

УДК 621.372:551.508.8

**МИКРОВОЛНОВЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ СТРАТОСФЕРНОГО ОЗОНА
НАД СРЕДНЕАЗИАТСКИМ РЕГИОНОМ С ПОМОЩЬЮ
РАДИОМЕТРИЧЕСКОГО СПЕКТРОМЕТРА (РМС-001)
МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА**

А. Т. Орозобаков, Б. Б. Саякбаева, К. Ш. Ашымканов, Г. Рыскул кызы
Институт физико-технических проблем и материаловедения им. академика
Ж.Ж.Жеенбаева Национальной Академии Наук Кыргызской Республики

Статья поступила в редакцию 14 октября 2015 г., после доработки – 11 ноября 2015 г.

Аннотация. Приведен принцип работы спектро radiометра при компенсационном режиме. По данным результатов периодических спектральных измерений прозрачности земной атмосферы было установлено, что вариации озона происходят в основном в нижних слоях стратосферы (20-30)км. Сравнение результатов дневных и ночных наблюдений подтвердило суточный ход содержания озона в верхней части стратосферы, где превышение концентрации озона после захода Солнца над дневными увеличивалось на 11%-30%. Представлены высотные распределения озона для типичных дней наблюдений.

Ключевые слова: радиоволны, излучение, длина волны, обтюратор, концентрация озона.

Abstract: The principle of work of a spektroradiometer at the compensation mode is given. According to results of periodic spectral measurements of transparency of the terrestrial atmosphere it was established that variations of ozone occur generally in the lower layers of a stratosphere (20-30) km. Comparison of results of day and night supervision confirmed the daily course of the content of ozone in the top part of a stratosphere where excess of concentration of ozone after sunset over day increased by 11%-30%. High-rise distributions of ozone for typical days of supervision are presented.

Key words: radio waves, radiation, wavelength, shutter, concentration of ozone.

Введение

В последние десятилетия значительные усилия мирового сообщества ученых и специалистов в области исследования атмосферы были направлены на исследования различных слоев атмосферы. Такой интерес к исследованию процессов, протекающих в различных слоях атмосферы и их взаимосвязи, был вызван, прежде всего, с освоением космического пространства, исследованиями условий распространения радиоволн, распространения возмущений от различных источников естественного и искусственного происхождения. А также с проблемами исследования механизмов солнечно-земного взаимодействия и истощения озонового слоя в полярных и средних широтах.

В настоящее время проблема исследования атмосферы не потеряла своей актуальности. В связи с появлением в 70-80-ые годы прошлого столетия таких глобальных проблем, как истощение озонового слоя и глобальное потепление климата, атмосферные исследования приобрели новую актуальность. Особенно исследования атмосферных процессов протекающих в стратосфере, где располагается озоновый слой, и тропосферы, в нижних слоях которой наблюдается эффект глобального повышения температуры. Исследования радиационного баланса атмосферы и малых газовых составляющих, определяющих этот баланс, а также особенностей динамических процессов, протекающих на различных высотах атмосферы, могут объяснить природу этих явлений.

В связи с этим особую актуальность приобретают исследования атмосферных процессов протекающих в стратосфере, где располагается истощаемый озоновый слой, и тропосфере, в нижних слоях которой наблюдается эффект глобального повышения температуры. Эти проблемы являются общими для всех континентов, но проявляются они в разных регионах по-разному. В Центральной Азии, далеко удаленной от океанов и материковых льдов, климат резко континентальный и, в значительной степени, зависит от высокогорных систем, покрытых своими собственными ледниками. Вследствие чего изучение влияния изменения климата на горные экосистемы и

условия проживания там населения Кыргызстана представляется чрезвычайно актуальным.

Для контроля состояния озонного слоя, на высотах от 20 до 75 км и обнаружения изменений, происходящих под влиянием как динамических, так и химических воздействий, а также для исследования процессов в озоновом слое при смене дня и ночи, незаменимы наземные дистанционные зондирования на миллиметровых волнах. По сравнению с ИК-видимым и УФ-излучением, миллиметровые волны слабо поглощаются в облаках и аэрозолях, поэтому озон можно контролировать круглосуточно и при любых метеорологических условиях, с помощью микроволновых спектрометров.

Содержание озона в атмосфере Земли характеризуется довольно большой изменчивостью в пространстве и во времени: широтные, долготные, короткопериодные, межгодовые и сезонные. Поэтому необходимо выявлять обусловленные природными факторами и антропогенным загрязнением длительные тренды изменения содержания озона. Эта задача может быть решена только путем накопления и статистического анализа длительных рядов измерений, выполненных в различных пунктах земного шара, желательно на всех широтах. Необходимо также организация мониторинга изменений вертикального распределения озона по всем широтам. В связи с этим представилось полезным создание радиофизической обсерватории миллиметрового диапазона в новом географическом районе, Средней Азии.

Микроволновые наблюдения стратосферного озона над Среднеазиатским регионом

Первые наблюдения озонного слоя над регионом Средней Азии радиоастрономическим методом в миллиметровом диапазоне радиоволн были начаты в 2006 г. в радиофизической обсерватории ИФ НАН КР, в рамках проектов МНТЦ. Данные результатов измерений в обсерватории востребованы для мирового сообщества, так как они позволяют дать более полное представление об общем содержании озона всей Земли. Организация таких наблюдений в Средней Азии будет важным шагом, в исследовании процессов

переноса стратосферного озона из тропических в полярные широты. Эти исследования помогут понять, как атмосферная циркуляция может влиять на вариации содержания озона в различных широтах.

Для наблюдений озона была выбрана линия с резонансной частотой 110836 МГц (длина волны $\lambda=2,7067$ мм). В 2^x – миллиметровом диапазоне длин волн имеется более интенсивная линия O_3 с частотой ~ 142 ГГц, но наблюдения ее в большей степени зависимы от атмосферных условий, что связано со значительным ростом коэффициента поглощения радиоволн в водяном паре при увеличении частоты в указанном выше диапазоне. Линия теплового радиоизлучения озона формируется в области высот над уровнем моря $h = 0-60$ км. Столбчатая ширина линии $\Delta\nu_c$ зависит от атмосферного давления и составляет при $h\approx 60$ км $\Delta\nu_c\approx 1$ МГц. Этим пределом определяется необходимое частотное разрешение спектрометра. Оно же диктует необходимую долговременную относительную стабильность рабочей частоты приемника радиометра: она должна быть не хуже 10^{-6} . С удалением от резонансной частоты такое разрешение становится избыточным, ширина канала частотного анализа должна соответствовать шагу по частоте при фиксированном декременте интенсивности излучения в линии. Это соображение диктует целесообразность построения анализатора частоты с переменной шириной канала. Необходимая ширина области частотного анализа линии также определяется особенностями вертикального распределения плотности озона в атмосфере. Максимум концентрации озона наблюдается при $h\approx 25$ км, а в тропосфере (т.е. при $h=0-15$ км) содержание озона не превышает 10% от его полного содержания.

Количество необходимых каналов было определено по принципу Релея (исходя из условия разделения линий излучения, формирующихся в соседних слоях озона). Из соображений обеспечения надежности измерений (с учетом возможных внешних помех или отказов отдельных каналов) их число увеличено до 16-ти для каждого из крыльев линий. Одновременное измерение обоих крыльев линии позволяет увеличить отношение сигнал/шум в контуре

линии (для восстановления профиля концентрации O_3 достаточно иметь информацию об одном из крыльев), а также устранить деформацию крыла линии из-за влияния нерезонансного поглощения в атмосфере. На основании экспериментальных исследований спектра атмосферного поглощения радиоволн в диапазоне $\lambda = 2...2,7$ мм при $h = 2,8$ км [1] можно оценить ожидаемый частотный градиент нерезонансной оптической толщи атмосферы вблизи $\lambda = 2,7$ мм, он составляет ~ 0.002 неп/100 МГц. Очевидно, что ошибка на такую величину приведет к существенному искажению контура линии на ее крыле.

Общая структура схема спектро радиометра более подробно приведена в [3], [4]. Измерения проводились в компенсационном режиме работы РМС, когда перед пирамидальной рупорной антенной, имеющей диаметр раскрыва 48мм и ширину главного лепестка $\Theta_{0,5} \sim 3,5^\circ$, находится 4-х секционный обтюратор (диск диаметром ~ 400 мм), вращающийся с угловой скоростью 200...400 об/мин. Внешний вид разработанного для реализации компенсационного метода обтюратора показан на Рис. 1.

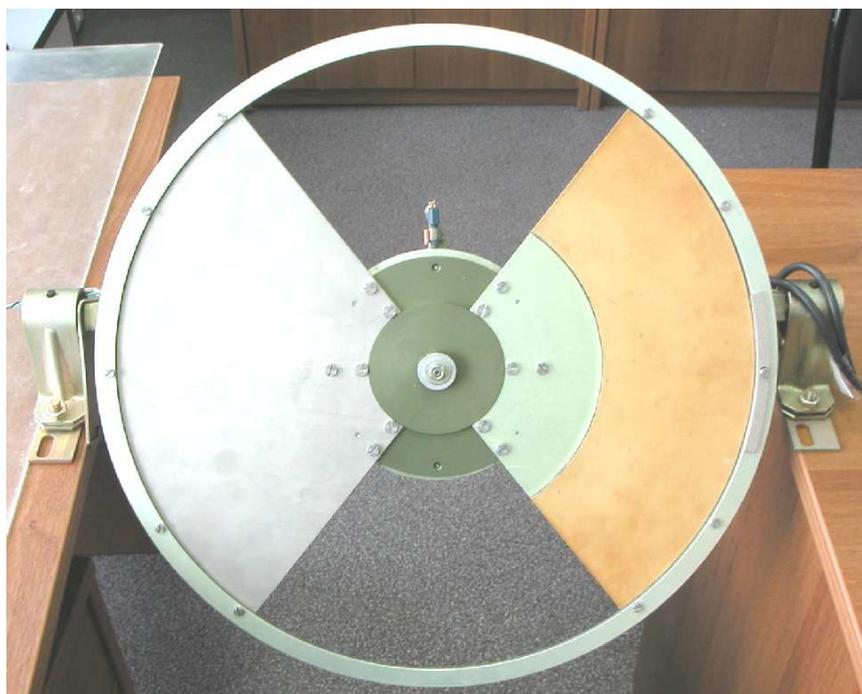


Рис.1. Высокоскоростной обтюратор для работы спектро радиометра в компенсационном режиме. Вид рабочей поверхности обтюратора.

Обтюратор вращается электрическим мотором ЭМ, соединенным с блоком управления частотой вращения. За один оборот обтюратора перед рупором последовательно проходят:

- зеркальный сектор диска с угловым размером 104° ;
- прозрачный сектор (вырез в диске) с угловым размером 76° ;
- сектор (угловой размер 104°), покрытый поглотителем микроволнового излучения с коэффициентом отражения по мощности не более 0,1;
- второй прозрачный сектор (угловой размер 76°).

Угловое положение секторов обтюратора относительно рупора определяется электрической системой на базе магнитного индукционного датчика, колоколообразные сигналы которого в последующем за ним формирователе преобразуются в нормированные по длительности импульсы напряжением ТТЛ-уровня. С формирователя импульсы поступают в блок управления частотой вращения электромотора и блок контроля вращения обтюратора, где вырабатываются коды сигналов управления для последующей их обработки в ПЭВМ.

Микроволновое излучение, собранное рупором, по волноводному тракту поступает на вход блока ММ, который функционально имеет в своем составе:

- приемно-преобразовательное устройство ($3 \text{ мм} \rightarrow \text{ПЧ-1}$);
- синтезатор частоты гетеродинных сигналов;
- умножители частоты сигнала гетеродина;
- усилители промежуточной частоты ПЧ₁ (МШУ и УПЧ-1).

Преобразование входного шумового сигнала осуществляется субгармоническим смесителем, имеющим два входа - сигнала и гетеродина.

Примерная компоновка блока ММ, включающего в себя основные узлы (рупорную антенну, плату приемника с СВЧ узлами приемного и гетеродинного трактов, синтезатор, стабилизаторы питающих напряжений - СН) и дополнительные узлы для модуляционного режима работы (генератор НЧ управляющего напряжения), приведена в [3], [4].

После частотных преобразований сигналы каналов I, II и III блока ПЧ-2 по кабелям длиной ~ 10 м поступают в блок спектрального анализа (БСА), включающий в себя 31 узкополосный спектральный канал. Каналы I и II нагружены на входы 12-ти спектральных каналов каждый, канал III - на 7 спектральных каналов.

Каждый спектральный канал имеет свой узкополосный фильтр. Ширина полосы пропускания этих фильтров меняется в зависимости от участка анализа спектра излучения озона и находится в пределах от 10 МГц для крыльев линии излучения до 1 МГц для центральной зоны.

Выделенные фильтрами спектральных каналов анализируемые сигналы подаются на квадратичные детекторы (на базе диодов 2A202A) и далее поступают на УНЧ, работающие в диапазоне частот до 10 кГц. Усилители НЧ имеют регулируемый K_p , что позволяет формировать как необходимый уровень напряжения выходных сигналов для работы с АЦП, так и обеспечивать равномерность коэффициентов передачи каналов в полной полосе частот (300 МГц) спектрального анализа. Каждый УНЧ собран по схеме с использованием прецизионных УПТ, имеющих высокую долговременную стабильность своих коэффициентов усиления.

С выходов УНЧ сигналы напряжением $\sim 2,25$ В (при сигнале, эквивалентном 300 °К) через устройства коммутации (2 разъема по 68 контактов) поступают в вычислитель, где с помощью АЦП преобразуются в цифровую форму. На входе АЦП включен электронный коммутатор на 32 положения с быстродействием не хуже 0,5 мкс. Оцифрованные сигналы поступают на вход ПЭВМ, где проводится их обработка по заданным алгоритмам и накопление данных измерений.

Полученные зависимости оптической толщины линии от частоты позволяют решить уравнение переноса теплового излучения в атмосфере относительно величины содержания озона на луче зрения, т.е. определить вертикальное распределение озона (ВРО). Однако, микроволновый метод зондирования атмосферных газов по своей сути является интегральным и при

наблюдениях с поверхности Земли это решение является некорректной задачей. Связь измеряемой оптической толщины озона $\tau_{oz}(\nu)$ и его высотного профиля концентрации $N_{oz}(z)$ определяется известным уравнением Фредгольма 1-го рода:

$$\tau_{oz}(\nu) = \int N_{oz}(z) \cdot K(\nu, z) dz,$$

где $K(\nu, z)$ - весовая функция, описывающая конкретный вращательный переход.

В этом случае применяют различные способы регуляризации решения [2]. В решении прямой задачи использовались как реальные (данные аэрологического, ракетного или спутникового зондирования), так и модельные зависимости давления и температуры от высоты.

В результате периодических спектральных измерений прозрачности земной атмосферы с помощью микроволнового спектрометра (РМС-001) была зарегистрирована максимальная концентрация озона над Среднеазиатским регионом на высотах 24-26 км, где $N_{\max} \approx 2.699 \cdot 10^{12}$ (молекул/см³). Было также установлено, что вариации озона происходят в основном в нижних слоях стратосферы (20-30)км. Сравнение результатов дневных и ночных наблюдений подтвердило суточный ход содержания озона в верхней части стратосферы, где превышение концентрации озона после захода Солнца над дневными увеличивалось на 11%-30%.

Результаты наземных микроволновых наблюдений в с. Караой для некоторых дней приведены на Рис.2. и Рис.3. они хранятся в виде файлов в базе данных обсерватории. Откуда можно получить информацию о высотном распределении озона на высотах 20-60 км. ее вариациях и суточном ходе. По рисункам видно увеличение концентрации озона после захода Солнца.

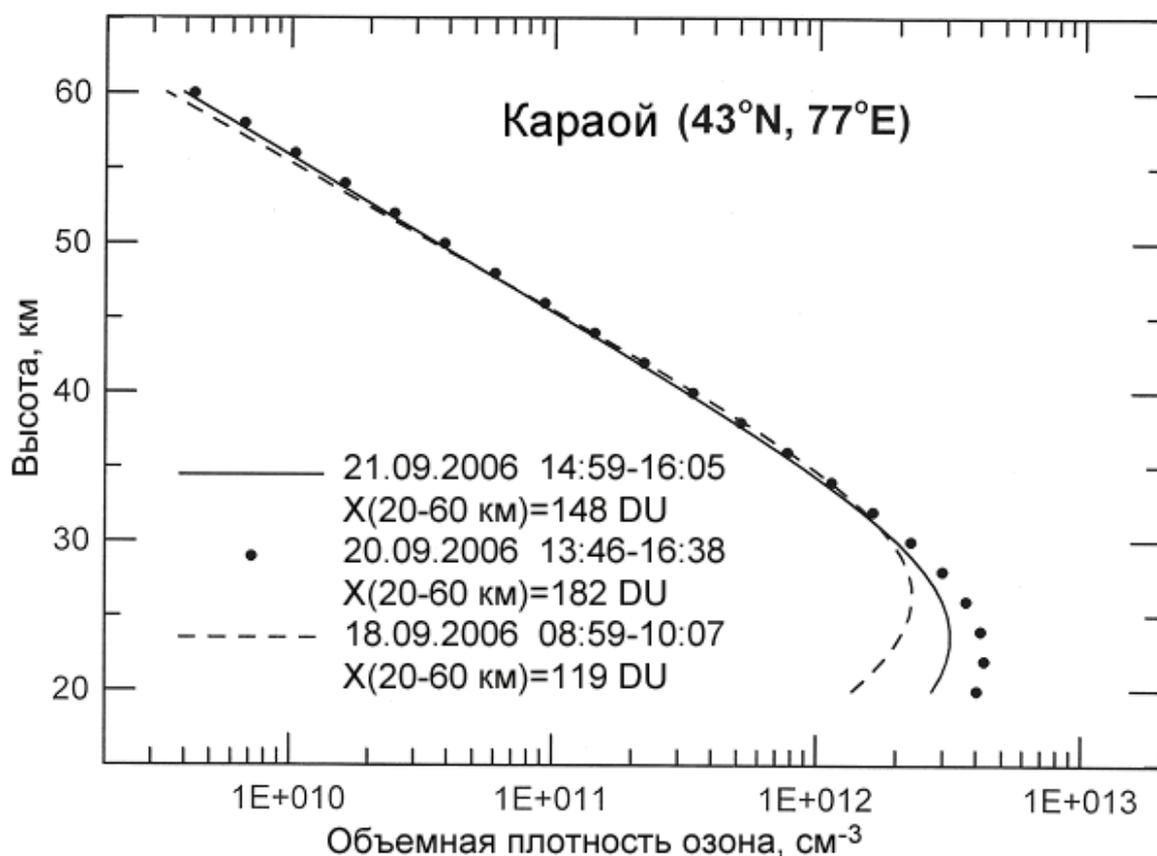


Рис.2. Высотное распределение озона

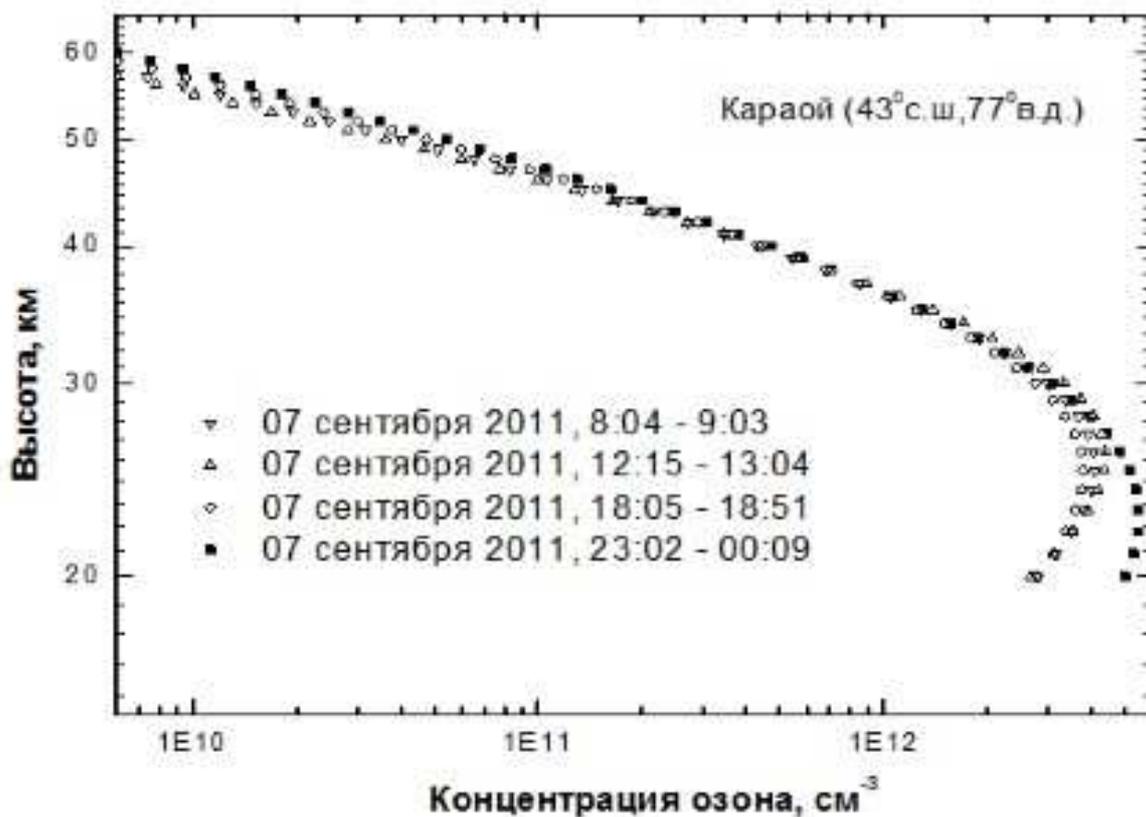


Рис.3. Высотное распределение озона до и после захода Солнца.

Выводы

По результатам наземных микроволновых измерений озонного слоя замечен суточный ход концентрации озона в стратосфере. Установлены зоны максимальной концентрации по высоте. С помощью аппаратур миллиметрового диапазона можно определять полное содержание озона независимо от времени суток, облачности. Для определения сезонных изменений озонного слоя над регионом, связанных с переносом воздушных масс, климатом и для более тщательного анализа, понимания процессов протекающих в средней атмосфере необходимо накопление длительной экспериментальной информации.

Литература

1. Кисляков А.Г., Наумов А.И. //Известия АН СССР, Серия Физика атмосферы и океана 1970 Т.6. с.239
2. Куликов Ю.Ю., Маркина Н.Н., Наумов А.П., Рыскин В.Г., Сумин М.И. «Восстановление высотного распределения озона из наземных измерений интегрального поглощения в миллиметровом диапазоне волн». //Известия АН СССР, серия Физика атмосферы и океана 1988. Т.24 №12 с.1282-1292
3. Орозобаков Т.О., Кисляков А.Г., Орехов Ю.И., Орозобаков А.Т. и др. «Мониторинг озонового слоя Земли в миллиметровом диапазоне длин волн в Центральноазиатском регионе» Известия НАН КР 2008/1 с. 44-46
4. Орозобаков Т.О., Орозобаков А.Т., Саякбаева Б.Б. «Восстановление высотного распределения озона над Иссыккульской котловиной по данным радиометрического спектрометра» (РМС-001) //Труды международной научно-технической конференции 22-24 апреля 2008г. Альтернативная энергетика и проблемы энергобезопасности. КРСУ. с.151-158