

Дистанционное зондирование атмосферного озона на миллиметровых волнах

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

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, ГСП-105, e-mail: gai@ipm.sci-nnov.ru

³ Институт прикладной физики РАН, 603950, Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46, e-mail: nikfv@appl.sci-nnov.ru

Представлены результаты проводимого в ФИАН мониторинга вертикального распределения озона, описана аппаратура, в состав которой входит новый 96-ти канальный анализатор спектра АС-96 и методы обработки спектральной информации, включающие новый алгоритм решения обратной задачи, основанный на методе Тихонова и статистической регуляризации.

Abstract

Актуальность данной работы обусловлена важностью проблемы происходящих в озоносфере глобальных изменений. Дистанционное зондирование озоносферы производится с помощью созданного чувствительного спектрорадиометра с оптимизированными параметрами и эффективных методов, включающих решение обратной задачи – восстановление вертикального распределения озона из измеренной спектральной линии с центром на 142,175 ГГц [1 - 3].

Физической основой решения обратной задачи является чувствительность контура регистрируемой спектральной линии озона к высотному распределению молекул этого газа в стратосфере и мезосфере. 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

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

где $\mathbf{K} = K(u(h), \nu, \theta, h)$ - нелинейное ядро уравнения (1), ν и θ - частота и угол приема излучения. Алгоритм решения обратной задачи с использованием метода Тихонова [4] подробно описан в работе [3]. Принимая во внимание, что правая часть (1) известна с погрешностью δ , итерационный алгоритм для решения уравнения (1) как нелинейной задачи в операторном виде имеет вид [3]

$$\mathbf{K}^i \mathbf{u}^{i+1} = \mathbf{T}_B^\delta, \quad (2)$$

где оператор $\mathbf{K}^i = \mathbf{K}(u^i(h), \nu, h)$, а в качестве первого приближения $u^1(h)$ (которым может служить произвольная функция) используется модельный профиль концентрации озона [5].

Развитием этой методики является новый алгоритм с использованием метода статистической регуляризации. В его основе - использование известной формулы Байеса, которая связывает апостериорное распределение плотности условной вероятности $P(\mathbf{u}|\mathbf{T}_B)$ реализации вектора \mathbf{u} при заданном векторе \mathbf{T}_B с априорным распределением вероятности $P(\mathbf{T}_B|\mathbf{u})$ (реализации вектора \mathbf{T}_B при заданном векторе \mathbf{u}) и априорным распределением $P(\mathbf{u})$ вероятности вектора \mathbf{u} :

$$P(\mathbf{u} | \mathbf{T}_B) = \frac{P(\mathbf{u})P(\mathbf{T}_B | \mathbf{u})}{\sum_z P(\mathbf{u})P(\mathbf{T}_B | \mathbf{u})}. \quad (3)$$

Среднее по этому распределению значение вектора \mathbf{u} определяет оценку искомого решения:

$$\tilde{\mathbf{u}} = \sum_z \mathbf{u}P(\mathbf{u} | \mathbf{T}_B). \quad (4)$$

В методах статистической регуляризации интегральное уравнение (2) сводится к системе уравнений с выделенным вкладом ошибки:

$$\sum_{i=1}^N k_{ji}(h_i, \nu_j) u_i(h_i) = T_{Bj}^\delta(\nu_j) - \delta_j, j=1, 2, \dots, M. \quad (5)$$

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 (5) в матрично-векторной форме:

$$\mathbf{T}_B^\delta = \mathbf{K}\mathbf{u} + \boldsymbol{\delta}, \quad (6)$$

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

В данной работе применяется метод максимального правдоподобия. 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:

$$\tilde{\mathbf{u}} = \langle \mathbf{u} \rangle + \mathbf{B}_u \mathbf{K}^* (\mathbf{K} \mathbf{B}_u \mathbf{K}^* + \mathbf{B}_\delta)^{-1} (\mathbf{T}_B^\delta - \langle \mathbf{T}_B^\delta \rangle), \quad (7)$$

где $\langle * \rangle$ - среднее по ансамблю, $\mathbf{B}_u = \langle (u_i - \langle u_i \rangle)(u_j - \langle u_j \rangle) \rangle$, $\mathbf{B}_\delta = \langle \delta_i \delta_j \rangle$, $\langle \delta(\nu_i) \rangle = 0$. Ковариационные матрицы вычислялись по на основе многолетних данных радиометрического зондирования высотных профилей концентрации озона над Москвой. Установлена высокая устойчивость используемых в (7) статистических параметров для выделенных сезонных ансамблей данных.

Таким образом, при решении обратной задачи с помощью итерационного алгоритма (2) может использоваться либо метод Тихонова, либо метод статистической регуляризации (7). Алгоритм метода статистической регуляризации имеет значительное преимущество по скорости решения обратной задачи 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 метод Тихонова даёт лучшие результаты. Поэтому сочетание этих двух методов позволяет оптимизировать решение задачи восстановления ВРО.

Спектрорадиометр для дистанционного зондирования атмосферного озона состоит из малошумящего супергетеродинного приемника [2], анализатора спектра АС-96 и персонального компьютера с интерфейсными модулями и программным обеспечением. Однополосная шумовая температура спектрорадиометра составляет ~700 К при охлаждении входных каскадов и ~1500 К без охлаждения.

Анализатор спектра АС-96 имеет 96 фильтровых каналов с полной шириной полосы анализируемых частот 475 МГц в диапазоне 75–550 МГц и переменным шагом по частоте. Ширина полосы пропускания фильтровых каналов изменяется от 0,1 МГц в центре линии озона до 20 МГц на ее крыльях. Выбор ширины полос пропускания и частот настроек фильтров удовлетворяет требованиям минимального спектрального сглаживания регистрируемой линии, максимального отношения сигнал/шум в каналах, помехозащищенности и возможности технической реализации узлов АС-96.

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. Суммарная погрешность восстановления профиля вертикального распределения озона (с учетом шума аппаратуры и других экспериментальных погрешностей) при оптимальных условиях наблюдения не превышает 5–7% на высотах от 20 до 50 км, постепенно возрастающая в более низких и в более высоких слоях. На рис.1 (слева) представлены примеры спектральных линий озона, зарегистрированных днем 31.03.2008 г. и 17.11.2008 г. Восстановленные по этим спектрам профили вертикального распределения озона показаны на рис.1 (справа). Здесь и ниже содержание озона дано в единицах отношения смеси озона и воздуха (ppm, или млн^{-1}).

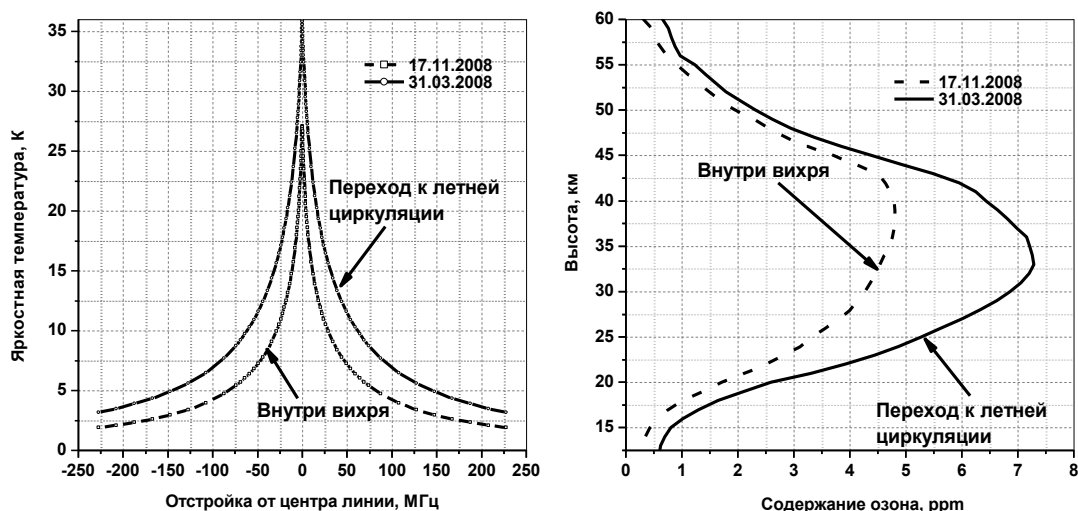


Рис.1. Примеры спектральных линий озона с центром на 142,175 ГГц (слева) и соответствующих им вертикальных профилей озона (справа).

По основным параметрам (чувствительности, точности восстановления профилей озона) аппаратура ФИАН соответствует мировому уровню инструментов такого типа. Спектральная аппаратура ФИАН была включена в состав глобальной сети по международным программам DYANA, CRISTA/MAHRSI, SOLVE 2000.

Результаты дистанционного зондирования озоносферы над Москвой с помощью спектрометра ФИАН хорошо согласуются с озонозондовыми и спутниковыми данными. На рис.2 а, б, в качестве примера, показаны профили распределения озона над Московским регионом, полученные при наблюдениях в ФИАН и из космоса с помощью прибора MLS на спутнике EOS Aura для случаев спокойной и возмущенной озоносферы.

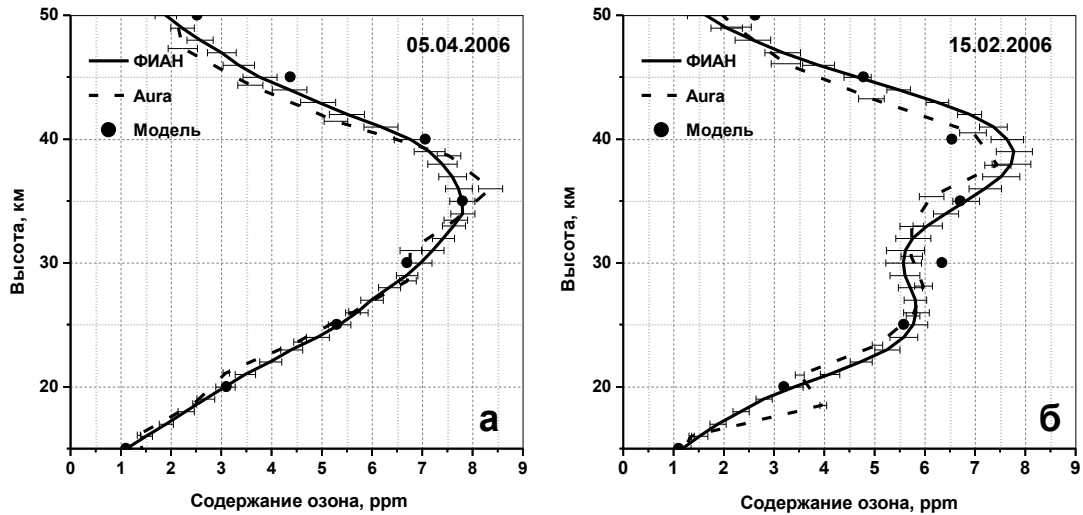


Рис.2. Профили распределения озона над Москвой по наблюдениям в ФИАН и из космоса для спокойной (а) и возмущенной (б) озоносферы. Модель из работы [5].

Пример высотно-временного распределения озона в холодный период 2007-2008 гг. представлен на рис.3. Изолиниями показаны уровни равных значений отношения смеси озона. Особенности этого распределения является значительные изменения (до 2 раз) содержания озона на высотах 25-40 км, которые вызваны динамическими процессами, протекающими в стратосфере с октября по май. Например, в периоды 19-21 декабря 2007 г. и 23-26 января 2008 г. содержание озона в этом слое снижалось примерно до 4 ppb из-за появления воздуха полярного вихря. При переносе богатого озоном воздуха в умеренные широты из низких произошло весеннее увеличение озона, превысившее 8 ppb вблизи 35 км в мае 2008 г.

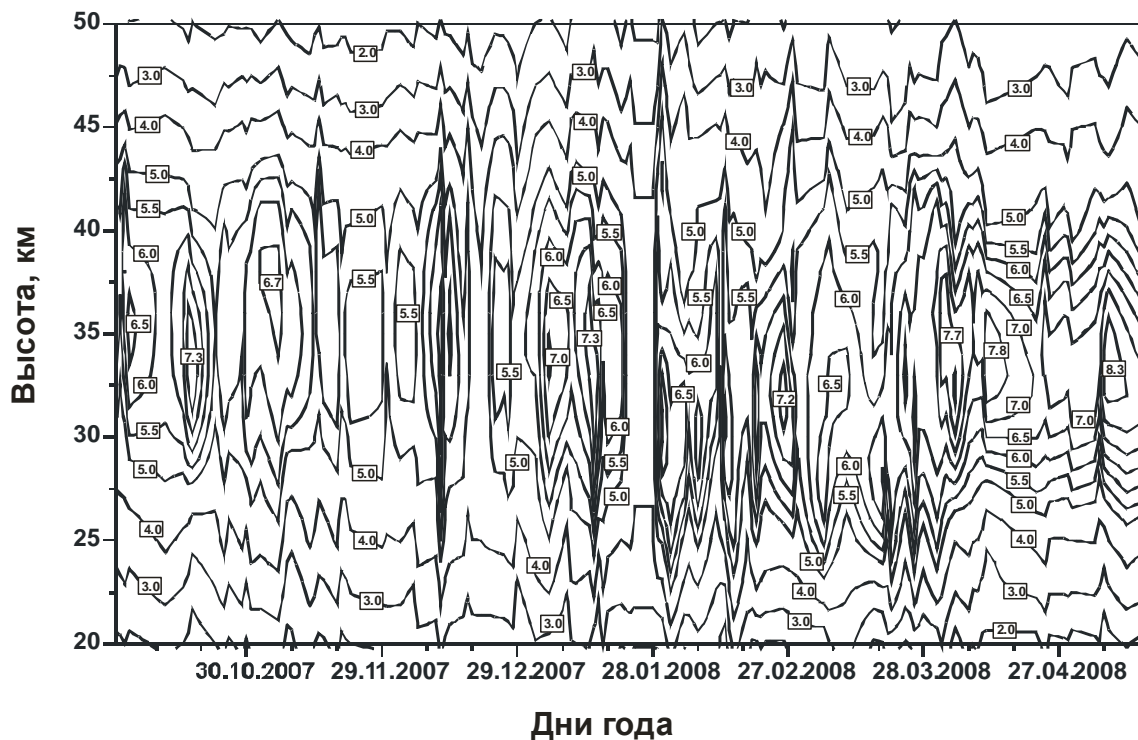


Рис.3. Высотно-временное распределение озона в холодный период 2007 – 2008 гг.

Получены пониженные среднемесячные значения содержания озона в чувствительных к техногенным воздействиям слоях верхней стратосферы (40-45 км), что согласуется с результатами других экспериментов, с известными теоретическими данными и может быть связано с разрушением озона из-за техногенного загрязнения атмосферы хлоросодержащими веществами.

Сделан вывод о важности мониторинга атмосферного озона на ММ-волнах для изучения дальнейшего развития изменений в озоносфере.

Авторы благодарны академику А.Г. Литваку, профессорам Н.А. Арманду, Е.В. Суворову и В.А. Черепенину за поддержку данной работы.

Работа поддержана Программами ОФН РАН «Проблемы радиофизики» и «Радиоэлектронные методы в исследовании природной среды и человека».

Литература

1. Соломонов С.В. Радиофизические исследования озоносферы //Успехи соврем. радиоэлектроники – 2003. - №1.- С.9-25.
2. Соломонов С.В., Розанов С.Б., Кропоткина Е.П., Лукин А.Н. Спектрорадиометр для дистанционного зондирования атмосферного озона на миллиметровых радиоволнах //Радиотехника и электроника. – 2000, т.45, №12, с.1519-1525.
3. Гайкович К.П., Кропоткина Е.П., Соломонов С.В. 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.
4. А.Н.Тихонов, А.В.Гончарский, В.В.Степанов,А.Г.Ягола. Регуляризирующие алгоритмы и априорная информация. М.: Наука, 1983.
5. Keating G.M., Chiou L.S., Hsu N.C. Improved ozone reference models for the COSPAR international reference atmosphere //Adv.Space Res. 1996. vol.18,No.9/10.pp.11-58.