

УДК 551.510

ОСОБЕННОСТИ ВЕРТИКАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОЗОНА НАД МОСКВОЙ ЗИМОЙ 1996 г. ПО НАБЛЮДЕНИЯМ НА ММ ВОЛНАХ В ФИАНе

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

В Физическом институте им. П. Н. Лебедева РАН в течение последних 10 лет проводятся систематические исследования озонного слоя над московским регионом методом наземного дистанционного зондирования на ММ волнах. В результате регулярных наблюдений на созданном в ФИАНе озонметре получена детальная картина высотно-временного распределения озона в 1996 г. Характерной особенностью состояния озоносферы над Москвой явилось устойчивое пониженное содержание озона в течение января и отдельных периодов февраля и марта 1996 г. Наиболее сильное уменьшение озона – до 2 – 2,5 раз по сравнению со средними значениями, обнаружено на высотах 30 – 45 км, где, как следует из фотохимической теории, озонный слой наиболее чувствителен к загрязнениям атмосферы.

Исследование состояния защитного озонного слоя, его мониторинг над густонаселенными регионами и крупными городами является актуальной проблемой, особенно в связи с наметившимся глобальным истощением озона, образованием антарктической озонной дыры и другими аномальными явлениями в озоносфере. Основная информация об озоне, его вертикальном распределении поступает с шаров-озонзондов, высота полета которых составляет примерно до 30 км, с борта ракет, самолетов и искусственных спутников Земли. Используются традиционные наземные оптические методы, а также лидары.

Для решения важной задачи наземного оперативного мониторинга озонового слоя в Физическом институте разработан новый эффективный метод и создана высокочувствительная озонметрическая аппаратура, работающая в ММ диапазоне радиоволн, с помощью которой измеряется вертикальное распределение озона (ВРО) в стратосфере и мезосфере на высотах 20 – 75 км над московским регионом. Наблюдения озонового слоя на ММ волнах позволяют получать ВРО круглосуточно, при различных погодных условиях, в том числе в отсутствие оптической видимости. Проводимые в ФИАНе систематические наблюдения позволяют оперативно обнаружить явления истощения озонового слоя, выявить характерные особенности влияния динамики и химии атмосферы на изменчивость озонового слоя над московским регионом [1, 3, 5]. Аппаратура ФИАНа для измерения озона была включена в состав глобальной озонметрической сети по международным программам DYANA и CRISTA-MAHRSI.

Наблюдения озонового слоя, регистрация вертикального профиля озона в стратосфере и мезосфере проводятся в ФИАНе с 1987 года с помощью созданных озонметрических комплексов, один из которых установлен на радиоастрономической станции ФИАН в г. Пущино Московской области, другой размещен в Москве [1]. Метод мониторинга озона на миллиметровых радиоволнах оказался очень удобным для оперативного контроля озонового слоя. С помощью приемной аппаратуры, входящей в состав озонметрического комплекса, регистрируется спектр теплового радиоизлучения молекул озона на частотах одной из спектральных линий вращательного спектра с центром на частоте 142,2 ГГц (длина волны около 2 мм), расположенной в окне прозрачности атмосферы. В излучение дают вклад слои стратосферы на разных высотах, для которых различны и давление атмосферы и концентрация молекул озона. В миллиметровом спектре уширение линий определяется столкновениями, т.е. пропорционально атмосферному давлению. Поэтому результирующий контур спектральной линии несет информацию о вертикальном распределении молекул озона. Для регистрации этой линии (примеры измеренных спектров озона приведены на рис. 1а) необходима приемная аппаратура высокой чувствительности и высокого спектрального разрешения, что реализовано в озонметре ФИАНа. На рис. 1б представлены примеры восстановленных профилей озона, соответствующих спектральным линиям, показанным на рис. 1а. Для восстановления вертикального профиля озона из измеренного спектра (обратная задача) применяются известные математические методы [2а, б]. Погрешности при восстановлении отдельного профиля озона не превышают 10%.

Наблюдения на ММ волнах в ФИАНе, выполненные за последние 10 лет, показы-

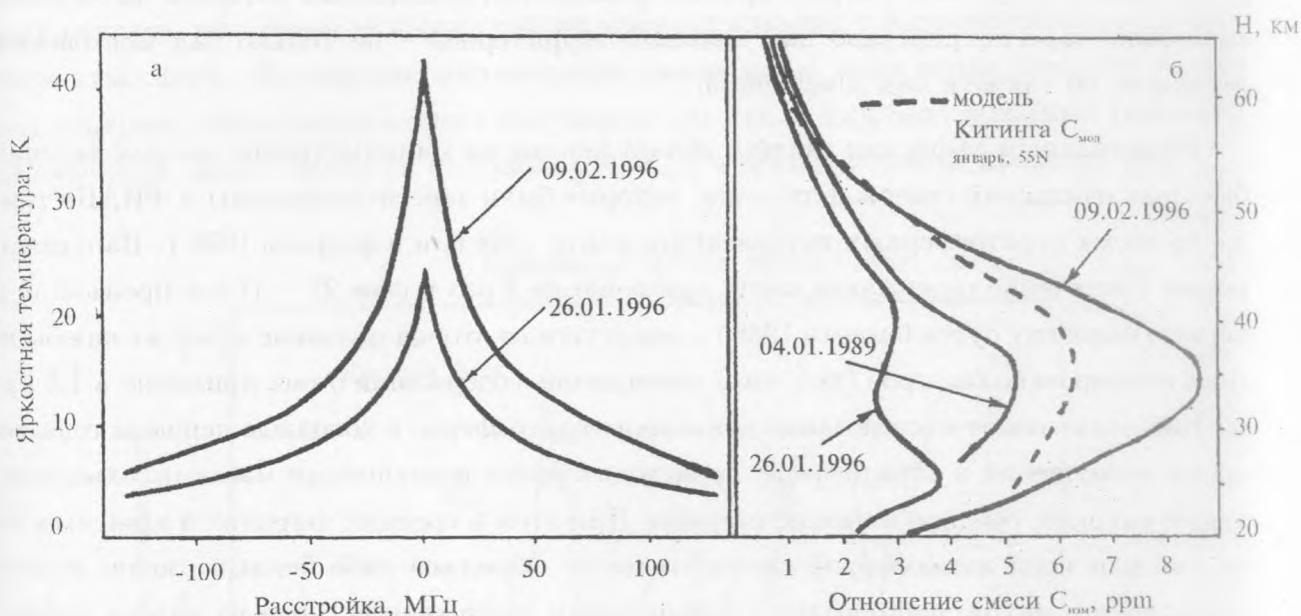


Рис. 1. а) Примеры спектральных линий озона с центром на частоте 142,2 ГГц, зарегистрированных 26 января и 9 февраля 1996 г. в ФИАНе. б) Вертикальное распределение содержания озона в ppt(10^{-6}) 26 января и 9 февраля 1996 г. и 4 января 1989 г.

вают, что вертикальный профиль содержания озона весьма чувствителен к происходящим в стратосфере физико-химическим процессам. В зависимости от особенностей этих процессов профиль озона в отдельные периоды может иметь устойчивые состояния с пониженными, повышенными или близкими к средним значениями содержания озона, а в другие периоды проявляет значительную изменчивость под их воздействием.

Вертикальные профили озона, близкие к модельным профилям [8], наблюдались летом, а также в начале холодных полугодий (в октябре и ноябре).

В середине холодного полугодия (в декабре – феврале) наблюдались периоды с пониженным содержанием озона (например, в отдельные дни января 1989 г. и, как показано ниже, в январе и феврале 1996 г.).

Во время усиления планетарной активности в стратосфере, характеризующейся увеличением амплитуды планетарных волн (например, во время стратосферных потеплений), наблюдались периоды с повышенным содержанием озона в слое 27 – 37 км (например, в феврале 1987 г., в марте 1988 и 1989 гг.). Повышенное содержание озона в слое 27 – 37 км над московским регионом было зарегистрировано также во второй половине февраля

1990 г. при проведении в ФИАНе наблюдений по международной программе DYANA. В это время завершалось стратосферное потепление, воздействие которого на озонный слой было зарегистрировано над большой территорией – не только над московским регионом, но также и над Швецией [3].

Неожиданным эффектом явились обнаруженные на миллиметровых волнах явления быстрых изменений содержания озона, которые были зарегистрированы в ФИАНе также во время стратосферных потеплений в марте 1988 г. и в феврале 1990 г. Например, резкое увеличение содержания озона примерно до 2 раз в слое 27 – 37 км произошло в первую половину суток 6 марта 1988 г., после чего во второй половине этого же дня было зарегистрировано быстрое (за 1 час) уменьшение содержания озона примерно в 1,5 раза. Как показывают исследования динамики стратосферы, в холодные периоды года, во время возмущений в стратосфере, происходит обмен воздушными массами, охватывающий высокие, средние и низкие широты. При этом в средних широтах в зависимости от той или иной атмосферной ситуации могут оказаться либо бедный озоном воздух из полярного вихря, либо воздух с повышенным содержанием озона из низких широт. Именно этими процессами, по-видимому, обусловлены быстрые вариации в вертикальном распределении озона, о которых говорилось выше.

Рассмотрим особенности вертикального распределения озона над Москвой по наблюдениям на ММ волнах в ФИАНе в 1996 г. Характерной отличительной особенностью состояния озоносферы над Москвой является устойчивое пониженное содержание озона в течение относительно продолжительных периодов времени в начале этого года. Действительно, как видно из рис. 2, на котором представлено содержание озона над Москвой на уровне 6 мбар (примерно на высоте 35 км, т.е. вблизи максимума относительной концентрации озона) зимой 1996 года, озонный слой на этой высоте характеризовался устойчивым пониженным содержанием озона в течение всего января и в отдельные периоды февраля и марта (рис. 2). Содержание озона на высотах 30 – 45 км в эти периоды уменьшилось до 2–2,5 раз по сравнению со средними значениями [8] (рис. 1б, 2 и 3). Необходимо отметить, что истощение озона, которое наблюдалось на ММ волнах в январе 1989 г. в слое 30 – 45 км (рис. 1б и 3) было не таким сильным, оно не превышало 40%. Столь значительное уменьшение содержания озона над Москвой зимой 1996 г. происходило в условиях устойчивой зимней циркуляции в стратосфере северного полушария и, возможно, при повышенном содержании там загрязняющих веществ, разрушающих озон. По данным сети аэрологического зондирования, стратосферный полярный вихрь (циклон), в сфере действия которого находилась стратосфера

над Москвой зимой 1995–1996 гг., был очень устойчивым. Известно [7], что в этом вихре озон активно разрушается в каталитических реакциях с участием хлора, брома и их окислов, повышенные концентрации которых связаны с антропогенным загрязнением атмосферы. Повышение концентрации окиси хлора были обнаружены не только над полярной областью северного полушария, но также над центральными районами Европейской части России со спутника UARS [4] в зимние периоды прошлых лет.

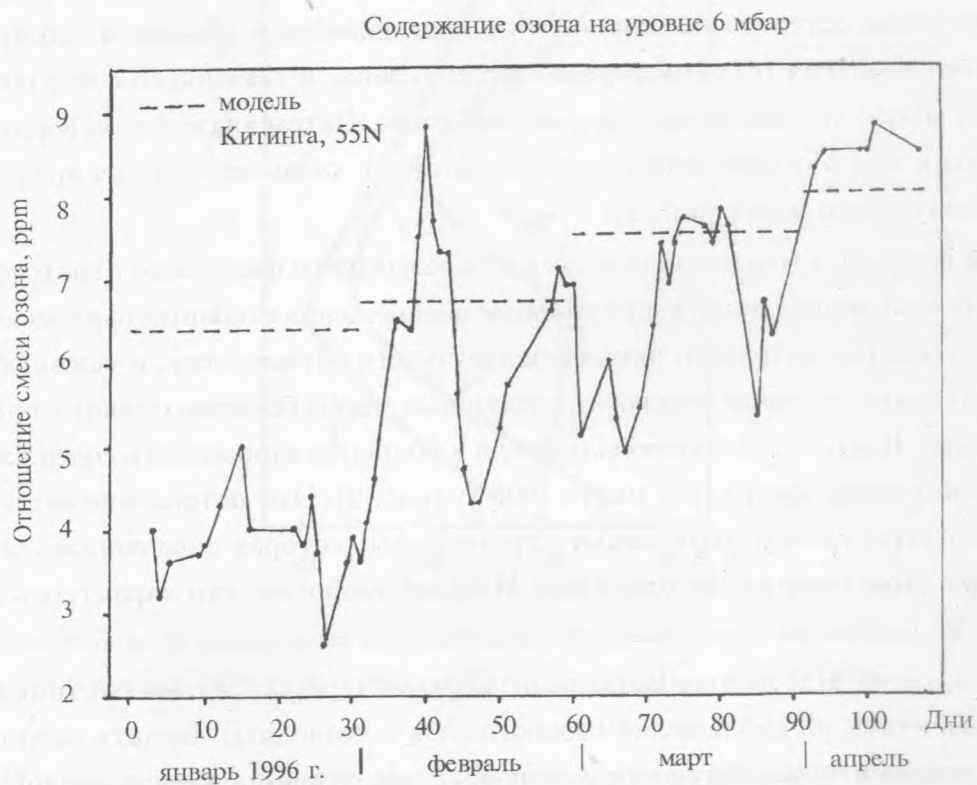


Рис. 2. Содержание озона над Москвой на уровне 6 мбар вблизи максимума относительной концентрации озона за период январь–апрель 1996 г.

Вместе с тем, существование устойчивой зимней циркуляции приводит к изоляции воздушных масс, препятствует поступлению богатого озоном воздуха из более низких широт. По-видимому, эти процессы и привели к наблюдавшемуся на ММ волнах устойчивому пониженному содержанию озона над Москвой. Важно отметить, что общее содержание озона по данным оптических измерений над Москвой в эти периоды также было понижено – примерно на 20% по сравнению с нормой [6]. Таким образом, явление истощения в озоносфере более сильно проявляется на вертикальном распределении

озона в слое 30 – 45 км, где, как это следует из фотохимической теории, озон очень чувствителен к загрязнениям, и поэтому измерение ВРО на ММ волнах более эффективно (по сравнению с оптическими методами) для обнаружения ранних стадий разрушения озонового слоя.

5 – 12 февраля 1996 г. было зарегистрировано значительное увеличение содержания озона в его вертикальном распределении (рис. 1б и 2), что коррелировало с увеличением общего содержания озона, измеренного оптическими методами в ЦАО [6]. Это увеличение озона обусловлено влиянием приблизившейся к Москве в это время области высокого давления (стратосферного антициклона) и связанного с ней поступления воздушных масс с увеличенным содержанием озона. Затем антициклон вернулся в низкие широты и над Москвой вновь появился воздух с характерным для высоких широт низким содержанием озона (рис. 2).

В конце февраля и марте наблюдалось так называемое финальное стратосферное потепление. В этот период происходят сильные перемещения основных барических образований стратосферы: полярного циклона и алеутского антициклона, а также образуются струйные течения, которые переносят воздушные массы богатые озоном из низких широт в высокие. Именно эти процессы привели к большим вариациям в содержании озона над Москвой в конце февраля и марте 1996 г. (рис. 2). Это потепление затем перешло в весеннюю перестройку циркуляции стратосферы, которая завершилась к середине апреля. При этом содержание озона над Москвой возросло, что характерно для этого периода.

Полученные на ММ волнах данные согласуются с результатами спутниковых и наземных оптических [6] наблюдений озонового слоя и позволяют сделать важный вывод: опасность истощения, периодически возникающего в озоновом слое над полярными областями, становится все более реальной и для озоносферы над умеренными широтами северного полушария, включая густонаселенный московский регион.

Развитые в ФИАНе методы дистанционного зондирования озонового слоя на ММ волнах открывают уникальную возможность оперативного контроля за состоянием озоносферы, за изменениями вертикального распределения озона в труднодоступных слоях стратосферы и мезосферы. Эти методы крайне необходимы для обнаружения ранних стадий прогнозируемого разрушения озонового слоя.

Данная работа поддержана грантами Международного научного фонда и Российского фонда фундаментальных исследований.

Авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность чл.-корр.

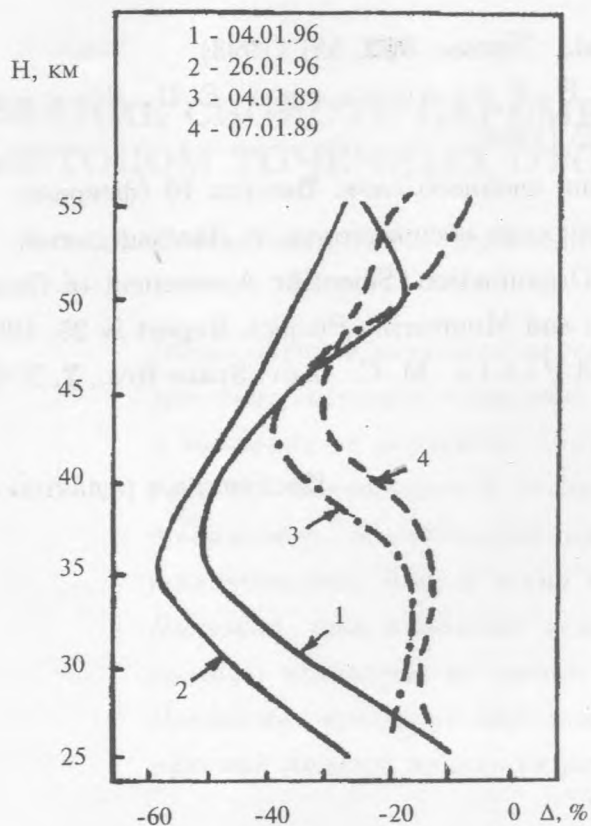


Рис. 3. Отклонение Δ измеренных вертикальных профилей озона от модели [8] 4 и 26 января 1996 г. и 4 и 7 января 1989 г.; $\Delta = [(C_{изм}(H) - C_{мод}(H))/C_{мод}(H)] \cdot 100\%$.

РАН И. И. Собельману и профессору Р. Л. Сороченко за внимание и поддержку данной работы.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Собельман И. И., Соломонов С. В., Сороченко Р. Л. Вестник РАН, **63**, 721 (1993).
- [2] а. Тихонов А. Н., Гончарский А. В., Степанов В. В., Ягола А. Я. Регуляризирующие алгоритмы и априорная информация. М., Наука, 1983; б. Gaikovich K. P., Kropotkina E. P., and Solomonov S. V. 25th General Assambly of the URSI, 1996, p. 291.

- [3] Solomonov S. V., Kropotkina E. P., Lukin A. N., et al. *Atm. Terr. Phys.*, **56**, no. 1, 9.
- [4] Waters J. W. et al., *Nature*, **362**, 597 (1993).
- [5] Соломонов С. В., Кропоткина Е. П., Лукин А. Н. и др. *Изв. АН., сер. ФАО*, **29**, 525 (1993).
- [6] Бюллетень о состоянии озонного слоя. Выпуск 10 (февраль – сентябрь 1996 г.). Центральная аэрологическая обсерватория, г. Долгопрудный, 1996.
- [7] World Meteorological Organization. *Scientific Assessment of Ozone Depletion: WMO Global Ozone Research and Monitoring Project. Report N 25*, 1991.
- [8] Keating G. M. and Pitts M. C. *Adv. Space Res.*, **7**, N 9, 937.

Поступила в редакцию 19 декабря 1996 г.

