

## Изменения вертикального распределения озона по результатам дистанционного зондирования на миллиметровых волнах в ФИАН

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

*Федеральное государственное бюджетное учреждение Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, 119991 ГСП-1 Москва, Ленинский проспект, д.53, [ker@sci.lebedev.ru](mailto:ker@sci.lebedev.ru)*

*Представлены новые результаты дистанционного зондирования атмосферного озона над Москвой в 2014 г., включая период внезапного стратосферного потепления. Дано описание спектрорадиометра, работающего на частотах вращательной спектральной линии озона с центром на 142.175 ГГц и методов анализа результатов наблюдений озона. Рассмотрены особенности высотного распределения озона до, во время и после сильного возмущения динамики стратосферы в 2014 г. Результаты мониторинга вертикального распределения озона необходимы для развития численных климатических моделей, для прогнозирования эволюции озонового слоя и климата*

*New results of remote sensing the atmospheric ozone over Moscow in 2014 are presented, including period of sudden stratospheric warming. A description of both radiometer operating at frequencies of ozone rotational line centered at 142.175 GHz and methods used for analysis of results of measurements the ozone by the instrument is given. Features of altitude ozone distribution over Moscow before, in time, and after strong perturbation of stratospheric dynamics in 2014 are considered. The monitoring data are necessary for development of numerical climate models, for prediction of both the ozone layer and climate evolution*

Дистанционное зондирование атмосферного озона на миллиметровых (ММ) волнах имеет большое значение в изучении эволюции озоносферы, исследование которой является важнейшей задачей в решении проблем изменений климата, состояния окружающей среды и экосистемы в целом [1]. Озон защищает жизнь на Земле от губительного УФ-Б излучения Солнца. Этот газ играет также ключевую роль в тепловом режиме средней атмосферы, участвует в динамических и химических процессах [1]. Для прогнозирования наблюдаемых изменений в озоносфере большое значение имеет изучение высотного распределения озона (ВРО) и его вариаций в холодное полугодие во время сильных возмущений циркуляции стратосферы, в периоды внезапных стратосферных потеплений. Ниже представлены новые результаты дистанционного зондирования атмосферного озона на миллиметровых волнах, выполненные в ФИАН в зимний период 2014 г., включающий внезапное стратосферное потепление в феврале 2014 г. Показаны особенности вертикального распределения озона до, во время и после сильного возмущения стратосферы в период этого потепления, сопровождавшегося разделением полярного вихря на две части.

Дистанционное зондирование озона проводится с помощью размещённого в Москве высокочувствительного спектрорадиометра [2].

Регистрируется спектральная линия теплового излучения молекул озона на частотах вращательного перехода  $10_{1,9}-10_{0,10}$  с центром на 142,175 ГГц. Эта уширенная столкновениями линия содержит информацию о профиле ВРО в стратосфере и мезосфере [2]. В предложенном К. П. Гайковичем алгоритме решения обратной задачи (восстановлении профиля ВРО из измеренного спектра) используются методы Тихонова и статистической регуляризации [2].

Связь яркостной температуры  $T_B$  спектра теплового радиоизлучения с высотным профилем концентрации озона  $U(h)$  после вычитания вклада других атмосферных составляющих можно представить 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),

$\nu$  и  $\Theta$  - частота и угол, под которым принимается излучение.

Высотный профиль распределения озона восстанавливается в результате решения (1) как нелинейного интегрального уравнения. На каждом шаге итерационного процесса интегральное уравнение Фредгольма 1-го рода решается методом обобщенной невязки Тихонова. Изложенный в [2] способ решения этой некорректной обратной задачи успешно используется при многолетних систематических наблюдениях динамики озоносферы над Москвой. Алгоритм решения уравнения (1) 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.

Многолетние измерения вертикального распределения озона над Москвой позволили накопить необходимый статистический материал, что открыло возможность использования также статистического подхода в методике восстановления профилей озона [2]. При этом интегральное уравнение (2) сводится к системе уравнений с выделенным вектором ошибки:

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

Обозначая  $\mathbf{u} = [u_1, u_2, \dots, u_N]^*$ ,  $\mathbf{T}_B^{\delta} = [T_{B_1}^{\delta}, T_{B_2}^{\delta}, \dots, T_{B_M}^{\delta}]^*$ ,  $\mathbf{K} = k_{ji}$ ,  $i = 1, 2, \dots, N$ , где (\*) – матричное транспонирование, запишем (2) в матрично-векторной форме:

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

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

В используемом методе 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 искомое соотношение

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

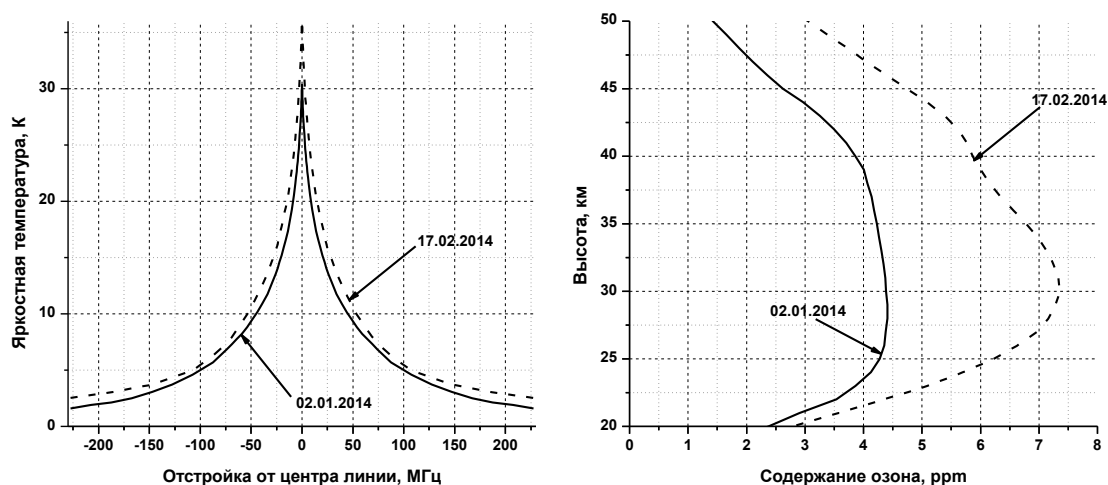
где  $\langle \dots \rangle$  - среднее по ансамблю,

$$\mathbf{B}_u = \langle (u_i - \langle u_i \rangle)(u_j - \langle u_j \rangle) \rangle, \quad \mathbf{B}_{\delta} = \langle \delta_i \delta_j \rangle, \quad \langle \delta(v_i) \rangle = 0.$$

Таким образом, при решении обратной задачи могут использоваться и метод Тихонова, и метод статистической регуляризации. Сочетание этих двух методов позволяет оптимизировать решение задачи восстановления ВРО.

Спектрорадиометр ФИАН [2] для дистанционного зондирования атмосферного озона состоит из малошумящего супергетеродинного приемника, 96-канального анализатора спектра АС-96 (создан в ИПФ РАН с участием ФИАН) и персонального компьютера. Однополосная шумовая температура приёмника составляет около 700 К

при охлаждении входных каскадов жидким азотом и около 1500 К без охлаждения. Полная ширина полосы анализируемых частот составляет 475 МГц.



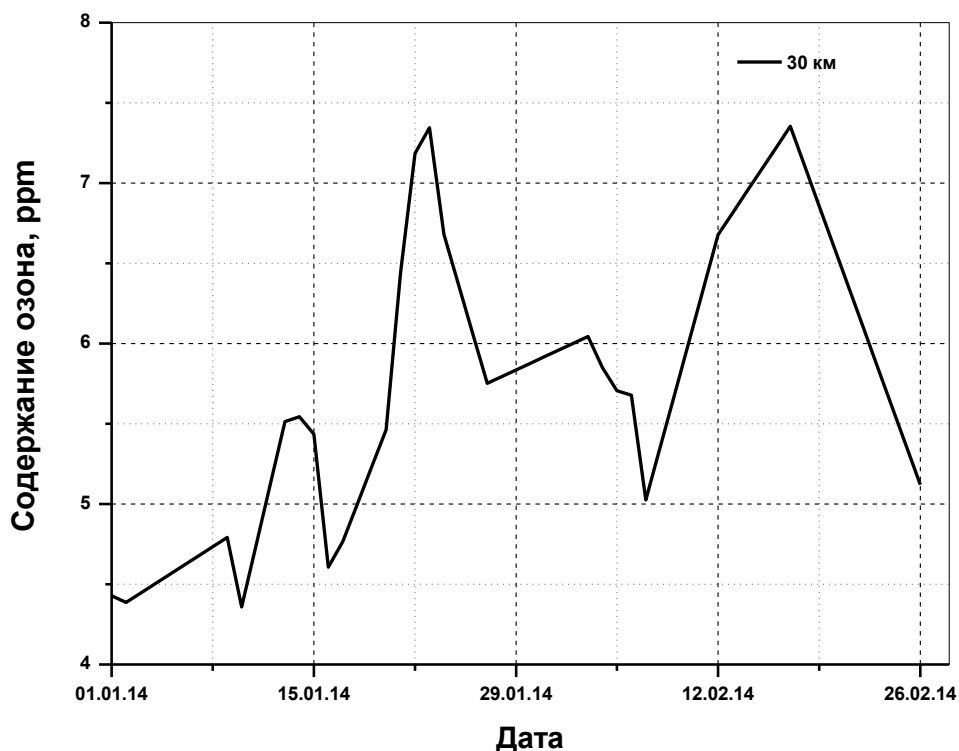
**Рис.1. Спектральные линии излучения озона и соответствующие им профили вертикального распределения озона 02.1.2014 г. и 17.02.2014 г.**

Ширина каналов изменяется от 0,1 МГц в центре линии озона до 20 МГц на ее крыльях. Линия озона регистрируется практически без искажения ее формы. Оценки показали [2], что суммарная погрешность восстановления профиля вертикального распределения озона 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 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. Получено хорошее соответствие профилей ВРО, измеренных в ФИАН, с данными одновременных наблюдений озона над Москвой из космоса. Спектральная аппаратура ФИАН была включена в состав глобальной озонметрической сети по ряду представительных международных программ.

Как показано ниже, наблюдаемые изменения ВРО связаны с возмущениями стратосферы. Методика, созданная для изучения этих возмущений, включает в себя анализ карт геопотенциальных высот, температуры для ряда барических уровней стратосферы, карт потенциальной завихренности [3]. Возникшее в феврале 2014 г. внезапное стратосферное потепление определялось по изменению знака разности среднезональных температур между широтами 85° и 60° Северного полушария ( $\Delta T_{85,60}$ ) на уровне с давлением 10 мбар.

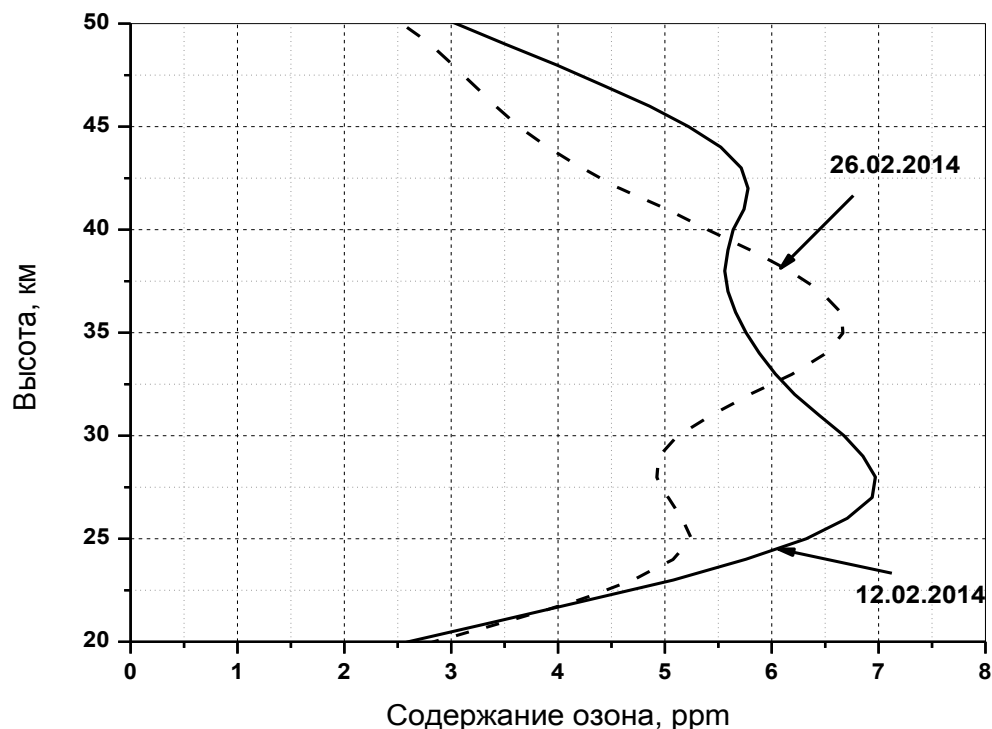
На рис.1. (слева) представлены примеры спектральных линий озона, зарегистрированных 2 января и 17 февраля 2014 г., т.е. до и в период стратосферного потепления. На рис.1. (справа) показаны профили ВРО соответствующие этим спектрам. Содержание озона  $C_{O_3}$  здесь и ниже дано в единицах отношения смеси ppb, или  $10^{-6}$ . На рис.2. показано содержание озона в слое на высоте 30 км в январе-феврале 2014 г. Видно, что содержание озона значительно меняется от минимальных значений, равных 4,3 ppb в начале января, до максимальных, равных 7,4 ppb 23 января и 17 февраля 2014 г. На рис.3. показан пример изменений профилей ВРО в феврале 2014 г. Анализ показал, что обнаруженные изменения ВРО связаны с крупномасштабными возмущениями динамики стратосферы, с развитием планетарных волн.

Пониженное содержание озона в первой декаде января было обусловлено влиянием на озоносферу интенсивного, устойчивого полярного стратосферного вихря, воздух которого с пониженным содержанием озона  $\text{C}_{\text{O}_3}$  располагался над Московским регионом в этот период. Затем в результате развития планетарных волн возникли колебания содержания озона  $\text{C}_{\text{O}_3}$ , значения которого изменялись между 4,7 ppм и 5,6 ppм во второй декаде января.



**Рис.2. Содержание озона в слое на высоте 30 км над Москвой в период с 1 января по 26 февраля 2014 г.**

После 21 января в слое на 30 км произошло значительное увеличение содержания озона, достигшее 7,4 ppм 23 января. В этот период стратосфера над Московским регионом оказалась вне полярного вихря. Необходимо отметить, что в период с 3 по 9 февраля полярный стратосферный вихрь разделился на две части. Произошло внезапное стратосферное потепление, в результате которого в период с 7 по 10 февраля изменился знак разности температур  $\Delta T_{85,60}$ . Т.е. в этот период средняя температура воздуха над высокими широтами превысила среднюю температуру умеренных широт на уровне 10 мбар (примерная высота 30 км). В результате эволюции полярного вихря воздух одной из его частей появился в стратосфере над Москвой, что сопровождалось понижением озона до 5 ppм 7 февраля. После 9 февраля вихрь приобрёл свою обычную форму с одним центром, а перемещение его воздуха к северу от Московского региона привело к увеличению озона до 7,4 ppм 17 февраля 2014 г. Происходящие процессы перемешивания воздушных масс отразились на изменениях формы профиля озона. Например, высота максимума содержания озона  $\text{C}_{\text{O}_3}$  изменилась от 27 км 12 февраля до 35 км 26 февраля 2014 г. (рис.3.).



**Рис.3. Вертикальные профили озона над Москвой 12 и 26 февраля 2014 г.**

Результаты мониторинга важны, для развития численных климатических моделей, для прогнозирования эволюции озонного слоя и климата.

*Работа поддержана Программами ОФН РАН «Современные проблемы радиофизики» и «Радиоэлектронные методы в исследовании природной среды и человека», а также грантом УНК ФИАН.*

### **Литература**

1. Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2010. World Meteorological Organization. Global Ozone Research and Monitoring Project. Report No.52. 516 pp. Geneva. Switzerland. 2011.
2. Соломонов С.В., Гайкович К.П., Кропоткина Е.П., Розанов С.Б., Лукин А.Н., Игнатъев А.Н. //Известия вузов. Радиофизика. 2011. Т.54. №2. С.113-121.
3. The British Atmospheric Data Centre (BADC). URL: [http://badc.nerc.ac.uk/view/badc.nerc.ac.uk\\_ATOM\\_dataent\\_ASSIM](http://badc.nerc.ac.uk/view/badc.nerc.ac.uk_ATOM_dataent_ASSIM)