

ИЗМЕНЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ОЗОНА В СТРАТОСФЕРЕ НАД МОСКВОЙ ПОД ВЛИЯНИЕМ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ХОЛОДНЫЙ ПЕРИОД 2015–2016 ГГ.

Е. П. Кропоткина¹, С. В. Соломонов¹, С. Б. Розанов^{1,2},
А. Н. Игнатьев¹, А. Н. Лукин¹

Представлены новые данные об изменениях вертикального распределения стратосферного озона над Москвой в холодное полугодие 2015–2016 гг. Этот период значительно отличался от предыдущих зим по ряду параметров стратосферы. Рассмотрены особенности этих изменений озона и изучена их связь с динамикой стратосферы. Наиболее значительное понижение содержания озона по сравнению со средними значениями его содержания наблюдалось в начале марта 2016 г. Развитию дальнейшего сильного истощения озонового слоя, подобного возникшему весной 2011 г., помешало сильное внезапное стратосферное потепление в марте 2016 г.

Ключевые слова: озон, внезапное стратосферное потепление.

Стратосферный озон жизненно необходим для существования человека и всей экосистемы [1]. Понижение содержания озона приводит к увеличению достигающего земной поверхности вредного для биосферы УФ-Б излучения Солнца, которое может привести к снижению иммунитета, развитию различных заболеваний населения [1]. Важно также, что эта газовая составляющая участвует в динамических и химических процессах, влияет на тепловой режим стратосферы и мезосферы.

Истощение озонового слоя является одной из основных экологических и геофизических проблем. На состояние озоносферы, помимо техногенных факторов, огромное влияние оказывают естественные процессы. Наиболее значительное разрушение озона происходит в полярном стратосферном вихре – атмосферном образовании, возника-

¹ ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: kep@sci.lebedev.ru.

² ФГУП “ВНИИФТРИ”, 141570 Россия, Московская обл., Солнечногорский р-н, п/о Менделеево.

ющем каждый год в холодные полугодия и охватывающем обширные области как в Южном, так и в Северном полушариях [1].

Важной задачей является установление связей изменений вертикального распределения озона (ВРО) с глобальными процессами, которые, как известно [1], характеризуются большой межгодовой изменчивостью. Эти данные необходимы для проверки численных моделей атмосферы, для прогнозов и оценок влияния изменений стратосферного озона на температуру, циркуляцию и климат в тропосфере [1, 2].

Наблюдения вертикального распределения озона над Московским регионом выполняются в Физическом институте им. П. Н. Лебедева РАН с 1987 г. С помощью высокочувствительного спектрометра регистрируется уширенная атмосферным давлением спектральная линия озона с центром на 142.2 ГГц (длина волны 2.1 мм) [3]. Эта линия содержит информацию о вертикальном распределении озона в стратосфере и мезосфере. Для восстановления профиля ВРО из измеренной спектральной линии озона используется алгоритм, основанный на методах Тихонова и статистической регуляризации [3]. Анализ результатов наблюдений проводится по методике, описанной в работе [4] с использованием базы данных BADC [5]. Получено хорошее согласие результатов наблюдений озона в ФИАН со спутниковыми данными [3]. Погрешность регистрируемого вертикального распределения озона не превышает 5–7% на высотах от 20 до 50 км, постепенно возрастающая в более низких и в более высоких слоях.

Ниже представлены новые данные об изменениях вертикального распределения озона в средней стратосфере над Москвой в холодный период 2015–2016 гг. Этот период значительно отличался от предыдущих зим по ряду параметров стратосферы. Рассмотрены особенности этих изменений озона и изучена их связь с динамикой стратосферы.

На рис. 1 показано высотно-временное распределение озона над Москвой в слое от 20 до 50 км в период с ноября 2015 г. по март 2016 г. Изолиниями обозначено содержание озона в единицах молярного отношения смеси C_{O_3} озона ppm (parts per million), или 10^{-6} . Хорошо видны вариации озона во всём этом слое стратосферы. Для более наглядного представления особенностей временного хода C_{O_3} в средних слоях стратосферы для этого периода на рис. 2 показаны значения C_{O_3} на барическом уровне 10 мбар (высота около 30 км) над Москвой. Точками обозначены исходные экспериментальные данные, толстой линией – сглаженные по 10 дням значения C_{O_3} . Пунктиром на этом рисунке показаны средние значения сезонного хода озона $\overline{C_{O_3}}$, полученные на основании анализа результатов наблюдений в ФИАН за период с 1996 по 2016 гг. Изучение

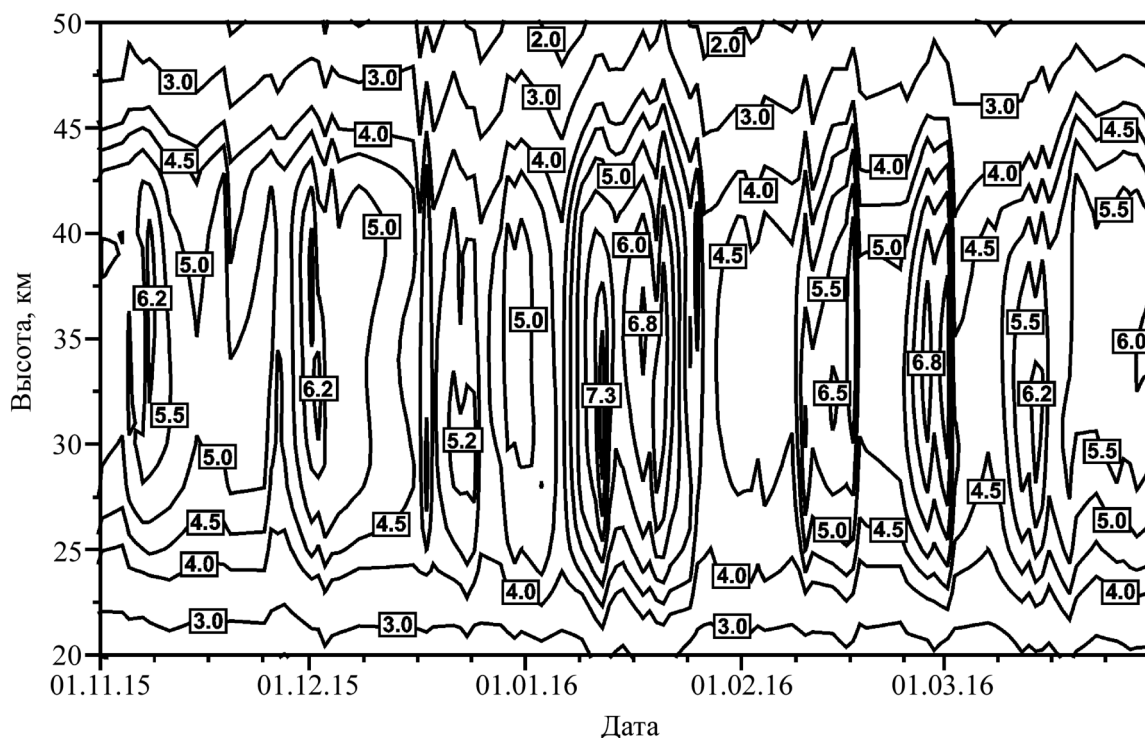


Рис. 1: Высотно-временное распределение озона в холодное полугодие с ноября 2015 г. по март 2016 г. Изолиниями показано содержание озона в единицах отношения смеси C_{O_3} (ppm, или 10^{-6}).

вариаций озона на этих высотах (около 30 км) важно в связи с ожидаемым увеличением разрушения озона в химических реакциях с участием азотных составляющих [1].

На рис. 2 видно, что значительную часть времени содержание озона в это полугодие было ниже средних значений $\overline{C_{O_3}}$ (показано штриховкой). Такие понижения C_{O_3} наблюдались уже в ноябре и декабре 2015 г., а наиболее значительные понижения озона происходили в конце января, в начале и во второй половине февраля, в марте 2016 г. Понижения содержания озона зарегистрированы также и на других высотных уровнях. Существенно, что содержание озона изменялось в значительных пределах. Например, в январе размах колебаний C_{O_3} на уровне 10 мбар составил $> 50\%$ от упомянутых выше многолетних средних значений отношения смеси озона.

Анализ показал, что наблюдавшиеся изменения озона в средней и нижней стратосфере связаны с её динамикой, с эволюцией основных барических систем стратосферы – полярного стратосферного вихря и областей высокого давления на периферии полярного вихря.

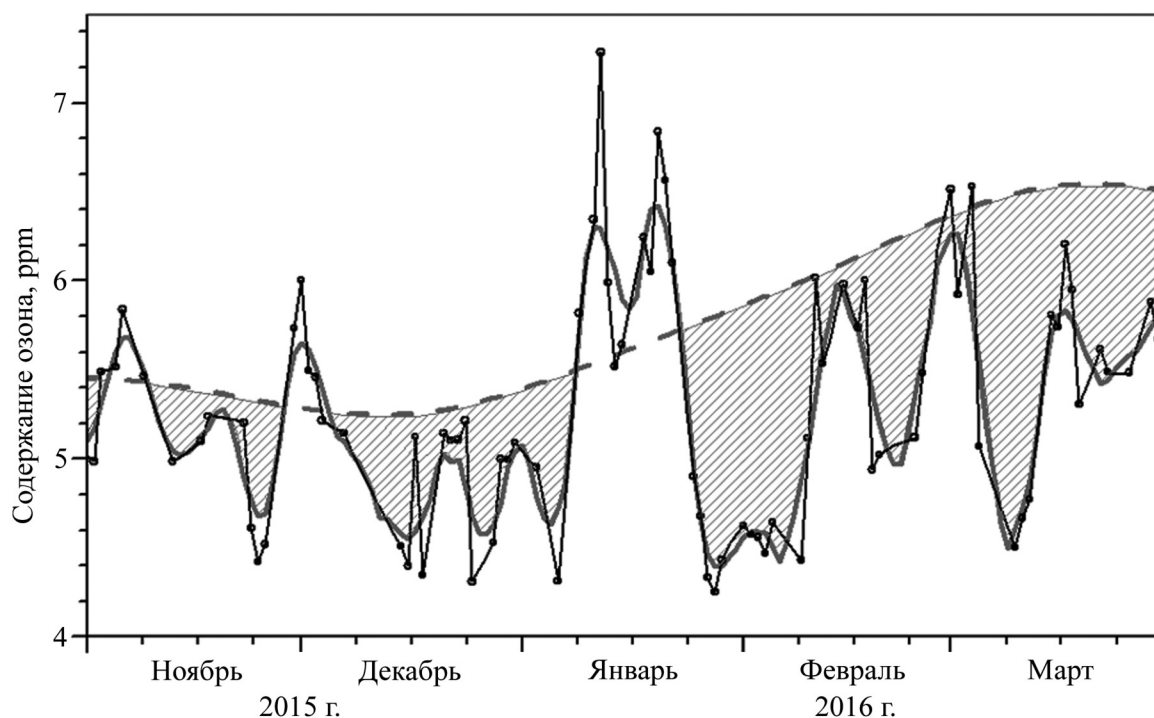


Рис. 2: Содержание озона (отношение смеси) на барическом уровне 10 мбар (высота около 30 км) над Москвой. Точки – экспериментальные данные, толстая сплошная линия – сглаженные по 10 дням значения C_{O_3} , пунктир – многолетние средние значения сезонного хода озона $\overline{C_{O_3}}$ (данные ФИАН). Штриховка – пониженное содержание озона.

Полярный стратосферный вихрь в холодное полугодие 2015–2016 гг. характеризовался рядом особенностей. Этот вихрь усиливался в ноябре–декабре 2015 г. быстрее, чем долгоживущий полярный вихрь в 2010–2011 гг. [5], в холодном воздухе которого весной 2011 г. возникла озонная дыра [6]. В начале холодного полугодия 2015–2016 гг. наблюдалась слабая активность планетарных волн, центральная часть полярного вихря (область минимума геопотенциальной высоты) по декабрь 2015 г. включительно располагалась в полярной области в пределах широтного круга с границей около 80° с.ш. Высокая интенсивность вихря привела к изолированности заключённого в вихре воздуха от внешних воздушных масс. В силу большой площади, занимаемой вихрем, холодный воздух его края появлялся в средней стратосфере над Москвой в ноябре, в середине и в конце декабря 2015 г. При этом наблюдалось пониженное содержание озона (рис. 2).

В январе 2016 г. возрастают амплитуды первых двух гармоник $n = 1$ и $n = 2$ планетарных волн на уровне 10 мбар. При этом центр вихря сильнее смещается от

полюса к широтному кругу 70° с.ш. В результате роста амплитуд планетарных волн после 8 января вихрь деформировался, площадь его стала уменьшаться, стратосфера над Москвой оказалась вне вихря, содержание озона возросло. Увеличение содержания озона в январе 2016 г. (рис. 1, рис. 2) было вызвано появлением над Москвой воздуха из области повышенного давления из более низких широт.

В конце января – начале февраля 2016 г. амплитуда планетарной волны с $n = 1$ на уровне 10 мбар достигла максимального значения, превышающего 1600 гп. м. В результате такой высокой волновой активности произошло сильное смещение вихря из полярной области к более низким широтам. При этом воздух вихря вновь оказался в стратосфере над Москвой. На рис. 3 показаны карты потенциальной завихренности на уровне с потенциальной температурой $\Theta = 850$ К [5], близком к уровню с давлением 10 мбар. На карте слева видно, что 4 февраля 2016 г. стратосфера над Москвой находилась внутри полярного вихря, вблизи его края, обозначенного серым цветом. Этот вихрь, вращающийся против часовой стрелки, имел в это время форму, вытянутую вдоль 0 и 150° меридианной оси и охватывал не только полярную область, но также и большое пространство над средними широтами Европы и Азии. Появление воздуха этого вихря сопровождалось отмеченным выше значительным снижением содержания озона над Москвой (рис. 1, рис. 2).

В конце февраля – начале марта вихрь приобрёл ещё более вытянутую форму. Он сильно сместился от Северного полюса к северной части Европы и к Сибири. В этот период стратосфера над Москвой оказалась вне вихря и характеризовалась возросшим содержанием озона (рис. 1, рис. 2).

Вихрь начал разрушаться в марте в период сильного стратосферного потепления, перешедшего в весеннюю перестройку циркуляции стратосферы. В начале марта 2016 г. были выполнены условия мажорного стратосферного потепления [7]: произошло резкое ослабление и следующий за ним реверс зонального ветра на уровне 10 мбар, усреднённого вдоль параллели 60° с.ш. Изменился знак разности среднезональных температур между параллелями 85° с.ш. и 60° с.ш. на том же уровне 10 мбар. Помимо того, что полярный вихрь сильно сместился от полюса, 12 марта 2016 г. произошло его разделение на две части. Судя по картам потенциальной завихренности, разрушение вихря сопровождалось перемешиванием воздушных масс вихря с воздухом из более низких широт.

На рис. 3 (справа) показано изменение формы полярного стратосферного вихря 9 марта 2016 г. во время стратосферного потепления. Видно, что стратосфера над Моск-

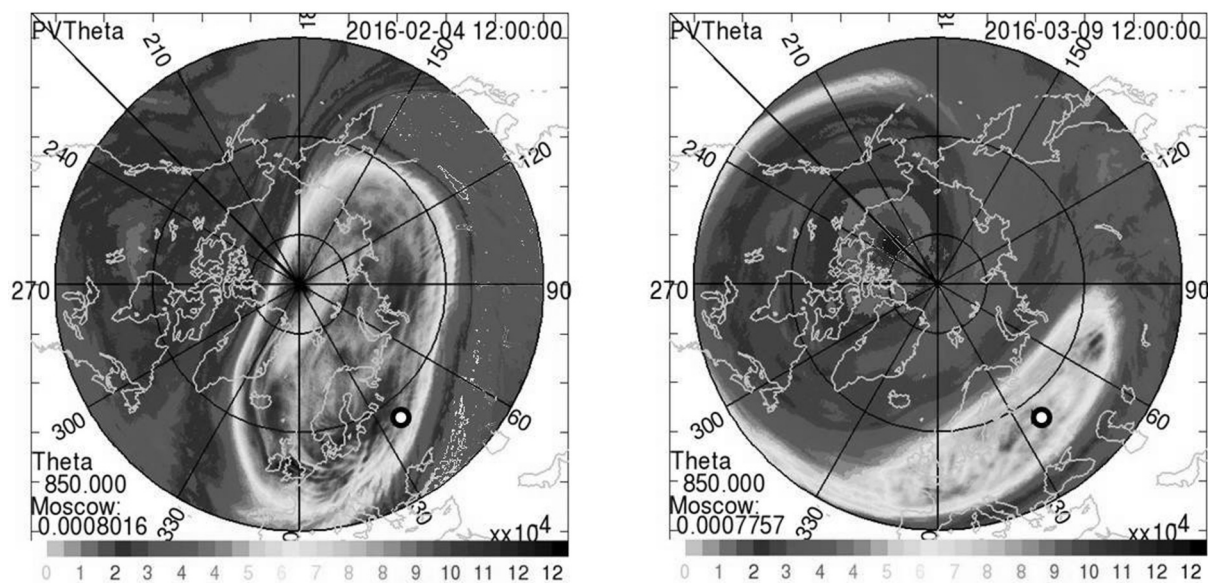


Рис. 3: Полярный стратосферный вихрь (обозначен светло-серым цветом) на картах потенциальной завихренности Северного полушария (до широты $40^\circ N$) на уровне потенциальной температуры 850 К 4 февраля (слева) и 9 марта 2016 г. (справа) по данным BADC [5]. Кружком отмечено положение Москвы.

вой находилась внутри полярного вихря. Пониженное содержание озона над Москвой в это время (рис. 1, рис. 2) было вызвано его истощением в полярном вихре. На этой карте видно как при разрушении вихря с центром над Европой из него вытягивается длинный шлейф воздушных масс, пересекающий стратосферу над Атлантическим океаном, Америкой и закручивающийся вокруг антициклона, расположенного севернее Канады.

В условиях интенсивного вихря в 2015–2016 гг. можно было ожидать значительного истощения озонового слоя по аналогии с процессами в 2010–2011 гг. [6, 8]. Низкие температуры в воздухе холодного необычайно устойчивого долгоживущего полярного вихря 2010–2011 гг. наблюдались до апреля 2011 г. [5]. Возникшие при таких температурах полярные стратосферные облака привели к разрушению озона в химических реакциях с участием хлора, к возникновению упомянутой выше озонной дыры весной 2011 г. Истощение озона в этот период было зарегистрировано также над Москвой [9].

В холодное полугодие 2015–2016 гг. уже в начале декабря в вихре сложились экстремальные температурные условия [5]. При этом минимальная температура в нижней стратосфере на уровне 50 мбар (высоты около 20 км) опустилась ниже порога образо-

вания полярных стратосферных облаков. В декабре 2015 г. и январе 2016 г. воздух в вихре был холоднее, чем в декабре 2010 г. и в январе 2011 г. [5]. Однако, несмотря на эти экстремальные условия в вихре в 2015–2016 гг., весеннего истощения озонного слоя в 2016 г., аналогичного истощению весной 2011 гг., не возникло. Действительно, температура в области холода в вихре в 2016 г. начала расти в конце февраля и из-за внезапного стратосферного потепления уже в первой половине марта превысила пороговые значения температуры образования полярных стратосферных облаков. Разрушение вихря во время стратосферного потепления, рост температуры в области холода привели к тому, что потери озона в стратосфере весной 2016 г. не достигли соответствующих значений в 2011 г. На картах потенциальной завихренности по данным BADC [5] хорошо видно перемешивание воздуха частей вихря с окружающим их воздухом средних широт в средней и нижней стратосфере в марте 2016 г. Эти процессы отразились на содержании озона, которое возросло в стратосфере над Москвой к середине марта (рис. 1, рис. 2).

Связь изменений озона с динамическими процессами характеризовалась высоким значением коэффициента корреляции между содержанием озона и потенциальной завихренностью. Этот коэффициент составил 0.76 (с надёжностью 0.99) для связи между содержанием озона на уровне 10 мбар и потенциальной завихренностью на уровне с $\Theta = 850$ К над Москвой в период с декабря 2015 г. по март 2016 г.

Таким образом, особенностью холодного периода 2015–2016 гг. являлось возникновение интенсивного полярного стратосферного вихря, который усиливался быстрее долгоживущего вихря 2010–2011 гг., в холодном воздухе которого весной 2011 г. возникла озонная дыра. Влияние полярного вихря на озон в средних широтах над Москвой в холодный сезон 2015–2016 гг. проявилось в тенденции озона к понижению его содержания в зимне-весенний период. Наиболее сильное весеннее снижение озона возникло при появлении воздуха вихря над Москвой в первой половине марта 2016 г. Внезапное стратосферное потепление в марте 2016 г., перешедшее в весеннюю перестройку циркуляции атмосферы, помешало дальнейшему сильному истощению озона, подобному возникшему весной 2011 г.

Резюмируя, следует отметить большое влияние динамики атмосферы на содержание озона над Москвой. Как показано выше, изменения, отражающие особенности высотно-временного распределения озона, могут варьироваться в широких пределах в зависимости от эволюции основных барических систем стратосферы.

Представленные новые данные об изменениях содержания озона над Москвой в 2015–2016 гг., в том числе в условиях стратосферного потепления весной 2016 г., позво-

ляют лучше понять особенности связи вертикального распределения озона с динамикой стратосферы. Эти данные важны для их учёта при оценках трендов озона, а также в численных моделях атмосферы, для прогнозирования изменений стратосферного озона.

Авторы выражают глубокую благодарность чл.-корр. РАН В. А. Черепенину, профессорам В. Н. Сорокину и Е. В. Суворову 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 исследованиях природной среды и человека”.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2014 World Meteorological Organization Global Ozone Research and Monitoring Project—Report No. 55 World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland. 2014 [Электронный ресурс]: <http://www.esrl.noaa.gov/csd/assessments/ozone/2014/report.html>
- [2] N. Calvo, L. M. Polvani, and S. Solomon, *Environ. Res. Lett.* **10**, 094003 (2015), doi:10.1088/1748-9326/10/9/094003.
- [3] С. В. Соломонов, К. П. Гайкович, Е. П. Кропоткина и др., *Известия вузов. Радиофизика* **54**(2), 113 (2011).
- [4] С. В. Соломонов, Е. П. Кропоткина, С. Б. Розанов и др., *Краткие сообщения по физике ФИАН* **41**(3), 3 (2014).
- [5] The British Atmospheric Data Centre (BADC). URL: http://badc.nerc.ac.uk/view/badc.nerc.ac.uk_ATOM_dataent_ASSIM.
- [6] G. L. Manney, M. L. Santee, M. Rex, et al., *Nature* **478**, 10556, 469 (2011), doi:10.1038/nature10556.
- [7] A. J. Charlton and L. M. Polvani, *J. Climate* **20**, 449 (2007).
- [8] G. L. Manney and Z. D. Lawrence, *Atmos. Chem. Phys.* **16**(23), 15371 (2016), <https://doi.org/10.5194/acp-16-15371-2016>.
- [9] С. В. Соломонов, Е. П. Кропоткина, С. Б. Розанов и др., *Краткие сообщения по физике ФИАН* **39**(10), 3 (2012).

Поступила в редакцию 12 января 2017 г.