

**ОСОБЕННОСТИ ВЫСОТНО-ВРЕМЕННОГО  
РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОЗОНА НАД МОСКВОЙ В ПЕРИОД  
СИЛЬНОГО ИСТОЩЕНИЯ ОЗОННОГО СЛОЯ ВЕСНОЙ  
2011 Г. И ПРИ СТРАТОСФЕРНОМ ПОТЕПЛЕНИИ В 2010 Г.  
ПО НАБЛЮДЕНИЯМ НА МИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛНАХ**

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

*Представлены новые результаты наблюдений на миллиметровых волнах вертикального распределения стратосферного озона над Москвой в период значительного истощения озонного слоя в Северном полушарии весной 2011 г., а также во время возмущения циркуляции при среднезимнем внезапном стратосферном потеплении в 2010 г. Зарегистрированы значительные межгодовые изменения в высотном распределении озона. Обнаруженные большие изменения концентрации озона под влиянием крупномасштабных атмосферных процессов показывают важность мониторинга озоносферы радиофизическими методами для изучения её эволюции.*

**Ключевые слова:** озон, миллиметровые волны, спектрорадиометр, полярный стратосферный вихрь.

1. Проблема изменений озонного слоя Земли в условиях естественных и техногенных возмущений озоносферы является одной из наиболее актуальных в атмосферных исследованиях, поскольку озон играет ключевую роль в фотохимии, динамике, излучении и тепловом режиме атмосферы, в защите биосферы Земли от губительного УФ-Б излучения Солнца [1]. Наблюдения вертикального распределения озона (ВРО) на миллиметровых волнах с поверхности Земли позволяют получать надёжную информацию о содержании озона и его изменениях в широком диапазоне высот, в стратосфере и в мезосфере [2–9].

Задачей наблюдений вертикального распределения озона, проводимых в Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН, является изучение откликов озоносферы на протекающие атмосферные процессы [4]. Наблюдения атмосферного озона на миллиметровых (ММ) волнах проводятся на частотах спектральной линии озона с центром на 142.2 ГГц (длина волны 2.1 мм) с 1987 г. [4].

В данной работе представлены новые результаты исследований вертикального распределения озона над Москвой в периоды значительных изменений в атмосфере: при среднезимнем внезапном стратосферном потеплении в 2010 г., а также во время образования сильного истощения озонового слоя в высоких широтах Северного полушария весной 2011 г. Показаны существенные межгодовые различия высотно-временных распределений в холодные полугодия 2009–2010 гг. и 2010–2011 гг.

**2.** Наблюдения ВРО производятся с помощью оптимизированного спектро радиометра, характеристики которого и методы наблюдений профилей озона описаны в работах [4–6]. Однополосная шумовая температура спектро радиометра составляет около 700 К при охлаждении входных каскадов жидким азотом и около 1500 К без охлаждения. На выходе спектро радиометра установлен фильтровой анализатор спектра АС-96, который имеет 96 каналов (создан в ИПФ РАН с участием ФИАН). Этот анализатор спектра имеет расширенную полосу анализируемых частот, равную 475 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 – восстановления профиля вертикального распределения озона из измеренных спектров – используется алгоритм [10], основанный на методах Тихонова и статистической регуляризации. Данные о профилях температуры и давления в атмосфере, необходимые для восстановления профилей ВРО, получены из базы данных [11]. Оценки [4–6] 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 согласие результатов наблюдений в ФИАН с данными спутниковых измерений ВРО [4–6]. Так, различие усредненных за апрель 1996–2003 гг. профилей

ВРО, полученных по наблюдениям в ФИАН и из космоса с помощью приборов ультрафиолетового диапазона SBUV [12], составило менее 6% на высотах 20–45 км. Различие усредненных за март 2005 г. профилей ВРО, полученных при наземных измерениях в ФИАН и с помощью прибора MLS на спутнике Aura [13] над Москвой, не превосходило 7% на высотах 21–51 км.

Для анализа результатов наблюдений ВРО над Москвой в рассмотренные периоды 2009–2010 гг. и 2010–2011 гг. использовалась созданная в ФИАН методика. В соответствии с ней были проанализированы карты геопотенциальных высот, температуры, потенциальной завихренности (potential vorticity, PV) [11] для ряда высотных уровней стратосферы Северного полушария, карты общего содержания озона [14], а также проведён траекторный анализ с помощью траекторных моделей Goddard automailer и HYSPLIT (NOAA HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory model) [15]. Проанализировано положение основных барических систем стратосферы в Северном полушарии, рассмотрено изменение интенсивности полярного стратосферного вихря, которая характеризуется геопотенциальной высотой  $H_c$  в центре полярного вихря (см., например, [16]). Известно [1], что сильные воздушные течения вокруг полярной области приводят к изолированности воздуха вихря. Граница (край) полярного вихря определялась методом расчётов максимума производной PV и с учётом максимума скорости ветра [17].

**3.** В результате регулярных наблюдений ВРО было построено высотно-временное распределение озона, отражающее изменения, происходившие в озоносфере в холодные периоды 2009–2010 гг. и 2010–2011 гг. Распределения озона для указанных холодных периодов представлены на рис. 1 и рис. 2 соответственно.

На этих рисунках изолиниями показано содержание озона в единицах отношения смеси  $C_{Oz}$  (ppm, или  $10^{-6}$ ). Для более наглядного представления различий и особенностей временного хода  $C_{Oz}$  в средних слоях стратосферы в 2009–2010 гг. и в 2010–2011 гг. на рис. 3 показаны значения  $C_{Oz}$  на высоте 30 км над Москвой для обоих холодных периодов. На этом рисунке стрелками обозначены события, характеризующиеся пониженными значениями  $C_{Oz}$ . Анализ показал, что причинами таких обнаруженных над Москвой понижений содержания озона  $C_{Oz}$ , явилось появление над Московским регионом воздуха полярного вихря (включая воздух края вихря), который характеризуется более низкими (по сравнению с воздухом вне вихря) значениями  $C_{Oz}$ . Такие события были зарегистрированы в отдельные периоды в октябре, ноябре 2009 г., в январе, феврале и марте 2010 г., а также ноябре, декабре 2010 г., в феврале, марте и апреле 2011 г.

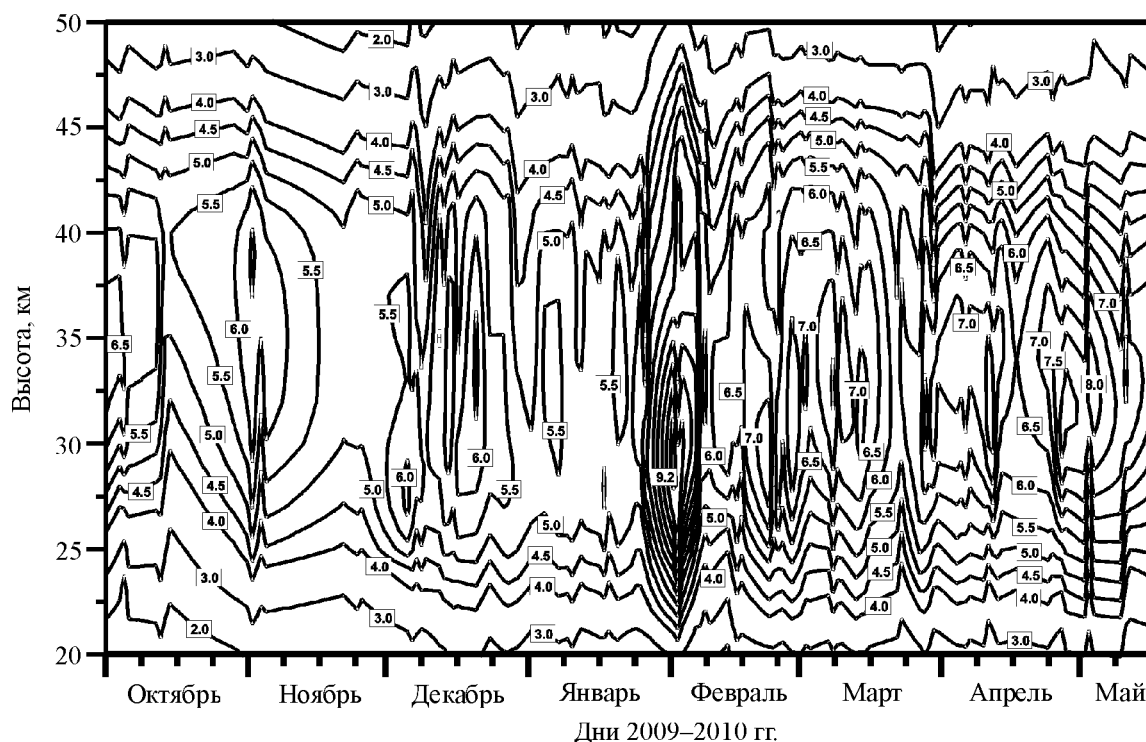


Рис. 1: *Высотно-временное распределение озона в единицах отношения смеси (ppm) в холодный период 2009–2010 гг.*

Как видно из рис. 3, отношение смеси  $C_{O_3}$  на высоте 30 км в холодное полугодие 2009–2010 гг. изменялось в пределах примерно от 4 ppm до 9 ppm. При этом минимальное значение  $C_{O_3}$ , равное 4.0 ppm, было зарегистрировано 16 октября 2009 г. Такое сильное понижение  $C_{O_3}$  связано с появлением воздуха вихря над Московским регионом в начале рассматриваемого холодного периода.

Другой особенностью холодного полугодия 2009–2010 гг. явилось показанное на рис. 1 и рис. 3 значительное увеличение  $C_{O_3}$  в конце января – начале февраля 2010 г. В этот период отношение смеси  $C_{O_3}$  на высоте 30 км возросло от 5.4 ppm 25 января до 9.2 ppm 3 февраля 2010 г., что превысило весенний максимум озона  $C_{O_3}$ , зарегистрированный в конце апреля – начале мая 2010 г. (см. рис. 3).

Наблюдавшиеся изменения вертикального распределения озона в конце января – начале февраля 2010 г. являются откликом озоносферы на среднезимнее стратосферное потепление, при котором возникло сильное возмущение циркуляции атмосферы.

Анализ полей геопотенциала и потенциальной завихренности Северного полушария в холодный период 2009–2010 гг. показал, что вариации содержания озона в средних

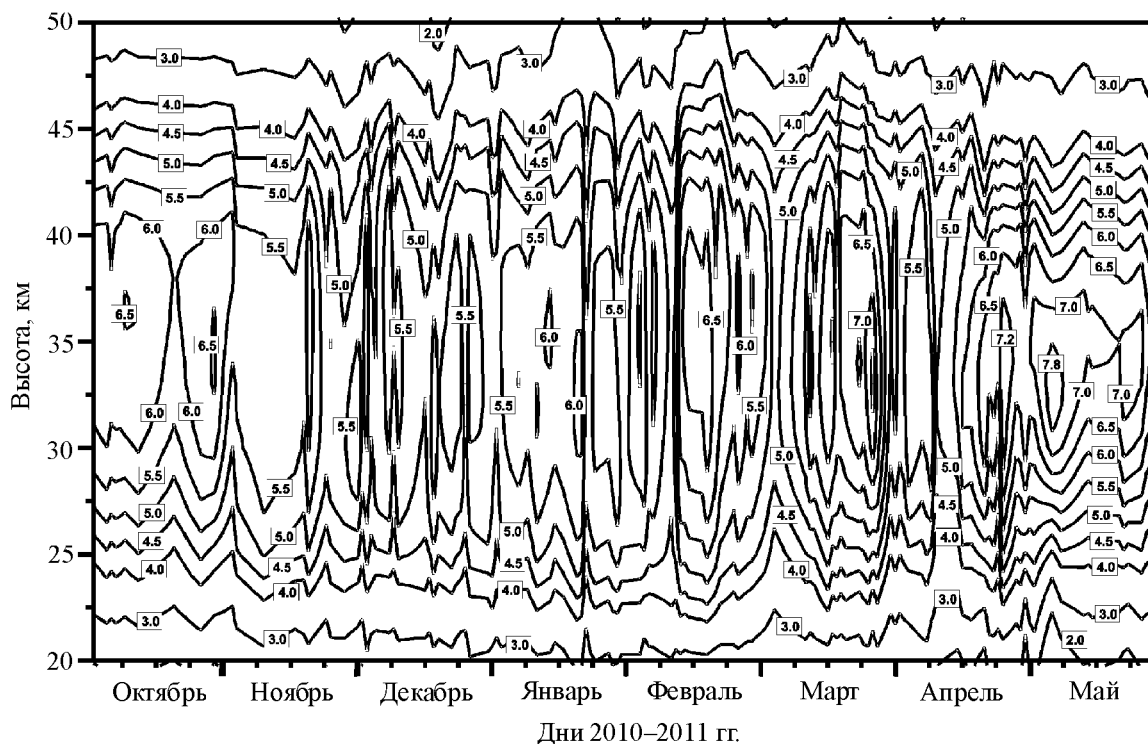


Рис. 2: Высотно-временное распределение озона в единицах отношения смеси (ppm) в холодный период 2010–2011 гг.

слоях стратосферы также, как и в предыдущие холодные периоды [4, 5, 7], связаны с крупномасштабными динамическими процессами в стратосфере. О влиянии динамики атмосферы на озон в холодный период 2009–2010 гг. свидетельствует, например, установленная корреляционная связь концентрации озона на высоте 30 км с характеризующей атмосферные движения потенциальной завихренностью на близком к этой высоте изэнтропическом уровне с потенциальной температурой 850 К. Соответствующий коэффициент корреляции составляет  $-0.85 \pm 0.04$ .

Благодаря наблюдениям озона на ММ волнах в условиях перемещения вихря над Москвой в январе–феврале 2010 г. удалось произвести “разрезы” полярного вихря. При этом луч зрения спектрометра дважды пересёк край вихря.

Упомянутое выше значительное увеличение содержания озона в конце января–начале февраля 2010 г. было зарегистрировано при перемещении вихря и было вызвано появлением над Москвой богатого озоном воздуха вне вихря. Произошло пересечение лучом зрения спектрометра области края вихря по схеме “изнутри вихря наружу”. Из анализа данных [11] следует, что область края полярного вихря помимо обнаружен-

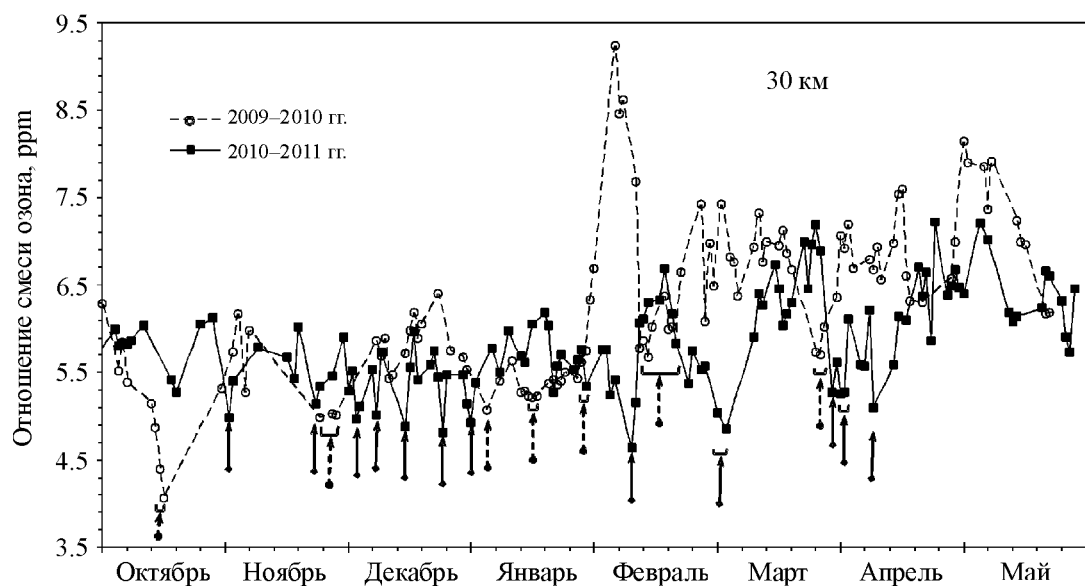


Рис. 3: Отношение смеси озона на высоте 30 км в холодные периоды 2009–2010 гг. (пунктирная кривая) и 2010–2011 гг. (сплошная кривая). Стрелки означают пониженное содержание  $O_3$ . Скобками выделены периоды низкого  $C_{O_3}$ .

ного большого перепада концентрации озона характеризуется также значительными горизонтальными градиентами в полях геопотенциала и потенциальной завихренности. Анализ с использованием модели [15] и карт общего содержания озона [14] показал, что траектория богатого озном воздуха, появившегося в стратосфере над Москвой в начале февраля 2010 г., проходила через области стратосферы с повышенным общим содержанием озона над южной частью Дальнего Востока, а также северо-западной частью Канады.

В результате дальнейшего перемещения полярного вихря снова произошло пересечение его края, но уже в направлении “снаружи вихря внутрь”. Это пересечение сопровождалось снижением содержания озона от 9.2 ppb 3 февраля 2010 г. до 5.7 ppb 11 февраля 2010 г. (см. рис. 1 и рис. 3).

Интересным явлением стало зарегистрированное постепенное увеличение  $C_{O_3}$  в воздухе вихря при его появлениях над Московским регионом в течение холодного полугодия 2009–2010 гг. Из представленных на рис. 1 и рис. 3 данных следует, что величина  $C_{O_3}$  в воздухе вихря возрастала в течение этого холодного полугодия от 4 ppb в октябре 2009 г. примерно до 5.7–6.4 ppb в феврале и марте 2010 г.

Высотно-временное распределение озона над Москвой в холодное полугодие 2010–2011 гг., показанное на рис. 2, имеет существенные отличия от распределения озона в предыдущий холодный период 2009–2010 гг.

Как следует из данных на рис. 2, рис. 3, содержание озона  $C_{O_3}$  на 30 км над Москвой до начала февраля 2011 г. изменялось относительно слабо – в пределах примерно от 5 ppм до 6 ppм, и только в феврале–марте пределы колебаний  $C_{O_3}$  возросли и составили от 4.6 ppм до 7.2 ppм.

Важной особенностью циркуляции стратосферы в холодное полугодие 2010–2011 гг. явилось продолжительное существование интенсивного полярного вихря, во время которого центр вихря значительную часть времени располагался вблизи Северного полюса. В отличие от события 16 октября 2009 г., возникшее понижение содержания озона 18–19 октября 2010 г. было менее значительным, поскольку над Москвой в это время располагалась лишь пограничная область полярного вихря.

Из представленных на рис. 3 данных следует, что изменения содержания озона  $C_{O_3}$  в воздухе вихря на высоте 30 км над Москвой в холодное полугодие 2010–2011 гг. лежали в пределах от 4.6 ppм до 5.3 ppм, причём в феврале–марте 2011 г. значения  $C_{O_3}$  в воздухе вихря были заметно ниже соответствующих величин в 2010 г. Другим важным отличием холодного периода 2010–2011 гг. стало появление воздуха вихря с пониженным на 30–35% содержанием озона над Москвой 30 марта и 7 апреля 2011 г. Это произошло во время смещения полярного вихря к Европе. В эти дни, судя по картам общего содержания озона [14], над Московским регионом появлялась периферия аномально истощённой области озона, большая часть которой располагалась в высоких широтах. В этой области, как показано в работе [18], из-за возросшей концентрации хлора, разрушающего озон при низких температурах, возникли беспрецедентные для Северного полушария потери озона над высокими широтами.

Для иллюстрации развития полярных стратосферных вихрей на рис. 4 представлена полученная из анализа данных [11] геопотенциальная высота  $H_c$  уровня 10 мбар (высота около 30 км) в центре полярного вихря в рассмотренные холодные периоды 2009–2010 гг. и 2010–2011 гг. Здесь и ниже геопотенциальная высота дана в геопотенциальных метрах, гп.м (геопотенциальные метры, как известно, численно примерно соответствуют геометрическим метрам, см., например, [19]).

Как следует из карт полей геопотенциала на уровне 10 мбар, полярный вихрь в 2009–2010 гг. стал наиболее глубоким, т.е. геопотенциальная высота  $H_c$  достигла минимальных значений в первой половине января 2010 г. Действительно, геопотенциальная

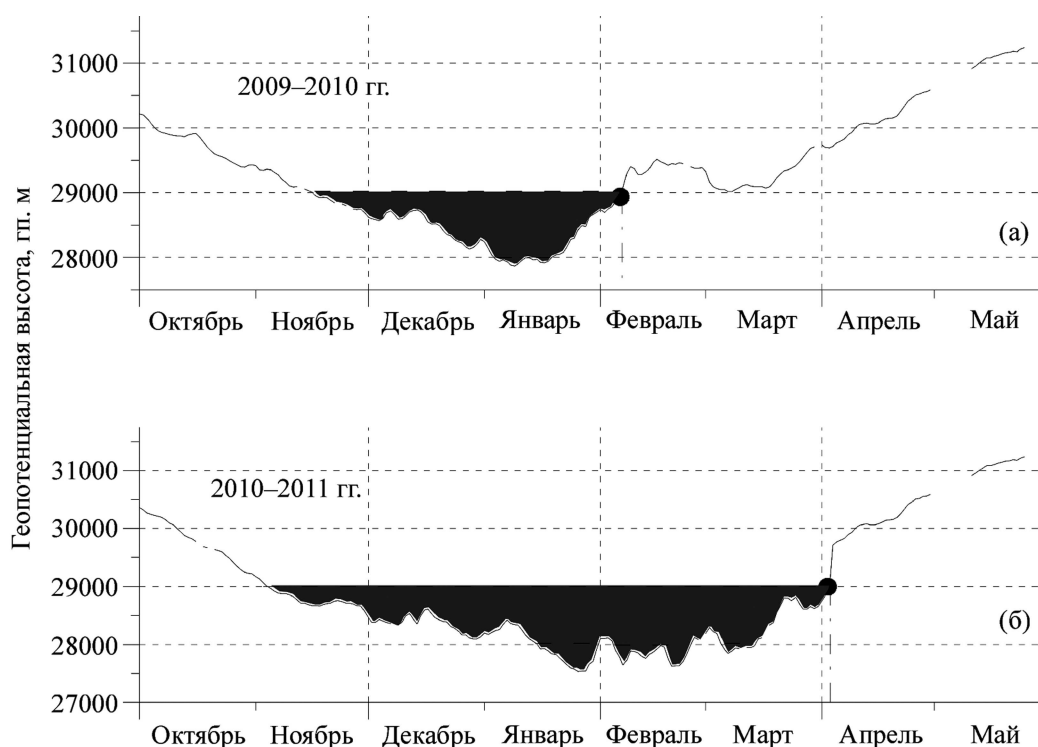


Рис. 4: Геопотенциальная высота  $H_c$  уровня давления 10 мбар в центре полярного вихря в холодные периоды 2009–2010 гг. и 2010–2011 гг. Горизонтальными пунктирными линиями отмечены значения  $H_c = 28 \cdot 10^3$  гп.м. и  $H_c = 29 \cdot 10^3$  гп.м. Заштрихована область с  $H_c \leq 29 \cdot 10^3$  гп.м.

высота  $H_c$  на рис. 4(а), примерно равная  $30 \cdot 10^3$  гп.м в начале октября 2009 г., снизилась до значений, меньших  $28 \cdot 10^3$  гп.м, в январе 2010 г. В конце января 2010 г. произошло упомянутое выше стратосферное потепление. Оно сопровождалось увеличением температуры воздуха над Москвой, увеличением геопотенциальной высоты  $H_c$ , деформацией и смещением полярного вихря. Например, на высоте 30 км температура воздуха поднялась почти на 50 К за период с 24 по 29 января 2010 г. Как видно на рис. 4(а), в феврале 2010 г. геопотенциальная высота увеличилась до значений, превышающих  $29 \cdot 10^3$  гп.м. В феврале 2010 г. вихрь стал вытянутым (в поперечном сечении) и, распавшись на две части, приобрёл двухцентровую структуру (значения  $H_c$  на рис. 4(а) в этот период соответствуют более глубокой части вихря).

Из сравнения графиков на рис. 4(а) и рис. 4(б) видно, что вихрь в 2010–2011 гг. углублялся быстрее, чем в 2009–2010 гг. и, за исключением начала января, полярный вихрь в 2011 гг. был более глубоким, чем в предыдущий холодный период. Отмеченные



выше более низкие значения  $C_{O_3}$  в воздухе вихря над Москвой в феврале–марте 2011 г. по сравнению с соответствующими значениями  $C_{O_3}$  в предыдущий холодный период могут означать более высокую изолированность воздуха вихря в 2010–2011 гг., которая объясняется большей интенсивностью (глубиной) этого вихря.

Как видно на рис. 4(б), вихрь с  $H_c$  менее  $29 \cdot 10^3$  гп.м сохранялся долго – до начала апреля 2011 г., т.е. примерно на два месяца дольше, чем в предыдущий холодный период. Обнаруженные пониженные значения  $C_{O_3}$  в воздухе вихря над Москвой 7 апреля 2011 г. свидетельствуют о том, что более долгоживущий интенсивный вихрь в 2010–2011 гг. препятствовал перемешиванию и обмену с богатым озоном воздухом вне вихря также и в апреле 2011 г.

Таким образом, межгодовые отличия высотно-временного распределения озона в холодные полугодия 2009–2010 гг. и 2010–2011 гг. (рис. 1, рис. 2, рис. 3) оказались связанными с различиями динамических процессов, с особенностями развития полярных вихрей в рассматриваемые холодные сезоны.

Отмеченные в работе [18] беспрецедентные для Северного полушария потери озона над высокими широтами, превосходившие 80% в слое на высоте около 20 км, свидетельствуют о возможности возникновения озонных дыр в Северном полушарии даже при более умеренных снижениях температуры стратосферы в Арктике по сравнению с температурами в Антарктике. Это уникальное явление в Северном полушарии стало полной неожиданностью, поскольку пока ещё не существует надёжных прогнозов изменений в озоном слое.

Поэтому для оперативного обнаружения сильных истощений озона (озонных дыр), необходимы дальнейшие исследования, включающие мониторинг вертикального распределения озона на миллиметровых волнах.

Полученные результаты указывают на большие изменения концентрации стратосферного озона под влиянием крупномасштабных атмосферных процессов, 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 значительного истощения озонового слоя в полярном вихре, а также при сильных возмущениях, вызванных стратосферным потеплением, и представляют важность для развития прогнозов эволюции озоносферы.

Авторы выражают глубокую благодарность профессорам В. Н. Сорокину, Е. В. Суворову и В. А. Черепенину за поддержку данной работы. Авторы признательны лабора-

тории NOAA Air Resources Laboratory (ARL) за возможность пользования транспортной моделью HYSPLIT, центру British Atmospheric Data Center (BADC) за любезно предоставленные метеорологические данные, а также благодарны NASA за возможность доступа к спутниковым данным.

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] *World Meteorological Organization. Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2010. Report 52*, (Global Ozone Research and Monitoring Project, Geneva, 2011).
- [2] *Atmospheric remote sensing by microwave radiometry*. Ed. M. Janssen (J. Willey & Sons Inc., New York, 1993).
- [3] А. А. Красильников, Ю. Ю. Куликов, А. Б. Мазур и др., *Микроволновое зондирование озона и других малых составляющих атмосферы. В сборнике “Физика микроволн”* (Изд. ИПФ РАН, Нижний Новгород, 1999), **1**, с. 171.
- [4] С. В. Соломонов, *Успехи соврем. радиоэлектроники*, № 1, 9 (2003).
- [5] С. В. Соломонов, К. П. Гайкович, Е. П. Кропоткина и др., *Известия вузов. Радиофизика*, **54**(2), 113 (2011).
- [6] С. В. Соломонов, А. Н. Игнатъев, Е. П. Кропоткина и др., *Приборы и техника эксперимента*, № 2, 138 (2009).
- [7] С. В. Соломонов, Е. П. Кропоткина, С. В. Розанов, А. Н. Лукин, *Краткие сообщения по физике ФИАН*, № 1, 23 (1998).
- [8] A. Parrish, *Proc. IEEE* **82**(12), 1915 (1994).
- [9] U. Klein, I. Wohltmann, K. Lindner, and K. F. Kunzi, *J. Geophys. Res.* **107**, No D20, 8288 (2002).
- [10] K. P. Gaikovich, *Inverse Problems in Physical Diagnostics* (Nova Science Publishers Inc., New York, 2004).
- [11] The British Atmospheric Data Centre (BADC). [Электронный ресурс]. 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).
- [12] SBUV Version 8, Nimbus 7, NOAA-9a, NOAA-9b, NOAA-11, NOAA-16 //DVD-ROM. (Prepared by the NOAA/NASA Ozone Processing Team, 2004).

- [13] L. Froidevaux, N. J. Livesey, W. G. Read, et al., *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing* **44**(5), 1106 (2006).
- [14] The Green Lane Environment Canada's World Wide Web Site. Select Ozone Maps [Электронный ресурс]. URL: <http://woudc.ec.gc.ca/cgi-bin/selectMap>.
- [15] R. R. Draxler and G. D. Rolph, 2010 HYSPLIT (NOAA Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) Model, NOAA ARL READY Website NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring, MD, [http://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT\\_traj.php](http://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT_traj.php).
- [16] Д. А. Тарасенко, *Структура и циркуляция стратосферы и мезосферы* (Л., Гидрометеоиздат, 1988).
- [17] E. R. Nash, P. A. Newman, J. E. Rosenfield, and M. R. Shoerberl, *J. Geophys. Res.* **101**(D5), 9471 (1996).
- [18] G. L. Manney, M. L. Santee, M. Rex, et al., *Nature* **478**, 469 (2011), doi: 10.1038.
- [19] Ф. Х. Хргиан, *Физика атмосферы* (М., Изд. МГУ, 1986).

Поступила в редакцию 30 мая 2012 г.