

УДК 551.510

## ИЗМЕНЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОЗОНА НАД МОСКВОЙ В ПЕРИОД ВНЕЗАПНОГО СТРАТОСФЕРНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ ЗИМОЙ 2012–2013 ГОДОВ

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

*Представлены новые результаты дистанционного зондирования атмосферного озона над Московским регионом в холодное полугодие 2012–2013 гг., включая период мажорного внезапного стратосферного потепления. Дано описание методов анализа результатов наблюдений вертикального распределения озона, полученного с помощью спектральной аппаратуры, работающей на частотах вращательной линии озона с центром на 142,175 ГГц. Рассмотрены особенности высотно-временного распределения стратосферного озона до, во время и после сильного возмущения динамики стратосферы в январе 2013 г. Проведено сравнение с результатами наблюдений озона в период предыдущего мажорного стратосферного потепления в 2009–2010 гг. Рассмотренные межгодовые различия и разнообразие особенностей динамических процессов, влияющих на вертикальное распределение озона, свидетельствуют о важности дальнейшего мониторинга атмосферного озона, что необходимо для развития численных климатических моделей, для прогнозов эволюции озоносферы и климата.*

**Ключевые слова:** озон, стратосфера, внезапное стратосферное потепление, спектральные измерения, дистанционное зондирование.

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

*Введение.* Озон защищает жизнь на Земле от губительного УФ-Б излучения Солнца. Этот газ играет также ключевую роль в тепловом режиме средней атмосферы, участвует в динамических и химических процессах [1]. Прогнозирование наблюдаемых изменений в озоносфере представляет собой сложную проблему. Для её решения большое значение имеет изучение высотно-временного распределения озона и его связи с происходящими в атмосфере процессами, с развитием полярных стратосферных вихрей [1]. Внутри полярного вихря, воздух которого изолирован от внешних воздушных масс, происходит разрушение озона. Например, сильное истощение озонового слоя весной 2011 года [2], возникшее в условиях низких температур в устойчивом полярном вихре, было зарегистрировано также и над Московским регионом [3].

Важной задачей являются наблюдения вертикального распределения озона (ВРО) в условиях нарушения циркуляции стратосферы, ярко выраженного в периоды внезапных стратосферных потеплений. Ниже приведены новые результаты спектральных измерений на миллиметровых волнах в Физическом институте им. П. Н. Лебедева РАН (ФИАН) высотно-временного распределения стратосферного озона над Московским регионом в холодное полугодие 2012–2013 гг. Рассмотрены особенности вертикального распределения озона до, во время и после сильного возмущения стратосферы в период мажорного (в соответствии с классификацией [4]) внезапного стратосферного потепления в январе 2013 г., сопровождавшегося разделением полярного вихря на две части. Проведено сравнение с результатами наблюдений озона в период предыдущего мажорного стратосферного потепления в 2009–2010 гг.

*Метод наблюдений и анализа результатов.* Дистанционное зондирование атмосферного озона проводится с помощью размещённого в Москве высокочувствительного спектрорадиометра [5, 6]. Регистрируется спектральная линия теплового излучения молекул 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 [5, 6].

Для восстановления вертикального распределения озона из измеренной спектральной линии используется предложенный К. П. Гайковичем алгоритм [5], 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].

Высотно-временное распределение озона на высотах 20–50 км над Москвой для холодного периода 2012–2013 гг. представлено на рис. 1. Изолиниями на этом рисунке показаны уровни равных значений содержания озона  $C_{O_3}$ . Значения  $C_{O_3}$  здесь и ниже даны в единицах отношения смеси ppm, или  $10^{-6}$ .

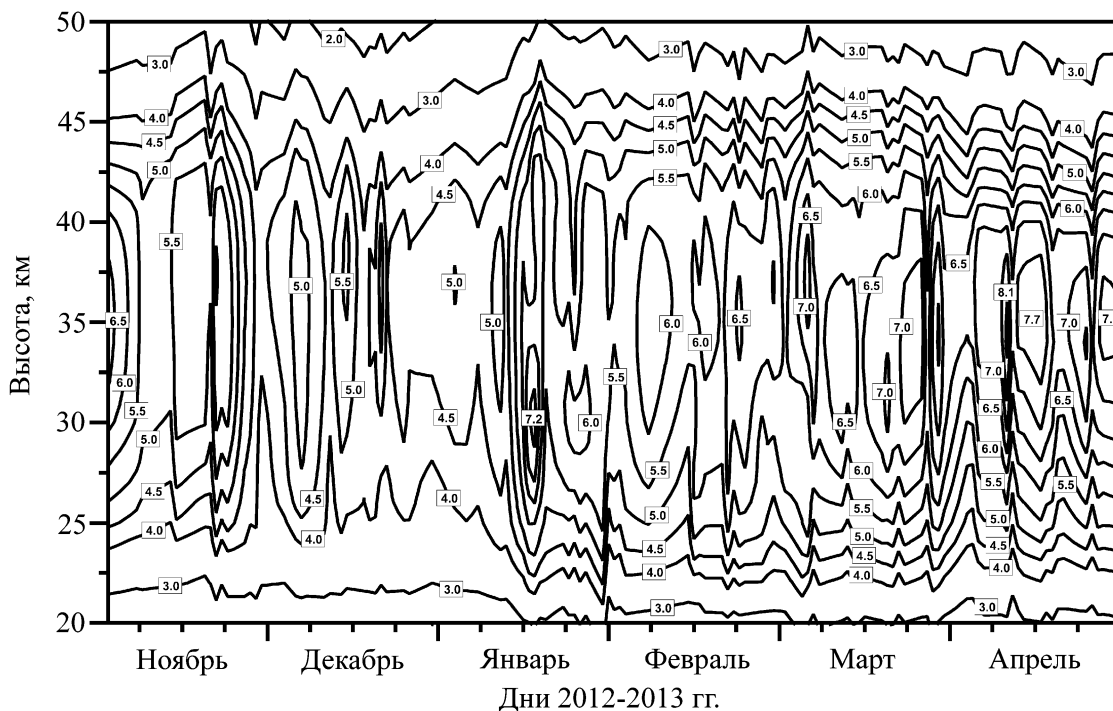


Рис. 1: Высотно-временное распределение озона над Москвой в холодное полугодие 2012–2013 гг.

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 возрастающая в более низких и в более высоких слоях [5]. 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 [5]).

Как показано ниже, наблюдаемые изменения ВРО связаны с возмущениями стратосферы. Методика, созданная для изучения этих возмущений, включает в себя анализ

карт геопотенциальных высот и температуры для ряда барических уровней стратосферы Северного полушария, карт потенциальной завихренности (potential vorticity, PV) для потенциальных температур, соответствующих исследуемым высотам стратосферы. Эти карты построены на основании данных BADC [7]. Возникшее в январе 2013 г. мажорное внезапное стратосферное потепление определялось по характерным для такого типа явлений признакам (см., напр., [4, 8]): по изменению знака разности среднезональных температур между широтами  $85^\circ$  и  $60^\circ$  Северного полушария ( $\Delta T_{85,60}$ ) на уровне с давлением 10 мбар и по изменению на противоположное направление среднезонального ветра на  $60^\circ$  с.ш. на том же барическом уровне.

Поскольку зимняя стратосфера над Московским регионом испытывает влияние полярного стратосферного вихря, то рассмотрены основные характеристики этого вихря – его интенсивность и размер. В качестве оценки интенсивности полярного вихря рассматривались значения геопотенциальной высоты в его центре (см., напр., [9]). Для оценки размера вихря выполнялся расчёт эквивалентной широты его края  $\varphi_{\text{equ}}$ , в терминах которой в литературе обычно характеризуется площадь вихря (см., напр., [10]). Эквивалентная широта  $\varphi_{\text{equ}}$  определялась в соответствии с работой [11] методом расчёта максимума градиента PV и с учётом максимума скорости ветра. Для изучения влияния крупномасштабных волновых процессов на стратосферный озон поле возмущений геопотенциала (отклонений от средних значений) вдоль  $60^\circ$  с.ш. было разложено в ряд Фурье. В полученном спектральном разложении с зональными волновыми числами  $n = 1, 2, 3 \dots$  преобладающими были волны с  $n = 1, 2$ . Усиление планетарной волны с зональным волновым числом  $n = 1$  соответствует смещению полярного вихря по отношению к полюсу, а отклонение вихря от круговой формы приводит к росту планетарной волны с  $n = 2$ .

С помощью траекторной модели [12] исследовалось движение воздушных масс до их появления в стратосфере над Московским регионом.

*Результаты исследований и их обсуждение.* Результаты наблюдений озона на ММ волнах показаны на рис. 1 и рис. 2(а). На рис. 2(а) показано содержания озона  $C_{O_3}$  в слое на высотном уровне 10 мбар (на высоте примерно 30 км) над Москвой за период с ноября 2012 г. по апрель 2013 г.

На рис. 1 и рис. 2(а) хорошо видны изменения содержания озона, характеризуемого низкими значениями  $C_{O_3}$ , в декабре 2012 г. и в начале января 2013 г. и значительным увеличением  $C_{O_3}$  15–16 января 2013 г.

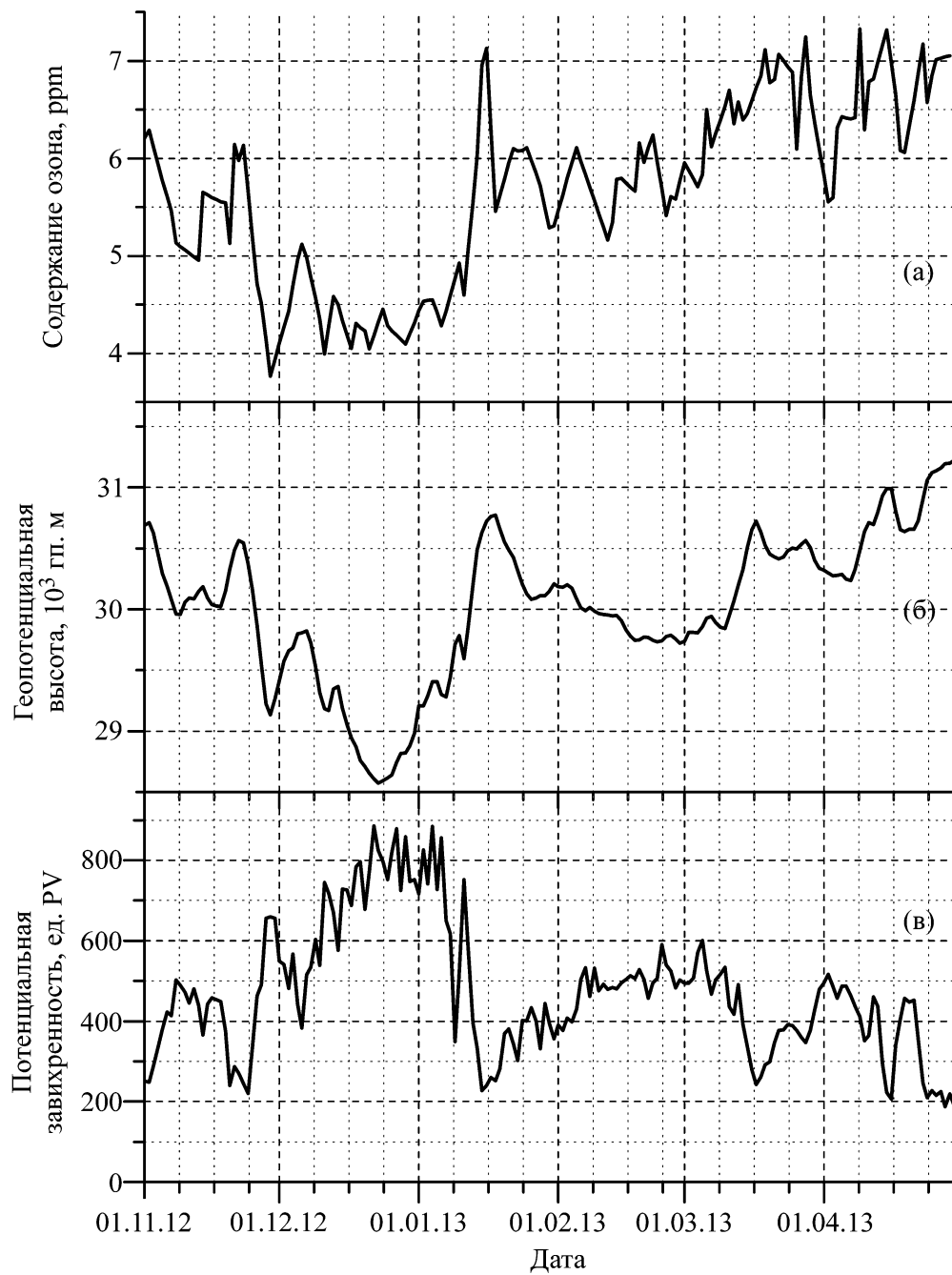


Рис. 2: Содержание озона на уровне 10 мбар (высота около 30 км) (а), геопотенциальная высота уровня с давлением 10 мбар (б) и потенциальная завихренность на уровне с потенциальной температурой 850 К, 1 ед.  $PV = 10^{-6} \text{ К} \cdot \text{м}^2 \text{ кг}^{-1} \text{ с}^{-1}$ , (в) в стратосфере над Москвой в период с 01.11.2012 г. по 30.04.2013 г.

Изменения геопотенциальной высоты уровня с давлением 10 мбар и потенциальной завихренности на близком по высоте уровне с потенциальной температурой 850 К в стратосфере над Москвой в период с 01.11.2012 г. по 30.04.2013 г. показаны на рис. 2(б) и рис. 2(в) соответственно.

На рис. 3 показаны амплитуды планетарных волн с  $n = 1$  (рис. 3(а)) и  $n = 2$  (рис. 3(б)), среднезональная скорость ветра на широте  $60^\circ$  (рис. 3(в)), разность среднезональных температур  $\Delta T_{85,60}$  между широтами  $85^\circ$  и  $60^\circ$  (рис. 3(г)) для периода с ноября 2012 г. по апрель 2013 г. Все данные на рис. 3 соответствуют уровню 10 мбар.

Из графика на рис. 3(а) видно, что амплитуды планетарных волн с  $n = 1$  и  $n = 2$  были пониженными в начале ноября 2012 г. В этот период полярный вихрь имел близкую к симметричной форму с центром, расположенным вблизи Северного полюса.

Стратосфера над Москвой в первых числах ноября находилась вне полярного стратосферного вихря, значения  $C_{O_3}$  в слое на уровне 10 мбар в стратосфере над Москвой в этот период составили около 6.3 ppм. Увеличение амплитуды планетарной волны с  $n = 1$ , начавшееся во второй половине ноября 2012 г. и достигшее максимальных значений в декабре 2012 г., соответствовало возникшему в этот период смещению полярного вихря от Северного полюса. Одновременно происходила значительная деформация вихря.

В период с 29 ноября по 3 декабря 2012 г. полярный вихрь приобрёл вытянутую форму с двумя центрами. Этот процесс отразился на значениях амплитуды соответствующей планетарной волны с  $n = 2$  (рис. 3(б)), которая начала существенно увеличиваться во второй половине ноября 2012 г. Эта амплитуда достигла максимального значения 1 декабря 2012 г. При этом над Москвой оказался воздух полярного вихря с пониженным содержанием озона, составившим  $C_{O_3} = 3.8$  ppм в слое на уровне 10 мбар 29 ноября 2012 г.

Усиление волны с  $n = 2$  в конце ноября повлекло за собой увеличение содержания озона  $C_{O_3}$  до 5.1 ppм на уровне 10 мбар 6 декабря 2012 г. Затем, к середине декабря, полярный вихрь восстановил свою первоначальную форму с одним центром, и продолжалось усиление вихря. При этом планетарная волна с  $n = 2$  значительно ослабла, в то время как происходило упомянутое выше усиление волны с  $n = 1$ , характеризующей смещение полярного вихря. В результате этого смещения вихря его воздух находился в стратосфере над Москвой во вторую и третью декады декабря 2012 г. и в начале января 2013 г. В этот период содержание озона в стратосфере над Москвой было пониженным и значения  $C_{O_3}$  составляли от 4 ppм до 4.5 ppм на 10 мбар (рис. 2(а)).

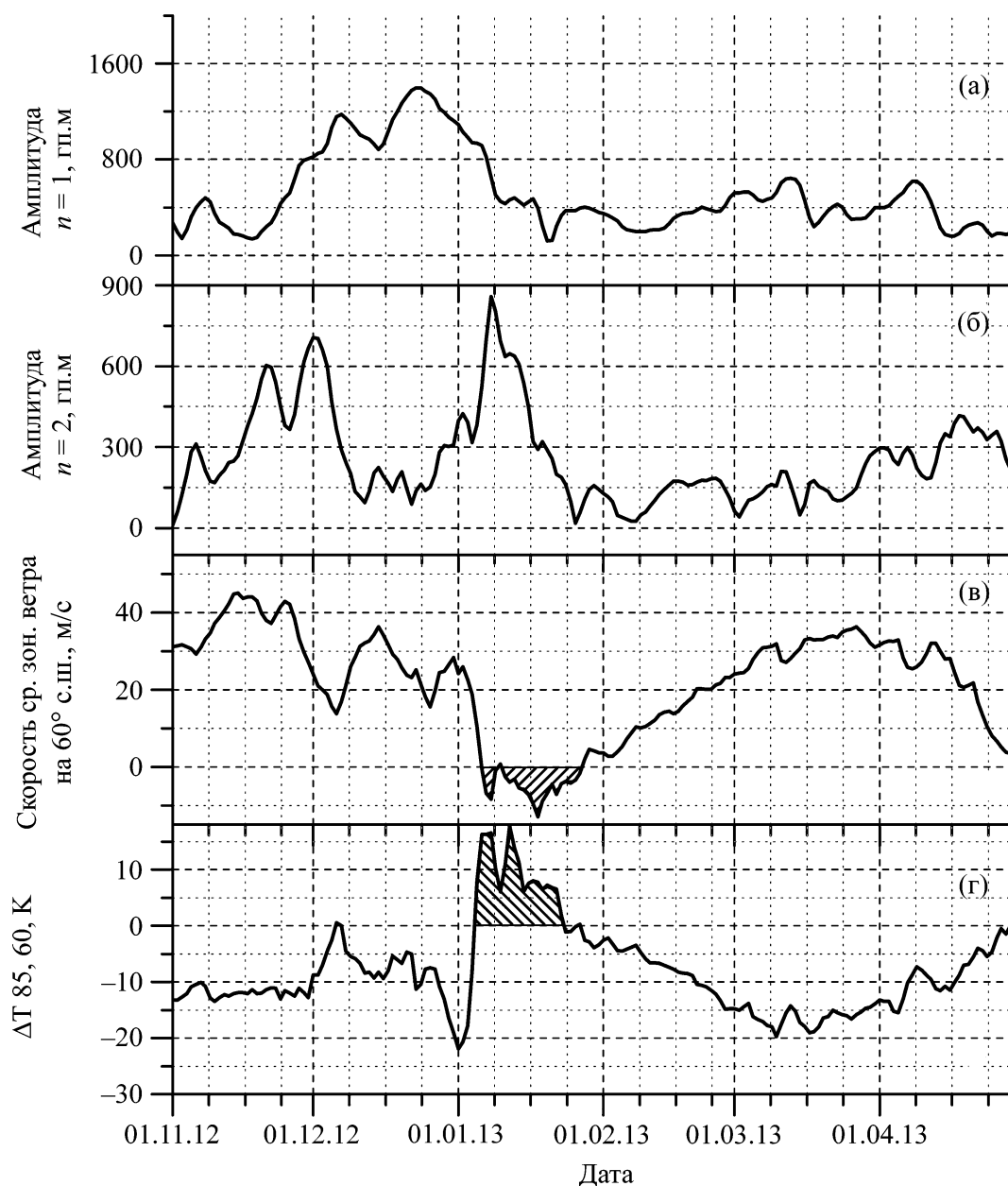


Рис. 3: Амплитуды планетарных волн в поле геопотенциала  $sp = 1$  (а) и  $n = 2$  (б), среднезональная скорость ветра на широте  $60^\circ$  (в), разность среднезональных температур между широтами  $85^\circ$  и  $60^\circ$  Северного полушария (г) для периода с ноября по апрель 2012–2013 гг. Все данные для уровня 10 мбар. Штриховкой отмечены события с реверсом среднезонального ветра и изменением знака  $\Delta T_{85,60}$ .

Существенные изменения в озоносфере над Москвой произошли, начиная с первой половины января 2013 г., после того, как 6 января 2013 г. полярный вихрь разделился на две части. В это время произошло соответствующее увеличение амплитуды волны с волновым числом  $n = 2$  (рис. 3(б)). Содержание озона  $C_{O_3}$  на уровне 10 мбар над Москвой возросло от 4.1 ppм 29 декабря 2012 г. (до разделения вихря на две части) до значения 7.2 ppм, которое наблюдалось 16 января 2013 г. (рис. 2). В период с 6 по 27 января 2013 г. изменилось направление (реверс) среднезонального ветра на широте  $60^\circ$  на уровне 10 мбар (рис. 3(в)) и примерно в это же время наблюдалось изменение знака разности среднезональных температур между широтами  $85^\circ$  с.ш. и  $60^\circ$  с.ш., представленной на графике рис. 3(г). Этим изменениям предшествовало уменьшение площади полярного вихря. В соответствии с критериями, приведенными в работах [4, 8, 13, 14], в январе 2013 г. были выполнены условия мажорного стратосферного потепления. Это потепление сопровождалось ослаблением волны с  $n = 1$  и усилением волны с  $n = 2$  (рис. 3), связанным с разделением вихря на две части.

Необходимо отметить, что во время разделения полярного вихря на две части 6 января 2013 г. в стратосфере над Москвой всё ещё находился воздух с пониженным содержанием озона, равным 4.3 ppм на уровне 10 мбар. Траекторный анализ показал, что этот воздух был перенесён из стратосферы над Гренландией. Там незадолго перед этим, а именно 3 января 2013 г., был расположен центр полярного стратосферного вихря. Значения  $C_{O_3}$ , зарегистрированные на указанном уровне над Москвой 6 января 2013 г. с помощью спектрорадиометра ФИАН, оказались близки к данным MLS Aura [15, 16] над Гренландией 3 января 2013 г., что также свидетельствует о перемещении этого воздуха полярного вихря к Москве за время с 3 по 6 января.

После разделения полярного вихря на две части в январе 2013 г. над Москвой оказался обогащённый озоном воздух, появившийся из области повышенного давления. Значения потенциальной завихренности 16 января 2013 г. были пониженные, что характерно для воздуха антициклона. Траекторный анализ показал, что воздух с возросшим содержанием озона, зарегистрированный над Москвой 16 января 2013 г., был перенесён из области антициклона над Сибирью.

В конце января 2013 г. полярный вихрь вновь приобрёл форму с одним центром. Интенсивность вихря ослабла. В период с февраля по март 2013 г. в Северном полушарии происходило перемешивание воздушных масс различного происхождения: из областей полярного вихря и областей антициклона. Эти процессы хорошо прослеживаются на картах барической топографии и на картах PV, на которых видно, как воздух с вы-



сокими значениями PV вытягивался из вихря и перемешивался с воздухом с низкими значениями PV вне вихря. В результате этих процессов содержание озона в стратосфере над Москвой в этот период постепенно возрастало и, например, на уровне 10 мбар, в соответствии с рис. 2(а), изменялось примерно от 5 ppм в феврале до 7 ppм во второй половине марта 2013 г. В конце марта – начале апреля 2013 г. зарегистрировано понижение содержания озона  $C_{O_3}$  от 7.2 ppм 28 марта до 5.5 ppм 2 апреля 2013 г. при появлении воздуха вихря над Москвой. Такое понижение содержания озона весной 2013 г., вызванное смещением к Москве воздуха полярного вихря, нередко наблюдалось в весенние месяцы в предыдущие годы, в том числе весной 2010 г. и 2011 г. [3].

Рассмотренная выше связь содержания озона над Москвой с динамикой стратосферы, с переносом воздушных масс подтверждается также высокими (по модулю) значениями коэффициентов корреляции концентрации озона с потенциальной завихренностью, с геопотенциальной высотой и с температурой на соответствующих высотных уровнях над Москвой.

Отметим, что изменения озона характеризуются антикорреляцией по отношению к изменениям PV. Действительно, коэффициенты корреляции для связи “озон–PV” (значения  $C_{O_3}$  взяты на уровне 10 мбар, а значения PV на близком по высоте уровне потенциальной температуры 850 К) имели отрицательные величины и, например, для периода с ноября 2012 г. по январь 2013 г. этот коэффициент был равен  $-0.80 \pm 0.04$ , а для февраля–марта 2013 г. он составил  $-0.72 \pm 0.07$ .

Колебания озона, температуры  $T$  и геопотенциальной высоты на рассмотренном уровне 10 мбар характеризуются положительной корреляцией. При этом коэффициент корреляции между содержанием озона и температурой на этом уровне был равным  $0.74 \pm 0.07$  для периода с ноября 2012 г. по январь 2013 г. включительно, а связь озона с геопотенциальной высотой характеризовалась коэффициентом корреляции  $0.90 \pm 0.03$  за тот же период. Очевиден физический смысл этих связей, которые означают, что для воздуха полярного вихря характерно пониженное содержание озона при высоких значениях потенциальной завихренности и пониженных значениях температуры. Воздух из областей антициклона характеризуется более высокими значениями содержания озона и температуры и пониженными значениями потенциальной завихренности. Временные зависимости  $C_{O_3}$ , PV и  $T$  показаны на рис. 2.

Представляет интерес сопоставить влияние на озоносферу динамических процессов в рассмотренный период 2012–2013 гг. с влиянием на вертикальное распределение озона над Московским регионом возмущений в предыдущее мажорное стратосферное

потепление, которое произошло в холодное полугодие 2009–2010 гг. Высотно-временное распределение озона над Москвой, полученное в этот период по наблюдениям на ММ волнах в ФИАН, описано в работе [3].

Общим для холодных полугодий 2009–2010 гг. и 2012–2013 гг. является значительное понижение содержания озона над Москвой в первой половине зимы, т.к. в стратосфере над Москвой был воздух полярного вихря. Последующие относительно быстрые увеличения содержания озона над Московским регионом были связаны со стратосферными потеплениями в эти полугодия. Этим событиям предшествовало увеличение амплитуды планетарных волн, замедление и реверс среднезональных ветров на  $60^\circ$  с.ш., изменение знака разности среднезональных температур между широтами  $85^\circ$  и  $60^\circ$  Северного полушария и уменьшение площади полярного вихря. Общим является также и уменьшение  $C_{O_3}$  в отдельные весенние периоды, что было вызвано появлением воздуха полярного вихря над Москвой.

Вместе с тем, имеется существенное различие в сроках возникновения и характере протекания этих двух мажорных потеплений и в сроках соответствующих откликов озоносферы над Москвой на эти потепления. Стратосферное потепление в холодное полугодие 2009–2010 гг. было связано со смещением полярного вихря и характеризовалось усилением планетарной волны с  $n = 1$  [14]. Этим оно отличается от потепления в январе 2013 г., которое характеризовалось усилением волны с  $n = 2$  (при ослаблении волны с  $n = 1$ , рис. 3) во время реверса ветра и изменения знака  $\Delta T_{85,60}$ .

Реверс среднезонального ветра в 2010 г. [14] произошёл позже (по отношению к началу зимы), чем в 2013 г. Различаются также и сроки, в которые произошли изменения содержания озона над Москвой, связанные с этими стратосферными потеплениями: максимальные значения  $C_{O_3}$  на уровне 10 мбар над Москвой наблюдались в начале февраля 2010 г. и в середине января 2013 г. соответственно.

Рассмотренные межгодовые различия и разнообразие особенностей динамических процессов, влияющих на вертикальное распределение озона, свидетельствуют о важности дальнейшего мониторинга атмосферного озона, что необходимо для развития численных климатических моделей, для прогнозов эволюции озоносферы и климата.

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, благодарны NASA за возможность доступа к данным Aura MLS, а также признательны лаборатории NOAA Air Resources Laboratory (ARL) за возможность

пользования транспортной моделью HYSPLIT.

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

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2010. World Meteorological Organization. Global Ozone Research and Monitoring Project. Report No.52. 516 pp. World Meteorological Organization. Geneva. Switzerland. 2011.
- [2] G. L. Manney, M. L. Santee, M. Rex, et al., *Nature* **478**, 10556, p.469 (2011), doi:10.1038/nature10556, 2011;  
URL: <http://www.nature.com/nature/journal/v478/n7370/full/nature10556.html>.
- [3] С. В. Соломонов, Е. П. Кропоткина, С. Б. Розанов и др., *Краткие сообщения по физике ФИАН* **39**(10), 3 (2012).
- [4] A. J. Charlton and L. M. Polvani, *J. Climate* **20**, 449 (2007).
- [5] С. В. Соломонов, К. П. Гайкович, Е. П. Кропоткина и др., *Известия вузов. Радиофизика* **54**(2), 113 (2011).
- [6] С. В. Соломонов, Е. П. Кропоткина, С. Б. Розанов, *Спектральные исследования атмосферного озона на миллиметровых радиоволнах. в: Коллективная монография “Оптическая спектроскопия и стандарты частоты. Молекулярная спектроскопия”*. Под ред. Л. Н. Синицы, Е. А. Виноградова (Томск, Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2004), с.52.
- [7] The British Atmospheric Data Centre (BADC). URL: [http://badc.nerc.ac.uk/view/badc.nerc.ac.uk\\_ATOM\\_dataent\\_ASSIM](http://badc.nerc.ac.uk/view/badc.nerc.ac.uk_ATOM_dataent_ASSIM)
- [8] G. L. Manney, M. J. Schwartz, K. Kruger, et al., *Geophys. Res. Lett.* **36**, L12815 (2009), doi: 10.1029/2009GL038586.
- [9] В. И. Бекорюков, И. В. Бугаева, В. Н. Глазков и др., *Известия АН. Физика атмосферы и океана* **37**(6), 820 (2001).
- [10] V. L. Harvey, R. B. Pierce, T. D. Fairlie, and M. H. Hitchman, *J. Geophys. Res.* **107**(D20), 4442 (2002), doi:10.1029/2001JD001471.
- [11] E. R. Nash, P. A. Newman, J. E. Rosenfield, and M. R. Shoerberl, *J. Geophys. Res.* **101**(D5), 9471 (1996).

- [12] R. R. Draxler and G. D. Rolph, HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) Model. NOAA Air Resources Laboratory. Silver Spring. MD. NOAA ARL READY Website: <http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>, 2013.
- [13] M. E. McIntyre and T. N. Palmer, *Nature* **305**(5935), 593 (1983).
- [14] J. Kuttipurath and G. A. Nikulin, *Atmos. Chem. Phys.* **12**, 8115 (2012), doi:10.5194/acp-12-8115-2012.
- [15] L. Froidevaux, N. J. Livesey, W. G. Read, et al., *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing* **44**(5), 1106 (2006).
- [16] Aura MLS Data Quality Documentation. URL: <http://mls.jpl.nasa.gov/data/datadocs.php>

Поступила в редакцию 16 декабря 2013 г.