

УДК 551.510

## МОНИТОРИНГ ВЕРТИКАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОЗОНА НАД МОСКВОЙ НА МИЛЛИМЕТРОВЫХ РАДИОВОЛНАХ

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

*Представлены результаты мониторинга вертикального распределения озона (ВРО) на ММ-волнах над Москвой. Рассмотрены особенности высотно-временного распределения озона, отражающего эволюцию озоносферы над умеренными широтами. Показаны изменения ВРО, характеризующие отклик озоносферы на стратосферное потепление в январе 2009 г. Сделан вывод о необходимости создания отечественной наземной сети мониторинга пространственного распределения озона на ММ-волнах.*

**Ключевые слова:** миллиметровые волны, озон, мониторинг.

1. Исследование эволюции озоносферы является важнейшей задачей в изучении климата, состояния окружающей среды и экосистемы в целом [1, 2]. Для изучения происходящих в озоносфере изменений необходим мониторинг вертикального распределения озона (ВРО), включающий наблюдения в холодное полугодие в период активизации атмосферных волновых процессов и связанных с ними сильных возмущений, стратосферных потеплений [1]. Важную роль в наблюдениях вертикального распределения озона в стратосфере и мезосфере играют радиофизические методы, дистанционное зондирование озоносферы на миллиметровых (ММ) волнах с поверхности Земли [1–4]. Дистанционное зондирование в этой области спектра имеет ряд достоинств. В диапазоне ММ-волн сосредоточены многочисленные спектральные линии озона, водяного пара, окиси хлора и ряда других газов, играющих ключевую роль в атмосферных процессах. Радиофизические методы позволили проводить круглосуточные наблюдения атмосферы по ее собственному тепловому радиоизлучению при различных погодных условиях,

---

Учреждение Российской академии наук Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, 119991 Москва, Ленинский проспект, д. 53.

поскольку ослабление излучения в облаках и слоях аэрозоля в радиодиапазоне существенно меньше, чем в оптической области спектра.

Ниже рассматриваются новые результаты наблюдений вертикального распределения стратосферного озона над Москвой, выполненных в Физическом институте им. П. Н. Лебедева РАН (ФИАН) на ММ-волнах.

2. Многолетние наблюдения озоносферы на миллиметровых волнах проводятся в ФИАН [3, 4] с помощью наземной высокочувствительной спектральной аппаратуры с 1987 г. При этом регистрируется вращательная спектральная линия озона с центром на 142.175 ГГц. Эта уширенная столкновениями молекул линия содержит информацию о высотном распределении молекул озона в стратосфере и мезосфере. Вертикальный профиль озона восстанавливается из измеренной спектральной линии методами Тихонова и статистической регуляризации [4, 5]. При решении обратной задачи (восстановлении ВРО из измеренной спектральной линии), интерпретации и анализе результатов наблюдений в ФИАН использовались данные о вертикальных профилях температуры, давления, полей температуры, геопотенциала и потенциальной завихренности [6]. Суммарная погрешность восстановленного профиля вертикального распределения озона (с учетом шума аппаратуры и других экспериментальных погрешностей) при оптимальных условиях наблюдения не превышает 5–7% на высотах 20–50 км, постепенно возрастающая в более низких и более высоких слоях [3]. По данным справочной модели [7], в слое 35–40 км в умеренных широтах расположен максимум среднемесячных значений вертикального распределения озона, представленного в единицах объемного отношения смеси озона и воздуха  $C_{O_3}$ . Ниже количество озона  $C_{O_3}$  дано в общепринятых в зарубежной литературе единицах ppm, или  $10^{-6}$ .

Получено хорошее соответствие зарегистрированных в ФИАН профилей ВРО с данными одновременных наблюдений озона над Москвой из космоса в отдельные дни и профилей, усредненных за месяц. Например, различие усредненных за апрель 1996–2003 гг. профилей ВРО, полученных по наблюдениям в ФИАН и с помощью ультрафиолетового инструмента SBUV [8], составляет менее 6% на высотах 20–45 км. Различие усредненных профилей ВРО, полученных в ФИАН и с помощью спектрометра MLS на спутнике Aura [9] над Москвой в марте 2005 г., не превосходит 7% на высотах 21–51 км. Спектральная аппаратура ФИАН была включена в состав глобальной озонметрической сети по международным программам DYANA, CRISTA/MAHRSI, SOLVE 2000. По инициативе ФИАН были выполнены одновременные наблюдения озоносферы на ММ-волнах из различных наземных пунктов [10, 11], ставшие первыми

шагами в создании наземной сети микроволнового мониторинга озонного слоя с участием отечественных обсерваторий.

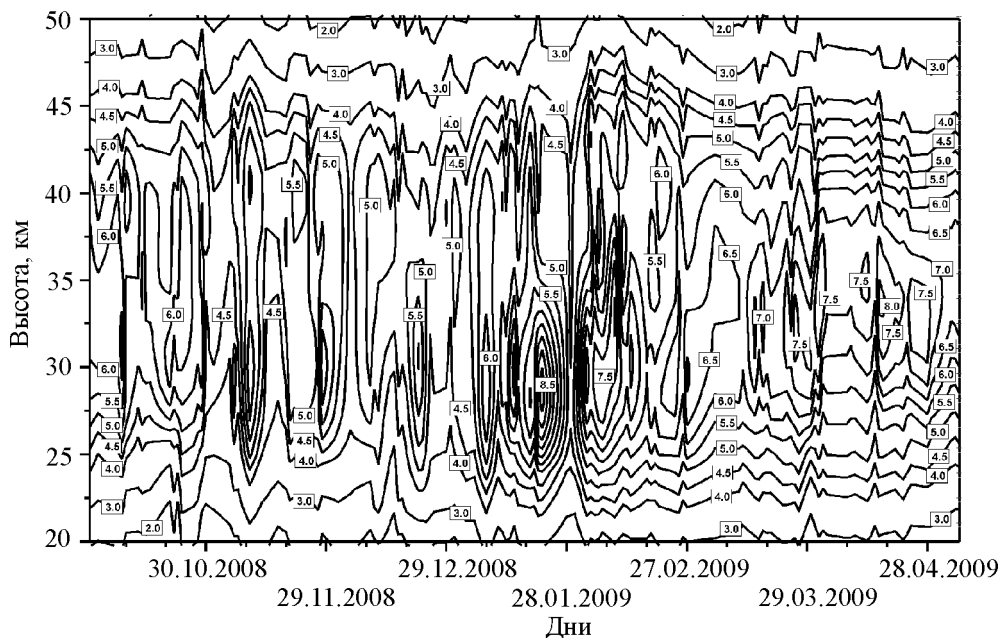


Рис. 1: Высотно-временное распределение озона над Москвой в период с 01.10.2008 г. по 06.05.2009 г. Изолиниями показаны уровни равного содержания озона в единицах отношения смеси (ppmt).

3. В результате выполненных в ФИАН многолетних наблюдений ВРО получена подробная картина изменений в озоносфере. Зарегистрированы короткопериодные, сезонные, межгодовые и более долговременные изменения вертикального распределения стратосферного озона. Наиболее значительные изменения ВРО происходили в холодные полугодия, при сильных стратосферных потеплениях.

Существенное влияние на вертикальное распределение озона над Москвой оказывали процессы в полярном стратосферном вихре, воздух которого характеризуется пониженным содержанием озона.

Полярный стратосферный вихрь развивается осенью при охлаждении стратосферы в условиях уменьшения солнечного освещения. При этом устанавливается зимний тип циркуляции. Воздух полярного стратосферного вихря отличается от воздушных масс вне вихря более высокими значениями потенциальной завихренности (*potential vorticity, PV*) [12]. Анализ карт потенциальной завихренности *PV* (карты построены на основании данных [6]) на отдельных изэнтропических уровнях стратосферы Северно-

го полушария дал возможность по методике [12] определять границу между воздухом полярного стратосферного вихря с высокими значениями  $PV$  и воздушными массами более низких широт с существенно более низкими значениями  $PV$ . Эта граница характеризуется большими скоростями окружающего вихрь воздушного потока и резким изменением градиента потенциальной завихренности [12]. Как показал анализ метеорологических данных (карт полей  $PV$ , барической топографии, температуры [6]) и траекторный анализ, воздух полярного вихря нередко оказывается над умеренными широтами европейской части нашей страны, включающими и Московский регион. Это происходит под влиянием возмущений циркуляции атмосферы, в том числе в периоды зимних потеплений в стратосфере и мезосфере. Для определения траекторий движения воздушных частиц в стратосфере использовалась траекторная модель NYSPLIT (NOAA Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory model) [13].

В качестве примера зарегистрированного над Москвой высотно-временного распределения озона, на рис. 1 изолиниями показано распределение содержания озона  $C_{O_3}$  на высотах 20–50 км над Москвой с 01.10.2008 г. по 06.05.2009 г. Влияние атмосферных процессов на озоносферу проявляется в деформациях поля  $C_{O_3}$ . По сгущению изолиний на рис. 1 хорошо виден отклик озоносферы на сильное возмущение (стратосферное потепление) в январе-феврале 2009 г. и смещение максимума распределения  $C_{O_3}$  вниз к 30 км.

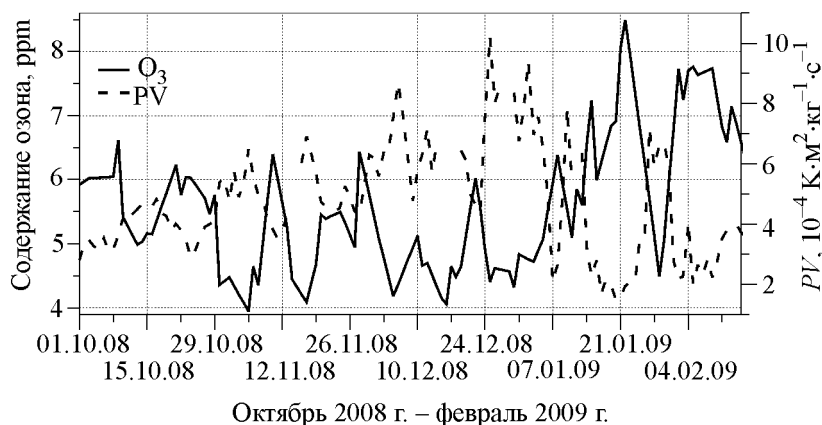


Рис. 2: Содержание (отношение смеси) озона на высоте 30 км по результатам наблюдений в ФИАН (вертикальная ось слева), а также значения потенциальной завихренности над Московским регионом (вертикальная ось справа) для уровня с потенциальной температурой 850 K по данным [6].

На рис. 2 представлены данные о содержании озона  $C_{O_3}$  над Москвой на высоте 30 км в период с 01.10.2008 г. по 15.02.2009 г. и значения потенциальной завихренности  $PV$  для близкого по высоте уровня с потенциальной температурой  $\theta = 850$  К [6] для этого же периода времени.

В ноябре, декабре 2008 г. и в январе 2009 г. воздух полярного вихря, охватывающего огромную площадь, неоднократно появлялся в стратосфере над Москвой.

На рис. 1 и рис. 2 видно, что содержание стратосферного озона достигает минимальных значений в зимний период. Эти снижения содержания озона происходили при повышенных значениях  $PV$ , характерных для воздуха полярного стратосферного вихря. Наиболее значительные изменения в озоносфере обнаружены в январе 2009 г. при сильном стратосферном потеплении, во время которого содержание озона на высоте 30 км 22 января 2009 г. достигло 8.5 ppм, а затем снизилось до 4.5 ppм 29 января (рис. 2). Как показал анализ карт потенциальной завихренности, барической топографии и температуры, во время этого потепления полярный вихрь разделился на две части и 21 января 2009 г. одна из них оказалась над Сибирью, а другая над северо-восточной частью Канады и Гренландией. При этом над Московским регионом располагался воздух стратосферного антициклона – области высокого давления с пониженными значениями  $PV$  и, как показали измерения в ФИАН, с повышенным содержанием озона. К 29 января воздушные массы стратосферного полярного вихря с пониженным содержанием озона (рис. 2) оказались над Московским регионом, переместившись из Сибири к Европе.

Таким образом, периодическим увеличением (уменьшением) потенциальной завихренности над Москвой, вызванным перемещениями основных барических систем стратосферы (полярного стратосферного вихря и антициклона), соответствовали уменьшения (увеличения) содержания озона на высоте 30 км над Москвой (рис. 2). На рис. 3 показаны примеры профилей ВРО с пониженным содержанием озона в воздухе вихря, наблюдавшихся 25 декабря 2008 г. и 29 января 2009 г., а также с повышенным содержанием озона в слое 25–30 км, зарегистрированных вне вихря 21 и 22 января 2009 г.

В стратосфере над Московским регионом на высотах ниже 35 км 29 января находились воздушные массы полярного вихря с пониженным содержанием озона и с повышенными значениями  $PV$  (рис. 2).

Согласно результатам траекторного анализа, воздух с повышенным содержанием озона, наблюдавшимся на высоте 25–30 км над Москвой 21 января 2009 г., за двое суток до этого, т.е. 19 января, находился над Средиземным морем. В следующие сутки, т.е. 20 января, этот воздух переместился в центральную часть Европы и оказался над

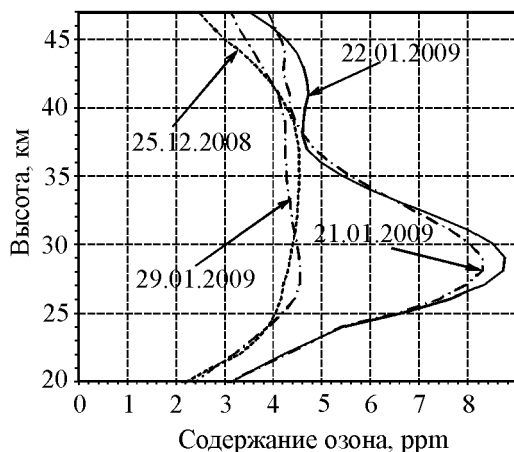


Рис. 3: Примеры профилей вертикального распределения озона в декабре 2008 г. и январе 2009 г.

Балтикой, откуда затем с северо-запада приблизился к Москве, описав за эти двое суток дугу по часовой стрелке, что характерно для антициклона.

Воздушные массы с пониженным содержанием озона, появившиеся над Москвой 29 января 2009 г., за двое суток до этого (т.е. 27 января) располагались над Северным Казахстаном и Западной Сибирью. Затем, описав крутую дугу против часовой стрелки (что типично для циклона), они приблизились к Москве с северо-востока.

В допущении линейной вероятностной связи между содержанием озона  $CO_3$  на 30 км и  $PV$  (в общем случае она нелинейна), коэффициент корреляции для этих величин оказался равным  $\rho = -0.82 \pm 0.04$  для представленного на рис. 2 периода. Такая связь этих характеристик свидетельствует о сильном влиянии процессов переноса воздушных масс на пространственное распределение озона. Таким образом, географическое положение пункта наблюдения озоносферы в Москве оказалось удобным для изучения вертикального распределения озона как внутри полярного вихря, так и вне его (рис. 3) в силу отмеченного выше нередкого появления воздуха полярного вихря над Москвой.

Откликом озоносферы на стратосферное потепление в январе 2009 г., во время которого была нарушена зимняя циркуляция, стали значительные изменения формы вертикального распределения озона. Нередко возникали профили озона с локальными неоднородностями. Примеры таких деформированных профилей озона показаны на рис. 4, где представлены профили ВРО с локальными неоднородностями — двумя максима-

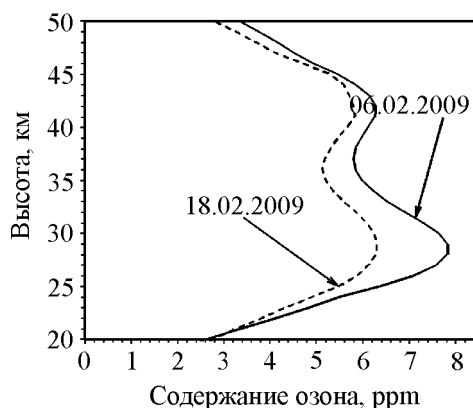


Рис. 4: Примеры профилей вертикального распределения озона в феврале 2009 г.

мами на высотах около 28 и 42 км (вместо одного на высоте 35 км по модели [7]), зарегистрированными 6 и 18 февраля 2009 г. Профили ВРО с двумя максимумами в стратосфере, неоднократно наблюдавшиеся над Москвой, свидетельствуют о существовании слоистых структур в озоносфере. Такие особенности профилей ВРО наблюдались над Московским регионом также и из космоса с помощью прибора MLS на спутнике Aura [9].

Многолетние наблюдения на ММ-волнах позволили зарегистрировать в 2008–2009 гг. и в предыдущие годы пониженные (по сравнению с данными спутниковых измерений в конце 70-х – начале 80-х годов) среднемесячные значения содержания озона весной в чувствительных к техногенным воздействиям слоях верхней стратосферы (40–45 км), что согласуется с результатами других экспериментов, с известными теоретическими данными и может быть связано с разрушением озона из-за техногенного загрязнения атмосферы хлорсодержащими веществами (ХФУ) [1].

4. Анализ результатов мониторинга ВРО в 2008–2009 гг. и в предыдущие годы позволяет сделать следующие выводы.

Исследовано влияние атмосферных процессов на структуру сезонного хода озона умеренных широт. Значительное понижение содержания стратосферного озона наблюдалось над Москвой в холодное полугодие (обычно в ноябре, декабре и январе) в воздухе полярного стратосферного вихря. При этом содержание озона в воздухе вихря было значительно ниже, чем в воздухе вне вихря.

Наибольшие изменения в озоносфере зарегистрированы при стратосферных потеплениях. Наблюдения показали, что сильное стратосферное потепление в январе 2009 г. сопровождалось изменением содержания озона на высоте 30 км от 4.5 ppм до 8.5 ppм.

Зарегистрированы слоистые структуры в озоносфере, характеризующиеся двумя стратосферными максимумами вертикального распределения озона в холодное полугодие.

Обнаруженное пониженное содержание озона в слоях верхней стратосферы весной отражает прогнозируемое долговременное изменение в наиболее чувствительной к техногенным загрязнениям области озоносферы на высотах 40–45 км.

Полученные новые данные об особенностях высотно-временного распределения озона свидетельствуют о важности мониторинга вертикального распределения озона радиофизическими методами с целью изучения эволюции озоносферы. Результаты исследований показывают настоятельную необходимость создания отечественной наземной сети мониторинга пространственного распределения озона на ММ-волнах и последующего её включения в глобальную озонометрическую сеть.

Авторы выражают глубокую благодарность академику А. Г. Литваку, профессорам К. П. Гайковичу, А. В. Масалову, В. Н. Сорокину, Е. В. Суворову и В. А. Черепенину за поддержку данной работы. Авторы признательны лаборатории NOAA Air Resources Laboratory (ARL) за любезно предоставленную возможность пользования транспортной моделью HYSPLIT, а также благодарны центру British Atmospheric Data Center (BADC) за любезно предоставленные аэрологические данные.

Работа поддержана Программами ОФН РАН “Современные проблемы радиофизики” и “Радиоэлектронные методы в исследовании природной среды и человека”.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2006. Global Ozone Research and Monitoring Project, Report No. 50 (World Meteorological Organization, Geneva, 2007).
- [2] World Meteorological Organization Global Atmosphere Watch (GAW) Strategic Plan: 2008–2015 (WMO, Geneva, TD NO. 1384, 2007).
- [3] С. В. Соломонов, А. Н. Игнатъев, Е. П. Кропоткина и др., Приборы и техника эксперимента, N 2, 138 (2009).
- [4] С. В. Соломонов, К. П. Гайкович, А. Н. Игнатъев и др., “Дистанционное зондирование атмосферного озона на миллиметровых волнах” в: Труды конференции “Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред”, Муром, 2009 г, (Муромский институт (филиал) ВлГУ, Муром, CD-R, 2009), стр. 49.
- [5] К. П. Гайкович, Е. П. Кропоткина, С. В. Соломонов, Известия АН. Физика атмосферы и океана **35**(1), 86 (1999).



- [6] The British Atmospheric Data Centre (BADC) <http://badc.nerc.ac.uk/data/assim/>
- [7] G. M. Keating, L. S. Chiou, and N. C. Hsu, *Adv. Space Res.* **18**(9/10), 11 (1996).
- [8] SBUV Version 8, Nimbus 7, NOAA-9a, NOAA-9b, NOAA-11, NOAA-16 (DVD-ROM, Prepared by the NOAA/NASA Ozone Processing Team, April 2004).
- [9] L. Froidevaux, N. J. Livesey, W. G. Read, et al., *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sensing* **44**(5), 1106 (2006).
- [10] S. V. Solomonov, E. P. Kropotkina, A. N. Lukin, et al., *J. Atmos. Terr. Phys.* **56**(1), 9 (1994).
- [11] Е. П. Кропоткина, Ю. Ю. Куликов, В. Г. Рыскин, С. В. Соломонов, *Изв. вузов. Радиофизика* **50**(10–11), 954 (2007).
- [12] E. R. Nash, P. A. Newman, J. E. Rosenfield, and M. R. Schoeberl, *J. Geophys. Res.* **101**(D5), 9471 (1996).
- [13] R. R. Draxler and G. D. Rolph, 2010. HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) Model access via NOAA ARL READY Website NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring, MD (<http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>).

Поступила в редакцию 31 марта 2010 г.