

Микроволновые и оптические наблюдения озона и температуры средней атмосферы во время стратосферного потепления в Западной Сибири

В.Н. Маричев^{1,2}, Г.Г. Матвиенко¹, А.А. Лисенко^{1,2}, Д.А. Бочковский¹, Ю.Ю. Куликов³, А.А. Красильников³, В.Г. Рыскин³, В.М. Демкин^{3*}

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
603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46

Поступила в редакцию 2.08.2013 г.

Представлены результаты параллельных наземных измерений вертикальных профилей озона и температуры с использованием микроволновой и лидарной техники во время стратосферного потепления. Во время зимнего потепления (декабрь 2012 г. — январь 2013 г.) зарегистрированы заметные вариации концентрации озона и температуры в средней атмосфере. Концентрация озона на высотных уровнях от 25 до 60 км выросла в 1,5–2 раза, при этом значительно увеличилась амплитуда ее колебаний. Пик положительного отклонения температуры от ее среднемесячного значения достигал 70 К на высоте 30 км. Суточные колебания озона на высоте 60 км, связанные с заходом и восходом Солнца, составляли около 30%.

Ключевые слова: стратосфера, мезосфера, микроволновая радиометрия, лидар, озон, температура, стратосферное потепление; stratosphere, mesosphere, microwave radiometry, lidar, ozone, temperature, stratospheric warming.

Введение

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 по температурной зависимости от высоты, которые могут быть представлены в виде зональных моделей [3] либо в виде измеренных данных. В качестве примера последних могут служить результаты лидарного термического зондирования с поверхности Земли [4]. Следует подчеркнуть, что наиболее сильное влияние изменений в температурном профиле на точность результатов микроволновых наблюдений будет проявляться во время так называемых внезапных стратосферных потеплений (ВСП), когда на высотах 20–60 км наблю-

дается 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 в зимний период атмосфера над Западной Сибирью отличается большей стабильностью по сравнению с атмосферой над Европейской частью, последствия разрушения полярного стратосферного циклона и возмущение температурного режима стратосферы проявляются и над Западной Сибирью. Поэтому одновременный контроль изменений, происходящих в атмосфере, с использованием микроволновой и лидарной техники позволяет на ранней стадии диагностировать процессы перестройки атмосферной циркуляции.

* Валерий Николаевич Маричев (marichev@iao.ru); Геннадий Григорьевич Матвиенко (magg@iao.ru); Андрей Александрович Лисенко (lisenko@iao.ru); Дмитрий Андреевич Бочковский (moto@iao.ru); Юрий Юрьевич Куликов; Александр Аркадьевич Красильников; Виталий Геннадьевич Рыскин; Валерий Матвеевич Демкин.

Оборудование, использованное в совместном эксперименте

Метод микроволновой наземной радиометрии основан на измерениях вращательных спектров излучения малых газовых составляющих (в нашем случае озона) 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 [6, 7]. Использование мобильных озонметров 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, которая соответствует вращательному переходу молекулы озона $\nu_{0,6} - \nu_{1,5}$, и многоканального анализатора спектра. На входе приемника находится модуль, включающий в себя антенну (скалярный рупор) и коммутатор для калибровки интенсивности принимаемого атмосферного излучения в линии озона. Ширина диаграммы направленности рупорной антенны по уровню 3 дБ составляет $5,4^\circ$. Шумовая температура приемника не превышает 2500 К при однополосном режиме приема, который обеспечивается заградительным фильтром с прямыми потерями 0,5 дБ и подавлением зеркального канала более 20 дБ. Анализатор спектра состоит из 31 фильтра с полосами пропускания, изменяющимися 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, один из них имеет температуру кипения жидкого азота, а другой — температуру окружающего воздуха.

Информация о наличии 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. Критерием правильности решения обратной задачи являлось наилучшее соответствие спектральной линии озона, рассчитанной по восстановленному профилю концентрации O_3 , исходному экспериментальному спектру. Погрешность определения ВРО по его измеренным спектрам вышеописанным прибором не превышает 20%.

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 на основе Nd:YAG-лазера с длиной волны излучения 532 нм, энергией в импульсе до 200 мДж, частотой посылок импульсов 10 Гц и расходимостью луча на выходе после коллиматора 0,1 мрад; приемно-регистрирующая система с телескопом Ньютона с диаметром главного зеркала 1 м и фокусирующим расстоянием 2 м и спектрофотометрический блок с фотоприемниками фирмы Hamamatsu. 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 равно 192 м, а необходимое время накопления для получения информации о температуре с высоты 60 км — около 2 ч. Такое время задается величиной относительной погрешности 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 2%, т.е. не превышает $\pm 2,5$ К на высоте 40 км.

Более подробное описание измерительной аппаратуры, которая была использована в совместных наблюдениях, дано в работе [8].

Результаты наблюдений и их обсуждение

Микроволновые и оптические наблюдения озона и температуры проводились в период с 14 декабря 2012 г. по 29 января 2013 г. Данный промежуток времени был выбран в связи с тем, что по результатам нескольких лет лидарного зондирования температуры над Томском (56° с.ш., 85° в.д.) стратосферные потепления, как правило, происходят в декабре–январе. В обсуждении результатов совместных наблюдений были использованы данные аэрологического зондирования, полученные на станциях Колпашево (58° с.ш., 83° в.д.) и Новосибирск (55° с.ш., 83° в.д.) [9], которые находятся на расстоянии от Томска около 253 и 210 км соответственно, и данные бортовых наблюдений суммарного озона (OMI/AURA) и озона и температуры (MLS/AURA) [10, 11]. Наземные микроволновые измерения начинались, как правило, до захода Солнца и продолжались несколько часов. В это же самое время измерялись температурные профили с помощью лидара.

На рис. 1 показаны изменения содержания озона за время измерительной кампании: данные бортовых приборов об общем содержании озона (OMI/AURA), содержании озона в слое 20–50 км (MLS/AURA), а также результаты наземного микроволнового (МВ) зондирования. Все приборы обнаружили уменьшение примерно на 50% количества озона в течение нескольких дней начиная с 14 декабря 2012 г. После 19–20 декабря наблюдался монотонный рост полного содержания озона (OMI/AURA) со средней

скоростью 3,3 е.Д. в сутки, при этом увеличение количества O_3 в слое 20–50 км (MLS/AURA) составило 1,5 е.Д. в сутки, а выше 22 км, по данным наземного микроволнового зондирования, – 0,7 е.Д. в сутки. В результате к 29 января 2013 г. содержание озона восстановилось до первоначальной величины.

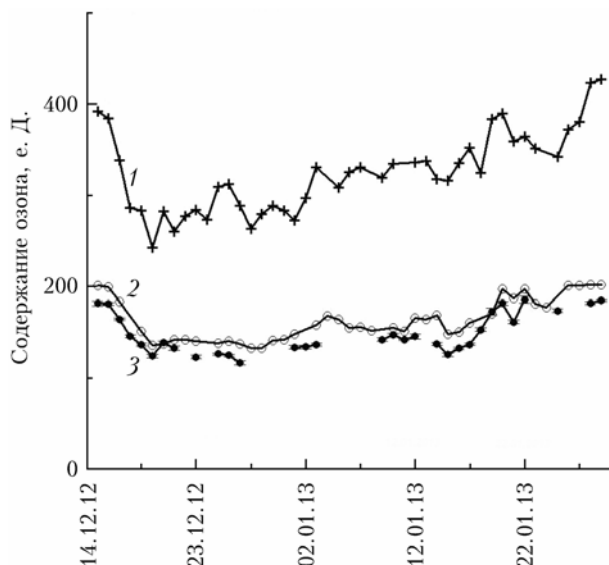


Рис. 1. Временные изменения общего содержания озона (2) (данные OMI/AURA), содержания озона в слое 20–50 км (1) (данные MLS/AURA) и содержания озона выше 22 км (данные наземных микроволновых наблюдений) (3) во время стратосферного потепления над Томском, Западная Сибирь

Эксперимент по оптическим и микроволновым измерениям проводился в период стратосферного потепления, которое характеризовалось существенными изменениями температуры и озона в средней атмосфере. Интересно проследить на поведение температуры и озона в нижней части стратосферы на высотах 15–20 км. На рис. 2 показаны изменения озона и температуры на уровне 50 гПа (примерно соответствуют высоте 20 км). Температура была измерена на станциях аэрологического зондирования Колпашево и Новосибирск. Температура над Томском получена усреднением данных двух вышеупомянутых пунктов и сопоставлена с результатами спутникового прибора MLS.

Из всего набора спутниковых данных были отобраны те, которые соответствовали пролетам спутника над районом, близким к месту расположения Томска. Этот район был ограничен прямоугольником, географические координаты которого составляли $(56 \pm 1,5)^\circ$ с.ш. и $(85 \pm 5)^\circ$ в.д. Имеется хорошее согласие между прямыми контактными и бортовыми дистанционными измерениями температуры. На верхней панели рис. 2 показано поведение концентрации O_3 на высоте около 20 км, которое характеризуется значительными (до 1,5 раза) изменениями. Отметим, что на этой высоте отсутствует корреляция между изменениями озона и температуры.

На рис. 3 показаны вариации температуры и концентрации озона на избранных высотах средней ат-

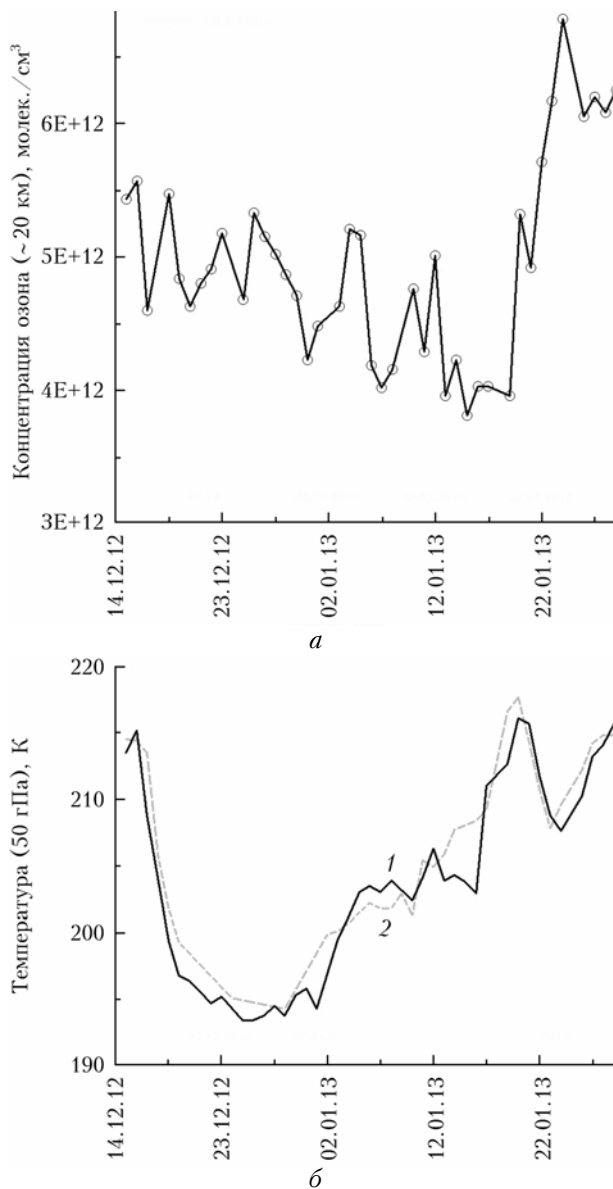


Рис. 2. Сопоставление вариаций концентрации озона на границе средней атмосферы (данные MLS/AURA) (а), температуры (б) (данные MLS/AURA) (1) и данные аэростатов по измерениям на станциях Колпашево и Новосибирск (2)

мосферы 25, 40 и 60 км. Приведена временная зависимость количества озона (заполненные кружки), полученная по результатам наземных микроволновых измерений. Эти данные следуют из решения задачи восстановления вертикального профиля озона с использованием модельных зависимостей давления и температуры от высоты [3]. Ромбами отмечены данные зондирования на МВ, скорректированные с учетом «реальных» температурных профилей, измеренных MLS/AURA. Крестами и сплошной линией обозначены данные измерения содержания O_3 , также полученных MLS.

При сравнении измерений температуры лидаром и MLS/AURA, а также в отдельных случаях аэростатами за указанный период проведения эксперимента необходимо отметить следующее. Наибольшее

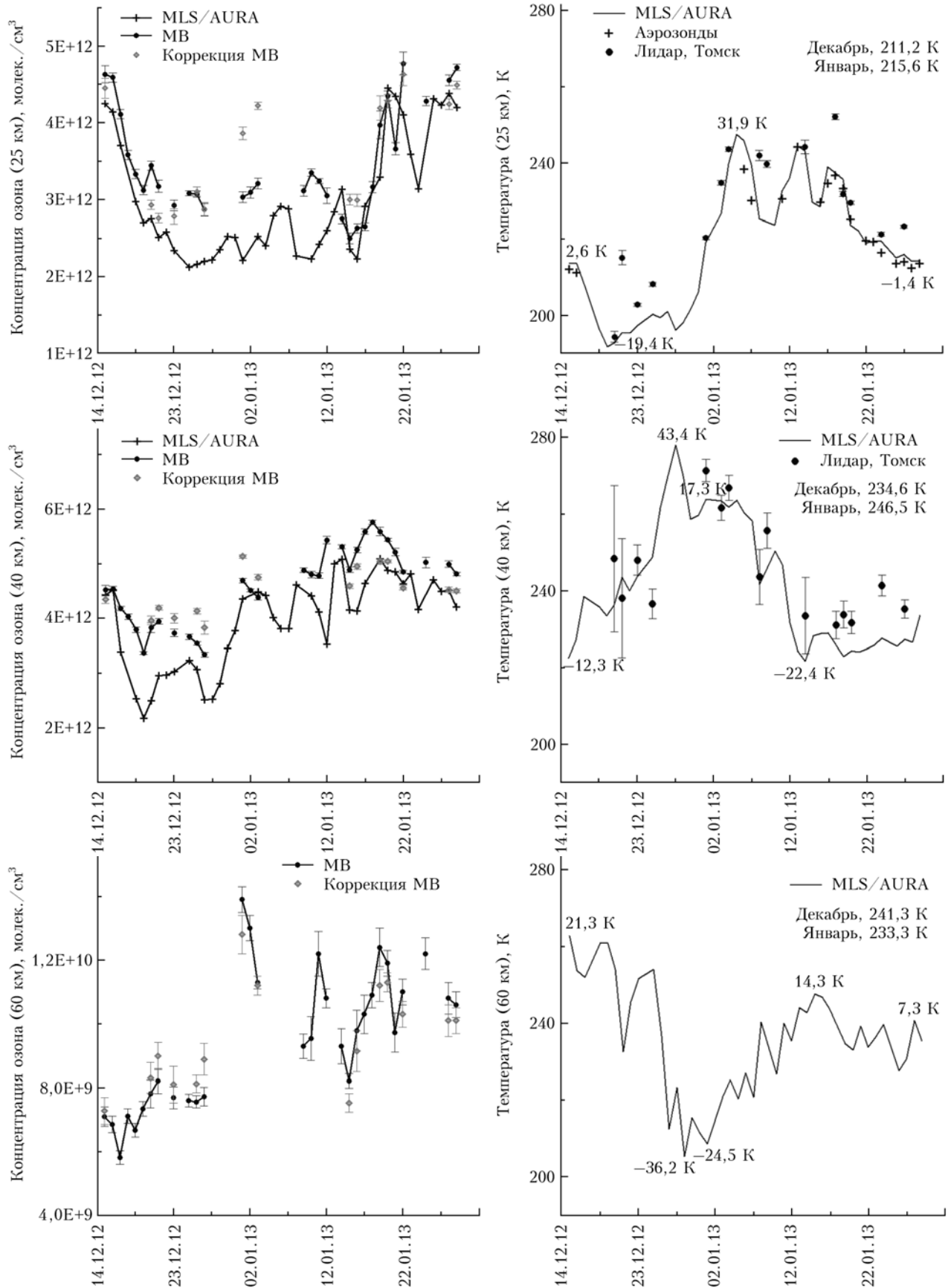


Рис. 3. Вариации озона и температуры на высотных уровнях 25, 40 и 60 км во время стратосферного потепления зимой 2012/13 г.

расхождение между данными характерно для высотных эшелонов 25 и 30 км. Для пояснения обратимся к результатам лидарных измерений аэрозольного наполнения стратосферы, которые проводились синхронно с измерениями вертикальных профилей температуры по методике, описанной в [12]. Именно в декабре 2012 и январе 2013 г. регистрировалось повышенное содержание аэрозольной компоненты вплоть до высот 30 км. А наличие аэрозольной компоненты, согласно [13], является мешающим фактором при измерениях температуры рэлеевским лидаром. Поэтому для оценки временного хода температуры в данном интервале высот следует полагаться на результаты наблюдений MLS/AURA, которые использовались при коррекции результатов измерения количества озона.

Результаты измерений температуры лидаром и MLS/AURA на высотах 35 и 40 км находятся в хорошем согласии. При этом лидарные данные, имея более высокое вертикальное разрешение и конкретное местоположение, дают более детальную картину изменения температуры над пунктом наблюдений. Сходство аналогичных наблюдений на высоте 45 км несколько хуже за счет заметного увеличения погрешности лидарных измерений. Для достоверности отслеживания проявления стратосферного потепления над Томском на рис. 4 приведены профили температуры, полученные лидаром и MLS/AURA во время кульминации стратосферного потепления. Видно их аналогичное вертикальное поведение, достаточно близкое высотное положение стратоплаузы и значения в ней температурных максимумов для 1, 3 и 4 января. На лидарных профилях, как отмечалось выше, в большей степени выражена детализация.

Обратимся снова к рис. 3. Видно, что наблюдалось мощное потепление во всей средней атмосфере над Западной Сибирью. Причем развивалось оно сверху вниз с середины декабря 2012 г., на высоте 60 км рост температуры по сравнению со среднеширотной моделью [3] для декабря составил около 21 К. Далее тепло спустилось вниз и на уровне 40 км прирост температуры достиг 43 К. Наконец, в нижней части зондируемой нами области на высоте около 25 км потепление стартовало в первых числах января 2013 г. и превышение температуры над модельными значениями составило порядка 32 К.

Следует отметить, что в средней и верхней стратосфере (уровни высот 40 и 60 км) должна наблюдаться антикорреляция между изменениями озона и температуры [14], так как в этой части атмосферы фотохимические процессы преобладают над динамическими. Кроме того, фотохимические реакции имеют довольно высокие скорости, в результате любые изменения теплового режима в этой области должны вызывать противофазные изменения количества озона [14], по крайней мере в невозмущенной средней атмосфере. В нашем случае в средней атмосфере протекало стратосферное потепление, которое вызвало, по-видимому, значительные изменения концентрации озона (до 1,5–2 раз) на высоте 60 км (см. рис. 3). Причем суточные колебания озона на высоте 60 км, связанные с заходом и восходом Солнца, которые определяются как раз фотохимическими

процессами, составляли около 30% (данные наземных микроволновых наблюдений).

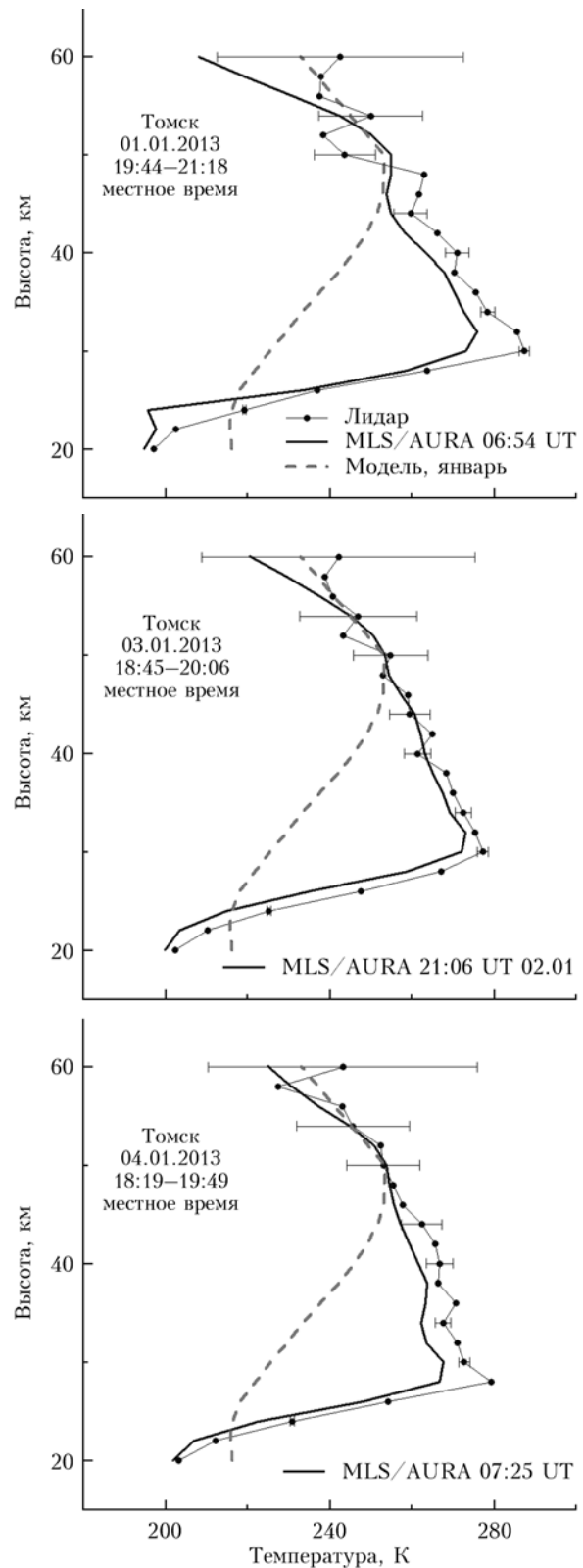


Рис. 4. Вертикальные профили температуры, измеренные во время кульминации стратосферного потепления лидаром (точки), MLS/AURA (сплошная кривая). Штриховой кривой изображен модельный профиль температуры (CIRA-86)

По микроволновым наблюдениям в полярных широтах (Кольский п-ов, Апатиты) во время внезапных стратосферных потеплений отмечались значительные изменения концентрации озона на высоте 60 км [15]. По данным наших микроволновых наблюдений отрицательная обратная связь между озоном и температурой наиболее очевидна на высоте 60 км в первых числах января и в меньшей степени на высоте 40 км (см. рис. 3).

В нижней части стратосферы (уровень 25 км) вариации атмосферных параметров обусловлены главным образом крупномасштабными процессами переноса, которые характеризуются временами порядка нескольких дней. Обычно во время разрушения полярного циклона, когда наступает стратосферное потепление, в этой части атмосферы наблюдается рост содержания озона [2], т.е. имеет место положительная корреляция между изменениями озона и температуры. Из рис. 3 следует, что потепление на высоте 25 км, начавшееся в первых числах января, сопровождается увеличением количества озона на этом уровне в середине января, но со сдвигом примерно на 2 нед.

Используя данные Британского центра атмосферных исследований BADC, мы выполнили траекторный анализ воздушных масс на уровне 20 гПа для Томска в январе 2013 г. Анализ показал, что в начале января Томск оказался на краю высотного полярного вихря, с которым воздушные массы пришли из Центральной Атлантики по периферии этого циклона. Известно, что в атмосфере экваториальных широт наблюдается низкое содержание озона. По видимому, воздух, бедный озоном, был принесен из Атлантики на территорию Западной Сибири. Поэтому как наземный, так и орбитальный инструменты зарегистрировали над Томском минимум содержания озона на высоте 25 км в первой декаде января. После разрушения полярного циклона, которое завершилось в начале второй декады января, воздушные массы в район Томска стали поступать из северной части Тихого океана, где атмосфера характеризуется высоким содержанием озона. В результате нами был обнаружен рост количества озона в нижней части стратосферы.

Следует отметить, что данные, полученные с поверхности Земли и с орбиты, качественно совпадают, однако имеются количественные различия. Вероятно, во время сильных атмосферных возмущений, таких как разрушение высотного полярного циклона, когда в атмосфере возникают пространственные неоднородности, наземный и спутниковый инструменты могут зондировать разные по составу воздушные массы. Специфика лимбового метода большинства спутниковых измерений состоит в том, что горизонтальное разрешение в этом методе составляет несколько сот километров. В этом случае, если измерение происходит вблизи края полярного вихря, геофизические условия по обе стороны которого различны, спутниковые данные будут содержать дополнительную погрешность, вызванную усреднением сигнала MLS, прошедшего от двух различных областей атмосферы.

Обратим внимание на особенности суточного хода содержания озона в фотохимической области атмосферы. По данным MLS/AURA, на высоте 60 км средняя концентрация дневного озона составила $(3,28 \pm 0,36) \cdot 10^9$ молек./см³, а ночного — $(6,22 \pm 0,40) \cdot 10^9$ молек./см³. Усреднение выполнялось за весь период измерительной кампании. По наземным микроволновым данным средняя концентрация ночного озона на этой высоте составила $(1,16 \pm 0,28) \cdot 10^{10}$ молек./см³. Отметим, что по данным наших микроволновых измерений в Томске в ноябре 2011 г. [8] на высоте 60 км концентрация дневного озона равнялась $(5,25 \pm 0,17) \cdot 10^9$ молек./см³, а ночного — $(8,29 \pm 0,26) \cdot 10^9$ молек./см³.

Заключение

По результатам микроволновых и оптических наблюдений, выполненных над Томском за период декабря—января 2012/13 г., можно сделать следующие выводы.

1. Стратосферное потепление относится к мажорному типу, при котором произошла перестройка циркуляции воздушных масс в верхней стратосфере над Западной Сибирью от западного переноса к восточному [16].

2. Во время зимних аномальных событий зарегистрированы заметные вариации концентрации озона от 1,5 до 2 раз на высоте от 25 до 60 км и значительный рост амплитуды ее колебаний. Максимум положительного отклонения температуры от ее среднемесячного значения достигал 65 К на высоте 30 км.

3. Особенностью наблюдаемого стратосферного потепления явилось отсутствие корреляции между изменениями озона и температуры на высотах от 20 до 30 км, а на 40–60 км корреляция была отрицательной — это –0,59 и –0,45 соответственно.

4. Поведение озона в нижней части стратосферы (на уровне 25 км) определялось динамическими процессами, которые были обусловлены разрушением высотного полярного вихря.

Авторы благодарят Британский центр атмосферных данных BADC за предоставленный расчет траекторий воздушных масс с использованием базы данных Европейского центра среднесрочных прогнозов ECMWF.

Работа выполнена при финансовой поддержке интеграционного проекта СО РАН № 106 и гранта РФФИ № 13-05-010369.

1. Waters J.W., Froidevaux L., Harwood R.S., Jarnot R.F. et al. The earth observing system microwave limb sounder (EOS MLS) on the Aura satellite // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2006. V. 44, N 5. P. 1075–1092.
2. 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. атмосфер. и океана. 2002. Т. 38, № 2. С. 182–191.
3. Barnett J.J., Corney M. Middle atmosphere reference model derived from satellite data // Handbook for MAP. 1985. V. 16. P. 47–85.
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. URL: http://acd-ext.gsfc.nasa.gov/Data_services/met/ann_data.html
 6. 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.
 7. 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 спектрометрический прибор – озонометр // Приборы и техн. эксперим. 2011. № 1. С. 127–133.
 8. Маричев В.Н., Матвиенко Г.Г., Лисенко А.А., Илюшик В.Ю., Куликов Ю.Ю., Красильников А.А., Рыскин В.Г. Первые результаты комплексного эксперимента по зондированию средней атмосферы в оптическом и миллиметровом диапазонах волн (над Томском) // Оптика атмосф. и океана. 2012. Т. 25, № 12. С. 1091–1095.
 9. URL: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>
 10. URL: http://gdata1.sci.gsfc.nasa.gov/daac-bin/G3/gui.cgi?instance_id=omi
 11. URL: <http://mirador.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/mirador/presentNavigation.pl?tree=project&project=MLS>
 12. Ельников А.В., Креков Г.М., Маричев В.Н. Лидарные наблюдения стратосферного слоя аэрозоля над Западной Сибирью // Физика атмосф. 1988. Т. 24, № 8. С. 818–823.
 13. Nauchecorne A., Chanin M.-L. Density and temperature profiles obtained by lidar between 35 and 75 km // Geophys. Res. Lett. 1980. V. 7, N 8. P. 565–568.
 14. Брасье Г., Соломон С. Аэронавигация средней атмосферы. Л.: Гидрометеониздат, 1987. 415 с.
 15. Куликов Ю.Ю., Рыскин В.Г., Красильников А.А., Кукин Л.М. Микроволновые наблюдения изменчивости озона в стратосфере высоких широт зимой 2002–2003 гг. // Изв. вузов. Радиофиз. 2005. Т. 48, № 2. С. 134–141.
 16. Маричев В.Н. Лидарные исследования особенности зимних стратосферных потеплений над Томском 2010/11, 2011/12 и 2012/13 гг. // Фундаментальные и прикладные проблемы науки. Т. 6: Материалы VIII Междунар. симпозиума. М.: РАН, 2013. С. 73–78.

V.N. Marichev, G.G. Matvienko, A.A. Lisenko, D.A. Bochkovsky, Yu.Yu. Kulikov, A.A. Krasilnikov, V.G. Ryskin, V.M. Demkin. Microwave and optical observation of ozone and temperature of the middle atmosphere during stratospheric warming at Western Siberia.

Results of joint ground-based measurements of vertical structures of ozone and temperatures with the use microwave and lidar technical equipment during stratospheric warming are presented. During winter warming (December 2012 – January 2013) appreciable variations of ozone concentration and temperature in the middle atmosphere are registered. Changes of ozone concentration at height levels from 25 to 60 km increased by 1.5–2 times, the amplitude of their oscillations thus has considerably increased. The peak of a positive deviation of temperature from its monthly average value reached 70 K at a height of 30 km. Daily ozone oscillations at a height of 60 km, connected with sunset and sunrise, were about 30%.