

ОСОБЕННОСТИ МЕЖГОДОВЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ОЗОНА В СРЕДНЕЙ СТРАТОСФЕРЕ НАД МОСКВОЙ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ НА МИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛНАХ

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

Рассмотрены особенности межгодовых изменений озона в средней стратосфере над Москвой в холодные полугодия с 1995 по 2015 гг. Эти особенности наиболее выражены в двух выделенных группах зим (по шесть зим в каждой группе) в декабре–январе. Оказалось, что усреднённый в пределах каждой из этих групп сезонный ход озона характеризуется более высоким содержанием озона CO_3 в группе I (по сравнению с группой II) в декабре и более низкими значениями в январе. Различия в сезонном ходе озона между этими группами на уровне 10 мбар в декабре и январе превышают 2 ррт. Особенностью циркуляции стратосферы для группы полугодий I является существование устойчивого полярного вихря и отсутствие сильных среднезимних возмущений, внезапных стратосферных потеплений. Наоборот, для холодных полугодий, входящих в группу II, общим является возникновение сильных стратосферных потеплений в январе–феврале. Представленные результаты дают количественную оценку влияния этих стратосферных потеплений на озон средней стратосферы над Москвой.

Ключевые слова: озон, стратосфера, стратосферное потепление.

1. *Введение.* Стратосферный озон играет важнейшую роль в земной атмосфере [1]. Он предохраняет жизнь на Земле от поглощаемого им губительного УФ-Б-излучения Солнца. Озон оказывает сильное влияние на тепловую структуру атмосферы. Изменения в распределении озона могут сказаться на тепловом балансе, влияя тем самым на

температуру стратосферы и на динамические процессы в ней [1]. В свою очередь, изменение циркуляции стратосферы может сыграть существенную роль в связях между стратосферой и тропосферой, и иметь последствия для приземного климата и погоды [2].

Наблюдаемое истощение озонового слоя стало одной из самых актуальных проблем аэронавигации, экологии и ряда других областей фундаментальной и прикладных наук [1].

В последние годы возрос интерес к изменениям 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 работ [3, 4], ожидается снижение содержания озона, вызываемое происходящим увеличением азотных составляющих стратосферы N_2O , NO и NO_2 .

Для развития прогностических моделей необходимо знать как изменяется содержание атмосферного озона в течение сезонов, от года к году и на более длительных периодах. Помимо количественных данных об изменениях озона для моделирования процессов в атмосфере важно также определить те атмосферные процессы, которые оказывают наиболее значительное влияние на содержание озона [5].

Проводимый в ФИАН многолетний мониторинг вертикального распределения озона на миллиметровых волнах [6–9] позволил получить ряды данных с информацией об изменениях вертикального распределения атмосферного озона различного масштаба времени, в широком диапазоне высот, включая слои средней стратосферы, наиболее чувствительные к влиянию азотных составляющих. Установлено, что сезонный ход озона характеризуется наиболее выраженными изменениями содержания озона в зимние периоды.

Ниже рассмотрены особенности межгодовых изменений содержания озона в слоях средней стратосферы над Москвой в холодные полугодия с 1995 г. по 2015 г.

2. Метод измерений. Измерения вертикального распределения содержания озона C_{O_3} в атмосфере проводятся радиофизическими методами с помощью размещённого в Москве высокочувствительного спектрометра [6]. 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 [6].

Для восстановления вертикального распределения озона (ВРО) 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 VADC [10].

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 [6]). Методика анализа результатов наблюдений изложена в работе [9].

3. Результаты наблюдений. 3.1. В результате многолетнего мониторинга получено высотно-временное распределение озона над Москвой для каждого года в период с 1995 по 2015 гг. Представленные на рис. 1(а) и рис. 1(б) тонкими линиями примеры изменений содержания озона C_{O_3} для холодных сезонов 2010–2011 гг. и 2012–2013 гг. иллюстрирует колебания озона в средней стратосфере на уровне 10 мбар. Значения C_{O_3} здесь и ниже даны в единицах отношения смеси ppm или 10^{-6} . Толстыми линиями на этих рисунках показаны сглаженные по 10 дням значения C_{O_3} . Сглаживание проводилось для устранения короткопериодных колебаний озона. Из сопоставления рис. 1(а) и рис. 1(б) хорошо видны различия в сезонном ходе озона между этими двумя полугодиями.

Действительно, по сравнению с холодным периодом 2010–2011 гг., сезонный ход озона в 2012–2013 гг. характеризуется более низким, примерно на 1–1.5 ppm, содержанием озона с конца ноября 2012 г. по начало января 2013 г., и резким увеличением озона в середине января 2013 г. Этим явлениям не наблюдались в соответствующие месяцы 2010–2011 гг.

3.2. Ранее (см., напр., [6–9]) была отмечена связь содержания озона в средней стратосфере на уровне 10 мбар с потенциальной завихренностью и геопотенциалом над Москвой, характеризующими динамику стратосферы. Было показано, что воздух полярного стратосферного вихря отличается пониженным содержанием озона и пониженными

значениями геопотенциала при высоких значениях потенциальной завихренности. Анализ результатов наблюдения озона, полученных в 2010–2011 гг. и в 2012–2013 гг., также показал связь обнаруженных изменений озона над Москвой с этими параметрами, которые, в свою очередь, изменялись под влиянием крупномасштабных атмосферных процессов, эволюции полярного стратосферного вихря.

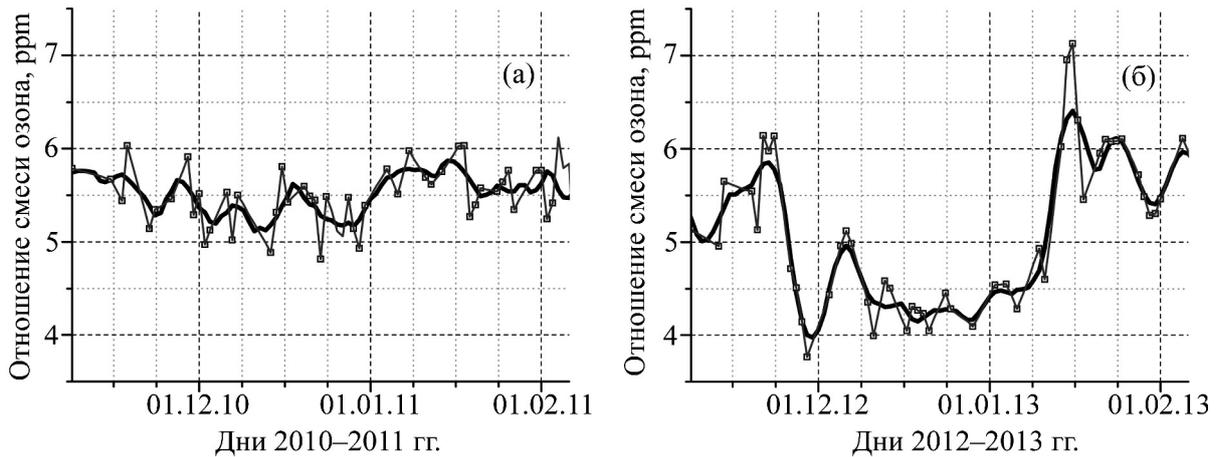


Рис. 1: Содержание озона C_{O_3} в средней стратосфере на уровне 10 мбар (высота около 30 км) над Москвой в зимние месяцы 2010–2011 гг. (а) и 2012–2013 гг. (б). Тонкие линии – наблюдаемые значения. Сглаженные по 10 дням значения C_{O_3} показаны толстыми линиями. Значения C_{O_3} даны в единицах отношения смеси ppm или 10^{-6} .

Характер циркуляции стратосферы в 2010–2011 гг. и в 2012–2013 гг. существенно различался. Значительную часть времени в холодный сезон 2010–2011 гг. воздух в стратосфере на уровне 10 мбар над Москвой находился вне или на краю интенсивного полярного вихря, центр которого располагался севернее 70° с.ш. и испытывал относительно небольшие перемещения. На рис. 2 показаны характеризующие циркуляцию стратосферы зональные скорости воздушного потока V_{60° на уровне 10 мбар, усреднённые вдоль параллели 60° с.ш., в холодные сезоны 2010–2011 гг. (кривая 1) и 2012–2013 гг. (кривая 2). Эта скорость при сравнительно небольших её колебаниях сохранялась высокой, достигающей 40–50 м/с, и не меняла своего направления в течение всего холодного полугодия 2010–2011 гг. (рис. 2, кривая 1). В условиях такой устойчивой циркуляции, при отсутствии сильных её возмущений были зарегистрированы относительно небольшие изменения содержания озона C_{O_3} , составлявшего примерно от 5 ppm до 6 ppm, в декабре 2010 г. и январе 2011 г. (рис. 1(а)).

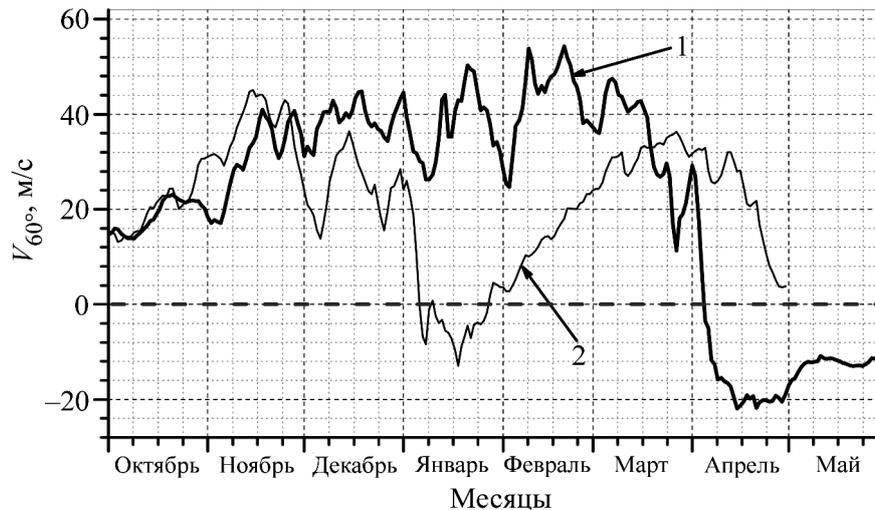


Рис. 2: Зональные скорости (м/с) воздушного потока V_{60° на уровне 10 мбар, усреднённые вдоль параллели 60° с.ш. в холодные сезоны 2010 – 2011 гг. (кривая 1) и 2012 – 2013 гг. (кривая 2).

Этот долгоживущий полярный вихрь способствовал возникновению над высокими широтами больших потерь озона в весенний период 2011 г. [11]. При появлениях воздуха вихря над Москвой в конце марта и в начале апреля 2011 г. содержание озона на высотах средней стратосферы значительно понижалось [8].

Зимний период 2012–2013 гг. характеризовался менее устойчивой циркуляцией стратосферы. В декабре 2012 г. полярный стратосферный вихрь смещался к Европейскому сектору Северного полушария и воздух вихря располагался в стратосфере на 10 мбар над Москвой значительную часть декабря 2012 г. и в начале января 2013 г., чем и объясняется пониженное содержание озона в этот период (рис. 1(б)).

В начале января 2013 г. произошло замедление и изменение направления средне-зональной скорости воздушного потока, усреднённой вдоль северной широты 60° на уровне 10 мбар (см. рис. 2, кривая 2), что является признаком сильного стратосферного потепления [12].

На картах геопотенциала на уровне 10 мбар и на картах потенциальной завихренности при потенциальной температуре 850 К видно разделение вихря на две части в начале января 2013 г. Сильное стратосферное потепление сопровождалось уменьшением амплитуды планетарной волны с $n = 1$ и ростом амплитуды волны с $n = 2$ (рассматривались волны, полученные при разложении в ряд Фурье-возмущений поля геопотен-

циала вдоль параллели 60° с.ш. на уровне 10 мбар [9], волна с $n = 1$ характеризует смещение вихря из полярной области, а волна с $n = 2$ описывает изменение формы вихря, отклонение её от симметричной круговой) [9].

Эти процессы отразились на содержании озона в стратосфере над Москвой, привели к продолжительным пониженным значениям C_{O_3} в течение декабря 2012 г. и резкому увеличению C_{O_3} в январе 2013 г. (рис. 1(б)). Перед потеплением в стратосфере над Москвой на уровне 10 мбар располагался воздух полярного вихря с пониженным до 4 ppм содержанием озона и с повышенными значениями потенциальной завихренности, характерными для воздуха вихря. В результате потепления содержание озона C_{O_3} на уровне 10 мбар над Москвой возросло примерно от 4 ppм 29 декабря 2012 г. (до разделения вихря на две части) до 7 ppм 16 января 2013 г. (тонкая линия на рис. 1(б)) в появившемся в стратосфере над Москвой богатом озоном воздухе из области повышенного давления.

Таким образом существенное различие сезонного хода содержания озона в средней стратосфере на уровне 10 мбар между холодными 2010–2011 гг. и 2012–2013 гг. полугодиями (рис. 1(а) и рис. 1(б)) связано с межгодовыми изменениями характера циркуляции, с существованием устойчивого стратосферного полярного вихря зимой 2010–2011 гг. и, напротив, с развитием сильного стратосферного потепления, нарушившего зимнюю циркуляцию стратосферы, в январе 2013 г.

Т а б л и ц а 1

Холодные полугодия

Группа I	Группа II
1995–1996	2002–2003
1996–1997	2005–2006
1999–2000	2006–2007
2004–2005	2008–2009
2010–2011	2011–2012
2013–2014	2012–2013

3.3. Межгодовые различия в сезонном ходе озона, подобные рассмотренным выше, обнаружены также и для ряда других холодных полугодий. В табл. 1 представлены две группы таких полугодий (группа I и II), наиболее различающихся характером изменений озона в декабре и январе. Для каждого дня в группах I и II были построены средние значения содержания озона $\overline{C_{O_3}^I}$ и $\overline{C_{O_3}^{II}}$, а также их разность $\Delta\overline{C_{O_3}} = \overline{C_{O_3}^{II}} - \overline{C_{O_3}^I}$.

Временной ход разности $\Delta\overline{C_{O_3}}$ показан на рис. 3 тонкими линиями. Толстыми линиями на этом рисунке обозначены сглаженные по 10 дням значения $\Delta\overline{C_{O_3}}$.

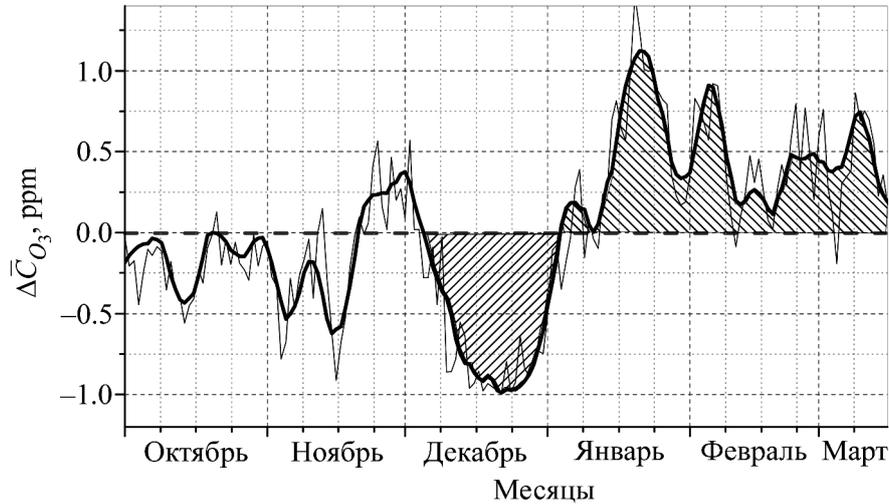


Рис. 3: Временной ход разности $\Delta\overline{C_{O_3}} = \overline{C_{O_3}^{II}} - \overline{C_{O_3}^I}$ показан на рис. 3 тонкими линиями. Здесь $\overline{C_{O_3}^I}$ и $\overline{C_{O_3}^{II}}$ являются средними значениями содержания озона для каждого дня в группах I и II соответственно. Толстыми линиями на этом рисунке обозначены сглаженные по 10 дням значения $\Delta\overline{C_{O_3}}$.

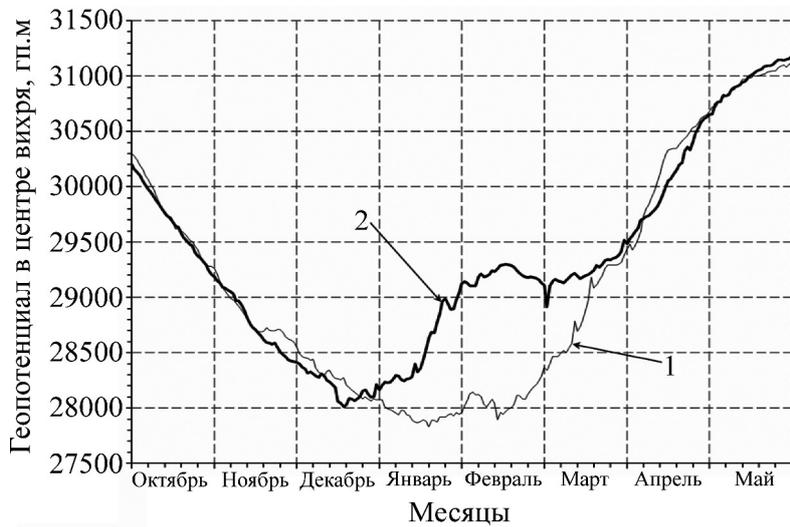


Рис. 4: Усреднённые по группам I и II значения геопотенциала \overline{H} в центре полярных вихрей на уровне 10 мбар (кривые 1 и 2 соответственно).

На рис. 3 видны резкие изменения $\Delta\overline{C_{O_3}}$ от значения -1 ppм в декабре до более чем $+1$ ppм в январе. Обращает на себя внимание также относительно более высокое содержание озона в группе II (положительные значения $\Delta\overline{C_{O_3}}$ на рис. 3) с января по март.

Как можно было ожидать, полугодия, относящиеся к группам I и II, существенно отличаются друг от друга не только характером изменений озона, но и состоянием стратосферы. Особенностью циркуляции стратосферы для группы полугодий I является отсутствие сильных стратосферных потеплений и существование интенсивного полярного вихря в течение всего холодного периода. На рис. 4 показаны усреднённые по группам I и II средние значения геопотенциала в центре полярных вихрей на уровне 10 мбар, которые характеризуют глубину (интенсивность) вихрей. Видно, что средние значения геопотенциала для группы I были меньше $29 \cdot 10^3$ гп.м продолжительное время с начала ноября до середины марта (рис. 4, кривая 1).

Наоборот, для холодных полугодий, входящих в группу II, общим является возникновение сильных стратосферных потеплений в январе–феврале. Во время этих возмущений помимо разогрева стратосферы происходило ослабление циркуляции и изменение направления среднезонального ветра \overline{V}_{60° на уровне 10 мбар (исключением является период 2011–2012 гг., когда сильное возмущение стратосферы сопровождалось реверсом среднезонального ветра несколько выше уровня 10 мбар). При этом уже в январе происходило ослабление интенсивности полярных вихрей, характеризуемое увеличением средних значений геопотенциала в их центре примерно от $28 \cdot 10^3$ гп.м в декабре до значений, превышающих $29 \cdot 10^3$ гп.м, в феврале (рис. 4, кривая 2).

Этими отличиями динамики стратосферы можно объяснить и различие характера сезонного хода озона в группах полугодий I и II, проиллюстрированных на рис. 1 и рис. 3.

Оказалось, что обнаруженные в группе II явления продолжительного пониженного содержания озона в средней стратосфере над Москвой в зимний период (рис. 1(б), рис. 3)) предшествуют развитию сильных стратосферных потеплений, которые, в свою очередь, сопровождаются значительным увеличением озона. Как следует из рис. 3, величина колебаний $\Delta\overline{C_{O_3}}$ имеет размах более 2 ppм, от минимальных значений -1 ppм в декабре и до более, чем $+1$ ppм в январе во время сильных возмущений стратосферы – внезапных стратосферных потеплений. Этот размах составляет примерно 40% от среднемесячных значений озона в эти месяцы.

4. Заключение. Показанные выше значительные межгодовые изменения стратосферного озона отражают соответствующую изменчивость динамики стратосферы Север-

ного полушария. Преобладающим фактором в этой изменчивости являются внезапные стратосферные потепления.

В работах [13, 14] отмечалось возросшее количество внезапных стратосферных потеплений в течение последних 15 холодных полугодий, что подтверждает отмеченную в работе [15] тенденцию увеличения числа стратосферных потеплений в двадцать первом веке.

Прогнозируемые изменения динамических и химических процессов, влияющих на озонный слой, могут привести к увеличению достигающего земной поверхности вредного для здоровья солнечного УФ-Б-излучения, а также могут иметь последствия для приземного климата и погоды [2].

Представленные выше данные о межгодовых изменениях озона в средней стратосфере над Московским регионом дают количественную оценку влияния стратосферных потеплений на озон. Результаты мониторинга важны для изучения эволюции озоносферы, для проверки прогнозов её изменений.

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.

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.ersl.noaa.gov/csd/assessments/ozone/2014/report.html>.
- [2] N. Butchart, Rev. Geophys. **52**, 157 (2014). doi:10.1002/2013RG000448.
- [3] P. J. Crutzen, Quart. J. R. Met. Soc. **96**, 320 (1970).
- [4] W. Wang, W. Tian, S. Dhomse, et al., Atmos. Chem. Phys. **14**, 12967 (2014), doi:10.5194/acp-14-12967-2014.

- [5] V. Eyring, T. G. Shepherd, and D. W. Waugh, SPARC Report on the Evaluation of Chemistry-Climate Model. (Eds.), SPARC Report No. 5 **WCRP-132** (WMO/TD-No. 1526)(2010). [Электронный ресурс]: <http://www.atmos.physics.utoronto.ca/SPARC>.
- [6] С. В. Соломонов, К. П. Гайкович, Е. П. Кропоткина и др., Известия вузов. Радиофизика **54**(2), 113 (2011).
- [7] С. В. Соломонов, Е. П. Кропоткина, А. Н. Игнатъев и др., Краткие сообщения по физике ФИАН **39**(3), 3 (2012).
- [8] С. В. Соломонов, Е. П. Кропоткина, С. Б. Розанов и др., Краткие сообщения по физике ФИАН **39**(10), 3 (2012).
- [9] С. В. Соломонов, Е. П. Кропоткина, С. Б. Розанов и др., Краткие сообщения по физике ФИАН **41**(3), 8 (2014).
- [10] The British Atmospheric Data Centre (BADC). URL: http://badc.nerc.ac.uk/view/badc.nerc.ac.uk_ATOM_dataent_ASSIIM.
- [11] G. L. Manney, M. L. Santee, M. Rex, et al., Nature **478**, 469 (2011), doi:10.1038/nature10556.
- [12] A. J. Charlton and L. M. Polvani, J. Climate **20**, 449 (2007).
- [13] G. L. Manney, K. Kruger, J. L. Sabutis et al., J. Geophys. Res. **110**, D04107 (2005), doi: 10.1029/2004JD005367.
- [14] J. Kuttippurath and G. Nikulin, Atmos. Chem. Phys. **12**, 8115 (2012), doi:10.5194/acp-12-8115-2012.
- [15] S. Schimanke, T. Spanghel, H. Huebener, and U. Cubasch, Climate Dynamics **40**(7–8), 1733 (2013), doi: 10.1007/s00382-012-1530-x.

Поступила в редакцию 27 апреля 2015 г.