

Микроволновое дистанционное зондирование атмосферного озона над Москвой в периоды сильных стратосферных потеплений

Е. П. Кропоткина, С. В. Соломонов, С. Б. Розанов, А. Н. Игнатъев, А. Н. Лукин

Федеральное государственное бюджетное учреждение Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, 119991 ГСП-1 Москва, Ленинский проспект, д.53, ker@sci.lebedev.ru

Представлены результаты многолетнего мониторинга вертикального распределения озона на миллиметровых (ММ) волнах над Москвой в периоды сильных возмущений стратосферы – внезапных среднезимних стратосферных потеплений. Получено, что содержание озона над Москвой в такие периоды характеризуется существенно более низким содержанием озона в средней стратосфере в декабре по сравнению со случаями зим без сильных потеплений. Показано, что явления продолжительного пониженного содержания озона в средней стратосфере над Москвой в декабре предшествуют развитию сильных стратосферных потеплений в январе, которые, в свою очередь, сопровождаются значительным увеличением озона. Сделан вывод, что содержание озона над Москвой является чувствительным индикатором крупномасштабных атмосферных процессов в Северном полушарии и приближающихся сильных стратосферных потеплений. Результаты многолетнего дистанционного зондирования озона на ММ волнах иллюстрируют широкие возможности радиофизических методов в изучение озоносферы и её эволюции.

Results of long-term microwave monitoring of vertical distribution of ozone over Moscow during periods of strong disturbances of the stratosphere such as the sudden midwinter stratospheric warming are presented. It is obtained that the ozone volume mixing ratio over Moscow during the periods is characterized by significantly lower content of ozone in the middle stratosphere in December in comparison with cases of winters without major sudden warmings. It is shown that the phenomena of the long lowered ozone content in the middle stratosphere over Moscow in December precede development of major stratospheric warming in January which, in turn, are followed by significant increase in ozone. The conclusion is made that the ozone over Moscow is the sensitive indicator of large-scale atmospheric processes in the Northern hemisphere and the approaching major stratospheric warmings. Results of long-term remote sensing of ozone at MM waves illustrate great opportunities of microwave methods in study of the ozonosphere and its evolution.

Введение

Дистанционное зондирование атмосферного озона, его вертикального распределения, на миллиметровых (ММ) волнах является эффективным средством исследования озоносферы [1-4]. Озоносфера защищает жизнь на Земле от губительного УФ-Б излучения Солнца. Обнаруженное истощение озонового слоя, вызванное в первую очередь хлорными составляющими техногенного происхождения, является одной из важнейших проблем. Возникают непрогнозируемые неожиданные явления в озоносфере, например, «первая арктическая озонная дыра» весной 2011 г. Необходимо изучать изменения содержания озона не только в верхней и нижней стратосфере, где озон наиболее чувствителен к техногенным загрязнениям хлорфторуглеродами [1], а также и в её средних слоях на высотах около 30 км (уровни давления примерно 10 мбар), где, в соответствии с данными работы [5], ожидается снижение содержания озона, вызываемое происходящим увеличением азотных составляющих стратосферы.

Выполняемый в ФИАН мониторинг озона на ММ волнах с земной поверхности как раз и позволяет получать новую важную информацию о ВРО в указанных слоях стратосферы и отличается от наблюдений в оптическом диапазоне волн большим диапазоном зондируемых высот, проведением наблюдений днём и ночью, при различных погодных условиях. Наибольший интерес представляют данные об изменениях вертикального распределения озона в периоды внезапных сильных

среднезимних стратосферных потеплений. Эти данные важны для развития и проверок современных численных климатических моделей.

Ниже представлены результаты мониторинга вертикального распределения содержания озона C_{O_3} на ММ волнах во время ряда сильных стратосферных потеплений, происшедших в последние два десятилетия.

Спектральная аппаратура и методы

Размещённым в Москве спектрометром для дистанционного зондирования атмосферного озона регистрируется спектральная линия теплового излучения озона на частотах вращательного перехода $10_{1,9}-10_{0,10}$ с центром на 142,175 ГГц (длина волны 2,1 мм). Эта уширенная столкновениями линия содержит информацию о высотном распределении молекул озона в стратосфере и мезосфере [3,4].

Спектрометр состоит из малошумящего супергетеродинного приемника, 96-канального анализатора спектра АС-96 и персонального компьютера с интерфейсными модулями и программным обеспечением [6]. Однополосная шумовая температура приёмника, в котором используется смеситель на планарном диоде Шоттки, составляет около 700 К при охлаждении входных каскадов жидким азотом и около 1500 К без охлаждения.

Фильтровой анализатор спектра АС-96 с полосой частот анализа 475 МГц и высоким спектральным разрешением в центре линии создан в ИПФ РАН с участием ФИАН. Ширина фильтровых каналов АС-96 изменяется от 0,1 МГц в центре линии озона до 20 МГц на ее крыльях ступенями с промежуточными значениями 0,2, 0,5, 2 и 5 МГц. Сеанс наблюдений разбивается на циклы, состоящие из двух этапов калибровки и следующих за ними заданного количества этапов измерений.

Для восстановления вертикального распределения озона из измеренной спектральной линии используется предложенный К.П.Гайковичем алгоритм, основанный на методах Тихонова и статистической регуляризации, сочетание которых позволяет оптимизировать решение задачи восстановления ВРО. Данные о профилях температуры и давления в атмосфере, необходимые для восстановления профилей ВРО, получены из базы данных BADC [7]. Суммарная погрешность восстановления профиля вертикального распределения озона (с учетом шума аппаратуры и других экспериментальных погрешностей) при оптимальных условиях наблюдения и времени накопления сигнала около 1 часа не превышает 5–7% на высотах от 20 до 50 км, постепенно возрастая в более низких и в более высоких слоях [6]. По основным параметрам (чувствительности, точности восстановления профилей озона) аппаратура ФИАН соответствует мировому уровню инструментов такого типа. Получено хорошее согласие результатов наблюдений в ФИАН с данными спутниковых измерений ВРО (результаты сопоставления этих данных представлены в [4]). Исследования в ФИАН проводятся по программам РАН и NDACC.

Примеры зарегистрированных спектральных линий озона и соответствующих им вертикальных распределений озона для различных состояний стратосферы над Москвой зимой 2015-2016 гг. представлены на рис.1. Содержание озона здесь и ниже даны в единицах отношения смеси ppm, или 10^{-6} .

Для анализа результатов наблюдений разработано программное обеспечение, которое позволяет:

- выполнять первичную обработку измеренных спектров озона, вводить поправки на тропосферное ослабление, усреднять единичные спектры;
- решать обратную задачу, восстанавливать вертикальное распределение озона в стратосфере и мезосфере из измеренных спектров озона;

- строить высотно-временные «разрезы» содержания озона над Москвой и представлять их в удобном для анализа диаграммном виде;
- собирать и накапливать информацию из метеорологических баз данных о полях атмосферных параметров (температуры, давления, потенциальной завихренности, геопотенциала и др.), необходимых для восстановления вертикальных профилей озона и для интерпретации результатов наблюдений;
- сравнивать измеренные профили озона с данными, полученными из космоса;
- устанавливать корреляционные связи между содержанием озона и другими параметрами атмосферы, что необходимо для определения причин изменений, происходящих в озоносфере;
- устанавливать основные характеристики полярного стратосферного вихря – его интенсивность и занимаемую им площадь, в качестве оценки интенсивности полярного вихря принимается значение геопотенциальной высоты в его центре;
- определять характеристики динамических процессов (планетарных волн с зональными волновыми числами $n=1, 2, 3 \dots$, скоростей переноса воздушных масс, и др.).

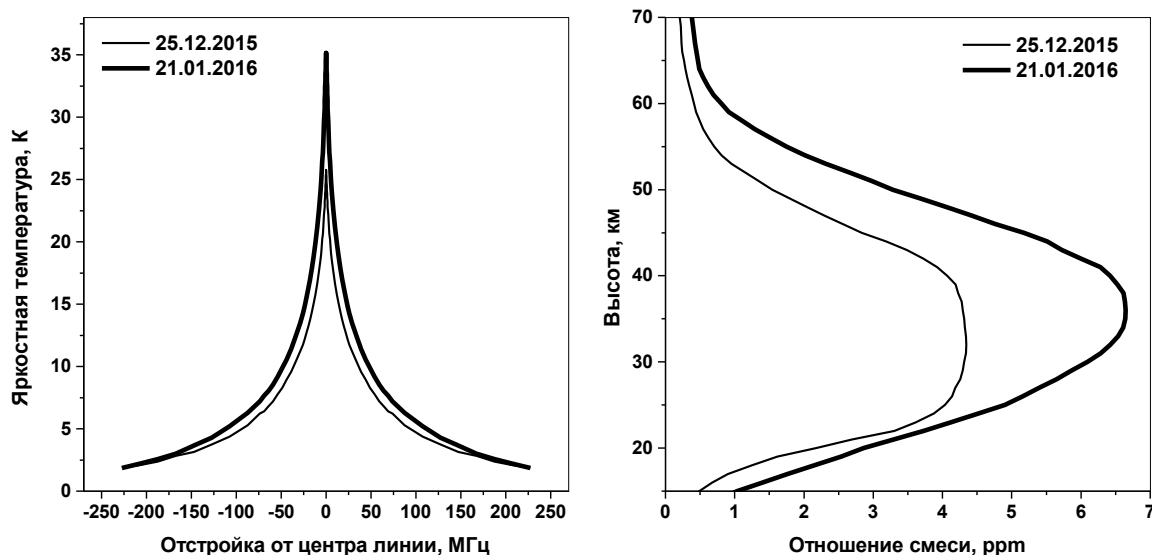


Рис.1. Примеры зарегистрированных спектральных линий озона (с учётом поправки на тропосферное ослабление) и соответствующих им вертикальных распределений озона для различных состояний стратосферы над Москвой зимой 2015-2016 гг.

Выполненный анализ позволил определить те зимы, во время которых происходило сильное внезапное стратосферное потепление, характеризуемое ростом температуры в стратосфере и разрушением полярного стратосферного вихря. Критерием сильного потепления, отличающим его от слабых потеплений, является реверс зонального ветра на уровне 10 мбар, усреднённого вдоль параллели 60° с.ш.

Результаты наблюдений

В результате многолетнего мониторинга получено и проанализировано высотно-временное распределение озона над Москвой. Оказалось, что содержание озона над Москвой в периоды сильных среднезимних возмущений стратосферы, внезапных стратосферных потеплений, характеризуется существенно более низким содержанием озона в средней стратосфере в декабре по сравнению со случаями зим без сильных потеплений. Для иллюстрации влияния сильных среднезимних потеплений на озон на рис.2 представлены данные о содержании озона на уровне 10 мбар для зим с сильными потеплениями (группа зим I, кривая 1), происшедшими за последние два десятилетия.

Для сравнения на рис.2 показаны также результаты наблюдений для зим без таких потеплений (группа зим II, кривая 2).

В группу I включены зимы 2002-2003, 2005-2006, 2006-2007, 2008-2009, 2011-2012, 2012-2013 гг., а в группу II включены зимы 1995-1996, 1996-1997, 1999-2000, 2004-2005, 2010-2011, 2013-2014 гг. Зимы, входящие в группу I, характеризовались возникновением сильного стратосферного потепления в январе, сопровождавшимся разрушением полярного стратосферного вихря, а зимы группы II характеризовались устойчивым долгоживущим полярным вихрем и отсутствием таких потеплений.

Для каждого дня в группах I и II были построены средние значения содержания озона (показаны тонкими сплошной и пунктирной линиями на рис.2). Усреднение производилось за каждый день в пределах каждой из двух групп зим. На рис.2 представлены также сглаженные по 10 дням результаты усреднений (показаны жирными сплошной и пунктирной линиями), позволившие более наглядно показать сезонные различия содержания озона $\Delta C = C_I - C_{II}$ между группами I и II. Здесь C_I и C_{II} обозначают средние сглаженные значения содержания озона в этих группах (кривые 1 и 2 на рис.2 соответственно).

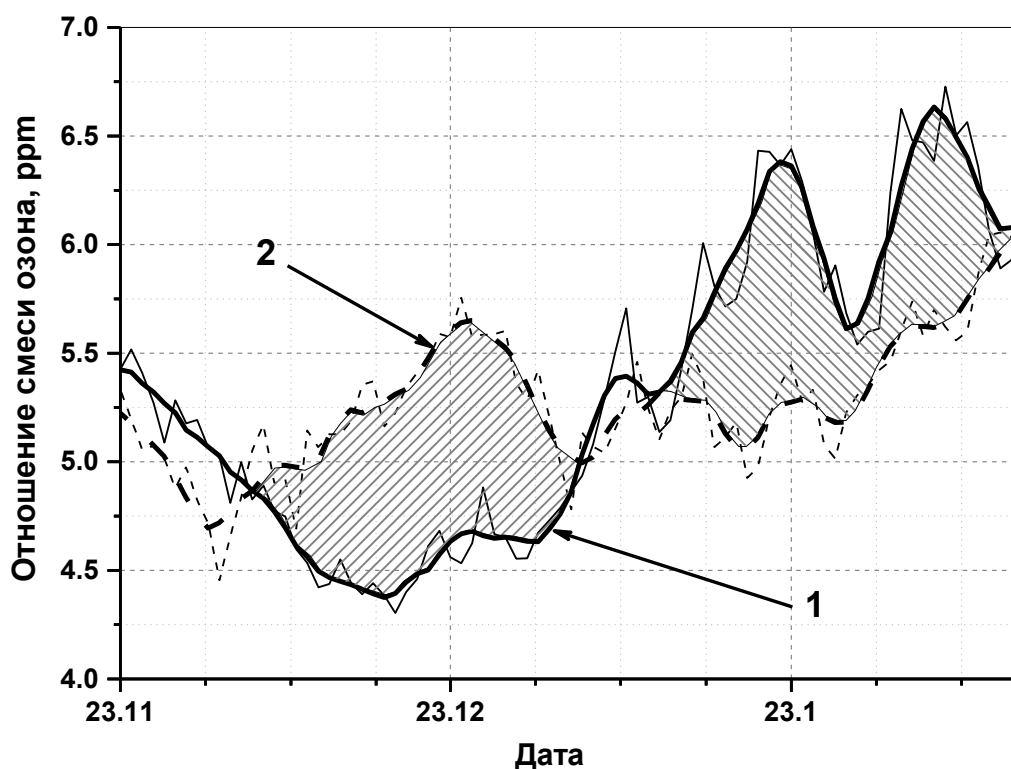


Рис.2. Содержание озона на уровне 10 мбар над Москвой для зим с сильными внезапными потеплениями (группа зим I, кривая 1), происшедшими за последние два десятилетия и для зим без таких потеплений (группа зим II, кривая 2). Рассмотрены периоды времени с 23 ноября по 13 февраля.

Из рис.2 видно, что значения содержания озона испытывают колебания, причём содержание озона в группе I в декабре примерно на 1 ppm меньше, чем в группе II в этот же месяц. Во время сильных возмущений в январе озон в группе I быстро возрастает, превышая более чем на 1 ppm содержание озона в группе зим II.

Таким образом, величина колебаний ΔC для двух групп зим имеет размах более 2 ppm, от минимальных значений -1 ppm в декабре и до более чем +1 ppm в январе во

время сильных возмущений стратосферы - внезапных стратосферных потеплений. Этот размах составляет примерно 40% от среднемесячных значений озона в эти месяцы.

Столь сильные различия в среднем сезонном ходе для рассмотренных случаев показывают высокую чувствительность озона в средней стратосфере над Москвой к глобальным атмосферным процессам, о которых оказывается возможным судить благодаря проводимому мониторингу.

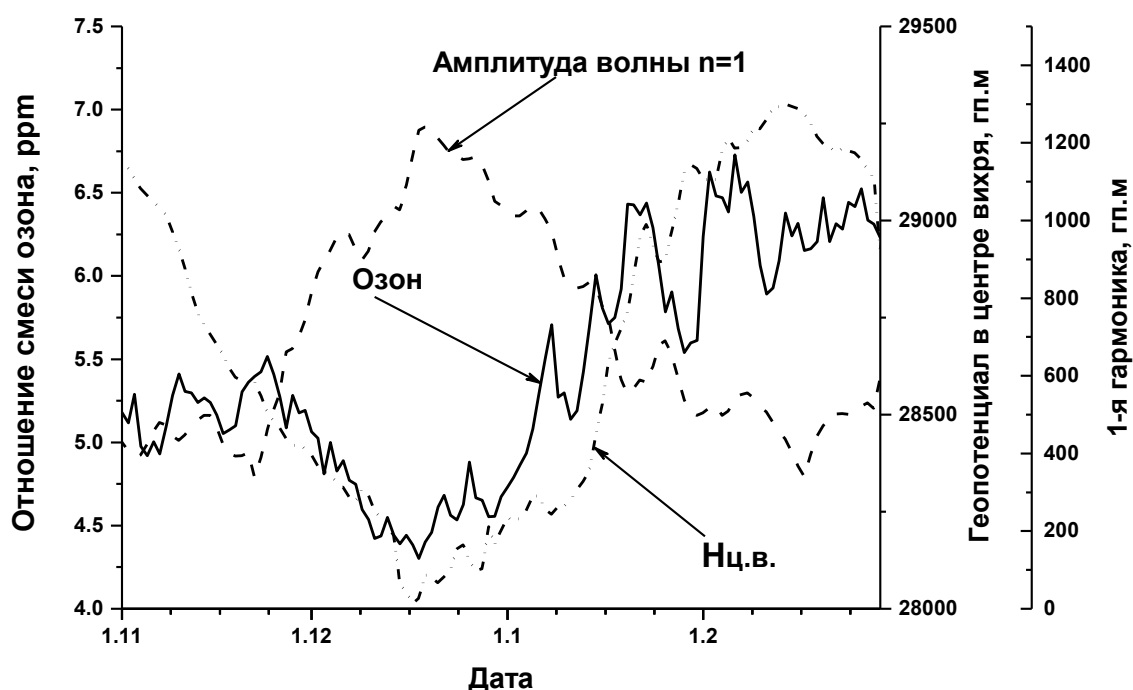


Рис.3. Усреднённые по группе зим I значения содержания озона, амплитуды планетарной волны с зональным волновым числом $n=1$ и геопотенциала в центре полярного вихря на уровне 10 мбар для периода с 1 ноября по 1 марта.

На рис.3 представлены усреднённые по группе I значения отношения смеси озона, интенсивности полярного стратосферного вихря, характеризуемой его глубиной — значением геопотенциала в центре полярного вихря $H_{ц.в.}$, а также значения амплитуды планетарной волны A_1 с зональным волновым числом $n=1$. Коэффициенты корреляции для связей «озон - $H_{ц.в.}$ » и «озон - A_1 » составили $+0,77$ и $-0,71$ соответственно (для интервала с 20 ноября по 15 февраля).

Заключение

Полученные результаты показывают, что на содержание озона над Москвой влияют интенсивность вихря и степень смещения его воздуха к пункту наблюдения. Действительно, по мере развития вихря в зимнее время увеличивается его интенсивность (уменьшается $H_{ц.в.}$), возрастает разрушение озона в его воздухе. При смещении бедного озоном воздуха этого вихря к Москве (возрастании амплитуды планетарной волны с $n=1$) наблюдается понижение содержания озона над Москвой.

Важным результатом является также то, что обнаруженные в группе зим I явления продолжительного пониженного содержания озона в средней стратосфере над Москвой в декабре (рис.2, рис.3) предшествуют развитию сильных стратосферных потеплений в январе, которые, в свою очередь, сопровождаются значительным увеличением озона.

Таким образом, содержание озона над Москвой является чувствительным индикатором крупномасштабных атмосферных процессов в Северном полушарии и приближающихся сильных стратосферных потеплений.

Результаты многолетнего дистанционного зондирования озона на ММ волнах иллюстрируют широкие возможности радиофизических методов в изучении озоносферы и её эволюции.

Авторы выражают глубокую благодарность профессорам В.Н.Сорокину, Е.В.Суворову и В.А.Черепенину за поддержку данной работы. Авторы признательны центру British Atmospheric Data Center (BADC) за любезно предоставленные метеорологические данные. Работа поддержана Программами ОФН РАН «Современные проблемы радиофизики», «Новые источники миллиметрового и терагерцового излучения и их перспективные приложения» и «Радиоэлектронные методы в исследовании природной среды и человека», а также грантом УНК ФИАН.

Литература

1. Atmospheric remote sensing by microwave radiometry. Ed. M.Janssen, J.Willey&Sons Inc., 1993.
2. Красильников А.А., Куликов Ю.Ю., Мазур А.Б., Рыскин В.Г., Серов Н.В., Суворов Е.В., Федосеев Л.И., Швецов А.А. Микроволновое зондирование озона и других малых составляющих атмосферы. В сборнике «Физика микроволн», Изд. ИПФ РАН, Нижний Новгород, 1999.- Т.1.- С.171-178.
3. Кропоткина Е.П., Куликов Ю.Ю., Рыскин В.Г., Соломонов С.В. Исследование пространственно-временного распределения стратосферного озона по наблюдениям на миллиметровых волнах в умеренных и высоких широтах //Известия вузов. Радиофизика. 2007. Т.50. №10-11. С.954-960.
4. Соломонов С.В., Гайкович К.П., Кропоткина Е.П., Розанов С.Б., Лукин А.Н., Игнатьев А.Н. Дистанционное зондирование атмосферного озона на миллиметровых волнах //Известия вузов. Радиофизика. 2011. Т.54. №2. С.113-121.
5. W. Wang, W. Tian, S. Dhomse et al. Stratospheric ozone depletion from future nitrous oxide increases. Atmos. Chem. Phys., 2014, 14, pp. 12967–12982, doi:10.5194/acp-14-12967-2014.
6. Соломонов С.В., Игнатьев А.Н., Кропоткина Е.П., Логвиненко С.В., Лукин А.Н., Никифоров П.Л., Розанов С.Б. Спектральная аппаратура для мониторинга атмосферного озона на миллиметровых волнах //Приборы и техника эксперимента.- 2009.- №2 – С.138-144.
7. The British Atmospheric Data Centre (BADC).
URL:http://badc.nerc.ac.uk/view/badc.nerc.ac.uk_ATOM_dataent_ASSIM