

Озонная «дыра» весной 2011 года и особенности изменений в озоносфере при сильном стратосферном потеплении 2010 года по данным наблюдений на миллиметровых волнах в ФИАН

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

Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, 119991 Москва, Ленинский проспект, 53, тел.84951326462, solomon@sci.lebedev.ru

Представлены новые результаты мониторинга на миллиметровых волнах вертикального распределения озона над Москвой при стратосферном потеплении в январе-феврале 2010 г., а также в период образования сильного истощения озонового слоя (озонной «дыры») в Северном полушарии весной 2011 г. Полученные результаты указывают на сильное влияние крупномасштабных атмосферных процессов на стратосферный озон и важность мониторинга озоносферы радиофизическими методами.

New results of millimeter-wave monitoring the atmospheric ozone vertical distribution over Moscow are presented both for stratospheric warming in January-February 2010 and for period of severe ozone depletion (ozone “hole”) in the Northern hemisphere in spring 2011. The results obtained demonstrate strong influence of large-scale atmospheric processes on the stratospheric ozone and importance of radio physical monitoring the ozonosphere.

Наблюдения атмосферного озона на миллиметровых волнах проводятся в Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН на частотах спектральной линии озона с центром на 142,2 ГГц (длина волны 2,1 мм) с 1987 г. [1]. В данной работе представлены новые результаты исследований вертикального распределения стратосферного озона (ВРО) над Москвой в периоды значительных изменений в озоносфере: при среднезимнем стратосферном потеплении в январе-феврале 2010 г., а также во время образования сильного истощения озонового слоя (озонной «дыры») в Северном полушарии весной 2011 г. Представленные данные позволяют судить также о межгодовых изменениях в озоносфере. Наблюдения ВРО производились с помощью оптимизированного спектрорадиометра, характеристики которого и методы наблюдений описаны в работах [2,3]. Однополосная шумовая температура спектрорадиометра составляет около 700 К при охлаждении входных каскадов жидким азотом и около 1500 К без охлаждения. На выходе спектрорадиометра установлен фильтровой анализатор спектра АС-96, который имеет 96 каналов (создан в ИПФ РАН с участием ФИАН). Этот анализатор спектра имеет расширенную полосу частот, равную 475 МГц (диапазон частот 75–550 МГц), и высокое спектральное разрешение в центре линии. Ширина каналов 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. При решении обратной задачи используется предложенный К.П.Гайковичем алгоритм основанный на методах Тихонова и статистической регуляризации. Оценки [1-3] показали, что 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 (в режиме работы приемника без охлаждения) не превышает 5–7% на высотах от 20 до 50 км, постепенно возрастающая в более низких и в более высоких слоях. По основным параметрам (чувствительности, точности восстановления профилей озона) аппаратура ФИАН соответствует мировому уровню инструментов такого типа. Получено хорошее соответствие результатов наблюдений в ФИАН и спутниковых данных [1-3].

В результате мониторинга было получено высотно-временное распределение озона, отражающее происходящие в озоносфере изменения. Пример такого распределения для холодного периода 2009-2010 гг. представлен на рис.1.

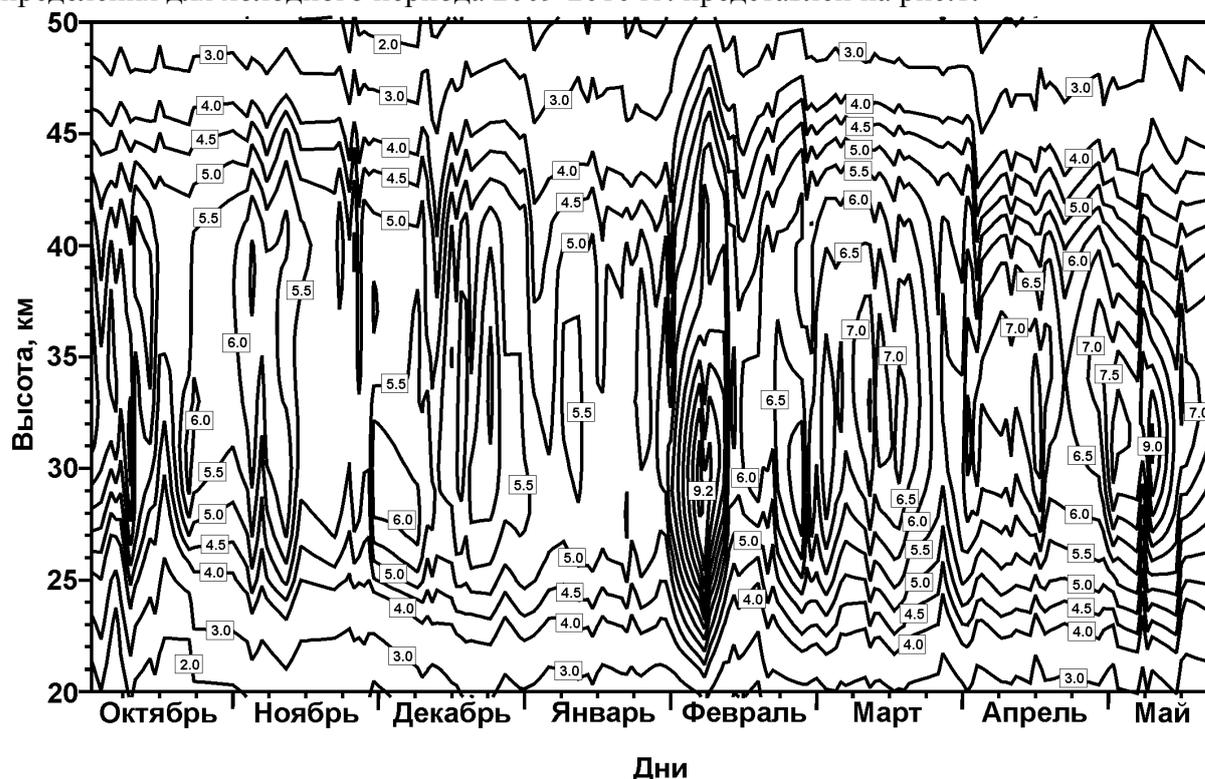


Рис.1. Высотно-временное распределения озона над Москвой в период с 01 октября 2009 г. по 20 мая 2010 года. Изолиниями показано содержание озона в единицах отношения смеси C_{O_3} (ppm, или 10^{-6}).

На этом рисунке изолиниями показано содержание озона в единицах отношения смеси C_{O_3} (ppm, или 10^{-6}). Хорошо видно значительное увеличение C_{O_3} в конце января-начале февраля 2010 г. в период среднезимнего стратосферного потепления. На рис.2 показаны профили ВРО, полученные перед началом (профиль от 3 января 2010 г.) и во время этого потепления (3 и 12 февраля 2010 г.). Для выяснения причин наблюдавшихся значительных изменений ВРО над Москвой проанализированы карты геопотенциальных высот, температуры, потенциальной завихренности PV [4] для ряда высотных уровней стратосферы Северного полушария, карты общего содержания озона, а также проведён траекторный анализ с помощью траекторных моделей Goddard automailer и NYSPLIT (NOAA HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory model) [5]. Эти изменения ВРО происходили в результате отклика озоносферы на указанное выше сильное среднезимнее возмущение циркуляции стратосферы, сопровождавшееся возникновением воздушных течений, которые переносили богатый озоном воздух из более низких широт в умеренные и высокие. Положение полярного вихря и его границы определялось методом расчётов максимума производной PV и с учётом максимума скорости ветра в соответствии с работой [6].

Причинами обнаруженного над Москвой пониженного содержания озона в январе (пример на рис.2, профиль ВРО для 3 января 2010 г.) явилось влияние на озоносферу процессов в полярном вихре, бедный озоном воздух которого появился в этот период в стратосфере над Москвой. В начале января 2010 г. полярный вихрь был слабо возмущенным, а к концу января и в первых числах февраля он был сжат под влиянием двух стратосферных антициклонов и сильно вытянут. Затем полярный вихрь распался

на две части. Причиной увеличения озона в конце января - начале февраля 2010 г. (пример на рис.2, профиль ВРО, зарегистрированный 3 февраля 2010 г.) явилось появление богатого озонном воздуха над Москвой, связанное со струйным течением, окружающим вихрь.

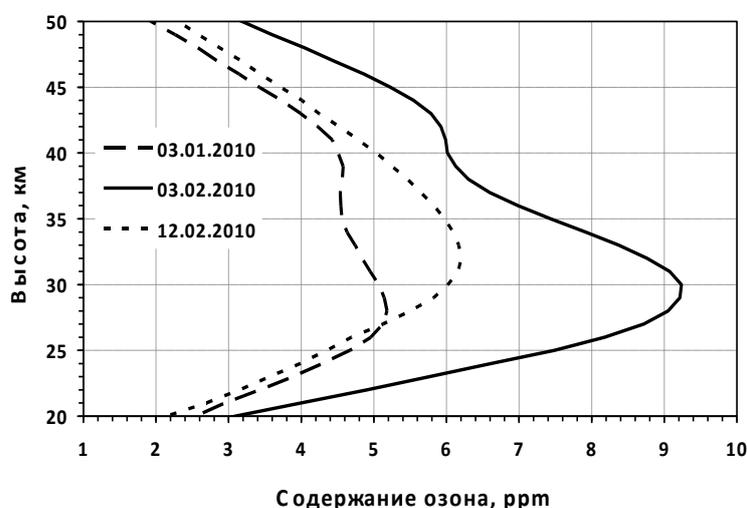


Рис.2. Профили вертикального распределения озона над Москвой, полученные перед началом стратосферного потепления (профиль ВРО от 3 января 2010 г.) и во время потепления (3 и 12 февраля 2010 г.).

Благодаря мониторингу озоносферы на ММ волнах в условиях перемещения вихря над Москвой удалось произвести «разрезы» края полярного вихря с пересечением окружающей вихрь сильной воздушной струи. Упомянутое увеличение содержания озона было зарегистрировано во время разреза по схеме «изнутри вихря наружу».

Особенностью воздуха этого струйного течения явилось измеренное на миллиметровых волнах значительное повышение содержания озона в нём, достигшее 9,2 ppт на высоте 30 км (пример на рис.2, профиль ВРО для 3 февраля 2010 г.), которое более, чем на 50% превышает среднемесячные значения для широты Москвы в январе. Траекторный анализ показал, что в этой струе на высотах около 30 км над Москвой оказались воздушные массы, принесённые из южной части Дальнего Востока, где располагалась обширная область с повышенным общим содержанием озона. В результате дальнейшего перемещения полярного вихря снова произошло пересечение («разрез») его края, но уже в направлении «снаружи внутрь». В этот период (9-20 февраля 2010 г.) полярный вихрь был уже не таким глубоким, как в начале января, изолированность вихря была ослаблена и внутрь вихря проникало всё больше богатого озонном воздуха умеренных широт. Поэтому профили озона внутри вихря (пример на рис.2, профиль ВРО, зарегистрированный 12 февраля 2010 г.) становятся близки к средним значениям, описываемым справочной моделью [7] для широты Москвы в феврале.

Таким образом, в результате мониторинга озоносферы на ММ волнах получены новые данные об особенностях структуры озонового слоя в области больших горизонтальных градиентов в полях озона, давления, температуры, потенциальной завихренности на границе окруженного сильной струёй полярного стратосферного вихря.

В отличие от холодного периода 2009-2010 гг., в холодное полугодие 2010-2011 гг. полярный вихрь был очень устойчивым и сохранялся необычайно долго - до середины апреля 2011 г., т.е. примерно на два месяца дольше, чем в предыдущий год. На рис.3 в качестве примера изменений в озоносфере весной 2011 г. представлены профили ВРО

над Москвой, полученные при наблюдениях 24, 30 марта и 7 апреля 2011 г. Следует отметить, что значительную часть времени центр интенсивного полярного вихря, сформировавшегося в это холодное полугодие, располагался вблизи Северного полюса.

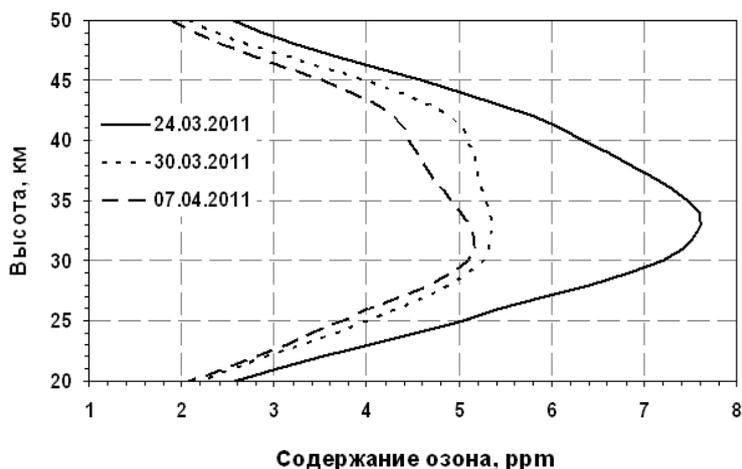


Рис.3. Профили вертикального распределения озона над Москвой, полученные при наблюдениях 24, 30 марта и 7 апреля 2011 г. в период существования озонной «дыры». Стратосфера над Москвой вне полярного вихря 24 марта 2011 г. и внутри полярного вихря 30 марта и 7 апреля 2011 г.

При этом стратосфера над Москвой была вне вихря. Например, 24 марта полярный вихрь продолжал быть интенсивным и центр его располагался вблизи Северного полюса. В отсутствие влияния полярного вихря, как это происходило 24 марта 2011 г., профили ВРО были близки к многолетним средним для марта значениям (пример на рис.3, профиль озона за 24 марта 2011 г.). При смещениях полярного вихря к Европе весной (в конце марта и в апреле) 2011 г. в стратосфере над Москвой оказывалась периферия аномально истощённой области озона (озонной дыры), а измеренное в ФИАН содержание озона над Москвой при этом уменьшалось на 30-35% относительно профилей озона вне вихря. Примеры таких профилей показаны на **рис.3** (профили за 30 марта и 7 апреля 2011 г.).

Отметим, что в предыдущие годы наиболее устойчивый и долгоживущий полярный вихрь в Северном полушарии возник в холодный период 1996-1997 гг., когда над Москвой на ММ волнах также было обнаружено значительное истощение озона под влиянием вихря [8]. Уменьшение озона над Москвой было зарегистрировано и в начале мая 1997 г. [8].

Вместе с тем, отличием атмосферных процессов холодного периода 2010-2011 гг. явилось то, что возросшая концентрация хлора, разрушающего озон, при низких температурах в воздухе полярного стратосферного вихря в холодный период 2010-2011 гг. привела к беспрецедентным потерям озона над высокими широтами, достигавшими 80% в слое на высоте около 20 км [9]. Большие потери озона в Северном полушарии в этот период, сопоставимые с истощением озонового слоя в озоновой дыре в Антарктике, наблюдались впервые. Это уникальное явление в Северном полушарии стало полной неожиданностью, поскольку пока ещё не существует надёжных прогнозов изменений озонового слоя [9]. Поэтому для оперативного обнаружения изменений в озоновом слое, в том числе озоновых дыр, необходимы дальнейшие исследования, включающие мониторинг вертикального распределения озона на миллиметровых волнах.

Полученные результаты указывают на сильное влияние крупномасштабных атмосферных процессов на стратосферный озон, на особенности межгодовых

изменений в озоносфере в условиях неконтролируемых техногенных нагрузок и изменений климата. Радиофизические методы мониторинга вертикального распределения озона дают уникальную информацию о процессах в озоносфере, в том числе в периоды образования озонных дыр, а также сильных стратосферных потеплений, и представляют важность для развития прогнозов эволюции озоносферы.

Работа поддержана Программами ОФН РАН «Современные проблемы радиофизики» и «Радиоэлектронные методы в исследовании природной среды и человека», а также грантом УНК ФИАН.

Литература

1. Соломонов С.В. Успехи соврем. радиоэлектроники. 2003. №1. С.9.
2. Соломонов С.В., Гайкович К.П., Кропоткина Е.П., Розанов С.Б., Лукин А.Н., Игнатьев А.Н. Известия вузов. Радиофизика. 2011, 54, №2, 113
3. Соломонов С.В., Игнатьев А.Н., Кропоткина Е.П., Логвиненко С.В., Лукин А.Н., Никифоров П.Л., Розанов С.Б. Приборы и техника эксперимента. 2009. №2, С.138.
4. The British Atmospheric Data Centre (BADC). [Электронный ресурс]. URL: http://badc.nerc.ac.uk/view/badc.nerc.ac.uk__ATOM__dataent_ASSIM
5. Draxler R.R., Rolph G.D. 2010 HYSPLIT (NOAA HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) Model, NOAA ARL READY Website NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring, MD
6. Nash E.R., Newman P.A., Rosenfield J.E., Shoerberl M.R. J.Geophys. Res. 1996, V. 101, No.D5, P.9471
7. Keating G.M., Chiou L.S., Hsu N.C. Adv. Space Res. 1996. V.18, No.9/10. P.11.
8. Соломонов С.В., Кропоткина Е.П., Лукин А.Н., Розанов С.Б. //Краткие сообщения по физике. 1998. №1. С.23.
9. Manney G.L., Santee M.L., Rex M. et al. Nature, 2011, V. 478, 10556, P.469.doi:10.1038