

модель дополнительные реакции гидроксила с окислами азота и реакции нечетного кислорода, а также расширить ряд проводимых измерений в различных условиях освещенности для конкретной оценки скорости фотодиссоциации двуокиси азота, входящей в реакции газовых составляющих.

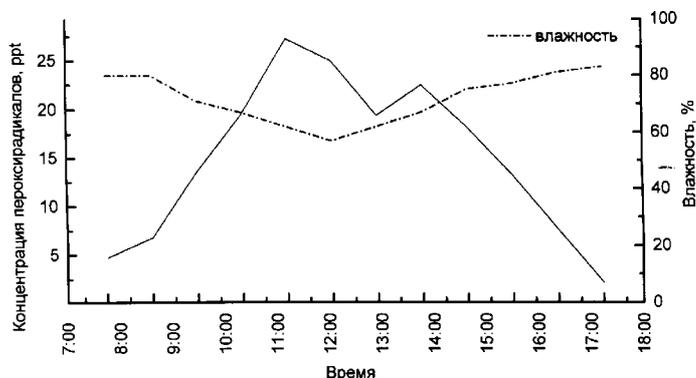


Рис. 5. Поведение концентрации пероксирадикалов и влажности 2 марта 1996 г.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (грант 96-05-66284).

Литература

1. Радиационно-фотохимические модели атмосферы / Под ред. И. Л. Кароля. Л., 1986.
2. Organic Peroxy Radicals: Kinetics, Spectroscopy and Tropospheric Chemistry / Ed. by P. P. Lightfoot. Environm. Research Prog., 1994.
3. Parish D.D., Trainer M., Williams E.J. et al. // J. Geophys. Res. 1986. **91**. P. 5361.
4. Madronich S. // Atm. Envir. 1987. **21**. P. 569.
5. Chemical Kinetics and Photochemical Data for Use in Stratospheric Modeling, 26-94, JPL, 1994.
6. Monk P.S., Carpenter L.J., Penkett S.A., Ayers G.P. // Geophys. Res. Lett. 1996. **23** (5). P. 535.
7. Kleiman L., Lee Y.-N., Springston S.R. et. al. // J. Geophys. Res. 1995. **100** (D4). P. 7263.

УДК 551.510.534: 528.811

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ОЗОнового СЛОЯ НА МИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛНАХ НАД МОСКОВСКИМ РЕГИОНОМ В 1996–1997 гг.

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

Приведены результаты исследований высотно-временного распределения озона в стратосфере и мезосфере над Московским регионом, выполненных с помощью радиоспектрометра 2-мм диапазона волн в период с января 1996 г. по май 1997 г. Обнаружено значительное уменьшение относительного содержания озона на высотах от 30 до 40 км в зимние периоды.

1. Введение

Исследования защитного озонового слоя и мониторинг озоносферы над густонаселенными районами и крупными городами являются актуальными проблемами, особенно в связи с наметившимся ухудшением состояния озонового слоя, обнаружением его истощения над полярными регионами и образованием антарктической озонной дыры. Основная информация об озоне поступает с шаров-озонзондов, с борта ракет, самолетов и искусственных спутников Земли. Кроме того, используются традиционные наземные оптические методы, а также лидары. Накапливаемые экспериментальные данные составляют все более полную картину глобального состояния озонового слоя, что важно для прогнозирования его эволюции в будущем. К сожалению, особенности высотно-временного распределения озона над конкретными

регионами умеренных широт северного полушария, в том числе над Москвой, изучены хуже.

Для решения важной задачи оперативного мониторинга озонового слоя с поверхности Земли в Физическом институте им. П. Н. Лебедева РАН (ФИАН) разработаны методы и создана высокочувствительная аппаратура [1, 2], работающая в миллиметровом диапазоне радиоволн и позволяющая измерять вертикальное распределение озона (ВРО) в стратосфере и мезосфере над Московским регионом. Наблюдения с помощью этой аппаратуры дают возможность получать данные о ВРО круглосуточно, при различных погодных условиях, в том числе в отсутствие оптической видимости. Систематические наблюдения, проводимые в ФИАНе в течение последних 10 лет, позволяют оперативно обнаруживать изменения содержания озона над Московским регионом и вы-

являть характерные особенности влияния атмосферных процессов на эти изменения [3, 4]. Аппаратура ФИАНа была включена в состав глобальной озонметрической сети по международным программам DYANA (1990 г.) и CRISTA/MAHRSI (1994 и 1997 гг.). Ниже приведены результаты регулярных исследований атмосферного озона на миллиметровых волнах, проводившихся в 1996–1997 гг.

2. Метод исследований

Наблюдаемые спектральные линии озона формируются в слоях атмосферы, для которых справедливо приближение локального термодинамического равновесия, при переходах между вращательными уровнями энергии молекул. Уширение отдельных спектральных линий озона в миллиметровой области спектра до высот мезосферы обусловлено столкновениями молекул, так что на частотах около 100 ГГц ширины линий пропорциональны давлению до высот 70–80 км. На больших высотах преобладает доплеровское уширение. Поэтому весьма специфичный контур спектральных линий озона отражает вклад излучения его молекул из различных слоев стратосферы и мезосферы. По форме спектральной линии, зарегистрированной на поверхности Земли, можно восстановить вертикальный профиль содержания озона в стратосфере и мезосфере.

Тепловое радиоизлучение молекул озона в линии 142,2 ГГц измерялось с помощью размещенного в Москве маломощного радиоспектрометра [2]. Для восстановления вертикального профиля озона использовались известные математические методы [5, 6]. В приведенных ниже результатах наблюдений за период с января 1996 г. по май 1997 г. ошибки восстановления ВРО не превышают 5–7% на высотах ниже 50 км и 10% в остальной области зондируемых высот. При обработке и анализе результатов наблю-

дений были использованы данные об общем содержании озона в атмосфере и вертикальных профилях температуры и давления в стратосфере, любезно предоставленные Центральной аэрологической обсерваторией (ЦАО) и Гидрометцентром.

3. Результаты наблюдений

Полученные вертикальные профили озона характеризуются значительной изменчивостью в зависимости от особенностей атмосферных процессов. На рис. 1 в качестве примера представлены зарегистрированные в 1996 и 1997 гг. вертикальные профили озона, а на рис. 2 — временная зависимость относительного содержания озона C над Московским регионом на высотах $H = 30–40$ км, т.е. вблизи максимума относительного содержания озона (согласно модели [7], максимум ВРО $C(H)$ расположен на высоте примерно 35 км).

Рассмотрим основные особенности распределения озона в 1996 г. (рис. 1, *a* и 2, *a*). Содержание озона на высотах 30–40 км в течение всего января и в отдельные периоды февраля и марта было пониженным, опускаясь до 40–50% от средних модельных значений [7], обозначенных пунктирными прямыми линиями на рис. 2. Столь значительное уменьшение содержания озона на этих высотах над Москвой зимой 1995–1996 гг. происходило в условиях устойчивой зимней циркуляции в стратосфере северного полушария. По данным оптических наблюдений в ЦАО, общее содержание озона над Москвой в эти периоды также уменьшалось, составляя 80–90% от средних многолетних значений [8].

5–12 февраля 1996 г. было зарегистрировано значительное увеличение содержания озона в стратосфере (рис. 1, *a*, кривые 6, 7), что коррелировало с возрастанием общего содержания озона в атмосфере.

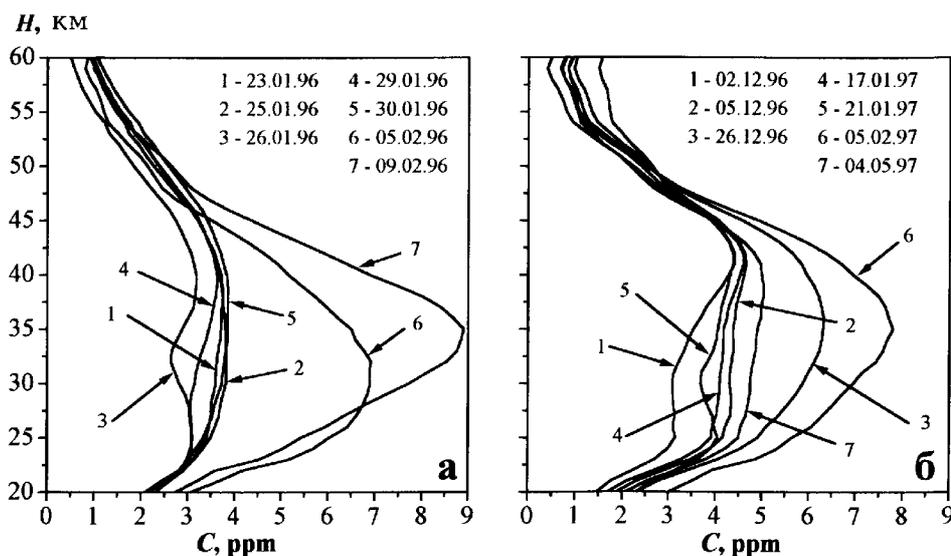


Рис. 1. Вертикальные профили относительного содержания озона $C(H)$, полученные из наблюдений на миллиметровых волнах над Московским регионом в начале 1996 г. (*a*) и в конце 1996 г. – начале 1997 г. (*б*)

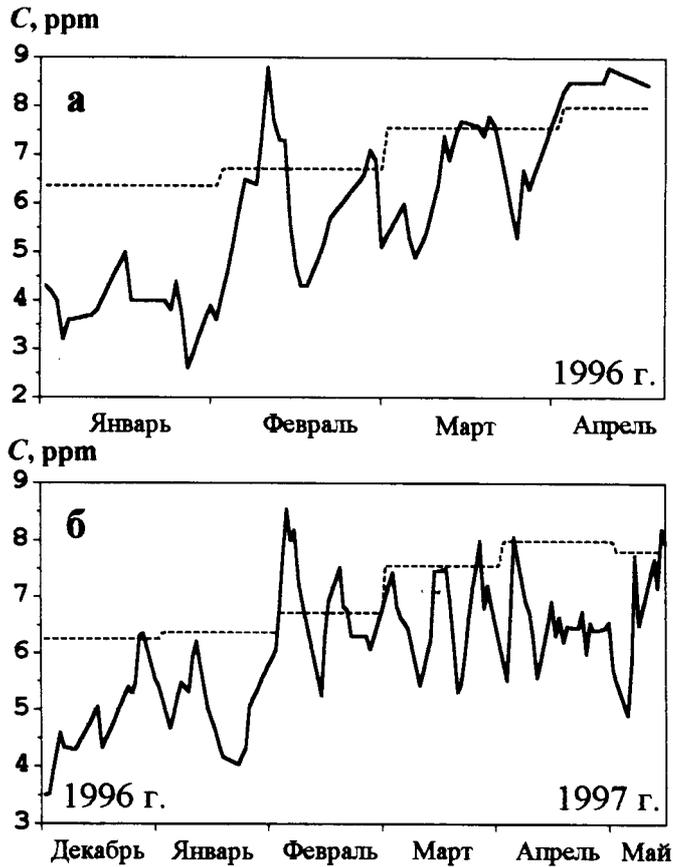


Рис. 2. Содержание озона на высотах 30–40 км над Московским регионом по данным наблюдений на миллиметровых волнах в холодные периоды 1996 г. (а) и 1996–1997 гг. (б)

Это увеличение было обусловлено влиянием приближившейся к Москве области высокого давления (стратосферного антициклона), которая вызвала поступление воздушных масс с повышенным содержанием озона. Затем антициклон вернулся в низкие широты и содержание озона снова уменьшилось (рис. 2,а).

В конце февраля и в марте 1996 г. наблюдалось так называемое финальное стратосферное потепление. В этот период происходили сильные перемещения основных барических образований стратосферы — полярного вихря (циклона) и Алеутского антициклона, а также образовывались струйные течения, которые переносили богатые озоном воздушные массы из низких широт в высокие. Эти процессы приводили к вариациям в содержании озона над Московским регионом в конце февраля и в марте 1996 г. (рис. 2,а). Стратосферное потепление перешло затем в весеннюю перестройку циркуляции стратосферы, которая завершилась к середине апреля. При этом содержание озона возросло, что характерно для этого периода.

Особенностью холодного сезона 1996–1997 гг. явилось значительное возмущение в динамике стратосферы во второй половине ноября и в декабре 1996 г. В это время центр полярного вихря значительно сместился от Северного полюса к Европе, что сопровождалось понижением относительного со-

держания озона на высотах 30–40 км до 3,5 ppb (т.е. $3,5 \cdot 10^{-6}$) — см. рис. 1,б, кривые 1, 2 и рис. 2,б — и уменьшением общего содержания озона в атмосфере над Московским регионом до 75–85% от средних значений. В третью декаду декабря это возмущение закончилось, центр полярного вихря вернулся к Северному полюсу и ВРО стало близким к модели [7] (рис. 1,б, кривая 3 и рис. 2,б).

В первой половине января 1997 г. полярный циклон углублялся, а в период 17–21 января он вновь сместился в сторону Москвы. Одновременно с этим наблюдалось уменьшение содержания озона на высотах 30–40 км (рис. 1,б, кривые 4, 5 и рис. 2,б), а также уменьшение его общего содержания в атмосфере. В начале февраля 1997 г. произошло резкое увеличение содержания озона на высотах 30–40 км до 8,5 ppb (рис. 1,б, кривая 6 и рис. 2,б), а также рост общего содержания озона, что было связано с образованием антициклона в стратосфере над Европой.

Интересно отметить, что последующие колебания содержания озона над Московским регионом, наблюдавшиеся до конца февраля и начала марта, совпадали по времени с перемещениями стратосферного полярного вихря. Возрастание содержания озона происходило при удалении вихря от Москвы, а уменьшение — при его приближении. В апреле полярный вихрь неоднократно оказывался смещенным к Европе, что привело к уменьшению содержания озона в стратосфере над Москвой, зарегистрированному с помощью спектрометра миллиметрового диапазона (рис. 2,б). В отличие от весны 1996 г. весенняя перестройка циркуляции стратосферы в 1997 г. происходила позже и завершилась в начале мая. Влияние полярного вихря на озоновый слой над Москвой проявилось также 4–5 мая, когда было отмечено уменьшение относительного содержания озона на высотах 30–40 км до 4,7 ppb (рис. 1,б, кривая 7 и рис. 2,б). Это уменьшение было вызвано появлением над Москвой воздушных масс, принадлежащих полярному вихрю (координаты центра вихря в это время составляли 56° с.ш., 35° в.д.). Летний тип циркуляции окончательно установился к 9 мая, когда весенняя перестройка завершилась, последние остатки полярного циклона исчезли и, по данным наблюдений на миллиметровых волнах, в стратосфере над Московским регионом оказался обогащенный озоном воздух, что типично для весеннего периода (рис. 2,б).

4. Выводы

Таким образом, результаты выполненных в 1996–1997 гг. в ФИАНе измерений ВРО с помощью наземного спектрометра миллиметрового диапазона радиоволн подтверждают данные [1, 3, 4], полученные ранее по той же методике и свидетельствующие о значительном влиянии динамических процессов на вертикальный профиль озона. Важным результатом является обнаруженное сильное истощение озонового слоя на высотах 30–40 км в холодные периоды рас-

смаатриваемых лет. Относительное содержание озона на этих высотах может снижаться на 50–60% по сравнению со средними модельными значениями. Эти изменения существенно превосходят сопутствующее им уменьшение (на 10–25%) общего содержания озона в атмосфере.

Отмеченная связь изменений содержания озона на высотах 30–40 км с перемещениями основных барических систем стратосферы и с положением полярного вихря показывает важную роль динамики стратосферы в распределении озона в этом слое. Вместе с тем для объяснения наблюдавшихся на миллиметровых волнах значительных изменений содержания озона необходимо учитывать влияние на его распределение не только динамических, но и фотохимических процессов, роль которых возрастает в слоях выше 30 км. Полученные результаты содержат новую важную информацию об изменениях, происходящих в озоносфере. Обнаруженное истощение озонового слоя над Московским регионом требует дальнейших наблюдений за его состоянием.

Авторы выражают глубокую благодарность чл.-корр. РАН И. И. Собельману за поддержку работы, а также Г. М. Крученицкому и Т. В. Кадыгровой (ЦАО) и Т. С. Кружковой (Гидрометцентр) за предоставленные данные аэрологического зондирования.

Работа была поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (грант 96-02-19093а).

Литература

1. *Собельман И.И., Соломонов С.В., Сороченко Р.Л.* // Вестн. РАН. 1993. **63**, № 8. С. 721.
2. *Solomonov S.V., Rozanov S.B., Kropotkina E.P.* et al. // Proc. SPIE. 1998. **3406**.
3. *Solomonov S.V., Kropotkina E.P., Lukin A.N.* et al. // J. Atmos. Terr. Phys. 1994. **56**, № 1. P. 9.
4. *Соломонов С.В., Кропоткина Е.П., Лукин А.Н.* и др. // Изв. РАН, ФАО. 1993. **29**, № 4. С. 525.
5. *Тихонов А.Н., Гончарский А.В., Степанов В.В.* и др. Регуляризирующие алгоритмы и априорная информация. М., 1983.
6. *Gaikovitch K.P.* // Digest Int. Geosciences and Remote Sensing Symp. Pasadena, California, USA, Aug. 8–12, 1994. V. 4. P. 1901.
7. *Keating G.M., Chiou L.S., Hsu N.C.* // Adv. Space Res. 1996. **18**, № 9/10. P. 11.
8. Бюллетень о состоянии озонового слоя / Под ред. А. А. Черникова. Вып. 10. Долгопрудный: Изд. ЦАО, 1996.