

Микроволновые и оптические наблюдения озона и температуры средней атмосферы над Томском

Ю.Ю. Куликов, А.А. Красильников, В.Г. Рыскин,
В.Н. Маричев, Г.Г. Матвиенко, А.А. Лисенко, В.Ю. Илюшик

*Институт прикладной физики РАН, 603950 Нижний Новгород, Ульянова 46,
yuukul@appl.sci-nnov.ru*

*Институт оптики атмосферы СО РАН, 634055 Томск, пр. Академический 1,
marichev@iao.ru*

Приводятся результаты совместных наземных измерений вертикальных профилей озона и температуры с использованием микроволновой и лидарной техники. Обсуждается важность подобных наблюдений при изучении воздействия на озоновый слой различных возмущений. Дан сравнительный анализ полученных результатов с данными спутникового инструмента MLS/AURA и с модельными профилями.

Results of joint ground-based measurements of vertical structures of ozone and temperatures with use microwave and lidar technical equipment are brought. Importance of similar observations in studying influence on ozone layer of various disturbances is discussed. The comparative analysis of the received results with satellite tool MLS/AURA data and with model profiles is given.

Исследование реакции средней атмосферы (стратосфера и мезосфера) на любое внешнее возмущение (вариации солнечного потока, потоки энергичных частиц, извержения вулканов и антропогенные воздействия) является актуальной физической задачей. К важнейшим параметрам средней атмосферы относятся озон и температура, взаимосвязь которых с точки зрения теплового баланса этой области представляет значительный интерес по следующим причинам. Во-первых, основной нагрев стратосферы (интервал высот 20 – 50 км) обусловлен поглощением молекулами озона солнечной ультрафиолетовой радиации. Во-вторых, любое тепловое изменение в атмосфере оказывает влияние на скорости образования и разрушения озона. В-третьих, разного типа волны могут перераспределять структуру вертикальных профилей озона и температуры в средней атмосфере. К числу широко известных атмосферных возмущений относятся внезапные стратосферные потепления. Это явление, имеющее характер волнового возмущения, связано с разрушением высотного вихря, в результате которого происходит быстрое изменение барического поля в полярных регионах и интенсивный нагрев стратосферы на огромной территории, прилегающей к этим районам. Стратосферные потепления сопровождаются, как правило, значительным увеличением содержания озона в средней атмосфере. Однако до сих пор до конца не изучены причинно-следственные связи в изменении озона и температурного режима на высотах стратосферы и мезосферы. Микроволновая радиометрия и лидарная техника позволяют исследовать вариации озона и температуры во время крупномасштабных волновых возмущений в средней атмосфере, например, таких как стратосферные потепления [1-4]. Совместные эксперименты позволят существенно улучшить модель корреляционных связей между озоном и температурой как при фоновом (естественном) так и при возмущенном состоянии стратосферы и мезосферы Земли. Кроме того, одновременные измерения температуры и озона позволят оценить влияние температуры на погрешность оценки вертикального профиля озона по результатам микроволновых измерений. В настоящей работе нам удалось впервые свести вместе два самых, пожалуй, перспективных метода для исследования средней атмосферы – лидарную и микроволновую диагностику.

Лидарные измерения вертикального распределения температуры по молекулярному (или рэлеевскому) рассеянию света основаны на однозначной связи между коэффициентом обратного молекулярного рассеяния и плотностью атмосферы на определенной высоте. В состав лидарного комплекса входят - передатчик: Nd-YAG-лазер с коллиматором; длина волны излучения 532 нм; энергия в импульсе до 200 мДж; частота посылок импульсов 10 Гц; расходимость луча на выходе 20.6". Приемно-регистрирующая система: телескоп Ньютона с диаметром главного зеркала 1 м и фокусным расстоянием 2 м. Зондирование проводится в ночное время суток. Прием обратного рассеяния осуществляется в режиме счета фотонов. Фотоприемник соединен с компьютером, который осуществляет управление измерениями, а также сбор, накопление и обработку данных. Достижимое при этом вертикальное разрешение для температурного профиля 150 м, а необходимое для накопления профиля время до высоты 60 км около полутора часов. Такое время определяется относительной погрешностью в 10% на максимальной высоте. Относительная погрешность измерений зависит от числа принятых фотонов с заданной высоты, которое определяется длительностью строба, количеством лазерных выстрелов, плотностью аэрозоля и воздуха и фоновыми засветками. При этом на высотах 30-40 км относительная погрешность составляет величину 2%, т.е. не превышает ± 2.5 К на высоте 40 км.

Метод микроволновой наземной радиометрии основан на измерениях вращательных спектров излучения малых газовых составляющих (в нашем случае озон) в диапазонах миллиметровых и субмиллиметровых волн. Микроволновые наблюдения слабо зависят от погодных условий и присутствия в атмосфере аэрозолей, а это является преимуществом по сравнению с наблюдениями в оптическом и инфракрасном диапазонах длин волн. Кроме того, микроволновые наблюдения озона могут выполняться круглосуточно. В последние годы удалось сделать существенный шаг вперед по пути создания мобильных микроволновых спектрометров нового поколения [5,6]. Использование мобильных озонметров позволило выполнить в сложных экспедиционных условиях ряд задач, решение которых было бы затруднительным при использовании «стандартной» микроволновой техники. Информация о содержании O_3 содержится в измеряемом спектре интегрального радиоизлучения атмосферы в окрестности линии вращательного спектра этого газа. С помощью инверсии получаемых спектров можно получить данные о вертикальном распределении озона (ВРО) в атмосфере. В решении задачи оценки вертикального профиля озона использовались модельные зависимости давления и температуры от высоты [7]. Погрешность определения ВРО по его измеренным спектрам вышеописанным прибором не превышает 20%. Использование при оценке профиля озона реального температурного распределения позволит улучшить погрешность определения ВРО до 10% в интервале высот 20-40 км.

Совместные наблюдения температуры и озона средней атмосферы над Томском были выполнены 18-27 ноября 2011 г. Микроволновые наблюдения озона проводились непрерывно в указанный срок с временным разрешением 20 мин. На Рис. 1 приведен пример спектра излучения атмосферы в линии O_3 , измеренный на входе рупорной антенны. На Рис. 2 показан соответствующий спектр поглощения собственно озона, пересчитанный на основе результатов измерений, и используемый для оценки ВРО в интервале высот 20-60 км.

Лидарные измерения температуры были осуществлены 22, 24 и 26 ноября, которым соответствовали временные периоды с 22:19 до 23:59, с 19:15 до 20:54 и с 18:32 до 20:12 часов местного времени. На Рис. 3 приведены измеренные вертикальные профили температуры в интервале высот 20 – 60 км 22, 24 и 26 ноября 2011 г. Пунктиром на Рис. 3 показан профиль температуры по справочной модели [7].

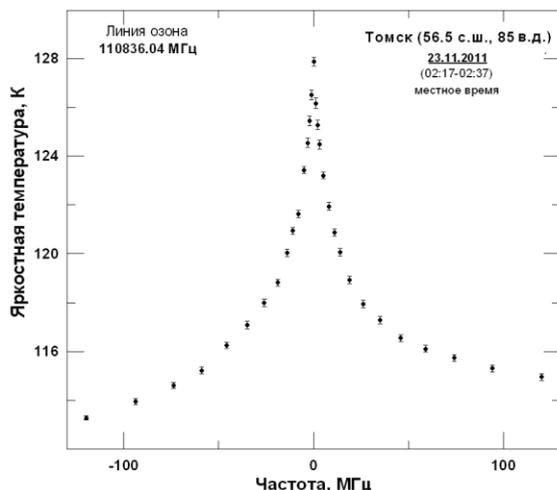


Рис. 1. Спектр линии озона, измеренный на антенне микроволнового спектрометра

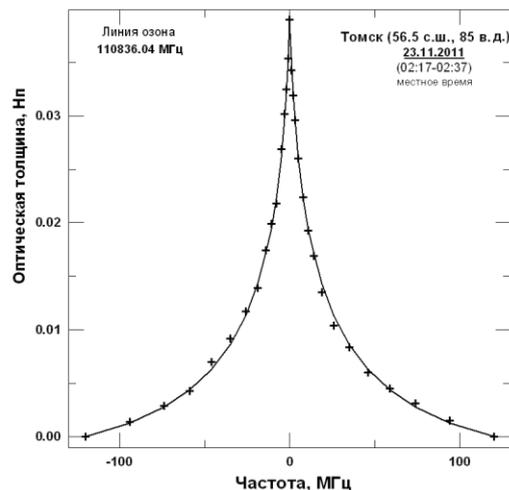


Рис.2. Преобразованный спектр линии озона для оценки его вертикального профиля. (+ – Эксперимент, сплошная линия – рассчитанный спектр по восстановленному вертикальному профилю O_3)

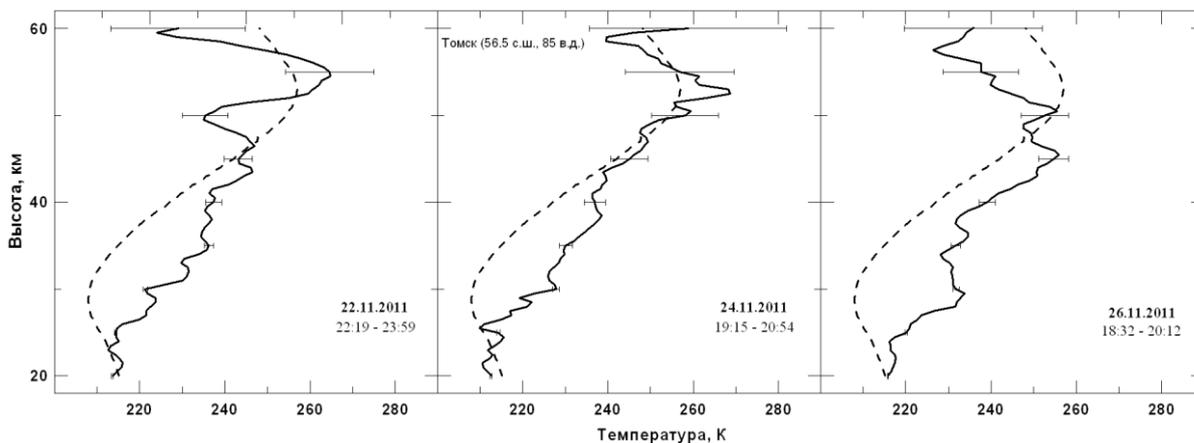


Рис. 3. Вертикальные профили температуры, измеренные на лидарной станции ИОА СО РАН (сплошная линия).

Рассмотрим полученные в совместной работе результаты. На Рис. 4 приведены временные изменения концентрации озона (каждое значение с усреднением два часа) на избранных высотах 25, 40 и 60 км. Разными значками отмечены результаты соответствующие различным дням непрерывных наблюдений с 18 по 27 ноября 2011 г.

Хорошо заметно, что на высотах 25 и 40 км поведение концентрации озона, по-видимому, зависит от динамических процессов в средней атмосфере. Амплитуда изменчивости концентрации озона на этих высотах составляет около 25% и, по крайней мере, не падает с высотой. Это свидетельствует, по-видимому, о значительной волновой активности в средней атмосфере на период времени наших наблюдений. А на высоте 60 км поведение концентрации O_3 в большей степени определяется фотохимическими процессами со средней амплитудой изменчивости 50%. Это так называемые суточные колебания озона, которые связаны с восходом и заходом Солнца. Кроме того, за небольшой временной интервал (10 дней) прослеживается квази 2-х дневная волна в суточных вариациях мезосферного озона (60 км) ночь-день [9].

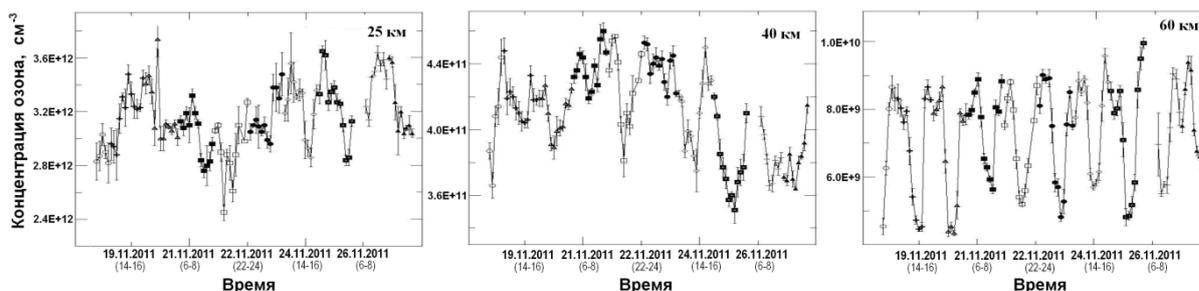


Рис. 4. Временные изменения озона над Томском на высотах 25, 40 и 60 км

В Таблице приведены количественные данные о содержании озона и температуре в атмосфере на избранных высотах. В столбцах 2 и 3 даны средние величины температуры (лидар) и количества озона (микроволны), которые были получены в моменты пролёта над Томском бортового прибора MLS/AURA. Следующие два столбца Таблицы содержат ту же информацию, полученную со спутникового прибора MLS. Эти результаты являются следствием усреднения за все пролёты аппарата над Томском внутри прямоугольника со сторонами $\pm 1.5^\circ$ по широте и $\pm 5^\circ$ по долготе с 17.11. по 30.11.2011 г. Следует отметить, что в усреднение попадали вместе дневные ($\sim 14:00$ местного времени) и ночные ($\sim 3:30$ местного времени) данные по озону и температуре. В последних двух столбцах приведены данные справочных моделей вертикальных профилей озона и температуры для ноября месяца и широты 56° с.ш. [7, 8]. Наибольшее расхождение между результатами бортовых и наземных измерений озона приходится на высоты 50-60 км. Так, по данным MLS суточные значения количества озона 60 км в среднем составили $(4.61 \pm 0.33) \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$ ночью и $(1.96 \pm 0.08) \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$ днем. Соответствующие величины, полученные наземным микроволновым озонметром, были $(8.29 \pm 0.26) \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$ – ночью и $(5.25 \pm 0.17) \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$ днем. На высотах 25-40 км данные бортовых и наземных микроволновых наблюдений находятся в удовлетворительном согласии. Усредненный за три дня температурный высотный профиль, измеренный лидаром (2 столбец Таблицы), также удовлетворительно согласуется с моделью и бортовыми измерениями MLS/AURA, исключая высоты 30 и 35 км.

Таблица 1 - Сравнение данных лидара и микроволнового спектрометра по температуре и озону средней атмосферы с данными измерений MLS/AURA и модельными профилями

Высот а, км	Лидар Т, К	MMB N, см^{-3}	MLS/AU RA T, К	MLS/AURA N, см^{-3}	Т, К Модель [7]	N, см^{-3} Модель [8]
25	215.9 \pm 2.0	$(3.33 \pm 0.07) \cdot 10^{12}$	208.5 \pm 0.5	$(3.49 \pm 0.05) \cdot 10^{12}$	212.5	$3.5 \cdot 10^{12}$
30	227.1 \pm 2.3	$(2.20 \pm 0.03) \cdot 10^{12}$	215.0 \pm 1.0	$(1.60 \pm 0.03) \cdot 10^{12}$	212.5	$2.0 \cdot 10^{12}$
35	232.9 \pm 1.4	$(1.05 \pm 0.01) \cdot 10^{12}$			221.6	$1.0 \cdot 10^{12}$
40	238.0 \pm 0.6	$(4.06 \pm 0.05) \cdot 10^{11}$	232.7 \pm 1.6	$(4.19 \pm 0.22) \cdot 10^{11}$	236.9	$4.7 \cdot 10^{11}$
45	247.8 \pm 2.9	$(1.49 \pm 0.03) \cdot 10^{11}$			251.1	$1.6 \cdot 10^{11}$
50	249.5 \pm 5.7	$(5.35 \pm 0.15) \cdot 10^{10}$	254.5 \pm 2.0	$(3.22 \pm 0.13) \cdot 10^{10}$	256.7	$4.3 \cdot 10^{10}$
55	252.5 \pm 6.5	$(1.86 \pm 0.08) \cdot 10^{10}$			250.1	$1.3 \cdot 10^{10}$
60	242.2 \pm 7.7	$(6.85 \pm 0.35) \cdot 10^9$	241.3 \pm 1.9	$(3.51 \pm 0.49) \cdot 10^9$	241.4	$3.7 \cdot 10^9$

Использование температурных профилей измеренных лидаром для оценки вертикального распределения озона привело к поправкам (усреднение по трем измерениям) в сторону увеличения концентрации озона на высоте 25 км на 10%, 30 км

– 7%, 35 км – 3% и 40 км – 2%. Спектры озона получены в то же самое время, когда измерялись температурные профили. На высотах 20 – 40 км измерено отклонение температуры от модели это указывает на то, что стратосфера на этих высотах была теплее, чем модель, которую мы использовали для оценок вертикального распределения озона.

В результате одновременных наземных наблюдений озона и температуры на высотах более 20 км получены результаты, которые позволяют надеяться на развитие дальнейших исследований динамических процессов различной природы в средней атмосфере. Наземные наблюдения могут быть полезными для бортовых исследований [10], которые в настоящее время активно изучают воздействие планетарных волн на структуру полей озона и температуры. Контроль этих параметров с поверхности Земли позволит не только регистрировать их реакцию на волновые возмущения (стратосферные потепления, 2 и 5-суточные планетарные волны), но и локализовать их в пространстве и во времени.

Авторы благодарят Российский фонд фундаментальных исследований за поддержку настоящей работы – гранты 08-05-99047, 10-05-00907.

Литература

1. Г.Г. Матвиенко, В.А. Банах, С.М. Бобровников, В.Д. Бурлаков, В.В. Веретенников, Б.В. Кауль, Г.М. Креков, В.Н. Маричев. Развитие технологий лазерного зондирования атмосферы. // Оптика атмосферы и океана. Т. 22, № 10, С. 915-930, 2009.
2. В.Н. Маричев. Лидарные исследования проявления стратосферных потеплений над Томском в 2008-2010 гг. // Оптика атмосферы и океана. Т. 24, № 05, С. 386-391, 2011.
3. Ю.Ю. Куликов, А.А. Красильников, В.Г. Рыскин. Результаты микроволновых исследований структуры озонового слоя полярных широт во время зимних аномальных потеплений стратосферы. // Известия АН. Физика атмосферы и океана. Т. 38, № 2, С. 182 – 191. 2002.
4. Ю.Ю. Куликов, А.А. Красильников, В.Г. Рыскин. Особенности поведения озона верхней атмосферы зимой 1999/2000 гг. по результатам одновременных микроволновых наблюдений в Нижнем Новгороде (56 с.ш., 44 в.д.) и Апатитах (67 с.ш., 35 в.д.), Геомагнетизм и аэрономия, Т. 42, № 2, С. 265-273, 2002.
5. А.А. Красильников, Куликов Ю.Ю., Рыскин В.Г., Щитов А.М. Микроволновые приемники для диагностики малых газовых составляющих земной атмосферы. Известия РАН. Сер. физическая. Т. 67. № 12. С. 1788 – 1792, 2003.
6. А.А. Красильников, Ю.Ю. Куликов, В.Г. Рыскин, В.М. Демкин, Л.М. Кукин, В.Л. Михайловский, В.Н. Шанин, М.З. Шейнер, В.А. Шумилов, А.М. Щитов. Новый малогабаритный микроволновый спектрометрический прибор – озонметр. Приборы и техника эксперимента. № 1, С. 127-133, 2011.
7. J.J. Barnett, M. Corney. Middle atmosphere reference model derived from satellite data. Handbook for MAP. V. 16, P. 47, 1985.
8. G.M. Keating, M.C. Pitts, D.F. Young. Ozone reference model for the middle atmosphere (New CIRE). Handbook for MAP. V. 31, P. 1, 1989.
9. S. M. I. Azeem, S. E. Palo, D. L. Wu, L. Froidevaux. Observations of the 2-day wave in UARS MLS temperature and ozone measurements. Geophys. Res. Lett., V. 28, No. 16, P. 3147-3150, 2001.
10. A. Belova, S. Kirkwood, D. Murtagh. Planetary waves in ozone and temperature in the Northern Hemisphere winters of 2002/2003 and early 2005. Ann. Geophys., V. 27, P. 1189-1206, 2009.