

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРНОГО ОЗОНА НА МИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛНАХ

С.В.Соломонов¹, К.П.Гайкович², Е.П.Кропоткина¹, С.Б.Розанов¹, А.Н.Лукин¹, А.Н.Игнатъев¹

¹ Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, 119991, Москва, Ленинский просп.,53, e-mail:
solomon@sci.lebedev.ru

² Институт физики микроструктур РАН,603950, Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46, e-mail:
gai@ipm.sci-nnov.ru

АННОТАЦИЯ

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 итерационного алгоритма, основанного на методах Тихонова и статистической регуляризации. Рассмотрены особенности высотно-временного распределения озона, отражающего процессы в озоносфере над умеренными широтами. Показаны изменения ВРО во время мажорного стратосферного потепления в январе 2009 г. Сделан вывод о необходимости создания отечественной наземной сети мониторинга пространственного распределения озона на миллиметровых волнах.

Ключевые слова: миллиметровые волны, озон, дистанционное зондирование

ATMOSPHERIC OZONE REMOTE SENSING AT MILLIMETER WAVES

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

THE SUMMARY

New results of remote sensing of ozone vertical distribution at millimeter waves by means of the LPI high-sensitive spectrometer which includes the new 96-channel spectrum analyzer SA-96 with the improved characteristics are presented. The spectrometer operates at the 142.2 GHz ozone spectrum line. Retrieval of the ozone profile from the microwave measurements was carried out by means of the advanced algorithm based on both Tikhonov's method and statistical regularization techniques. Features of altitude distributions of the ozone reflecting processes in the ozonosphere above middle latitudes are considered. Changes in ozone profiles during major stratospheric warming in January 2009 are shown. A conclusion about necessity of creation a ground-based network for ozone monitoring at millimeter waves in Russia is given.

Keywords: millimeter waves, ozone, remote sensing

ВВЕДЕНИЕ

Дистанционное зондирование атмосферного озона на миллиметровых (ММ) 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 ММ волн сосредоточены многочисленные спектральные линии озона, водяного пара, окиси хлора и ряда других газов, играющих ключевую роль в атмосферных процессах. Радиофизические методы [3-14, 2.1-2.4] позволили проводить со спутников и с поверхности Земли круглосуточные наблюдения атмосферы по ее собственному тепловому радиоизлучению 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. Работы в этом направлении проводятся в нашей стране [4-7, 10-13] и за рубежом (см., например, [3, 8, 9, 12, 14]). Спектральная аппаратура ФИАН, систематически измеряющая вертикальное распределение озона в стратосфере и мезосфере на ММ-волнах в течение более, чем 15 лет, была включена в состав глобальной озонометрической сети по международным программам DYANA, CRISTA/MAHRSI, SOLVE. Важными шагами в создании наземной сети мониторинга озонового слоя на ММ-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 гг. [12] и одновременные наблюдения в Москве и Апатитах, выполненные в ФИАН в содружестве с ИПФ РАН в последние годы [13].

Ниже описывается усовершенствованная методика дистанционного зондирования вертикального распределения атмосферного озона на ММ волнах и результаты измерения вариаций высотных распределений озона над Москвой, полученные в Физическом институте им. П.Н.Лебедева РАН (ФИАН).

1. МЕТОДЫ И АППАРАТУРА

Наземные измерения вертикального распределения озона (ВРО) на миллиметровых (ММ) волнах проводятся в ФИАН, в Москве, 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.

Физической основой решения обратной задачи является чувствительность контура регистрируемой спектральной линии озона к высотному распределению молекул этого газа в стратосфере и мезосфере [3, 5, 6, 2.6]. 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 $\mathbf{K} = K(U, \nu, \theta, h)$ - нелинейное ядро уравнения (1), ν и θ - частота и угол, под которым принимается излучение.

Высотный профиль распределения озона восстанавливается из решения (1) как нелинейного интегрального уравнения. Метод решения этой некорректной обратной задачи, предложенный в [2.5] и подробно описанный в [2.6, 11], успешно использовался для многолетних систематических наблюдений динамики озоносферы над Москвой. В алгоритме решения на каждом шаге итерационного процесса решается интегральное уравнение Фредгольма 1-го рода методом обобщенной невязки Тихонова [15]. Этот 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 и статистические подходы к регуляризации соответствующих некорректных задач [2.7-2.10]. Препятствием к их использованию в данной задаче долгое время являлось отсутствие необходимой статистики. Однако, упомянутые выше многолетние измерения озоносферы 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 на каждом итерационного процесса. При этом интегральные уравнения (2) сводятся 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 (*) - матричное транспонирование, запишем (2) в матрично-векторной форме:

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

где относительно вектора ошибки предполагается, что он 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 [2.6, 2.7, 2.8, 2.9]. В нем 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 дает искомую формулу этого метода статистической регуляризации, который и применяется 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 $\langle * \rangle$ - среднее по ансамблю, $\mathbf{B}_u = \langle (u_i - \langle u_i \rangle)(u_j - \langle u_j \rangle) \rangle$, $\mathbf{B}_\delta = \langle \delta_i \delta_j \rangle$, $\langle \delta(v_i) \rangle = 0$.

Таким образом, при решении обратной задачи с помощью итерационного алгоритма (2) могут использоваться и метод Тихонова и метод статистической регуляризации (5), что позволяет получать более объективную и точную информацию.

На первый взгляд, кажется, что нельзя избавиться от погрешностей определения статистических параметров в (5), связанных с формированием ансамблей из профилей, восстановленных из данных косвенных измерений. Можно, однако, использовать тот факт, что ковариационные и корреляционные функции (матрицы) ошибок восстановления по данным этих измерений (с использованием метода Тихонова) и профиля озона являются некоррелированными. Тогда ковариационная функция \mathbf{B}_u^T профилей озона, восстановленных методом Тихонова, будет суммой ковариационной функции истинного распределения озона \mathbf{B}_u и ковариационной функции погрешностей восстановления $\mathbf{B}_{\delta u}$ (легко определяемой путем численного моделирования), откуда легко определяется истинная ковариационная функция озонного распределения:

$$\mathbf{B}_u = \mathbf{B}_u^T - \mathbf{B}_{\delta u}, \quad (6)$$

Систематические ошибки определения $\langle \mathbf{u} \rangle$ $\langle \mathbf{T}_B^\delta \rangle$ в (5), связанные с погрешностью восстановления профилей в статистическом ансамбле, неустранимы, но их влияние, так же, как и влияние выбора первого приближения в алгоритме, использующем метод Тихонова, незначительно – что легко проверяется в численном эксперименте. Неожиданным результатом анализа явилась обнаруженная высокая устойчивость статистических параметров профиля озона: ни средние значения, ни ковариационные матрицы, вычисленные за первую половину

15-летнего периода наблюдения не отличались статистически значимым образом от соответствующих параметров, вычисленных за вторую половину периода. Оказалось, что для минимизации погрешности имеет смысл использовать ковариационные матрицы, вычисленные для ансамблей профилей, отобранных с учетом сезона. Систематические ошибки восстановления с использованием ковариационных матриц для «чужого» ансамбля могут быть сравнимы с соответствующими среднеквадратичными погрешностями.

Было выполнено численное моделирование на ансамблях профилей по замкнутой схеме. Для каждого профиля на частотах спекторорадиометра вычислялись яркостные температуры, затем на них набрасывалась случайная погрешность с дисперсией, равной дисперсии реальной погрешности измерений. Далее из решения обратной задачи восстанавливался профиль концентрации озона и сравнивался с исходным профилем, что позволило определить среднеквадратичную погрешность метода восстановления концентрации озона с применением каждого из описанных способов регуляризации. Оказалось, что алгоритм с использованием метода статистической регуляризации имеет преимущество по скорости решения обратной задачи на персональном компьютере (примерно 10 профилей в секунду) 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. Оба алгоритма существенно уменьшают априорную неопределенность высотного распределения озона (являются информативными) в интервале 15–80 км, что согласуется с полученными ранее оценками [1]. Среднеквадратичная погрешность восстановления в этом интервале высот мало меняется и составляет 0,1–0,3 ppm (в зависимости от ансамбля), т.е. 2–5% от средних значений концентрации озона в максимуме озонного слоя. Таким образом, достигнутый уровень точности метода решения обратной задачи позволяет получать информацию о высотном распределении озона без искажений, значимых с точки зрения возможных приложений.

Спектрорадиометр ФИАН для дистанционного зондирования атмосферного озона состоит из малозумящего супергетеродинного приемника, 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, 16]. Однополосная шумовая температура приёмника составляет около 700К 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 ее 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 максимальное отношение сигнал/шум в каналах и, с другой стороны, помехозащищенность и возможность технической реализации узлов АС-96. Напряжения с выходов квадратичных детекторов в каналах АС-96 поступают в интерфейс - стандартный 96-канальный модуль АЦП 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 проведенной оптимизации параметров спектрорадиометра линия озона регистрируется практически без искажения ее 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 учетом шума аппаратуры и других экспериментальных погрешностей) при оптимальных условиях наблюдения и времени накопления сигнала около 1 часа (в режиме работы приемника без охлаждения) не превышает 5–7% на высотах от 20 до 50 км, постепенно возрастая 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.1** (слева) представлены примеры спектральных линий озона, зарегистрированных днем 5 декабря 2008 г. и 13 апреля 2009 г. при различных состояниях озоносферы. Восстановленные по этим спектрам профили вертикального распределения озона показаны на **рис.1** (справа). Содержание озона дано в единицах отношения смеси C_{O_3} (ppm, или млн⁻¹). Получено хорошее соответствие профилей ВРО, измеренных в ФИАН, с данными одновременных наблюдений озона над Москвой из космоса в отдельные дни и среднемесячных. На **рис.2а, б** 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 [17], для случаев спокойной и возмущенной озоносферы. Точками отмечены данные справочной модели [18] для широты Москвы.

Различие усреднённых за март 2005 г. профилей ВРО, полученных в ФИАН и с помощью прибора MLS [17] над Москвой не превосходило 7% на высотах 21-51 км. Различие усредненных профилей ВРО, полученных в апреле 1996-2003 гг. по наблюдениям в ФИАН и из космоса с помощью ультрафиолетовых инструментов SBUV [19], составило менее 6% на высотах 20-45 км.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В результате многолетнего мониторинга получено высотно-временное распределение содержания озона над Московским регионом, пример которого для холодного периода 2008-2009 гг. представлен на **рис.3**. На этом рисунке изолиниями показаны уровни равных значений отношения смеси озона C_{O_3} в единицах ppm. Влияние атмосферных процессов на озоносферу проявляется в деформациях поля C_{O_3} , которые переданы на этом рисунке искривлением, сгущением или разрежением изолиний. Так, на **рис.3** хорошо видно сгущение искривленных

изолиний, характеризующих «отклик» озоносферы на сильное стратосферное потепление в январе-феврале 2009 г.

Характерной особенностью высотно-временного распределения озона в 2008-2009 гг. (**рис. 3**) было продолжительное понижение содержания стратосферного озона (до 4-4,5 ppm) в слое 25-40 км, наблюдавшегося в ноябре, декабре 2008 г. и в январе 2009 г., которое, как показал анализ метеорологических данных (карт полей *PV*, барической топографии, температуры) [20, 21], возникало при появлении над Московским регионом воздуха полярного стратосферного вихря (циклона).

Полярный стратосферный вихрь развивается при охлаждении стратосферы в условиях уменьшения солнечного освещения осенью. При этом устанавливается зимний тип циркуляции. Воздух полярного стратосферного вихря отличается от воздушных масс вне вихря более высокими значениями потенциальной завихренности *PV* [20]. Анализ карт *PV* на отдельных изэнтропических уровнях стратосферы Северного полушария дал возможность по методике [20] 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 [20].

Как показал анализ метеорологических данных, в зимние месяцы 2008-2009 гг. воздух полярного стратосферного вихря охватывал огромную площадь и нередко оказывался над умеренными широтами Европейской части нашей страны, включающими и Московский регион. Эти события происходили под влиянием возмущений циркуляции атмосферы.

Важно отметить межгодовые различия в состоянии озонового слоя. Например, отличительной особенностью высотно-временного распределения озона в 2008-2009 гг. было более продолжительное понижение содержания стратосферного озона в слое 25-40 км по сравнению с предыдущим холодным полугодием 2007-2008 гг. [10].

Примеры профилей ВРО с пониженным содержанием озона в полярном вихре, наблюдавшихся над Москвой 5, 25 декабря 2008 г. и 29 января 2009 г. представлены на **рис.1 и**

рис.4. На **рис. 5** 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 $\theta = 850\text{K}$ [21] для этого же периода времени. На **рис.5** хорошо видны периоды пониженного содержания озона.

Для иллюстрации влияния атмосферных процессов на озонный слой рассмотрим подробнее изменения вертикального распределения содержания озона над Москвой в холодный период 2008-2009 гг. Помимо относительно быстропротекающих колебаний содержания озона, на **рис.3** видны сезонные изменения в озоносфере, проявившиеся в повышении содержания озона в весенние месяцы 2009 г. по отношению к содержанию озона в конце 2008 г. Такие изменения иллюстрируют также примеры на **рис.1** (виден контраст декабрь-апрель).

Наиболее значительные и резкие изменения в озоносфере были обнаружены в январе-феврале 2009 г. при сильном стратосферном потеплении, во время которого 22 января 2009 г. содержание озона на высоте 30 км достигло 8,5 ppт, а затем, 29 января, снизилось до 4,5 ppт (**рис. 4,5**).

В период этого потепления полярный вихрь сначала был сильно вытянут, причем один его край оказался над Сибирью, а другой - над северо-восточной частью Канады и Гренландией. Затем полярный вихрь разделился на две части, возникли два циклона и два антициклона. В дальнейшем стратосферный антициклон установился над Северным полюсом и при этом над полярной областью наблюдался летний тип циркуляции, что характерно для мажорного стратосферного потепления. 21 и 22 января 2009 г. над Московским регионом находился стратосферный антициклон - область высокого давления с низкими значениями PV и, как показали измерения в ФИАН, с повышенным содержанием озона (8,5 ppт на 30 км). К 29 января воздушные массы стратосферного полярного вихря с пониженным содержанием озона (**рис.4**) оказались над Московским регионом, переместившись из Сибири к Европе. На **рис. 4** показаны примеры изменений: упомянутые выше профили ВРО с пониженным содержанием озона в воздухе полярного стратосферного вихря, наблюдавшиеся 25 декабря 2008 г. и 29

января 2009 г., а также профили с повышенным содержанием озона в слое 25-35 км, зарегистрированные вне вихря 21 и 22 января 2009 г.

Результаты наблюдений (**рис.3-рис.5**) указывают на сильное влияние процессов в полярном вихре на озоносферу умеренных широт.

Рассмотренная картина динамических процессов, влияющих на озоносферу, была дополнена результатами траекторного анализа. Для определения траекторий движения воздушных частиц в стратосфере использовалась траекторная модель HYSPLIT (NOAA HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory model) [22]. Согласно результатам траекторного анализа, воздух с повышенным содержанием озона на высоте 25-30 км над Москвой 21 января 2009 г. за двое суток до этого (19 января) находился над Средиземным морем, а в следующие сутки (20 января) переместился в центральную часть Европы и оказался над Балтикой, откуда эти воздушные массы и приблизились к Москве с северо-запада, описав движение по часовой стрелке в антициклоне. Воздушные массы с пониженным содержанием озона, появившиеся над Москвой 29 января 2009 г., за двое суток до этого (27 января) располагались над северным Казахстаном и Западной Сибирью. Затем, описав крутую дугу против часовой стрелки в циклоне, они приблизились к Москве с северо-востока.

Помимо значительных изменений формы вертикального распределения озона над Москвой, которые были рассмотрены выше (примеры на **рис.4**), во время стратосферного потепления были зарегистрированы также деформированные профили озона с локальными неоднородностями. Примеры таких профилей ВРО показаны на **рис. 6**, где представлены профили для 6 и 18 февраля 2009 г. с двумя максимумами на высотах около 28 км и 42 км (вместо одного максимума на высоте 35 км по модели [18]). Профили ВРО с двумя максимумами в стратосфере, неоднократно наблюдавшиеся над Москвой и ранее (см. также пример на **рис.2б**), 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 [17].

Проведённый анализ показал, что периодическим увеличениям (уменьшениям) потенциальной завихренности над Москвой, вызванным перемещениями основных барических систем стратосферы (полярного стратосферного вихря и антициклона), соответствовало уменьшение (увеличение) содержания озона на высоте 30 км над Москвой (см. **Рис. 4**). 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 указанных величин оказался равным $\rho = -0,82 \pm 0,04$ для представленного на **Рис. 4** периода 2008-2009 гг. Такая связь этих параметров свидетельствует о сильном влиянии процессов переноса воздушных масс на пространственное распределение озона. Таким образом, географическое положение Москвы оказалось удобным для изучения вертикального распределения озона как внутри полярного вихря, так и вне вихря (**рис. 1, рис.3-5**) в силу отмеченного выше нередкого появления воздуха полярного вихря над Москвой.

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

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ результатов проводимого в ФИАН дистанционного зондирования вертикального распределения озона в атмосфере позволяет сделать следующие выводы.

Радиофизические методы дистанционного зондирования позволили 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 малошумящего приемника, оптимизированного анализатора спектра и современных математических методов решения обратной задачи – восстановления профилей ВРО из измеренных спектров излучения озона.

Исследовано влияние атмосферных процессов на структуру сезонного хода озона в умеренных широтах. Значительное понижение содержания стратосферного озона наблюдалось над Москвой в холодные полугодия (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 озонном слое зарегистрированы при стратосферных потеплениях. При сильном стратосферном потеплении в январе 2009 г. наблюдались изменения содержания озона на 30 км в пределах от 4,5 ppт до 8,5 ppт.

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

Обнаруженное пониженное содержание озона в слоях верхней стратосферы весной отражает прогнозируемое долговременное изменение в наиболее чувствительной к техногенным загрязнениям области озоносферы на 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 Е.В.Суворову и В.А. Черепенину за поддержку данной работы, а также В.А.Гусеву и С.В.Логвиненко за участие в создании спектрорадиометра. Авторы признательны лаборатории NOAA Air Resources Laboratory (ARL) за любезно предоставленную возможность пользования

транспортной моделью NYSPLIT, 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».

Список литературы

- [1] Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2006. World Meteorological Organization, Global Ozone Research and Monitoring Project, Report No.50, Geneva, 2007.
- [2] World Meteorological Organization Global Atmosphere Watch (GAW) Strategic Plan: 2008-2015, No. 172, WMO TD NO.1384.
- 2.1. Малкевич М.С. Оптические исследования атмосферы со спутников. М.: Наука, 1973, 303 с.
- 2.2. Башаринов А.Е., Гурвич А.С., Егоров С.Т. Радиоизлучение Земли как планеты. М.: Наука, 1974, 188 с.
- 2.3. Кондратьев К.Я., Тимофеев Ю.М. Метеорологическое зондирование атмосферы из космоса. Л.: Гидрометеиздат, 1978, 280 с.
- 2.4 Ulaby E.T., Moore R.K., Fune A.K. Microwave remote sensing. v.3, Active and Passive. North Bergen: Artech Hause, 1986, 2162 p.
- [3] Atmospheric remote sensing by microwave radiometry. Ed. M.Janssen, J.Willey&Sons Inc., 1993.
- [12] S.V.Solomonov, E.P.Kropotkina, A.N.Lukin, N.I.Ponomarenko, S.B.Rozanov, J.Ellder. Some features of the vertical ozone distribution from millimeter wave measurements at Pushchino and Onsala observatories //J. Atmos. Terr. Phys. - 1994.- V.56, No.1.- P.9-15.
- [8] A.Parrish. Millimeter-wave remote sensing of ozone and trace constituents in the stratosphere //Proc. IEEE. -1994. - V.82, No.12. - P.1915-1929.
- [4] А.А.Красильников, Ю.Ю.Куликов, А.Б.Мазур, В.Г.Рыскин, Н.В.Серов, Е.В.Суворов, Л.И.Федосеев, А.А.Шевцов. Микроволновое зондирование озона и других малых составляющих атмосферы. В сборнике «Физика микроволн», Изд. ИПФ РАН, Нижний Новгород, 1999.- Т.1.- С.171-178.

- 2.5. Gaikovich K.P. Tikhonov's method of the ground-based radiometric retrieval of the ozone profile // IGARSS'94, Digest, v.4, pp.1901-1903.
- 2.6. Gaikovich K.P. Inverse Problems in Physical Diagnostics. Nova Science Publishers Inc., New York, 2004.
- [15] А.Н.Тихонов, А.В.Гончарский, В.В.Степанов, А.Г.Ягола. Регуляризирующие алгоритмы и априорная информация. М.: Наука, 1983.
- [11] К.П.Гайкович, Е.П. Кропоткина, С.В.Соломонов. Определение вертикального профиля атмосферного озона по наземным измерениям излучения в миллиметровом диапазоне//Известия АН. Физика атмосферы и океана.- 1999.- Т.35, №1.- С.86-95.
- [5] С.В.Соломонов. Радиофизические исследования озоносферы //Успехи соврем. радиоэлектроники – 2003. - №1.- С.9-25.
- [6] С.В.Соломонов, Е.П.Кропоткина, С.Б.Розанов. Спектральные исследования атмосферного озона на миллиметровых радиоволнах //Монография «Оптическая спектроскопия и стандарты частоты». Под. ред. Л.Н.Синицы и Е.А.Виноградова. Томск: Изд. Ин-та оптики атмосферы СО РАН, 2004. С.52-85.
- [13] Е.П.Кропоткина, Ю.Ю.Куликов, В.Г.Рыскин, С.В.Соломонов. Исследование пространственно-временного распределения стратосферного озона по наблюдениям на миллиметровых волнах в умеренных и высоких широтах //Изв. вузов. Радиофизика.- 2007.- Т.50, №10-11.- С.954-960.
- [7] С.В.Соломонов, А.Н.Игнатьев, Е.П.Кропоткина, С.В.Логвиненко, А.Н.Лукин, П.Л.Никифоров, С.Б.Розанов. Спектральная аппаратура для мониторинга атмосферного озона на миллиметровых волнах //Приборы и техника эксперимента.- 2009.- №2 – С.138-144.

- [14] W.Steinbrecht et al. Long-term evolution of upper stratospheric ozone at stations of the Network for Detection of Stratospheric Change// J. Geophys.Res. – 2006 – v.111, D10308, doi:10.1029/2005JD006454.
- [9] U.Klein, I.Wohltmann, K.Lindner, K.F.Kunzi. Ozone depletion and chlorine activation in the Arctic winter 1999/2000 observed in Ny-Ålesund //J.Geophys.Res., 2002.- V.107, No D20.- P.8288-8298.
- [10] С.В.Соломонов, К.П.Гайкович, А.Н.Игнатьев, Е.П.Кропоткина, А.Н.Лукин, П.Л.Никифоров, С.Б.Розанов Дистанционное зондирование атмосферного озона на миллиметровых волнах. Труды конференции «Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред», Муром, 30 июня-3 июля 2009 г. Муромский институт (филиал) ВлГУ, Муром, CD-R, 2009, С.49-53.
- 2.7. Турчин В. Ф., Козлов В. П., Малкевич М. С., “Использование методов математической статистики для решения некорректных задач”, УФН, 102, вып.3 (1970), 345–386.
- 2.8. Rodgers, C. D.: Retrieval of atmospheric temperature and composition from remote measurements of thermal-radiation, Rev. Geophys. Space Phys., 14, 609–624, 1976.
- 2.9. Westwater E.R., Sweezy W.B., McMillin L.M., Dean C. Determination of atmosphere temperature profiles from a statistical combination of ground-based profiler and operational NOAA 6/7 satellite retrievals// J. Climate and Meteorology, 1984, v.23, No.5, p. 689-703.
- 2.10. Gaikovich K.P., Markina N.N., Naumov A.P., , Plechkov, V.M. and Sumin, M.I., Investigation of remote sensing possibilities of the low atmosphere in the microwave range and some aspects of statistical data use//Int. Journal of Remote Sensing, 1983, v.4, No.2, p.419-431.
- [16] С.В.Соломонов, С.Б.Розанов, Е.П.Кропоткина, А.Н.Лукин. Спектрорадиометр для дистанционного зондирования атмосферного озона на миллиметровых радиоволнах //Радиотехн. и электрон. - 2000. - Т.45, №12. - С.1519-1525.

- [17] L.Froidevaux, N.J.Livesey, W.G.Read, et al., Early validation analyses of atmospheric profiles from EOS MLS on the Aura satellite //IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing.- 2006.- V44, No.5.- P.1106-1121.
- [18] G.M.Keating, L.S.Chiou, N.C. Hsu. Improved ozone reference models for the COSPAR international reference atmosphere //Adv. Space Res.- 1996.- V.18, No.9/10.- P.11-58.
- [19] SBUV Version 8, Nimbus 7, NOAA-9a, NOAA-9b, NOAA-11, NOAA-16. DVD-ROM April 2004. Prepared by the NOAA/NASA Ozone Processing Team.
- [20] E.R.Nash, P.A.Newman, J.E.Rosenfield, M.R.Schoeberl. An objective determination of the polar vortex using Ertel's potential vorticity//J. Geophys. Res.- 1996.- V.101, No.D5.- P.9471-9478.
- [21] The British Atmospheric Data Centre (BADC) <http://badc.nerc.ac.uk/data/assim/>
- [22] R.R.Draxler, G.D.Rolph, 2010. HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) Model access via NOAA ARL READY Website (<http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>) NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring, MD

Подписи к рисункам

Рис.1. Примеры спектральных линий озона с центром на 142,175 ГГц, зарегистрированных 5 декабря 2008 г. и 13 апреля 2009 г. (слева), и соответствующие им вертикальные профили озона (справа). Кружками на графиках спектров (слева) показаны значения яркостных температур в каналах анализатора спектра.

Рис.2. Профили распределения озона над Москвой по наблюдениям в ФИАН и из космоса [14] для спокойной (а) и возмущенной (б) озоносферы. Данные модели из работы [15].

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

Рис. 4. Профили ВРО с пониженным содержанием озона в воздухе полярного стратосферного вихря, наблюдавшиеся 25 декабря 2008 г. и 29 января 2009 г., а также профили с повышенным содержанием озона в слое 25-35 км, зарегистрированные вне вихря 21 и 22 января 2009 г.

Рис.5. Содержание (отношение смеси) озона над Москвой на высоте 30 км и значения потенциальной завихренности PV на уровне $\theta = 850\text{K}$ [17] в период с 01.10.2008 г. по 15.02.2009 г.

Рис.6. Профили ВРО с двумя максимумами на высотах около 28 км и 42 км, зарегистрированные 6 и 18 февраля 2009 г.

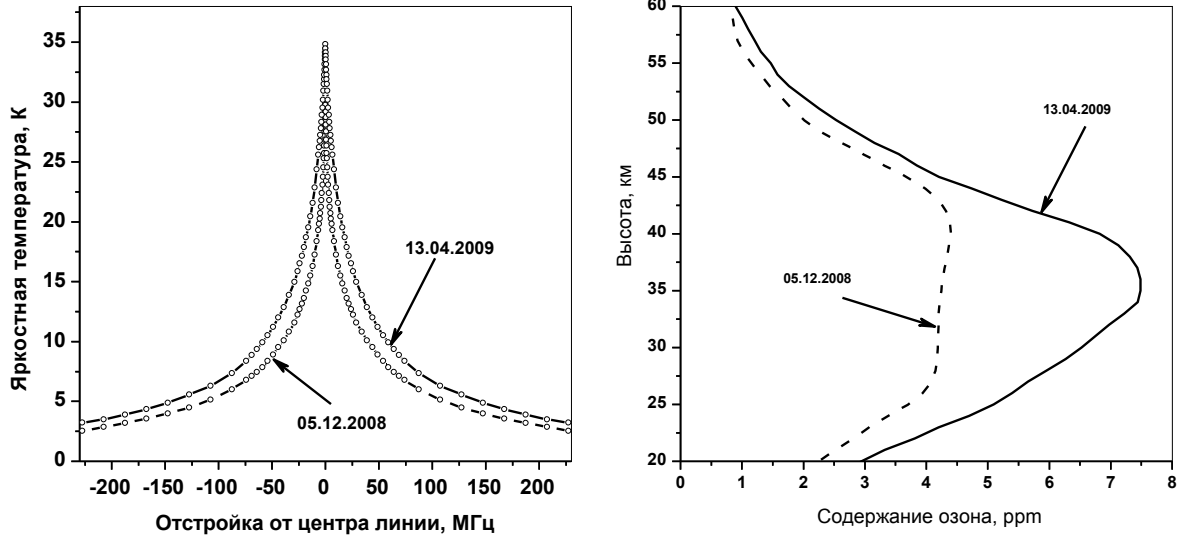


Рис.1

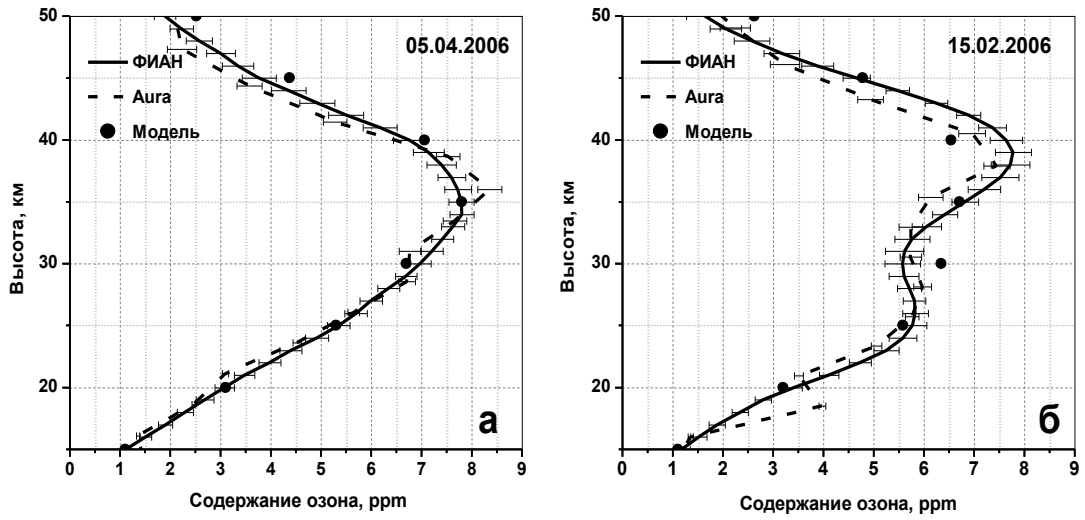


Рис.2

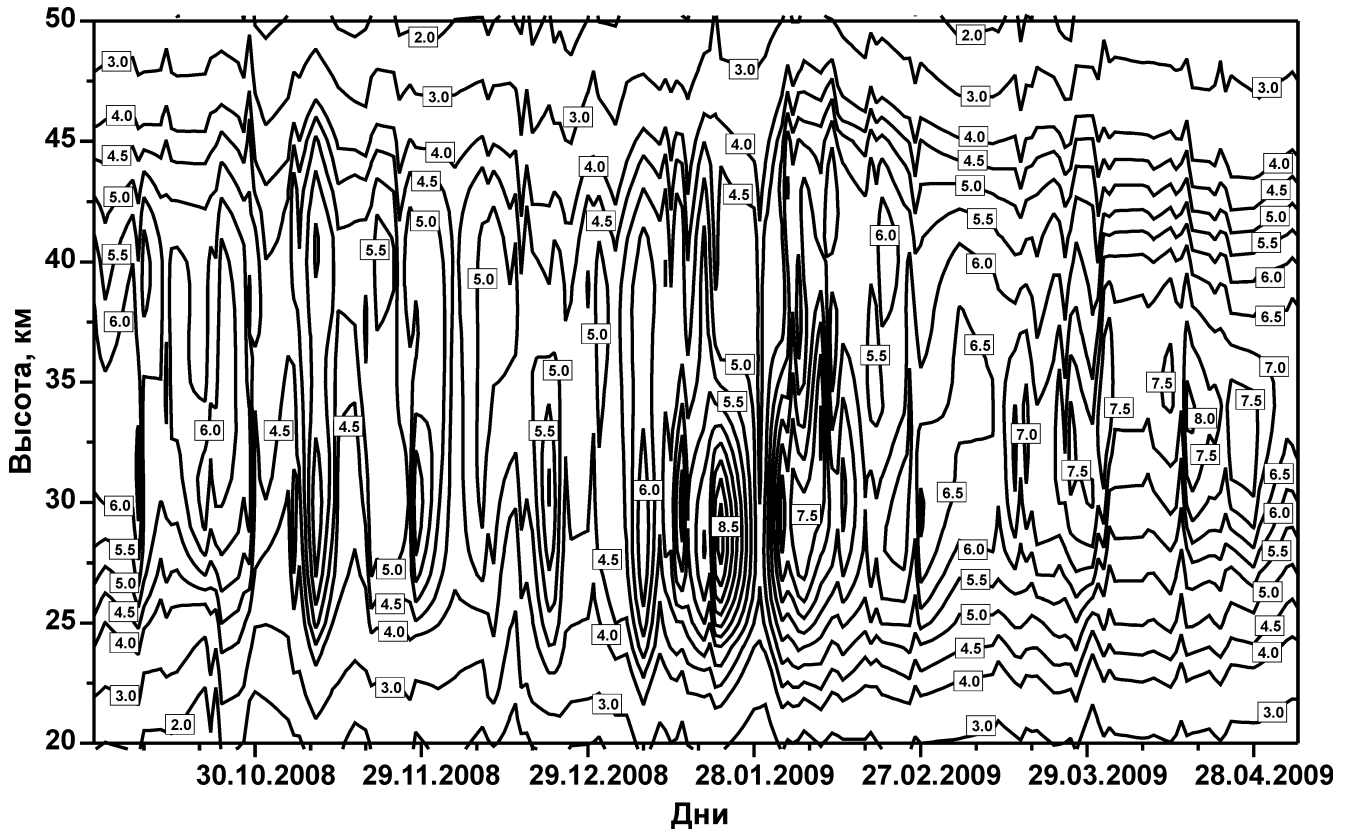


Рис.3

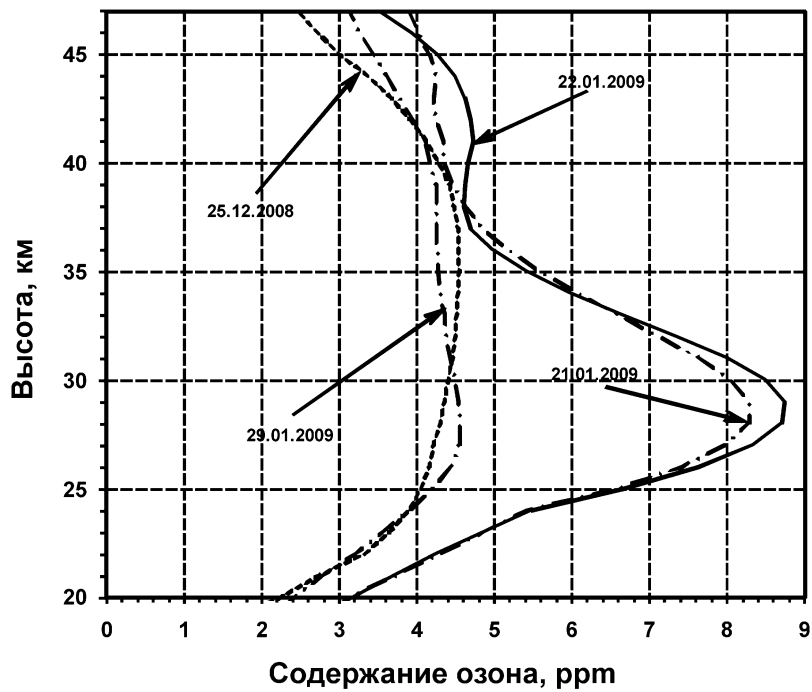


Рис.4

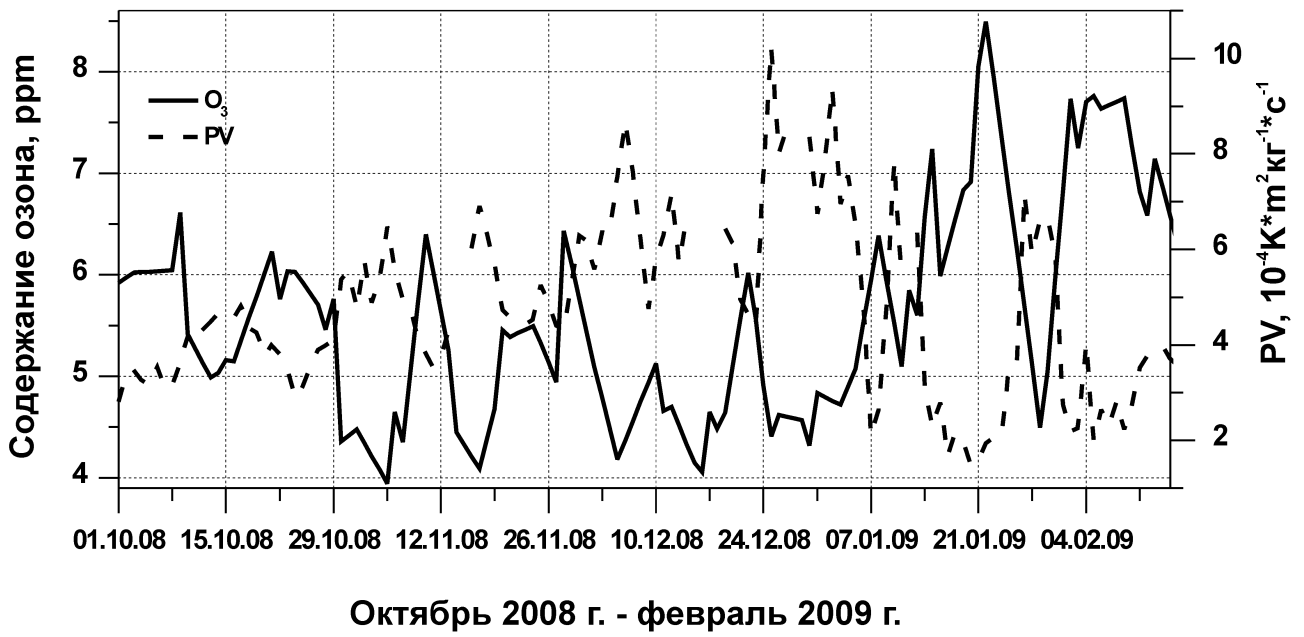


Рис.5

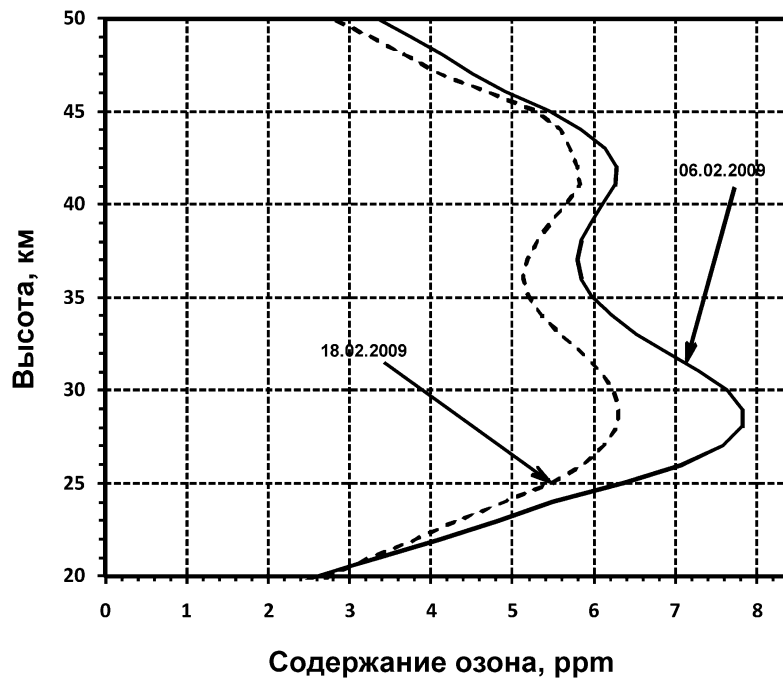


Рис.6