

Первые результаты комплексного эксперимента по зондированию средней атмосферы в оптическом и миллиметровом диапазонах волн (над г. Томском)

В.Н. Маричев^{1,2}, Г.Г. Матвиенко¹, А.А. Лисенко¹, В.Ю. Илюшник¹,
Ю.Ю. Куликов³, А.А. Красильников³, В.Г. Рыскин³, В.В. Бычков^{4*}

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

²Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

³Институт прикладной физики РАН

603600, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46

⁴Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН
Камчатский край, Елизовский р-н, пос. Паратунка, ул. Мирная, 7

Поступила в редакцию 17.03.2012 г.

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.

Ключевые слова: стратосфера, мезосфера, лидар, микроволновый спектрометр, озон, температура; stratosphere, mesosphere, lidar, microwave spectrometer, ozone, temperature.

Введение

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 физическим характеристикам средней атмосферы относятся концентрация озона 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 происходят 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. С использованием микроволновой радиометрии и лидарной техники можно исследовать вариации озона и температуры во время крупномасштабных волновых возмущений в средней атмосфере, например, таких, как стратосферные потепления [1–7]. Эксперименты, проводимые в оптическом и миллиметровом диапазонах волн, позволят существенно улучшить модель корреляционных связей между концентрацией озона и температурой как при фоновом (естественном), так и при возмущенном состоянии стратосферы и мезосферы Земли. Кроме того, одновременные измерения температуры и концентрации озона дают возможность оценить влияние температуры на погрешность оценки

* Валерий Николаевич Маричев (marichev@iao.ru); Геннадий Григорьевич Матвиенко (magg@iao.ru); Андрей Александрович Лисенко (lisenko@iao.ru); Вячеслав Юрьевич Илюшник; Юрий Юрьевич Куликов; Александр Аркадьевич Красильников; Виталий Геннадьевич Рыскин; Василий Валентинович Бычков (vasily@ikir.kamchatka.ru, vasily@ikir.ru).

вертикального профиля озона по результатам микроволновых измерений. В настоящей работе нам удалось впервые свести вместе два, пожалуй, самых перспективных метода для исследования средней атмосферы — лидарную и микроволновую диагностику.

Эксперимент и методы измерений

Лидарные наземные исследования термического состояния стратосферы и мезосферы над Томском были начаты в Институте оптики атмосферы СО РАН в 1994 г. и с 1996 г. проводятся на регулярной основе [4]. 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 0,1 мрад; 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 192 м, а необходимое время накопления для получения информации о температуре с высоты 60 км — около 2 ч. Такое время определяется относительной погрешностью 10% на максимальной высоте. Относительная погрешность измерений зависит от числа принятых фотонов с заданной высоты, которое определяется длительностью строка, количеством лазерных выстрелов, плотностью аэрозоля и воздуха и фоновыми засветками. При этом на высотах 30–40 км относительная погрешность составляет 2%, т.е. не превышает $\pm 2,5$ 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. Этот метод позволяет проводить наблюдения в сложных погодных условиях, включая присутствие в атмосфере аэрозолей, что является преимуществом по сравнению с наблюдениями в ультрафиолетовом, видимом 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 [8, 9]. Использование мобильных озонометров позволило выполнить в сложных экспедиционных условиях ряд задач, решение которых было бы затруднительным при использовании «стандартной» микроволновой техники.

Прибор состоит из гетеродинного неохлаждаемого приемника, настроенного на фиксированную частоту 110836,04 МГц, соответствующую вращательному переходу молекулы озона $6_{0,6} - 6_{1,5}$, и многоканального анализатора спектра. На входе приемника находится модуль, включающий в себя антенну (скалярный рупор) и коммутатор для калибровки уровня принимаемого из атмосферы излучения. Ширина диаграммы направленности рупорной антенны по уровню -3 дБ составляет $5,4^\circ$. Шумовая температура приемника 2500 К, режим приема в одной полосе обеспечивается заградительным фильтром с прямыми потерями 0,5 дБ и подавлением зеркального канала более 20 дБ. Анализатор спектра состоит из 31 фильтра с полосой пропускания от 1 до 10 МГц и полной полосой анализа 240 МГц. Параметры прибора позволяют измерять за 15 мин спектр линии излучения озона с точностью $\sim 2\%$. Измерения спектров теплового излучения атмосферы выполняются методом калибровки по двум «чернотельным» эталонам, которые находятся при температуре кипения жидкого азота и при температуре окружающего воздуха.

Информация о концентрации O_3 содержится в измеряемом спектре интегрального радиоизлучения средней атмосферы. С помощью инверсии измеренных спектров можно получить данные о вертикальном распределении озона (ВРО) в атмосфере. Для этой цели использовался метод подбора параметров заданной модели вертикального распределения озона, который заключался в минимизации среднеквадратичных разностей измеренных спектров и рассчитанных по восстановленным профилям озона. В решении задачи оценки вертикального профиля озона использовались модельные зависимости давления и температуры от высоты [10]. Критерием правильности решения обратной задачи являлось наилучшее соответствие спектральной линии озона, рассчитанной по восстановленному профилю концентрации O_3 с исходным экспериментальным спектром. Точностные характеристики оценки профиля озона зависят от ошибок радиометрических измерений спектров линии O_3 . 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.

Параллельные наблюдения температуры (лидар) и озона (радиометр) 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 окрестности вращательного резонанса линии озона (110836,04 МГц), измеренный на входе рупорной антенны. Это зависимость яркостной температуры излучения атмосферы от частоты с учетом водяного пара, кислорода и озона.

На рис. 2 показан преобразованный спектр (убраны водяной пар и кислород) в виде частотной зависимости оптической толщи, которая связана только с озоном.

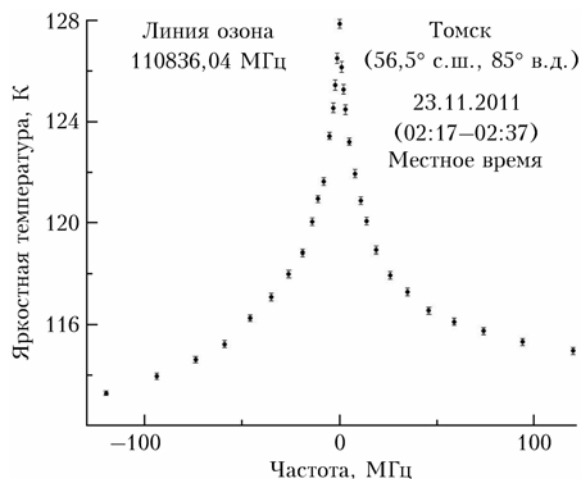


Рис. 1. Спектр излучения всей атмосферы на резонансной линии озона, измеренный на антенне микроволнового спектрометра

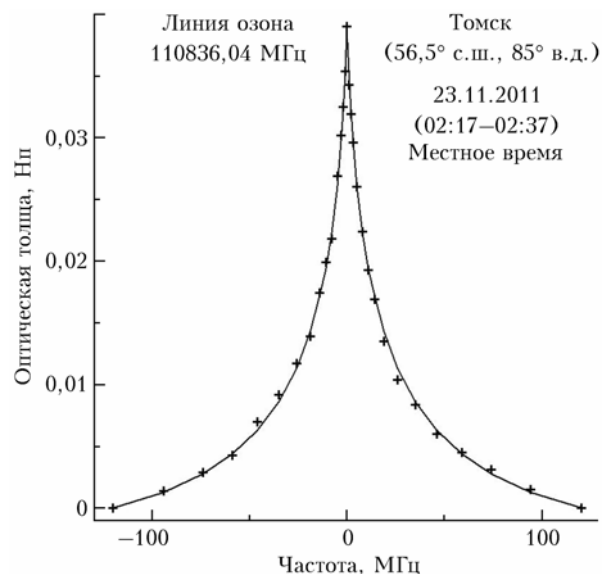


Рис. 2. Преобразованный спектр линии озона для оценки его вертикального профиля (крестики – эксперимент, сплошная линия – рассчитанный спектр по восстановленному вертикальному профилю O_3)

Оптическая толщина приведена в безразмерных единицах непер (Нп), которая широко употребляется в микроволновых измерениях прозрачности земной атмосферы. Преобразованный спектр используется для оценки ВРО в интервале высот 20–60 км.

Лидарные профили температуры показаны на рис. 3, где также приведены даты наблюдений и временные интервалы измерений. Штриховой линией показан профиль температуры по справочной модели [10].

Обсуждение экспериментальных результатов

Рассмотрим полученные в совместной работе результаты. На рис. 4 приведены временные изменения концентрации озона (каждое значение с усреднением 2 ч) на избранных высотах 25, 40 и 60 км.

Значками отмечены результаты, соответствующие различным дням непрерывных наблюдений с 18

по 27 ноября 2011 г. Каждый значок соответствует определенному числу от 18 до 27 ноября. Каждая точка – это концентрация озона на соответствующей высоте, определенная за 2 ч. Соответственно сутки разбиты на 2-часовые интервалы, на них приходится 12 точек. Время, указанное в скобках, жестко привязано к разбивке оси. Хорошо заметно, что на высотах 25 и 40 км поведение концентрации озона, по-видимому, зависит от динамических процессов в средней атмосфере. Относительная амплитуда изменчивости концентрации озона на этих высотах составляет около 25% и, по крайней мере, не падает с высотой. Это свидетельствует 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

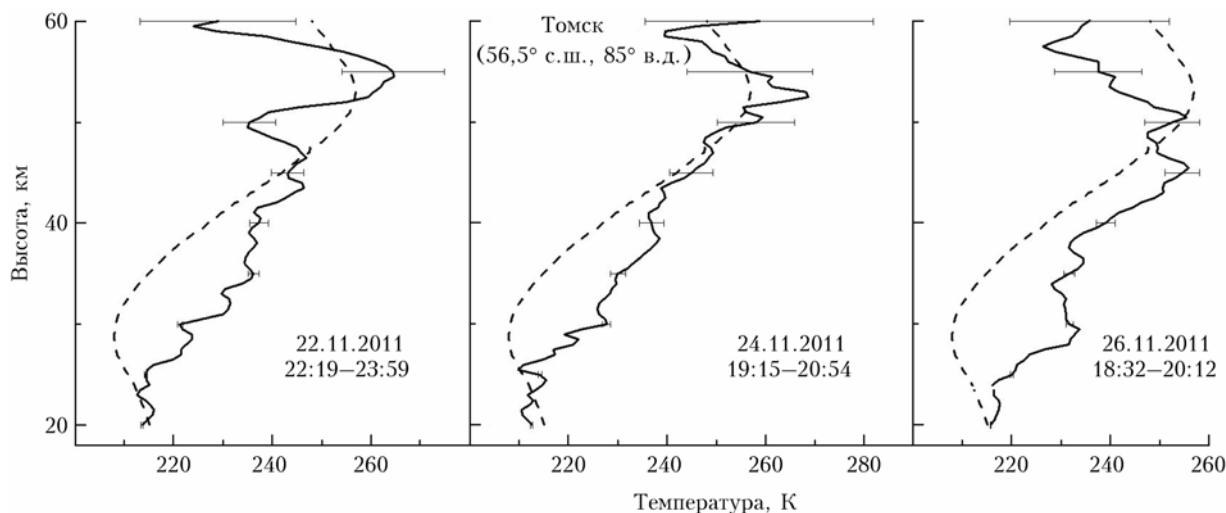


Рис. 3. Вертикальные профили температуры, измеренные на лидарной станции ИОА СО РАН (сплошные линии) и взятые из модели CIRA-86 (штриховые)

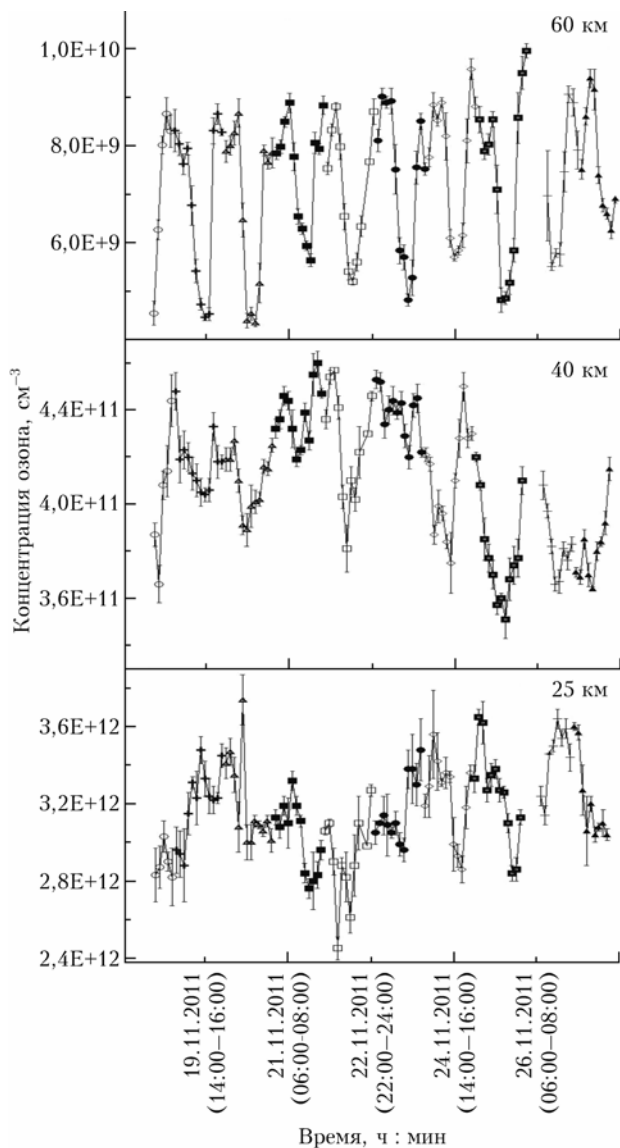


Рис. 4. Временные изменения озона (усреднение 2 ч) над Томском на высотах 25, 40 и 60 км

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-

двухдневная волна в суточных вариациях мезосферного озона (60 км) «ночь—день» [12].

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 концентрации озона (микроволны), которые были получены в моменты пролета над Томском бортового прибора MLS (Microwave Limb Sounder), установленного на космическом аппарате AURA. Следующие два столбца содержат ту же информацию, полученную со спутникового прибора MLS. Эти результаты являются следствием усреднения за все пролеты 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 и широты 56° с.ш. [10, 11]. Наибольшее расхождение между результатами бортовых и наземных измерений озона приходится на высоты 50–60 км. Так, по данным MLS суточные значения количества озона на высоте 60 км в среднем составили $(4,1 \pm 0,33) \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$ ночью и $(1,96 \pm 0,08) \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$ днем. Соответствующие величины, полученные наземным микроволновым озонотомом, 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-й столбец), также удовлетворительно согласуется с моделью и бортовыми измерениями MLS/AURA, исключая высоты 30 и 35 км.

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, 30, 35 и 40 км на 10, 7, 3 и 2% соответственно. 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

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

Высота, км	Лидар, T, К	Микроволновый озонотом, N, см ⁻³	MLS/AURA, T, К	MLS/AURA, N, см ⁻³	T, К, модель [10]	N, см ⁻³ , модель [11]
25	215,9 ± 2,0	$(3,33 \pm 0,07) \cdot 10^{12}$	208,5 ± 0,5	$(3,49 \pm 0,05) \cdot 10^{12}$	212,5	$3,5 \cdot 10^{12}$
30	227,1 ± 2,3	$(2,20 \pm 0,03) \cdot 10^{12}$	215,0 ± 1,0	$(1,60 \pm 0,03) \cdot 10^{12}$	212,5	$2,0 \cdot 10^{12}$
35	232,9 ± 1,4	$(1,05 \pm 0,01) \cdot 10^{12}$			221,6	$1,0 \cdot 10^{12}$
40	238,0 ± 0,6	$(4,06 \pm 0,05) \cdot 10^{11}$	232,7 ± 1,6	$(4,19 \pm 0,22) \cdot 10^{11}$	236,9	$4,7 \cdot 10^{11}$
45	247,8 ± 2,9	$(1,49 \pm 0,03) \cdot 10^{11}$			251,1	$1,6 \cdot 10^{11}$
50	249,5 ± 5,7	$(5,35 \pm 0,15) \cdot 10^{10}$	254,5 ± 2,0	$(3,22 \pm 0,13) \cdot 10^{10}$	256,7	$4,3 \cdot 10^{10}$
55	252,5 ± 6,5	$(1,86 \pm 0,08) \cdot 10^{10}$			250,1	$1,3 \cdot 10^{10}$
60	242,2 ± 7,7	$(6,85 \pm 0,35) \cdot 10^9$	241,3 ± 1,9	$(3,51 \pm 0,49) \cdot 10^9$	241,4	$3,7 \cdot 10^9$

стратосфера на этих высотах была теплее, чем модель, которую мы применяли для оценок вертикального распределения озона.

Заключение

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 полезны для бортовых исследований [13] воздействия 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 времени.

Авторы благодарят Российский фонд фундаментальных исследований (гранты № 08-05-99047, 10-05-00907), интеграционный проект СО РАН № 106, а также Минобрнауки РФ (ГК № 14.518.11.7053, соглашения № 14.В37.21.0612 и 8883) за поддержку настоящей работы.

1. Зуев В.В., Маричев В.Н., Долгий С.И., Шарабарин Е.В. Сравнение результатов измерения температуры в стратосфере лидаром и метеозондом в интервале высот 13–30 км // Оптика атмосф. и океана. 1996. Т. 9, № 10. С. 1394–1398.
2. Маричев В.Н. Лидарные наблюдения зимних стратосферных потеплений над Томском в 1996–2000 гг. // Метеорол. и гидрол. 2001. № 8. С. 41–48.
3. Матвиенко Г.Г., Банах В.А., Бобровников С.М., Бурлаков В.Д., Веретенников В.В., Кауль Б.В., Креков Г.М., Маричев В.Н. Развитие технологий лазерного зондирования атмосферы // Оптика атмосф. и океана. 2009. Т. 22, № 10. С. 915–930.

4. Маричев В.Н. Лидарные исследования проявления стратосферных потеплений над Томском в 2008–2010 гг. // Оптика атмосф. и океана. 2011. Т. 24, № 5. С. 386–391.
5. Kulikov Yu.Yu., Ryskin V.G. Relation between ozone and temperature in the Arctic stratosphere // Int. J. Geomagnet. and Aeronom. 1999. V. 1, N 3. P. 253–257.
6. Куликов Ю.Ю., Красильников А.А., Рыскин В.Г. Результаты микроволновых исследований структуры озонового слоя полярных широт во время зимних аномальных потеплений стратосферы // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 2002. Т. 38, № 2. С. 182–191.
7. Куликов Ю.Ю., Красильников А.А., Рыскин В.Г. Особенности поведения озона верхней атмосферы зимой 1999/2000 г. по результатам одновременных микроволновых наблюдений в Нижнем Новгороде (56° с.ш., 44° в.д.) и Апатитах (67° с.ш., 35° в.д.) // Геомагнет. и аэроном. 2002. Т. 42, № 2. С. 265–273.
8. Красильников А.А., Куликов Ю.Ю., Рыскин В.Г., Щитов А.М. Микроволновые приемники для диагностики малых газовых составляющих земной атмосферы // Изв. РАН. Сер. физ. 2003. Т. 67, № 12. С. 1788–1792.
9. Красильников А.А., Куликов Ю.Ю., Рыскин В.Г., Демкин В.М., Кукин Л.М., Михайловский В.Л., Шанин В.Н., Шейнер М.З., Шумилов В.А., Щитов А.М. Новый малогабаритный микроволновый спектрометр – озонметр // Приборы и техн. эксперим. 2011. № 1. С. 127–133.
10. Barnett J.J., Corney M. Middle atmosphere reference model derived from satellite data // Handbook for MAP. 1985. V. 16. P. 47.
11. Keating G.M., Pitts M.C., Young D.F. Ozone reference model for the middle atmosphere (New CIRE) // Handbook for MAP. 1989. V. 31. P. 1.
12. Azeem S.M.I., Palo S.E., Wu D.L., Froidevaux L. Observations of the 2-day wave in UARS MLS temperature and ozone measurements // Geophys. Res. Lett. 2001. V. 28, N 16. P. 3147–3150.
13. Belova A., Kirkwood S., Murtagh D. Planetary waves in ozone and temperature in the Northern Hemisphere winters of 2002/2003 and early 2005 // Ann. Geophys. 2009. V. 27. P. 1189–1206.

V.N. Marichev, G.G. Matvienko, A.A. Lisenko, V.Yu. Iljushik, Yu.Yu. Kulikov, A.A. Krasilnikov, V.G. Ryskin, B.B. Bychkov. **First results of complex experiment on sounding the middle atmosphere in optical and millimeter waves (above Tomsk).**

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