

УДК 551.510

ВЛИЯНИЕ КРУПНОМАСШТАБНЫХ АТМОСФЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ НА ВЕРТИКАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОЗОНА НАД МОСКВОЙ

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

Приведены результаты многолетнего мониторинга озоносферы над Москвой с помощью спектрорадиометра ФИАН на частотах спектральной линии озона с центром на 142.175 ГГц. Исследованы высотно-временное распределение содержания стратосферного озона и его изменения. Установлено, что наиболее значительные изменения в озоносфере происходят в холодные полугодия под влиянием крупномасштабных атмосферных возмущений, при перемещениях воздуха полярного вихря над Москвой. Пониженное содержание озона может сохраняться в средней стратосфере продолжительное время, достигая в отдельные периоды аномально низких значений.

Изучение изменений, происходящих в земной атмосфере, в ее озонном слое, является одним из важнейших направлений в современных научных исследованиях. Будущее состояние озонного слоя является неопределенным [1]. С одной стороны, уменьшение содержания техногенных хлоросодержащих веществ в стратосфере в соответствии с международными соглашениями должно привести к постепенному восстановлению озонного слоя. Вместе с тем увеличение содержания парниковых газов и глобальное потепление в нижней атмосфере, по всей видимости, может способствовать ускорению разрушения озона из-за увеличения содержания водяного пара и понижения температуры в стратосфере, а также из-за изменений динамики атмосферы и возрастания вероятности образования полярных стратосферных облаков [1]. Для лучшего понимания причин истощения озонного слоя и прогнозирования будущих изменений в озоносфере необходимо знать, как влияют на озонный слой атмосферные химические и динамические процессы,

включая планетарные волновые процессы, процессы в полярном стратосферном вихре, которые, как известно [1], приводят к разрушению озонового слоя и к возникновению “озонной дыры” в Южном полушарии в полярном вихре над Антарктидой.

В то время как изучению изменений атмосферного озона в нижней стратосфере на высотах 15 – 25 км посвящено большое число исследований [1], значительно менее изучено вертикальное распределение озона выше 25 км в труднодоступных для других методов верхних слоях стратосферы и в мезосфере. Благодаря проводимому в ФИАН мониторингу озоносферы на миллиметровых волнах стало возможным наблюдать за высотно-временным распределением озона над Москвой как в нижних, так и в средних и верхних слоях стратосферы и мезосферы [2].

Мониторинг озонового слоя проводится с помощью спектрорадиометра ФИАН на частотах вращательного перехода в молекулах озона с центром на 142.175 ГГц. Погрешность восстановленного профиля озона не превышает 5-7% для высот 20–50 км и 20–30% в слоях 15–20 и 50–75 км. Спектрорадиометр ФИАН был включен в состав глобальной озонометрической сети по международным программам DYANA (1990 г.), CRISTA/MAHRSI (1994 и 1997 гг.), SOLVE 2000 (1999-2000 гг.). Результаты дистанционного зондирования озонового слоя над Москвой хорошо согласуются с озонозондовыми и спутниковыми данными [2].

В результате многолетнего мониторинга исследовано высотно-временное распределение содержания озона, зарегистрированы сезонные изменения этой малой газовой составляющей атмосферы. На рис. 1а в качестве примера показан сезонный ход содержания озона на 35 км над Москвой за период 1996–2003 гг. в принятых в литературе (см., например, [1]) единицах отношения смеси – в миллионных долях по объему (*ppm*, или 10^{-6}). Тенденция к понижению содержания озона над Москвой, как это можно видеть на рис. 1а, наблюдается в конце лета – начале осени каждого года. Причиной, вызывающей годовой ход озона, является сезонная изменчивость атмосферных процессов, влияющих на озон [1]. Имеется широтная зависимость годового хода содержания озона. В качестве примера на рис. 2 представлены изменения среднемесячного содержания озона на высоте 30 км над Москвой (55° с.ш., 37° в.д.), построенные по результатам регулярных наблюдений на ММ волнах в ФИАН с 1996 по 2003 гг. [2] и над островом Шпицберген (79° с.ш., 12° в.д.) с 1996 по 2000 гг. [3]. Различие в развитии атмосферных процессов над средними и высокими широтами приводит к сдвигу фазы между этими двумя колебаниями и, как следствие, к более низким среднемесячным значениям содержания озона над Москвой в декабре и январе.

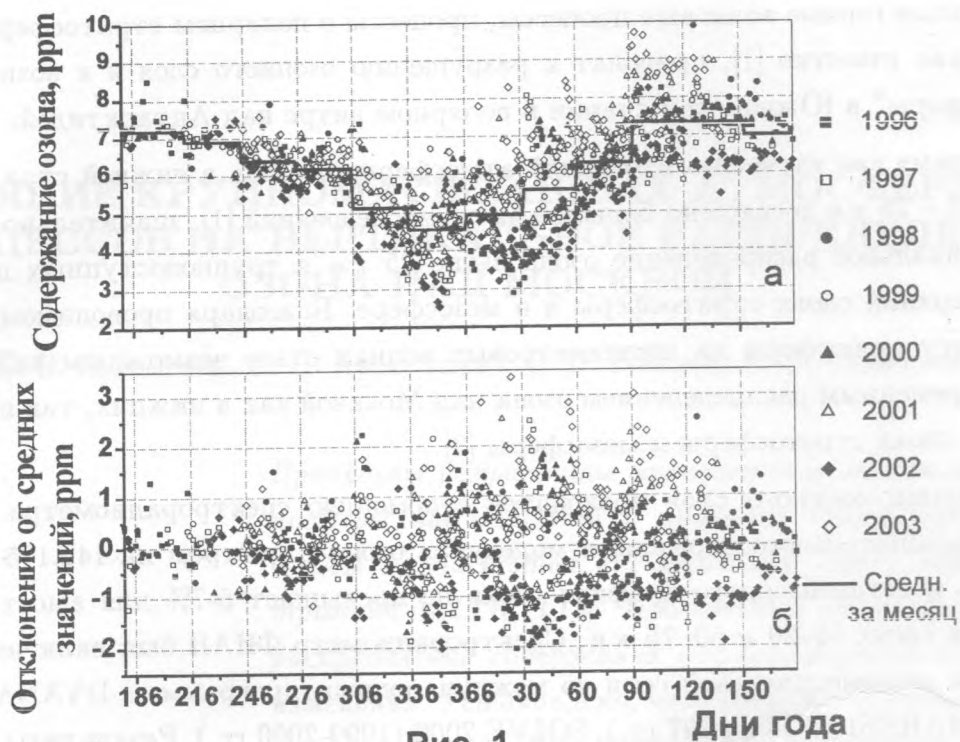


Рис. 1.

Рис. 1. а – сезонный ход содержания озона на высоте 35 км над Москвой за период 1996–2003 гг., также показаны среднемесячные значения содержания озона; б – короткопериодные изменения содержания озона на 35 км.

Наблюдаемые сезонные изменения содержания озона качественно соответствуют данным справочной модели озоносферы COSPAR [4]. Действительно, близкие к данным этой модели максимальные среднемесячные значения содержания озона над Москвой зарегистрированы в теплые полугодия, а минимальное среднемесячное содержание озона, например, на 30, 35 и 40 км над Москвой достигается в декабре, как и в этой справочной модели. Вместе с тем, было обнаружено, что среднемесячные значения содержания стратосферного озона, зарегистрированного в холодные полугодия методами ММ волн, заметно меньше данных модели [1]. Это отклонение может быть связано не только с локальными особенностями вертикального распределения озона (ВРО) над Москвой, но также и с долговременными изменениями в озоносфере [1], происшедшими со времени спутниковых измерений озона (конец 70-х – начало 80-х гг.), положенных в основу справочной модели [4]. Помимо годового хода озона на ММ волнах зарегистрированы также более короткопериодные изменения, образующие “шум” озоносферы с характерными

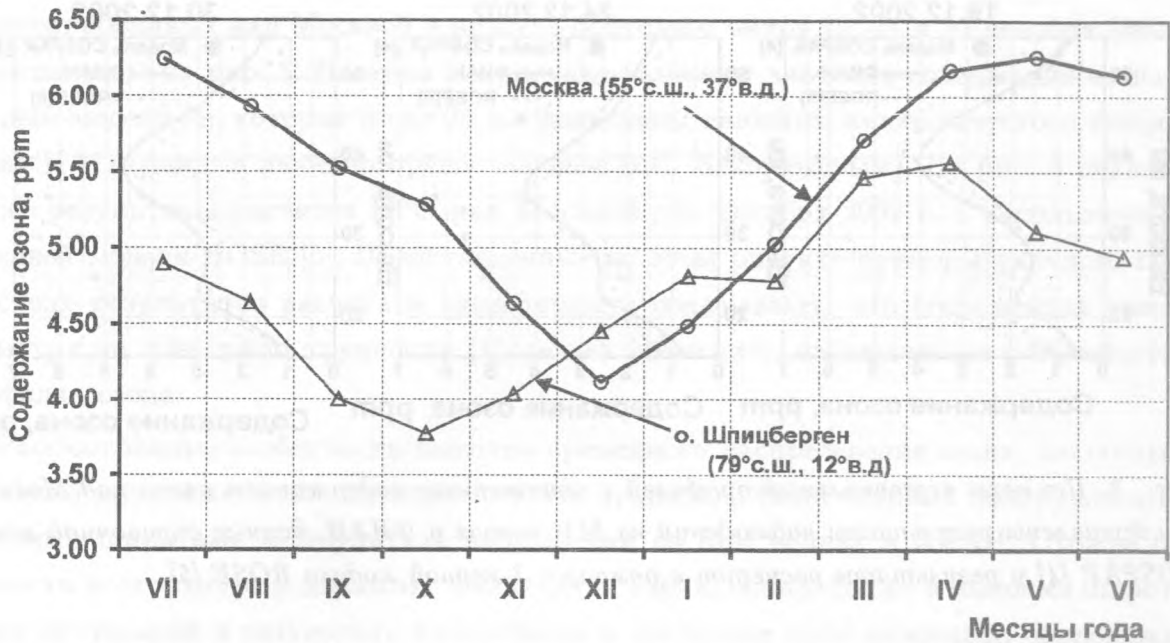


Рис. 2. Изменения среднемесячных значений содержания озона на 30 км над Москвой и о. Шпицберген.

временами вариаций от нескольких дней до нескольких недель. Наблюдения показали, что пониженное содержание озона может сохраняться в средней стратосфере над Москвой продолжительное время, достигая в отдельные периоды аномально низких значений (примеры на рис. 3). Такие довольно продолжительные явления наблюдались над Москвой в течение всего января 1996 г., всего декабря 1997 г. и декабря 1998 г., происходили с небольшими перерывами с конца ноября 1999 г. до первой декады февраля 2000 г., наблюдались с некоторыми перерывами с середины ноября 2001 г. до конца февраля 2002 г. и происходили также с небольшими перерывами с начала последней декады ноября 2002 г. до середины января 2003 г., а также с небольшими перерывами в ноябре, декабре 2003 г. и в январе 2004 г. В разнообразии сроков этих явлений отразились межгодовые различия состояния озоносферы.

Обнаруженной закономерностью явилось увеличение размаха колебаний содержания озона в условиях крупномасштабных атмосферных возмущений, усиливающихся в холодное полугодие, что качественно также соответствует данным модели [4]. На рис. 16 в качестве примера, иллюстрирующего такие колебания, показаны короткопериодные изменения содержания озона на 35 км, полученные из данных рис. 1а исключением составляющей годового хода озона.



Рис. 3. Примеры вертикальных профилей с пониженным содержанием озона над Москвой. Представлены результаты наблюдений на ММ волнах в ФИАН, данные справочной модели COSPAR [4] и результаты расчетов с помощью 3-мерной модели ROSE [5].

С целью изучения возможных причин этих изменений были изучены связи между ними и вариациями других характеристик атмосферы. В результате было установлено, что наиболее значительные изменения в озоносфере происходили в условиях крупномасштабных атмосферных возмущений, а пониженное содержание озона возникало при перемещениях воздуха полярного вихря над Москвой.

Здесь и ниже используются принятые в литературе термины “полярный вихрь”, воздух “внутри вихря” и “вне вихря”, “граница полярного вихря” для обозначения областей стратосферы, разграниченных струей сильного ветра и различающихся содержанием газов-трассеров, значением потенциальной завихренности и ее большим градиентом на границе полярного вихря (см., например, [1]).

Выяснилось, что географическое расположение пункта наблюдений в Москве оказывается удобным для изучения изменений вертикального распределения озона как в воздухе полярного вихря при перемещениях полярного вихря над средними широтами, так и вне его. Наблюдения показали, что даже относительно небольшие перемещения полярного вихря в высоких широтах, связанные с развитием планетарных волн, могут вызывать заметные изменения содержания озона над Москвой.

В холодные полугодия в стратосфере над Москвой нередко наблюдались явления, при которых происходила значительная деформация вертикального распределения озона, связанная с развитием планетарных волн. Такие ВРО отличаются от данных справочной модели пониженным содержанием озона, а в ряде случаев и локальным мини-

мумом, расположенным, как правило, вблизи 25–30 км. Примеры таких профилей, зарегистрированных над Москвой в воздухе полярного вихря 19, 24 и 30 декабря 2002 г., представлены на рис. 3. На этом же рисунке нанесены значения содержания озона по данным модели [4], которые ниже 25 км дополнены данными аэрологического зондирования ЦАО (данные любезно предоставлены В.И. Бекорюковым). На рис. 3 показаны также результаты расчетов ВРО над Москвой для декабря 2002 г. с использованием 3-мерной модели ROSE [5]. Представленные на этом рисунке примеры удачного соответствия результатов расчета и эксперимента показывают, что современная теория, несмотря на известные трудности [1], может объяснить наблюдаемые особенности в профилях озона.

Рассмотренные особенности высотно-временного распределения озона, связанные с влиянием крупномасштабных атмосферных процессов, были впервые обнаружены над средними широтами в результате наблюдений на ММ волнах в ФИАН. Схожие особенности в структуре и динамике озоносферы наблюдались также в высоких широтах обоих полушарий в результате проводимых в последние годы наземных, баллонных и спутниковых экспериментов [3, 6, 7].

Все эти результаты иллюстрируют общие черты закономерностей влияния атмосферных процессов на пространственно-временное распределение озона в средних и высоких широтах в период существования полярного вихря. Явления значительного уменьшения содержания озона на рассмотренных высотах охватывают огромную часть стратосферы, включающую не только высокие широты, но также и те области средних широт, куда смещается воздух полярного вихря.

Интересным результатом наблюдений озоносферы явилась обнаруженная особенность влияния атмосферных процессов на статистическое распределение содержания озона на отдельных высотных уровнях в средней стратосфере.

Для иллюстрации этой особенности на рис. 4а,б,в представлены графики (гистограммы) для отклонений содержания озона от соответствующих среднесуточных значений на 35 км над Москвой для трех периодов: осень (с 15 октября по 30 ноября, рис. 4а, всего 116 дней наблюдений), зима (с 18 января по 2 марта, рис. 4б, всего 229 дней наблюдений) и весна (с 4 марта по 15 апреля, рис. 4с, 203 дня наблюдений). Эти данные относятся к наблюдениям, выполненным с 1996 по 2004 гг.

Из вида гистограммы на рис. 4а следует, что в первом из указанных периодов распределение рассматриваемой случайной величины характеризуется одной модой (одним наиболее вероятным значением содержания озона). В этот период воздух в стратосфере

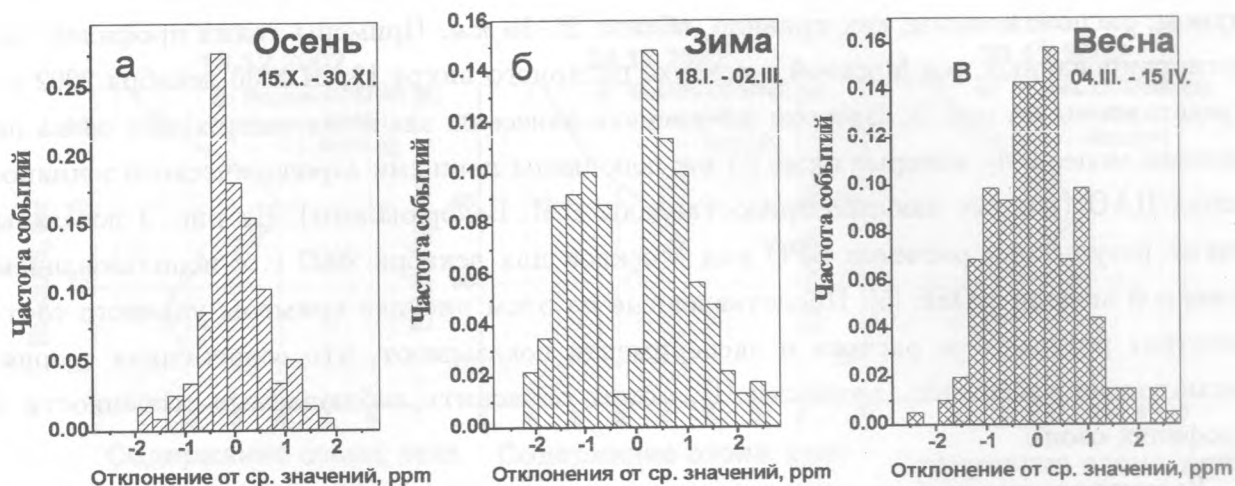


Рис. 4. Гистограммы для отклонений содержания озона на 35 км от средних значений для трех периодов: а) с 15 октября по 30 ноября, б) с 18 января по 2 марта, в) с 4 марта по 15 апреля.

сравнительно однороден, среднее за период значение содержания озона равно 5.5 ppт, среднее квадратическое отклонение составляет 0.64 ppт. Второй период характеризуется примерно таким же средним значением озона, как и первый. Но, в отличие от первого периода, во втором периоде происходит частое перемещение воздуха полярного вихря к средним широтам, вызванное значительной интенсивностью планетарных волн. Соответствующее этому периоду среднее квадратическое отклонение составляет уже 1.15 ppт. В это время в стратосфере над Москвой могут наблюдаться воздушные массы, связанные либо с полярным вихрем, т.е. имеющие пониженное содержание озона, либо не принадлежащие вихрю, с более высоким содержанием озона. Отражающее это явление распределение является бимодальным (рис. 4б). Это означает, что содержание озона на 35 км в стратосфере над Москвой в этот период редко принимает среднее значение, заметно отклоняясь от него то в одну, то в другую сторону. Продолжительное существование в стратосфере Северного полушария этих двух воздушных масс является свидетельством относительной изолированности воздуха вихря от воздуха более низких широт. Анализ показал, что частота событий, при которых над Москвой появляется та или другая воздушная масса, зависит от особенностей крупномасштабных динамических процессов в Северном полушарии, и в этой частоте проявляется межгодовая изменчивость, включающая известную квазидвухлетнюю периодичность в атмосферных процессах [1]. Важно отметить, что обнаруженная бимодальная особенность распределения озона над Москвой характерна для слоев на высотах между 25 и

45 км. Она не проявляется в нижних слоях стратосферы (и в общем содержании озона) из-за специфики динамических процессов в этих слоях [1]. Нет этой особенности и в верхних слоях стратосферы выше 45 км, т.е. в фотохимической области озоносферы, что вызвано возрастанием роли фотохимических процессов, приводящих к равновесному состоянию в озоносфере на больших высотах. В весенние месяцы в результате интенсивного перемешивания воздуха зимой происходит постепенное увеличение содержания озона в средней стратосфере внутри полярного вихря и наблюдается тенденция к постепенному уменьшению контраста между содержанием озона внутри вихря и вне его к концу холодного полугодия. При этом поле содержания озона над Москвой становится все более однородным и характеризуется одномодовым распределением. На рис. 4в представлено соответствующее распределение содержания озона в весенний период на 35 км с одной модой, со средним значением содержания озона 6.8 *ppm* и средним квадратическим отклонением 0.84 *ppm*.

Таким образом, в результате многолетнего мониторинга вертикального распределения атмосферного озона над Москвой зарегистрированы короткопериодные, сезонные и межгодовые изменения в озоносфере. Установлено, что наиболее значительные изменения содержания озона обусловлены крупномасштабными атмосферными процессами в Северном полушарии, усилением планетарных волн в холодное полугодие. Пониженное содержание озона в средней стратосфере, часто наблюдаемое в холодное полугодие над Москвой, возникает в результате появления воздуха полярного вихря, в котором происходит разрушение озона.

Авторы глубоко признательны члену-корреспонденту РАН И.И. Сობельману за внимание и поддержку работы, а также А.Н. Лукину и В.Н. Леонову за помощь в проведении наблюдений и обработке результатов.

Работа поддержана грантами РФФИ N 03-02-17436, "Ведущие научные школы" НШ-1254.2003.2, ФЦП "Интеграция", ФЦНТП, а также по программе фундаментальных исследований ОФН РАН "Проблемы радиофизики".

ЛИТЕРАТУРА

- [1] World Meteorological Organization (WMO), Scientific Assessment of Ozone Depletion: 1998, Global Ozone Res. and Monitoring Project, Geneva, 1999.
- [2] Соломонов С. В. Успехи современной радиоэлектроники, N 1, 9 (2003).

- [3] Langer J., Barry B., Klein U. et al. Geophys. Res. Lett., **26**, No. 5, 599 (1999). <http://www.ram.uni-bremen.de>
- [4] Keating G. M., Chiou L. S., Hsu N. C. Adv. Space Res., **18**, No. 9/10, 11 (1996).
- [5] Rose K., Brasseur G. J. Geophys. Res., **94**, No. D13, 16387 (1989). <http://www.ncar.ucar.edu/ncar>
- [6] Austin J., Hofmann D. J., Butchart N., Oltmans S. J. Geophys. Res. Lett., **22**, No. 18, 2489 (1995).
- [7] Kawa S. R., Bevilacqua R. M., Margitan J. J. et al. J. Geophys. Res., **108**, No. D5, 8310, doi: 10.1029/2001JD001527,2002

Поступила в редакцию 30 декабря 2004 г.