

УДК 551.510

## ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРНОГО ОЗОНА НА МИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛНАХ

*С. В. Соломонов<sup>1</sup>, К. П. Гайкович<sup>2</sup>, Е. П. Кропоткина<sup>1</sup>, С. Б. Розанов<sup>1</sup>,  
А. Н. Лукин<sup>1</sup>, А. Н. Игнатъев<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, г. Москва;

<sup>2</sup> Институт физики микроструктур РАН, г. Нижний Новгород, Россия

Представлены новые результаты дистанционного зондирования вертикального распределения озона на миллиметровых волнах с помощью высокочувствительного спектрорадиометра ФИАН, в состав которого входит новый 96-канальный анализатор спектра АС-96 с улучшенными характеристиками. Регистрируется спектр излучения озона на частоте 142,2 ГГц. Восстановление вертикального профиля озона выполнялось с использованием усовершенствованного алгоритма, основанного на методах Тихонова и статистической регуляризации. Рассмотрены особенности высотно-временного распределения озона, отражающего процессы в озоносфере над умеренными широтами. Показаны изменения вертикального распределения озона во время сильного стратосферного потепления в январе 2009 года. Сделан вывод о необходимости создания отечественной наземной сети мониторинга пространственного распределения озона на миллиметровых волнах.

### ВВЕДЕНИЕ

Дистанционное зондирование атмосферного озона на миллиметровых волнах (микроволнах) играет важную роль в исследовании эволюции озоносферы, изучение которой является важнейшей задачей в решении проблем изменений климата, состояния окружающей среды и экосистемы в целом [1, 2]. Дистанционное зондирование в этой области спектра имеет ряд достоинств. В диапазоне миллиметровых волн сосредоточены многочисленные спектральные линии озона, водяного пара, окиси хлора и ряда других газов, играющих ключевую роль в атмосферных процессах. Радиофизические методы [3–14] позволили проводить с поверхности Земли круглосуточные наблюдения собственного теплового радиоизлучения атмосферы в широком диапазоне высот при различных погодных условиях, поскольку ослабление излучения в облаках и слоях аэрозоля в радиодиапазоне существенно меньше, чем в оптической области спектра. Задачами радиофизических исследований озоносферы являются исследования изменений атмосферного озона под влиянием естественных и техногенных воздействий в условиях изменяющегося климата.

Одной из важных задач таких исследований является изучение «отклика» озоносферы на сильные стратосферные потепления, которые нарушают зимнюю циркуляцию стратосферы. Изменение частоты и характера таких потеплений может повлиять на содержание стратосферного озона и на климат тропосферы [1, 15].

Работы по дистанционному зондированию атмосферного озона на миллиметровых волнах проводятся в нашей стране [4–7, 10–13] и за рубежом (см., например, [3, 8, 9, 14]). Спектральная аппаратура ФИАН, позволившая проводить многолетние регулярные наблюдения вертикального распределения озона в стратосфере и мезосфере на миллиметровых волнах, была включена в состав глобальной озонометрической сети по международным программам DYANA, CRISTA/MAHRSI, SOLVE. Важными шагами в создании наземной сети мониторинга озонового слоя на миллиметровых волнах с участием отечественных обсерваторий явились первые одновременные наблюдения озоносферы на этих волнах из различных наземных пунктов, выполненные в ФИАН и в Космической обсерватории Онсала (Швеция) в 1988–1990 годах [12] и одновременные наблюдения в Москве и Апатитах, выполненные в ФИАН в содружестве с ИПФ РАН в последние годы [13].

Ниже представлены новые результаты дистанционного зондирования вертикального распределения атмосферного озона над Москвой, полученные на миллиметровых волнах в Физическом институте им. П. Н. Лебедева РАН (ФИАН) в 2008–2009 годах. Рассмотрено влияние сильного стратосферного потепления в январе–феврале 2009 года на высотное-временное распределение озона над Москвой. Это потепление сопровождалось разрушением полярного вихря, сменой зимней циркуляции стратосферы на летнюю. Отличительная особенность этого потепления в том, что оно возникло вопреки прогнозам, нарушив представление о природе столь сильных возмущений атмосферы [16, 17]. Поэтому данные об изменчивости озона в этот период аномальных изменений циркуляции атмосферы представляют особый интерес.

## 1. МЕТОДЫ И АППАРАТУРА

Наземные измерения вертикального распределения озона на миллиметровых волнах проводятся в ФИАН (г. Москва) с помощью высокочувствительной спектральной аппаратуры. Спектрорадиометром регистрируется вращательная спектральная линия озона с центром на частоте 142,175 ГГц. Эта уширенная столкновениями молекул линия содержит информацию о высотном распределении молекул озона в стратосфере и мезосфере.

Решение обратной задачи строится с учётом чувствительности контура регистрируемой спектральной линии озона к высотному распределению молекул этого газа в стратосфере и мезосфере [3, 5, 6]. Соотношение между яркостной температурой  $T_B$  спектра теплового радиоизлучения и высотным профилем концентрации озона  $U(h)$  после вычитания вклада других атмосферных составляющих может быть представлено в виде интеграла

$$T_B(f) = \int_0^{\infty} U(h)K(U, \nu, \theta, h) dh, \quad (1)$$

где  $K(U, \nu, \theta, h)$  — нелинейное ядро уравнения (1),  $\nu$  и  $\theta$  — частота и угол, под которым принимается излучение, соответственно.

Высотный профиль распределения озона восстанавливается в результате решения (1) как нелинейного интегрального уравнения. В алгоритме решения на каждом шаге итерационного процесса интегральное уравнение Фредгольма 1-го рода решается методом обобщённой невязки Тихонова [18]. Метод решения этой некорректной обратной задачи, предложенный в [19] и подробно описанный в [11, 20], успешно использовался при многолетних систематических наблюдениях динамики озоносферы над Москвой. Алгоритм решения уравнения (1) как нелинейной задачи в операторном виде записывается следующим образом:

$$\mathbf{K}^{(n)}U^{n+1} = T_B^{\delta}, \quad (2)$$

где оператор  $\mathbf{K}^{(n)} = \mathbf{K}(U^n, \nu, h)$ , а в качестве первого приближения  $U^1(h)$ , которым может служить произвольная функция, используется модельный профиль концентрации озона.

Как известно, в дистанционном зондировании атмосферы давно и с успехом используются также статистические подходы к регуляризации некорректных задач [21–25]. Препятствием к их использованию в данном случае долгое время являлось отсутствие необходимой статистики. Однако, упомянутые выше многолетние измерения вертикального распределения озона над Москвой позволили накопить необходимый статистический материал, что открыло возможность использования данного подхода в методике восстановления профилей озона. Естественным представлялось включить этот подход в действующий алгоритм как альтернативный метод решения

уравнения Фредгольма 1-го рода. При этом интегральное уравнение (2) сводится к системе уравнений с выделенным вектором ошибки:

$$\sum_{i=1}^N k_{ji}^{(n)}(h_i, \nu_j) u_i^{(n+1)}(h_i) = T_{Bj}^{\delta}(\nu_j) - \delta_j, \quad j = 1, 2, \dots, M. \quad (3)$$

Обозначая  $\mathbf{u} = [u_1, u_2, \dots, u_N]^*$ ,  $\mathbf{T}_B^{\delta} = [T_{B1}^{\delta}, T_{B2}^{\delta}, \dots, T_{BM}^{\delta}]^*$ ,  $\mathbf{K} = k_{ji}$ ,  $i = 1, 2, \dots, N$ , где индекс  $*$  обозначает матричное транспонирование, запишем (2) в матрично-векторной форме:

$$\mathbf{T}_B^{\delta} = \mathbf{K}\mathbf{u} + \boldsymbol{\delta}, \quad (4)$$

где предполагается, что вектор ошибки имеет нормальное распределение с нулевым средним и заданной ковариационной матрицей.

В данной работе применялся вариант статистической регуляризации, основанный на методе максимального правдоподобия, который использовался ранее при решении ряда задач дистанционного зондирования атмосферы [20–23]. В нём предполагается, что распределения вектора атмосферного параметра и ошибок являются гауссовыми и независимыми друг от друга. Тогда их совместное распределение вероятностей распадается на произведение, условие максимума которого при заданном векторе данных даёт искомую формулу этого метода статистической регуляризации, применяемого в данной работе:

$$\tilde{\mathbf{u}} = \langle \mathbf{u} \rangle + \mathbf{B}_u \mathbf{K}^* (\mathbf{K} \mathbf{B}_u \mathbf{K}^* + \mathbf{B}_\delta)^{-1} (\mathbf{T}_B^{\delta} - \langle \mathbf{T}_B^{\delta} \rangle), \quad (5)$$

где угловые скобки обозначают среднее по ансамблю,  $(\mathbf{B}_u)_{ij} = \langle (u_i - \langle u_i \rangle)(u_j - \langle u_j \rangle) \rangle$ ,  $(\mathbf{B}_\delta)_{ij} = \langle \delta_i \delta_j \rangle$ ,  $\langle \delta(\nu_i) \rangle = 0$ .

Таким образом, при решении обратной задачи могут использоваться и метод Тихонова, и метод статистической регуляризации (5).

Оказалось, что использование метода статистической регуляризации имеет преимущество по скорости решения обратной задачи на персональном компьютере и по точности на высотах нижней стратосферы (12÷20 км) по сравнению с алгоритмом метода Тихонова. Вместе с тем, для восстановления сложных (деформированных) вертикальных распределений озона алгоритм с использованием метода Тихонова даёт лучшие результаты. Поэтому сочетание этих двух методов позволяет оптимизировать решение задачи восстановления вертикального распределения озона.

Спектрорадиометр ФИАН для дистанционного зондирования атмосферного озона состоит из малошумящего супергетеродинного приёмника, 96-канального анализатора спектра АС-96 с улучшенными характеристиками и персонального компьютера с интерфейсными модулями и программным обеспечением. Подробное описание приёмника, в котором используется смеситель на планарном диоде Шоттки, дано в работах [6, 26]. Однополосная шумовая температура приёмника составляет около 700 К при охлаждении входных каскадов жидким азотом и около 1500 К без охлаждения.

Новый фильтровой анализатор спектра АС-96 с расширенной полосой частот и высоким спектральным разрешением в центре линии создан в ИПФ РАН с участием ФИАН. В состав АС-96 входят блок преобразований частоты с четырьмя гетеродинами и блоки фильтров, имеющие 96 фильтровых каналов при полной ширине полосы анализа 475 МГц (диапазон частот 75÷550 МГц). Ширина каналов изменяется от 0,1 МГц в центре линии озона до 20 МГц на её крыльях ступенями с промежуточными значениями 0,2; 0,5; 2 и 5 МГц. Принятый выбор ширины полос пропускания каналов и частот гетеродинов обеспечивает, с одной стороны, минимальное спектральное сглаживание регистрируемой линии и оптимальное отношение сигнал/шум в каналах и, с другой

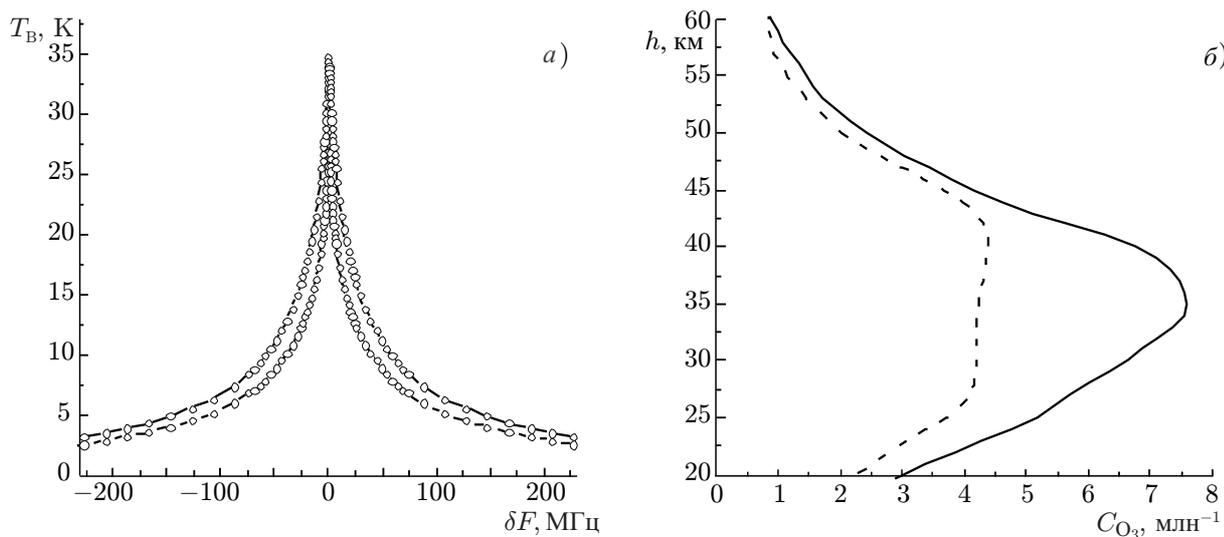


Рис. 1. Примеры спектральных линий озона с центром на 142,175 ГГц (а), зарегистрированных 5 декабря 2008 года (пунктир) и 13 апреля 2009 года (сплошная линия), и соответствующие им вертикальные профили  $C_{O_3}$  озона (б). Здесь  $h$  — высота,  $\delta F$  — отстройка от центра линий; кружками на графиках спектров показаны значения яркостных температур в каналах анализатора спектра

стороны, помехозащищённость и возможность технической реализации узлов АС-96. Напряжения с выходов квадратичных детекторов в каналах АС-96 поступают на интерфейс — стандартный 96-канальный модуль аналого-цифрового преобразования типа DAQ-2208 фирмы «Adlink». Сеанс наблюдений разбивается на циклы, состоящие из двух этапов калибровки и следующих за ними заданного количества этапов измерений.

В результате проведённой оптимизации параметров спектро радиометра линия озона регистрируется практически без искажения её формы, что обеспечивает высокую точность определения вертикального распределения озона на высотах стратосферы и мезосферы. Оценки показали [6, 11], что суммарная погрешность восстановления профиля вертикального распределения озона (с учётом шума аппаратуры и других экспериментальных погрешностей) при оптимальных условиях наблюдения и времени накопления сигнала около 1 часа (в режиме работы приёмника без охлаждения) не превышает  $5 \div 7\%$  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.

На рис. 1а представлены примеры спектральных линий озона, зарегистрированных днём 5 декабря 2008 года и 13 апреля 2009 года при различных состояниях озоносферы в зимний и весенний периоды. Восстановленные по этим спектрам профили вертикального распределения озона показаны на рис. 1б. Содержание озона дано в единицах отношения смеси  $C_{O_3}$  (ppm, или  $\text{млн}^{-1}$ ). Получено хорошее соответствие профилей высотного распределения озона, измеренных в ФИАН, с данными одновременных наблюдений озона над Москвой из космоса в отдельные дни и среднемесячных профилей. На рис. 2 в качестве примера показаны профили вертикального распределения озона над Московским регионом, полученные при наблюдениях в ФИАН и из космоса с помощью микроволнового спектрометра MLS, установленного на спутнике EOS Aura [27], для случаев спокойной и возмущённой озоносферы. Точками отмечены данные справочной модели [28] для широты Москвы.

Различие усреднённых за март 2005 года профилей высотного распределения озона, полученных в ФИАН и с помощью прибора MLS [27] над Москвой, не превосходило  $7\%$  на вы-

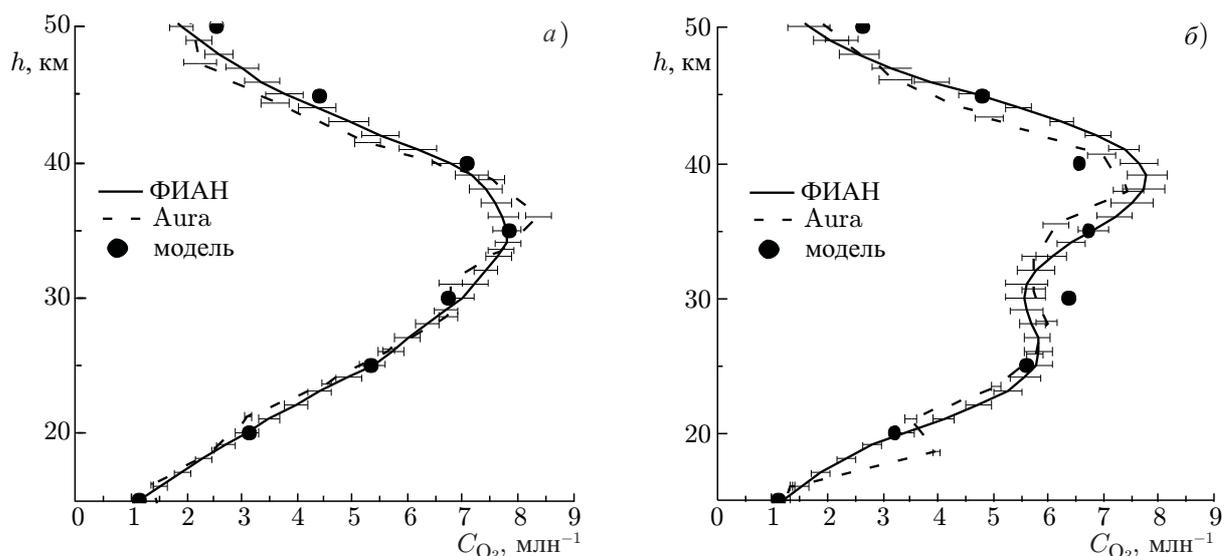


Рис. 2. Профили распределения озона над Москвой по наблюдениям в ФИАН и из космоса [26] для спокойной (а) и возмущённой (б) озоносферы. Данные модели из работы [27]

тах  $21 \div 51$  км. Различие усреднённых профилей высотного распределения озона, полученных в апреле 1996–2003 годов по наблюдениям в ФИАН и из космоса с помощью ультрафиолетовых инструментов SBUV [29], составило менее 6 % на высотах  $20 \div 45$  км.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На рис. 3 представлено высотно-временное распределение содержания озона над Москвой, зарегистрированное изложенными выше методами в холодный период 2008–2009 годов. На этом рисунке изолиниями показаны уровни равных значений отношения смеси озона  $C_{O_3}$  в единицах ppm в стратосфере над Москвой. Как следует из рис. 3, в январе–феврале 2009 года обнаружено значительное увеличение содержания озона в стратосфере.

В этот период, в соответствии с данными работы [16], следовало ожидать устойчивую зимнюю циркуляцию стратосферы с интенсивным полярным вихрем на протяжении всего холодного сезона. Такая ситуация была, например, в холодный период 2004–2005 годов. Для этих двух периодов (2008–2009 и 2004–2005 года) можно было также ожидать похожие высотно-временные распределения озона в силу тесной связи динамики атмосферы и озона в средней и нижней стратосфере [1] (о такой связи свидетельствуют полученные ранее высокие абсолютные значения коэффициентов корреляции содержания озона и потенциальной завихренности PV над Московским регионом [5]). Однако выполненные в ФИАН наблюдения показали значительные отличия во временных изменениях содержания озона для этих двух холодных сезонов. На рис. 4 показано содержание озона на высоте 30 км над Москвой для 2004–2005 и 2008–2009 годов, полученное в результате наблюдений на миллиметровых волнах. Видно резкое увеличение содержания озона  $C_{O_3}$  в январе–феврале 2009 года по сравнению с аналогичным периодом 2004–2005 годов (область отличий заполнена серым цветом на рис. 4). На рис. 4 видно также, что увеличение  $C_{O_3}$  в 2009 г., начавшееся в середине зимы (отмеченная штриховкой область на рис. 4 слева), произошло существенно раньше увеличения  $C_{O_3}$  в результате финального потепления весной 2005 года (отмеченная штриховкой область на рис. 4 справа).

Как показал анализ метеорологических данных (карт полей PV, барической топографии, температуры [30]) и результатов траекторного анализа [31], в январе–феврале 2009 года произошло

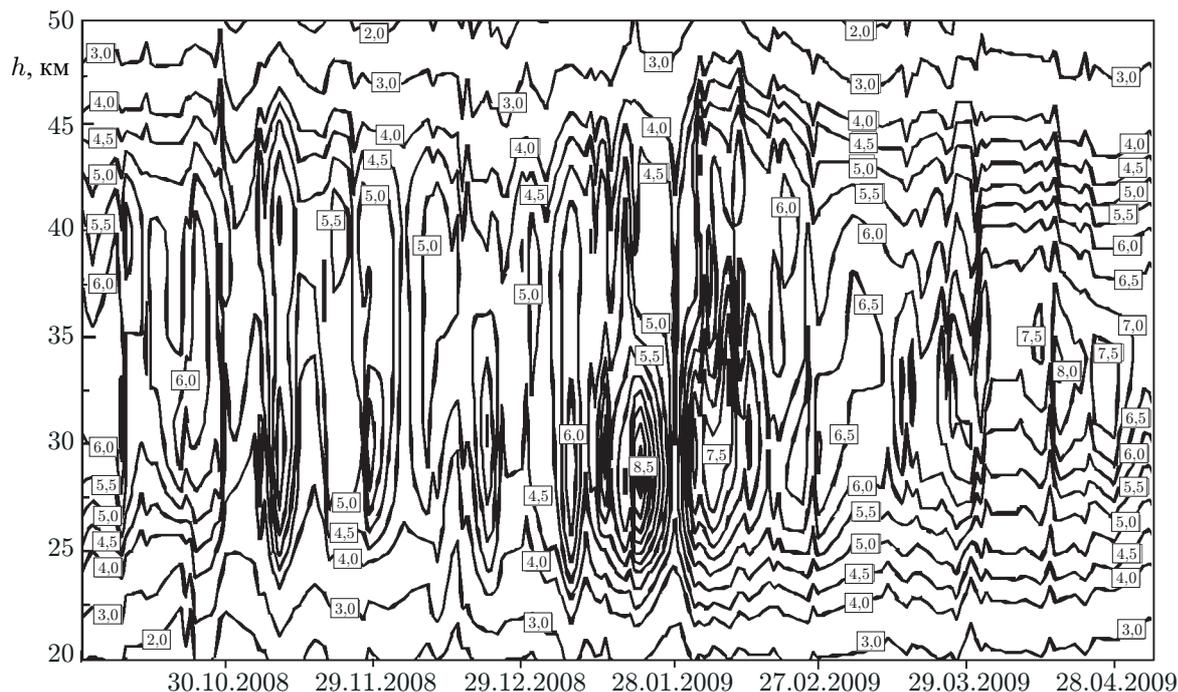


Рис. 3. Высотно-временное распределение озона над Москвой в холодный период 2008–2009 годов

сильное стратосферное потепление с рекордными температурами и разрушением зимней циркуляции стратосферы с переходом её на летний тип (см. также [17]). Это явление в 2008–2009 годах наступило вопреки известным представлениям, изложенным в работе [16], т. к. были нарушены установленные в [16] статистические закономерности, использовавшиеся для прогнозирования сильных среднезимних потеплений.

Как видно из рис. 3, понижение  $C_{O_3}$  до значений  $4 \div 5$  ppb в слое  $25 \div 40$  км над Москвой наблюдалось в ноябре–декабре 2008 года и в начале января 2009 года. Из анализа метеорологических данных следовало, что такое понижение содержания озона возникало под влиянием полярного стратосферного вихря. В 2008–2009 годах воздух полярного стратосферного вихря охватывал огромную площадь и в указанные месяцы под влиянием возмущений циркуляции атмосферы нередко оказывался над умеренными широтами европейской части нашей страны, включающими и Московский регион.

На рис. 3 и 4 виден сезонный ход  $C_{O_3}$  (понижение содержания озона зимой, повышение весной), который проиллюстрирован на рис. 1 профилями озона, наблюдавшимися в декабре 2008 и в апреле 2009 годов.

Влияние атмосферных процессов на озоносферу в холодный период 2008–2009 годов отразилось на форме профилей высотного распределения озона. Наблюдавшиеся профили можно условно разбить на четыре типа, характеризующие различные явления в озоносфере. Первый из них отличался пониженным содержанием озона под влиянием процессов в полярном вихре. Причём вертикальные профили  $C_{O_3}$  слабо изменялись с высотой в области от 25 до  $40 \div 45$  км, что также отличало эти профили от нормы (по данным справочной модели [28] средние профили  $C_{O_3}$  озона характеризуются ярко выраженным максимумом на высоте около  $35 \div 40$  км). Пример вертикального профиля  $C_{O_3}$  этого вида приведён на рис. 1 для 5 декабря 2008 года. Содержание озона было ниже данных справочной модели [28], на высоте 35 км это различие достигало 30 %.

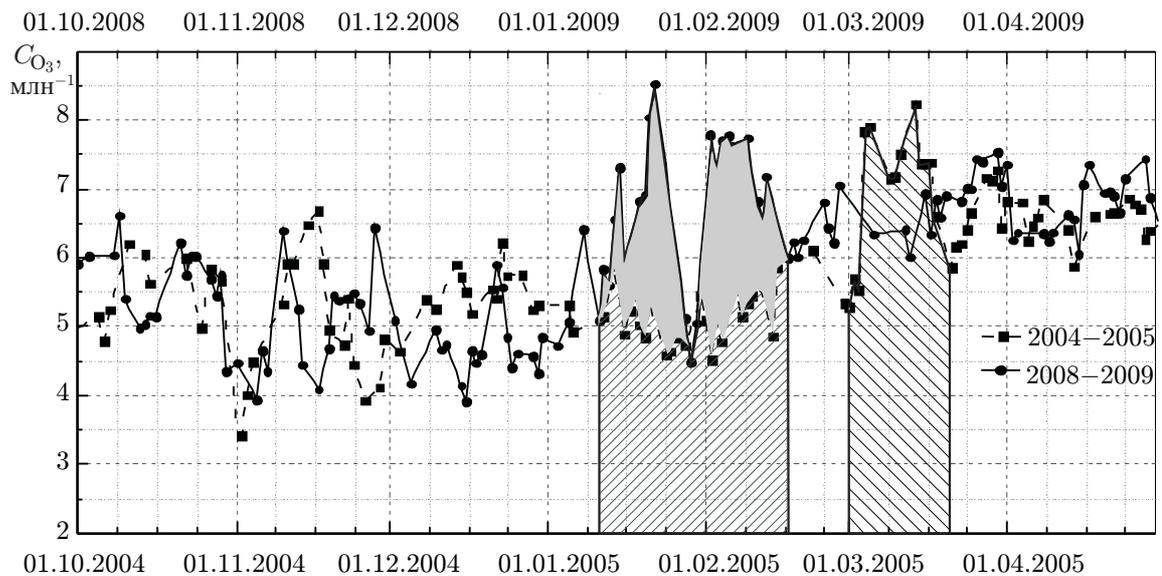


Рис. 4. Содержание озона на 30 км над Москвой в холодные периоды 2004–2005 и 2008–2009 годов по измерениям на миллиметровых волнах. Штриховкой отмечены области сильного стратосферного потепления в январе–феврале 2009 года и финального потепления в марте 2005 года. Серым цветом заполнена область, соответствующая разнице временного хода содержания озона в январе–феврале 2005 и 2009 годов

Ко второму виду относились деформированные профили озона со смещённым вниз максимумом. Эти профили были зарегистрированы во время стратосферного потепления в январе 2009 года. На рис. 3 видно, что максимальные значения отношения смеси озона находились на высотах около 30 км. Содержание озона на высотах максимума в этот период существенно (на 30÷40 %) превышало значения модели [28].

Третий вид профилей высотного распределения озона отличался от модели [28] двумя локальными максимумами. Примеры таких вертикальных профилей  $C_{O_3}$  показаны на рис. 5, где представлены профили озона для 6 и 18 февраля 2009 года с двумя максимумами на высотах около 28 и 42 км (вместо одного максимума по модели [28]). Профили  $C_{O_3}$  с двумя максимумами в стратосфере, наблюдавшиеся над Москвой и ранее, например, в холодный период 2005–2006 годов (см. пример на рис. 2б), свидетельствуют о существовании слоистых структур в озоносфере в период её сильных возмущений. Такие особенности профилей  $C_{O_3}$  наблюдались над Московским регионом также и из космоса с помощью прибора MLS на спутнике Aura [27].

Весенние профили  $C_{O_3}$  (пример на рис. 1 для 13 апреля 2009 года) характеризуют озоносферу после разрушения зимней циркуляции и активного перемешивания воздушных масс. При этом форма профилей  $C_{O_3}$ , относящихся к четвёртому типу, близка к данным справочной модели [28].

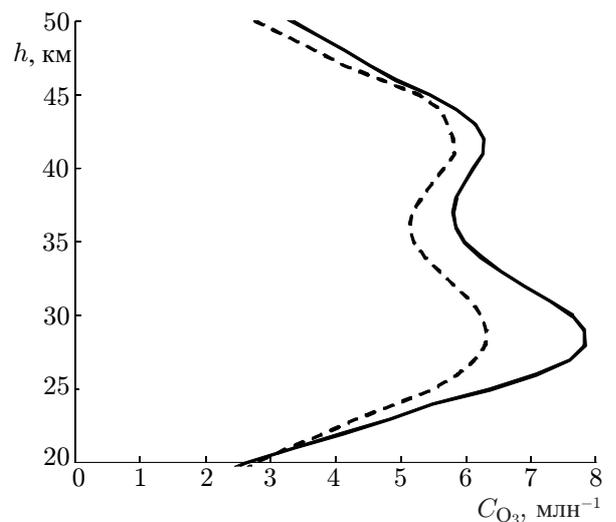


Рис. 5. Профили высотного распределения озона с двумя максимумами на высотах около 28 и 42 км, зарегистрированные 6 (сплошная линия) и 18 (пунктирная линия) февраля 2009 года

Проведённый анализ результатов наблюдений 2008–2009 годов показал, что периодическим увеличениям (уменьшениям) содержания озона в стратосфере над Москвой соответствовало уменьшение (увеличение) потенциальной завихренности, вызванное перемещением основных барических систем стратосферы (полярного стратосферного вихря и антициклона). В допущении линейной вероятностной связи между содержанием озона  $C_{O_3}$  на высоте 30 км и потенциальной завихренностью PV (в общем случае эта связь нелинейна) коэффициент корреляции для указанных величин оказался равным  $\rho = 0,82 \pm 0,04$ . Такая связь этих параметров свидетельствует о сильном влиянии процессов переноса воздушных масс на пространственное распределение озона в холодный период 2008–2009 годов. Таким образом, географическое положение Москвы оказалось удобным для изучения вертикального распределения озона как внутри полярного вихря, так и вне него (рис. 1, 3 и 4) в силу отмеченного выше нередкого появления воздуха полярного вихря над Москвой.

Важным является исследование озона в наиболее чувствительных к техногенным воздействиям слоях верхней стратосферы (высоты 40–45 км). Многолетние наблюдения атмосферного озона на миллиметровых волнах в ФИАН позволили зарегистрировать пониженные по сравнению с данными спутниковых измерений конца 70-х—начала 80-х годов среднемесячные значения содержания озона весной в этих слоях, что согласуется с результатами других экспериментов [1, 14], с известными теоретическими данными и может быть связано с разрушением озона вследствие техногенного загрязнения атмосферы хлорсодержащими веществами (хлорфторуглеводородами) [1].

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные выше радиофизические методы дистанционного зондирования позволяют надёжно регистрировать вертикальное распределение озона и его изменения в условиях естественных и техногенных воздействий на атмосферу. Высокая точность полученных результатов обусловлена применением в спектрорадиометре ФИАН малощумящего приёмника, оптимизированного анализатора спектра и современных математических методов решения обратной задачи — восстановления профилей вертикального распределения озона из измеренных спектров излучения озона.

Получены новые данные об изменениях высотного распределения стратосферного озона во время сильного стратосферного потепления в январе–феврале 2009 года, возникновение которого нарушило известное представление о природе таких явлений [16, 17].

Полученные радиофизическими методами данные об озоне важны для понимания закономерностей изменчивости пространственного распределения озона и для прогнозирования влияния стратосферных процессов на климат и погоду в тропосфере.

Результаты исследований показывают настоятельную необходимость создания отечественной наземной сети мониторинга пространственного распределения озона на миллиметровых волнах и последующего её включения в глобальную озонметрическую сеть.

Важны дальнейшие наблюдения за эволюцией озоносферы, происходящей в условиях естественных возмущений, изменений климата и продолжающихся техногенных воздействий.

Авторы выражают глубокую благодарность А. Г. Литваку, Е. В. Суворову и В. А. Черепнину за поддержку данной работы, а также В. А. Гусеву, П. Л. Никифорову и С. В. Логвиненко за участие в создании спектрорадиометра. Авторы признательны лаборатории NOAA Air Resources Laboratory (ARL) за предоставленную возможность использования транспортной модели HYSPLIT, а также благодарны центру British Atmospheric Data Center (BADC) за любезно предоставленные аэрологические данные.

Работа выполнена при финансовой поддержке программами ОФН РАН «Современные проблемы радиофизики» и «Радиоэлектронные методы в исследовании природной среды и человека».

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Scientific assessment of ozone depletion: 2006. Report No. 50 of World Meteorological Organization, Global Ozone Research and Monitoring Project. Geneva, 2007.
2. World Meteorological Organization Global Atmosphere Watch (GAW) Strategic Plan: 2008–2015. Report No. 172, WMO TD No. 1384.
3. Atmospheric remote sensing by microwave radiometry / Ed. by M. Janssen. J. Wiley and Sons Inc., 1993.
4. Красильников А. А., Куликов Ю. Ю., Мазур А. Б. и др. // Физика микроволн. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 1999. Т. 1. С. 171.
5. Соломонов С. В. // Усп. совр. радиоэлектроники. 2003. № 1. С. 9.
6. Соломонов С. В., Кропоткина Е. П., Розанов С. Б. // Оптическая спектроскопия и стандарты частоты / Под. ред. Л. Н. Синецы, Е. А. Виноградова. Томск: Ин-т оптики атмосферы СО РАН, 2004. С. 52.
7. Соломонов С. В., Игнатъев А. Н., Кропоткина Е. П. и др. // Приборы и техника эксперимента. 2009. № 2. С. 138.
8. Parrish A. // Proc. IEEE. 1994. V. 82, No. 12. P.1915.
9. Klein U., Wohltmann I., Lindner K., Kunzi K. F. // J. Geophys. Res. D. 2002. V. 107, No. 20. P. 8288.
10. Соломонов С. В., Гайкович К. П., Игнатъев А. Н. и др. // Тр. конф. «Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред», Муром, 30 июня–3 июля 2009 г. Муром: Муромский институт (филиал) ВлГУ, 2009. С. 49.
11. Гайкович К. П., Кропоткина Е. П., Соломонов С. В. // Изв. АН. Физика атмосферы и океана. 1999. Т. 35, № 1. С. 86.
12. Solomonov S. V., Kropotkina E. P., Lukin A. N., et al. // J. Atmos. Terr. Phys. 1994. V. 56, No. 1. P. 9.
13. Кропоткина Е. П., Куликов Ю. Ю., Рыскин В. Г., Соломонов С. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 2007. Т. 50, № 10–11. С. 954.
14. Steinbrecht W., Claude H., Schonenborn F., et al. // J. Geophys. Res. 2006. V. 111. Art. no. D10308.
15. Charlton-Perez A. J., Polvani L. M., Austin J., Li F. // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. Art. no. D16116.
16. Labitzke K., Kunze M. // Climate and weather of the Sun-Earth system (CAWSES). Selected papers from the 2007 Kyoto symposium. Tokio: TERRAPUB, 2009. P. 257.
17. Labitzke K., Kunze M. // J. Geophys. Res. 2009. V. 114. Art. no. D00102.
18. Тихонов А. Н., Гончарский А. В., Степанов В. В., Ягола А. Г. Регуляризирующие алгоритмы и априорная информация. М.: Наука, 1983.
19. Gaikovich K. P. // IGARSS'94: Digest. V. 4. P. 1901.
20. Gaikovich K. P. Inverse problems in physical diagnostics. New York: Nova Science Publishers Inc., 2004.
21. Турчин В. Ф., Козлов В. П., Малкевич М. С. // УФН. 1970. Т. 102, вып. 3. С. 345.
22. Rodgers C. D. // Rev. Geophys. Space Phys. 1976. V. 14. P. 609.
23. Westwater E. R., Sweezy W. B., McMillin L. M., Dean C. // J. Climate Meteorology. 1984. V. 23, No. 5. P. 689.

24. Gaikovich K. P., Markina N. N., Naumov A. P., et al. // *Int. J. Remote Sensing*. 1983. V. 4, No. 2. P. 419.
25. Виролайнен Я. А., Тимофеев Ю. М. // *Исследование Земли из космоса*. 2008. № 3. С. 3.
26. Соломонов С. В., Розанов С. Б., Кропоткина Е. П., Лукин А. Н. // *Радиотехника и электроника*. 2000. Т. 45, № 12. С. 1519.
27. Froidevaux L., Livesey N. J., Read W. G., et al. // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2006. V. 44, No. 5. P. 1106.
28. Keating G. M., Chiou L. S., Hsu N. C. // *Adv. Space Res.* 1996. V. 18, No. 9–10. P. 11.
29. SBUV Version 8: DVD-ROM. NOAA/NASA Ozone Processing Team, 2004.
30. <http://badc.nerc.ac.uk/data/assim>.
31. Draxler R. R., Rolph G. D. HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory). NOAA Air Resources Laboratory, 2010. <http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>.

Поступила в редакцию 6 июля 2010 г.; принята в печать 22 февраля 2011 г.

### REMOTE SENSING OF ATMOSPHERIC OZONE AT MILLIMETER WAVES

*S. V. Solomonov, K. P. Gaikovich, E. P. Kropotkina, S. B. Rozanov, A. N. Lukin, and A. N. Ignatyev*

We present new results of remote sensing of the vertical distribution of ozone at millimeter waves using the FIAN (P. N. Lebedev Institute of Physics, the Russian Academy of Sciences) high-sensitivity spectroradiometer which includes a new 96-channel spectrum analyzer AS-96 with improved characteristics. The ozone radiation spectrum is recorded at a frequency of 142.2 GHz. Vertical profile of ozone is recovered using an improved algorithm based on Tikhonov's method and statistical regularization technique. Specific features of the altitude-temporal distribution of ozone, which reflects ozonospheric processes above middle latitudes are considered. Variations in the vertical distribution of ozone during major stratospheric warming in January 2009 are shown. It was concluded that creation of national ground-based network for ozone monitoring at millimeter waves in Russia is a must.