/AURA, кресты). Количество озона в атмосфере приведено в единицах Добсона (ДЕ). Следует обратить внимание на хорошую корреляцию результатов, полученных с помощью микроволновой техники с поверхности Земли (прибор MMW) и со спутника (прибор MLS/ AURA). Верхняя кривая, демонстрирующая вариации озона во всей толще атмосферы в течение зимы 2013 – 2014 гг., в значительной степени отражает изменения озона, происходящие в районе максимума озонового слоя (высоты 18 – 20 км). Поэтому рост общего содержания озона выглядит более выраженным во время потепления в конце января 2014 года, которое было отмечено в основном в нижней части стратосферы [10].

Работа выполнена при финансовой поддержке программы фундаментальных исследований Отделения физических наук РАН «Физика атмосферы: электрические процессы, радиофизические методы исследования»; интеграционного проекта СО РАН № 106 и гранта РФФИ № 13-05-010369.

Литература

1. J.W. Waters et al. The earth observing system microwave limb sounder (EOS MLS) on the Aura satellite. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. V. 44. P. 1075–1092. 2006.

2. Ю.Ю. Куликов, А.А. Красильников, В.Г. Рыскин. Результаты микроволновых исследований структуры озонового слоя полярных широт во время зимних аномальных потеплений стратосферы. Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. Т. 38. № 2. С. 182 - 191. 2002.
3. J.J. Barnett, M. Corney. Middle atmosphere reference model derived from satellite data. Handbook for MAP. V. 16. P. 47 - 85. 1985.
4. В.Н. Маричев. Лидарные исследования проявления стратосферных потеплений над Томском в 2008-2010гг. Оптика атмосферы и океана. Т.24, № 05, С.386-391, 2011.
5. http://acd-ext.gsfc.nasa.gov/Data_services/met/ann_data.html
6. В.Н. Маричев, Г.Г. Матвиенко, А.А. Лисенко, В.Ю. Илюшик, Ю.Ю. Куликов, А.А.Красильников, В.Г. Рыскин. Первые результаты комплексного эксперимента по зондированию средней атмосферы в оптическом и миллиметровом диапазонах волн (над Томском). Оптика атмосферы и океана. Т. 25, № 12, С. 1091-1095, 2012.
7. http://gdata1.sci.gsfc.nasa.gov/daac-bin/G3/gui.cgi?instance_id=omi
8. <http://mirador.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/mirador/presentNavigation.pl?tree=project&project=MLS>
9. В.Н. Маричев, Г.Г. Матвиенко, А.А. Лисенко, Д.А. Бочковский, Ю.Ю. Куликов, А.А. Красильников, В.Г. Рыскин, В.М. Демкин. Микроволновые и оптические наблюдения озона и температуры средней атмосферы во время стратосферного потепления в Западной Сибири. Оптика атмосферы и океана. Т. 27, №1, С. 46-52, 2014.
10. <http://www.pole-ether.fr/>
11. Г. Брасье, С. Соломон. Аэрономия средней атмосферы. Гидрометеиздат. 1987.