

УДК 551.510

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ВЕРТИКАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОЗОНА НАД МОСКВОЙ

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

*В результате регулярных наблюдений озонного слоя на миллиметровых волнах исследовано высотное-временное распределение содержания озона над Москвой. Рассмотрены особенности этого распределения в холодный период 2002 – 2003 гг. Обнаружено значительное влияние процессов в полярном стратосферном вихре на состояние озоносферы средних широт.*

Атмосферный озон играет важную роль в излучении и поглощении электромагнитных волн, в атмосферной динамике, химии, тепловых процессах, в предохранении жизни от губительного биологически активного (УФ-Б) излучения Солнца [1]. Изучение закономерностей изменений вертикального распределения озона (ВРО) под влиянием факторов естественного и техногенного происхождения необходимо для решения задач физики атмосферы, экологии, при планировании экспериментов по изучению условий распространения радиоволн, для создания систем космической радиосвязи на миллиметровых (ММ) и субмиллиметровых (субММ) волнах и т.д. Вращательный спектр излучения озона богат сильными спектральными линиями, расположенными в радиодиапазоне – на ММ и субММ волнах. Поэтому озон, наряду с водяным паром и кислородом, вносит основной вклад в спектры радиоизлучения и поглощения стратосферы. В качестве иллюстрации на рис. 1 представлен рассчитанный по методике [2] участок субмиллиметрового спектра теплового излучения атмосферы в численном эксперименте лимбового зондирования при наблюдении из космоса. При расчете учтены спектры  $O_3$ ,  $O_2$ ,  $H_2O$ ,  $ClO$ ,  $N_2O$ ,  $NO$ ,  $CO$ . Все спектральные линии на рис. 1, за исключением отмеченных, принадлежат вращательному спектру атмосферного озона. Спектроскопические параметры для этих молекул взяты из атласа HITRAN [3]. Вертикальные распределения этих газов были заданы в соответствии с данными [1, 4]. Спектральные линии излучения стратосферного озона можно наблюдать и с поверхности Земли в так называемых

окна прозрачности атмосферы. На рис. 2 представлены результаты расчета по методике [2] спектра излучения атмосферы при наблюдении с поверхности Земли в зенит в диапазоне частот 15–350 ГГц. Как видно из рис. 2, между сильными линиями кислорода и водяного пара имеются окна прозрачности атмосферы, в которых расположены спектральные линии озона и других малых газовых составляющих стратосферы. В ФИАН проводятся многолетние регулярные наблюдения (мониторинг) атмосферного озона с поверхности Земли на частотах сильной спектральной линии с центром на 142.175 ГГц, соответствующей переходу  $10_{0,10} - 10_{1,9}$ . Методика восстановления вертикального профиля содержания озона из измеренной спектральной линии изложена в [5].

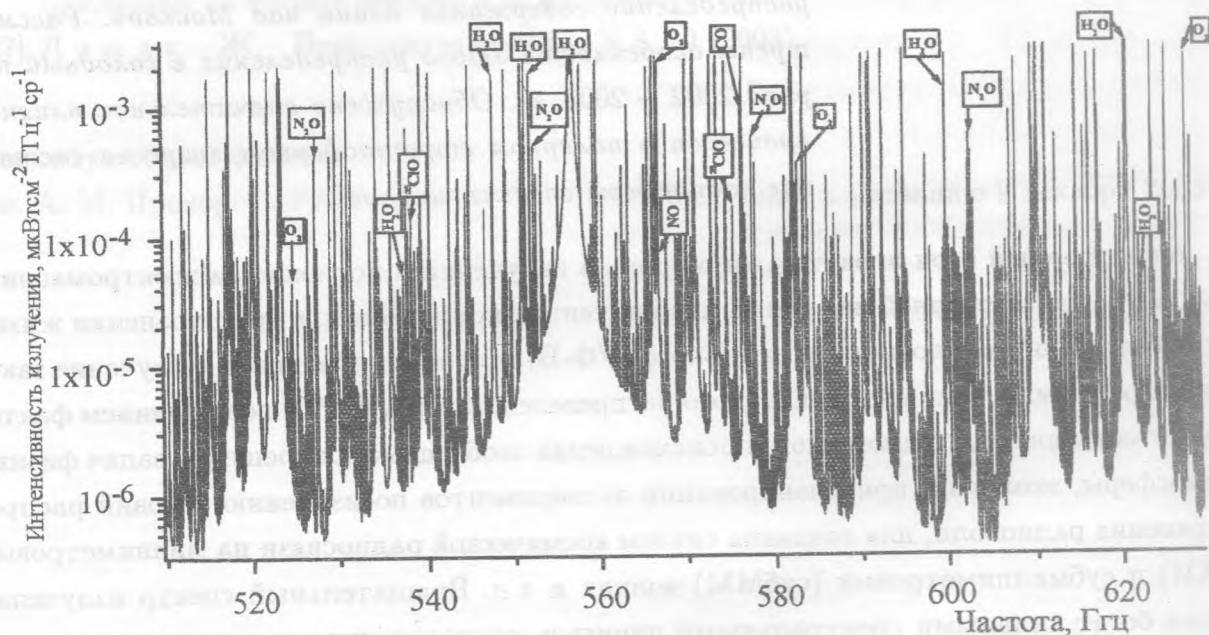


Рис. 1. Спектр излучения атмосферы в субмиллиметровой области от 500 до 640 ГГц при наблюдении из космоса вдоль луча зрения с тангенциальной высотой 40 км над горизонтом.

Выполненные ранее в ФИАН наблюдения показали [6], что наиболее значительные изменения в озоном слое средних широт происходят в холодное полугодие, в условиях активизации процессов атмосферной динамики, в период развития стратосферного полярного вихря (циркумполярного циклона). Стратосфера над Москвой оказывается в сфере влияния этого вихря. Известно, что в изолированной от внешней атмосферы центральной области полярного вихря (ниже для краткости эту область будем называть "полярным вихрем") происходит разрушение озона (см., например, [7]). Важной

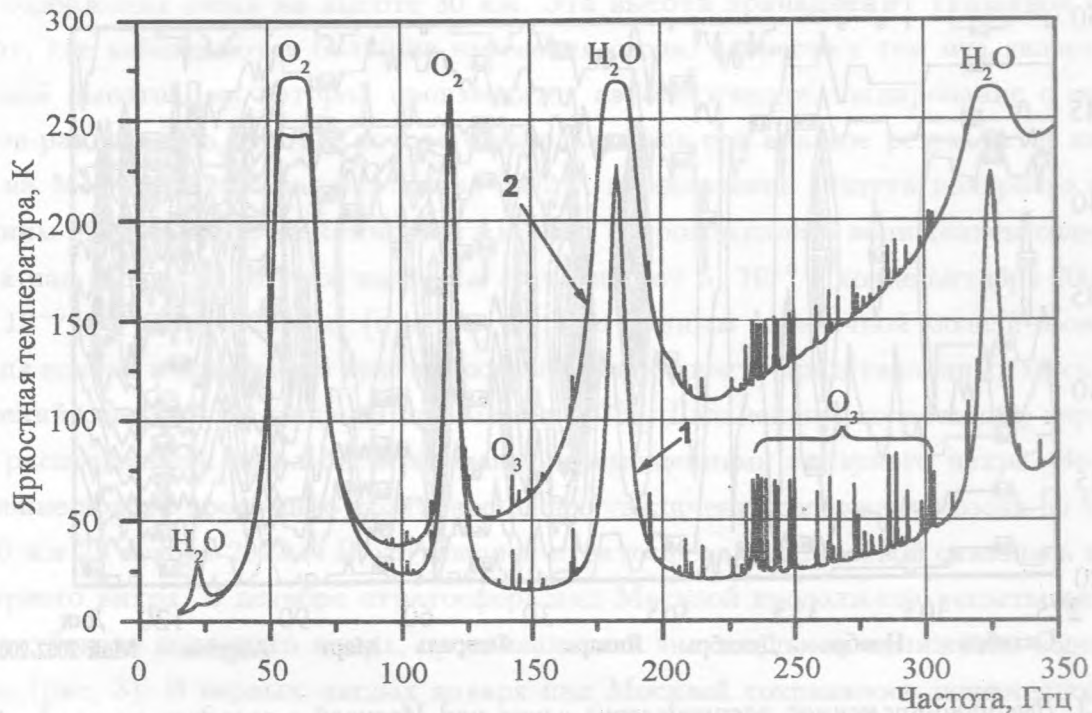


Рис. 2. Спектр излучения атмосферы при наземном наблюдении в зенит в диапазоне 15–350 ГГц. Кривые 1 и 2 – пониженная и средняя влажность тропосферы соответственно.

является проблема влияния физических и химических процессов в полярном вихре на озоносферу средних широт в условиях возрастающих техногенных нагрузок на атмосферу. Значительная изменчивость динамических атмосферных процессов усложняет решение этой проблемы. Многолетние регулярные наблюдения озонового слоя над Московским регионом на ММ волнах производились при различных состояниях зимней стратосферы. Например, холодное полугодие 1996–1997 гг. характеризовалось необычайно устойчивым полярным вихрем, сохранявшемся до начала мая 1997 г. В то же время полярный вихрь в холодный период 2002–2003 гг. был менее устойчивым, часто смещался к Европе и завершил свое существование почти на месяц раньше (по сравнению с ситуацией весной 1997 г.). Отличия в характере атмосферных процессов в указанные периоды отразилась и на особенностях ВРО над Москвой, которые рассмотрены ниже. Происходившие в период 2002–2003 гг. перемещения полярного вихря приводили к неоднократному появлению воздуха его центральной области в стратосфере над Москвой, что позволило наблюдать на ММ волнах вертикальное распределение озона при разных атмосферных условиях: вне, на краю и внутри центральной области полярного

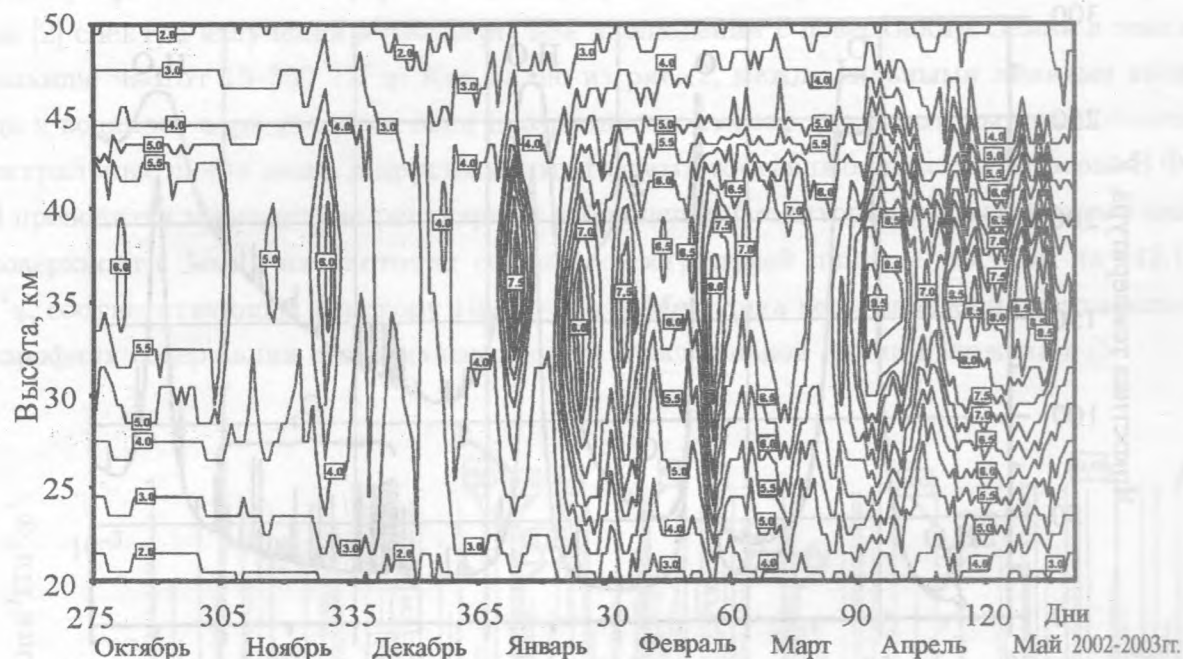


Рис. 3. Высотно-временное распределение озона над Москвой в холодное полугодие 2002 – 2003 гг. Изолиниями показаны уровни равного содержания озона в единицах отношения смеси ( $10^{-6}$ ).

вихря. При анализе наблюдений ВРО на ММ волнах были использованы данные аэрологического зондирования с информацией о пространственно-временном распределении температуры, давления, высот геопотенциальных поверхностей в стратосфере, полученных в отечественных и зарубежных обсерваториях (ЦАО, Гидрометцентр, ECMWF [8]). Использовались также данные о потенциальной завихренности ( $PV$ ), которая, как известно, является адиабатическим инвариантом [1], удобным для анализа атмосферных движений, для определения границ центральной области полярного вихря. На рис. 3 представлено высотно-временное распределение озона (ВРО) над Москвой в холодное полугодие 2002–2003 гг. Изолиниями показаны уровни равного содержания озона в принятых в литературе единицах отношения смеси – в миллионных долях по объему ( $ppm$ , или  $10^{-6}$ ) [1, 4]. На этом рисунке хорошо видны значительные вариации содержания озона в области высот между 25 и 45 км, где расположен максимум относительного содержания озона.

Полярный вихрь сформировался в первой половине осени 2002 г. [8]. Для иллюстрации влияния этого вихря на озоносферу ниже представлены результаты наблюде-

ний содержания озона на высоте 30 км. Эта высота принадлежит указанной области высот, где наблюдаются большие изменения озона, и вместе с тем она является предельной высотой, на которой производится аэрологическое зондирование с помощью шаров-радиозондов, данные которого используются при анализе результатов наблюдений на ММ волнах. В начале ноября 2002 г. перемещение воздуха полярного вихря к средним широтам Европейской части России сопровождалось понижением содержания озона над Москвой, которое на 30 км составило от  $5 \cdot 10^{-6}$  в конце октября 2002 г., до  $3.5 \cdot 10^{-6}$  4–6 ноября 2002 г. (при  $5.6 \cdot 10^{-6}$  по данным справочной модели озоносферы [4] для ноября и широтного круга Москвы). Погрешность представленных здесь и ниже значений содержания озона не превышает 5–7%. Дальнейшие колебания в вертикальном распределении озона были вызваны перемещениями полярного вихря. Во второй половине ноября произошло кратковременное увеличение содержания озона до  $5.5 \cdot 10^{-6}$  на 30 км 25 ноября 2002 г. В этот период стратосфера над Москвой оказалась на краю полярного вихря. В декабре стратосфера над Москвой продолжала испытывать влияние глубокого полярного вихря, проявившееся в значительном понижении содержания озона (рис. 3). В первых числах января над Москвой сохранялось пониженное содержание озона, связанное с присутствием воздуха полярного вихря. При удалении вихря от Москвы с 6 по 9 января 2003 г. содержание озона выросло, достигнув  $6 \cdot 10^{-6}$  на 30 км 8 января и затем, между 12 и 18 января, вновь снизилось при появлении воздуха вихря над Москвой. В январе 2003 г. произошла сильная деформация полярного вихря, который 19 января распался на две части. На карте барической топографии стратосферы северного полушария возникли четыре крупномасштабных барических образования: две области высокого давления и две области низкого давления. В этот период стратосфера над Москвой оказалась вне вихря, появился теплый воздух, температура стратосферы выросла на 40 K, а содержание озона на 30 км в этот период увеличилось с  $3.5 \cdot 10^{-6}$  до  $8 \cdot 10^{-6}$ . Сложилась ситуация, типичная для стратосферного потепления. После 21 января обе части полярного вихря соединились в единое барическое образование вытянутой формы. В качестве примера изменения влияния полярного стратосферного вихря на озоносферу средних широт на рис. 4 показаны последовательно зарегистрированные вертикальные распределения содержания озона над Москвой по мере удаления полярного вихря 17, 22 и 24 января 2003 г.

В первой половине февраля 2003 г. продолжалась значительная деформация полярного вихря, сопровождавшаяся его быстрым перемещением. Луч зрения спектро радиометра, сделал поперечный "разрез" полярного вихря. При этом содержание озона умень-



Рис. 4. Вертикальные распределения содержания озона над Москвой 17, 22 и 24 января 2003 г.

шилось на 30 км от  $7.2 \cdot 10^{-6}$  вне вихря до  $4.5 \cdot 10^{-6}$  внутри вихря. После развала вихря на две части, начавшегося 15 февраля, стратосфера над Москвой оказалась вне вихря, а содержание озона над Московским регионом заметно выросло, достигнув  $8 \cdot 10^{-6}$  на 30 км 23 и 24 февраля. К этому же времени обе части полярного вихря соединились в единый вихрь.

В марте 2003 г. при перемещении воздуха центральной области полярного вихря содержание озона на 30 км над Москвой изменялось от  $5.7 \cdot 10^{-6}$  внутри вихря до  $7 \cdot 10^{-6}$  вне вихря. До середины апреля стратосфера над Москвой находилась вне полярного вихря. В начале апреля 2003 г. под влиянием области высокого давления, приблизившейся к Московскому региону с юга, произошло увеличение содержания озона над Москвой, превысившее  $8 \cdot 10^{-6}$  на 30 км. Полярный вихрь вновь распался на две части 16–18 апреля и постепенно разрушился к концу этого месяца. Остатки вихря появились над Москвой в середине апреля, вызвав некоторое уменьшение содержания озона до  $(6 - 6.5) \cdot 10^{-6}$  на 30 км 16–20 апреля. В последующий после весенней перестройки теплый период 2003 г. вертикальное распределение озона приблизилось к ожидаемому из справочной модели [4].

Анализ результатов наблюдений показал, что минимальное содержание озона было

зарегистрировано внутри центральной части полярного вихря, а максимальное – вне вихря. При этом минимальное зарегистрированное содержание озона на 30 км внутри вихря составляло  $2.5 \cdot 10^{-6}$  в декабре 2002 г.,  $3.5 \cdot 10^{-6}$  в январе,  $4.5 \cdot 10^{-6}$  в феврале,  $5.7 \cdot 10^{-6}$  в марте 2003 г.

Полученные данные свидетельствуют о постепенном увеличении содержания озона внутри полярного вихря. Это увеличение может быть вызвано обменом воздуха (перемешиванием) между центральной частью вихря и атмосферой вне ее, в которой содержание озона заметно выше. Действительно, диапазон изменений содержания озона на 30 км вне и внутри вихря в ноябре и декабре 2002 г. составил от  $2.5 \cdot 10^{-6}$  до  $5.5 \cdot 10^{-6}$ , в январе от  $3.5 \cdot 10^{-6}$  до  $8.0 \cdot 10^{-6}$ , в феврале от  $4.5 \cdot 10^{-6}$  до  $8.0 \cdot 10^{-6}$  и в марте 2003 г. от  $5.7 \cdot 10^{-6}$  до  $7.2 \cdot 10^{-6}$ . Перемешивание воздуха стратосферы можно проследить на ежедневных картах потенциальной завихренности на уровне потенциальной температуры 600 К (высота около 25 км), картах температуры и геопотенциальной высоты [8] для средней стратосферы в рассматриваемый период. На них хорошо видно развитие полярного вихря, сопровождающееся выносом из его края холодного воздуха с относительно высокими значениями  $PV$  и (по данным наблюдений на ММ волнах) низким содержанием озона. На этих картах наблюдаются также направленные к центральной части вихря "языки" поступающего из более низких широт теплого воздуха, с низкими значениями  $PV$  и высоким содержанием озона (по данным наблюдений в ФИАН).

Холодный период 2002–2003 гг., как показано выше, характеризовался продолжительными многократными смещениями центра полярного вихря к Европе. Этой особенностью рассмотренный период заметно отличался от упомянутого выше холодного полугодия 1996–1997 гг. В течение продолжительного времени с конца декабря 1996 г. до двадцатых чисел апреля 1997 г. центр вихря располагался в полярной области с относительно небольшими смещениями от полюса, за исключением кратковременного перемещения в сторону Европейской территории России в конце января 1997 г., когда внутри полярного вихря на 30 км в стратосфере над Москвой было зарегистрировано [9] содержание озона, равное  $3.5 \cdot 10^{-6}$ . Холодный период 1996–1997 гг., конец которого, как и обычно, связан с разрушением полярного вихря и весенней перестройкой циркуляции, завершился довольно поздно – в мае 1997 г. Незадолго до разрушения полярного вихря его центральная область переместилась из полярных широт в стратосферу над Москвой, что позволило измерить содержание озона в ней дистанционными методами на ММ волнах [9]. Как оказалось, содержание озона на 30 км над Москвой в центре вихря в тот период составило около  $4.5 \cdot 10^{-6}$  (при среднемесечном значении  $6.9 \cdot 10^{-6}$  по

данным справочной модели [4] для мая). Это содержание заметно ниже отношения смеси озона, равного  $5.7 \cdot 10^{-6}$ , зарегистрированного в центре вихря 19 марта 2003 г., т.е. в конце холодного периода 2002–2003 гг. Из этого сопоставления значений содержания озона внутри вихря в конце указанных холодных периодов можно сделать вывод, что изолированность полярного вихря была выше в холодное полугодие 1996–1997 гг. по сравнению с ситуацией в 2002–2003 гг. По-видимому, частое перемещение полярного вихря и более интенсивное перемешивание воздуха стратосферы в 2002–2003 гг. (по сравнению с периодом 1996–1997 гг.) привело к более заметному увеличению содержания озона внутри полярного вихря к концу холодного периода 2002–2003 гг.

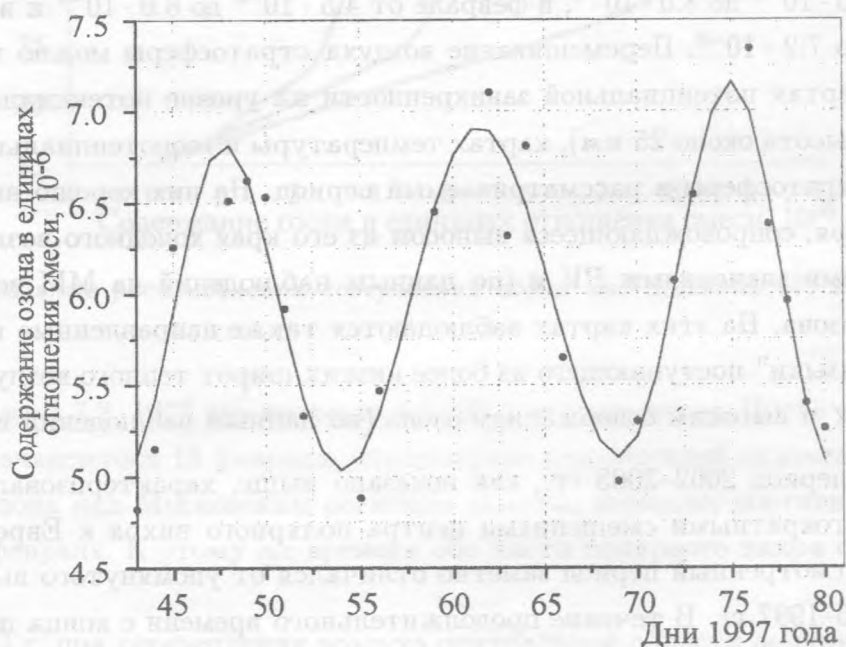


Рис. 5. Колебания содержания озона на 30 км над Москвой в феврале-марте 1997 г. Точки — эксперимент, сплошная линия — аппроксимация содержания озона на 30 км за исследуемый период пятью первыми гармониками разложения в ряд Фурье.

Интересно отметить, что даже относительно небольшие перемещения полярного вихря в рассмотренный период 1996–1997 гг. вызвали колебания содержания озона над Москвой, пример которых на 30 км представлен на рис. 5. Спектральный анализ этих колебаний выявил основную гармонику Фурье разложения с периодом около 14 дней, что характерно для планетарной волны [1].

Таким образом, результаты наблюдений озоносферы на ММ волнах свидетельствуют о значительном влиянии динамических процессов в стратосфере на пространственно-



временное распределение озона, на состояние озоносферы над Московским регионом. Полученные результаты подтверждают известную концепцию истощения озонного слоя внутри полярного стратосферного вихря и последующего перемешивания воздуха вихря с воздухом средних широт [7]. Установленное влияние атмосферных процессов на вертикальное распределение содержания озона необходимо учитывать при решении перечисленных выше задач.

Авторы благодарны чл.-корр. РАН И.И. Сوبельману за внимание и поддержку работы.

Работа поддержана грантами РФФИ N 03-02-17436, "Ведущие научные школы" НШ-1254.2003.2, ФЦП "Интеграция", ФЦНТП, а также по программе фундаментальных исследований ОФН РАН "Проблемы радиофизики".

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Брасье Г., Соломон С. Аэрономия средней атмосферы. Л., Гидрометеиздат, 1987 г.
- [2] Кропоткина Е. П., Соломонов С. В. Исследования Земли из космоса, N 1, 81 (1988).
- [3] Rothman L. S., Risland C. P., Goldman A., et al. J. Quant. Spectrosc. Radiative Transfer, **60**, No. 5, 665 (1998).
- [4] Keating G. M., Chiou L. S., and Hsu N. C. Adv. Space Res., **18**, No. 9/10, 11 (1996).
- [5] Гайкович К. П., Кропоткина Е. П., Соломонов С. В. Изв. АН. Физика атмосферы и океана, **35**, N 1, 86 (1999).
- [6] Соломонов С. В. Успехи современной радиоэлектроники. N 1, 9 (2003).
- [7] Staehelin J., Harris N. R., Appenzeller C. and Eberhard J. Rev. Geophys., **39**, No. 2, 231 (2001).
- [8] ECMWF Analyses - Arctic Polar Vortex. [http:// www.ecmwf.int](http://www.ecmwf.int); <http://www.pa.op.dir.de/arctic>
- [9] Соломонов С. В., Кропоткина Е. П., Лукин А. Н., Розанов С. Б. Краткие сообщения по физике ФИАН, N 1, 23 (1998).

Поступила в редакцию 9 декабря 2003 г.