

Орозобаков А.Т., Саякбаева Б.Б.

**НАБЛЮДЕНИЯ СТРАТОСФЕРНОГО ОЗОНА НАД
ОЗЕРОМ ИССЫК-КУЛЬ РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ
В МИЛЛИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН**

A.T. Orozobakov, B.B. Sayakbaeva

**THE STRATOSPHERIC OZONE OBSERVATIONS ABOVE
THE ISSYK-KUL LAKE**

УДК: 621.372:551.508.8

Приведены результаты первых летних наблюдений озонового слоя обсерватории «Ысык-Көл» радиоастрономическими методами в миллиметровом диапазоне радиоволн с помощью микроволнового спектрометра РМС-001. Для получения спектров стратосферного озона была использована методика атмосферной калибровки интенсивности линии озона. По спектрам излучения озона были рассчитаны зависимости оптической толщины линии от частоты, которые позволили определить вертикальное распределение озона в пределах высот 20-60 км.

Микроволновый спектрометр РМС-001 рассчитан на долговременные систематические наблюдения, что позволяет планировать включение радиофизической обсерватории «Иссыккуль» в международную сеть мониторинга стратосферных явлений.

The results of the early ozone layer observations at the observatory "Issyk-Kul" were obtained by radioastronomic methods in millimeter waveband with the help of the microwave spectrometer PMC-001. For obtaining the stratospheric ozone spectra the methods were used of the ozone line atmospheric calibration intensity. Using the ozone radiation spectra the dependences of the optical line thickness on frequency were calculated, which allowed defining vertical ozone distribution within heights of 20-60 km.

The microwave spectrometer PMC-001 is intended for long-term regular observations, that allows planning the radiophysical observatory "Issyk-Kul" link to international network of stratospheric phenomena monitoring.

Озон, как одна из важнейших составляющих атмосферы, активно изучается на протяжении многих десятилетий. Понимание физики процессов, происходящих в атмосфере, в том числе связанных с проблемой так называемых озоновых дыр над Арктикой и Антарктикой, существенно улучшилось за последнее десятилетие благодаря как совершенствованию теоретических моделей, так и разработке и внедрению новых методов измерений [1]. В Кыргызстане исследования озонового слоя оптическими методами проводятся с 80-х годов прошлого века [1]. В течение 1980-2006гг получены средне- месячные значения общего содержания озона в атмосфере центральной

части Евразии (Ысык-Көл), линейный тренд и плавные изменения озона от года к году, полученные скользящим 12-месячным усреднением. За период этих наблюдений средне-годовое содержание озона в атмосфере упало примерно на 14% с 349 е.Д. в 1980 г. до 300 е.Д. в 2006 г. Отрицательный линейный тренд составил – 0,3 % в год, эта величина превышает скорость истощения озона для равнинных и океанических регионов для средней широты северного полушария. Исследования озона и других малых газовых составляющих в Кыргызстане оптическими методами проводятся и на лидарной станции [2], где также есть данные о состоянии озонового слоя за последние 10-ти летия. Однако проблема контроля за состоянием озонового слоя Земли продолжает оставаться актуальной. В связи с этим особое значение придается разработкам и совершенствованию методов измерения содержания в земной стратосфере озона и ряда других, связанных с ним малых составляющих. Одним из таких методов является радиоастрономический, широко применяющийся для исследования характеристик распространения радиоволн в атмосфере Земли, знание которых необходимо как для решения задач самой радиоастрономии, так и проблем связи, радиолокации и дистанционного зондирования окружающей среды, проблем влияния стратосферного озона и других малых составляющих атмосферы на распространение миллиметровых волн. Озон, молекула которого имеет линии поглощения в миллиметровом диапазоне, может оказывать заметное влияние на распространение волн этого диапазона, поэтому задача исследования спектра поглощения и излучения земной атмосферы вблизи резонансных частот вращательных переходов озона представляет большой интерес. С другой стороны, спектр поглощения или излучения газовой составляющей несет информацию о ее содержании в атмосфере и может быть использован для исследования характеристик различных слоев атмосферы. С этой целью с

2006 года в радиофизической обсерватории «Ысык-Кёл» проводятся измерения озонового слоя радиоастрономическими методами в миллиметровом диапазоне радиоволн.

В 2007 году в обсерватории «Ысык-Кёл» были проведены первые летние периодические

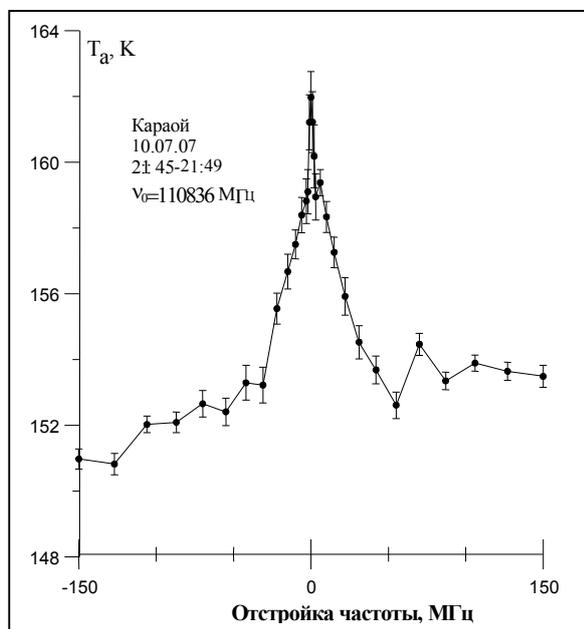


Рис.1. Спектр излучения озона

измерения озонового слоя радиоастрономическими методами в миллиметровом диапазоне длин волн на длине волны 2,7мм.

Определение содержания озона в стратосфере выполнялось методом микроволнового пассивного зондирования с поверхности Земли. Он основан на измерении спектра селективного теплового радиоизлучения молекул атмосферного озона в окрестности одной из линий вращательного спектра этого газа. Исследовался вращательный переход молекулы O_3 ($6_{0,6} \rightarrow 6_{1,5}$), резонансная частота которого близка 110836 МГц. Аппаратура позволяла проводить измерения круглосуточно, независимо от облачности. Для получения спектров атмосферного озона была использована методика атмосферной калировки интенсивности линии озона [3], которая включает в себя последовательный приём излучения атмосферы в зените, в направлении угла места 16° и от «черного тела».

На Рис.1. приведен один из спектров O_3 , полученный с помощью спектрометра РМС - 001, установленного в обсерватории.

На Рис.2. приведен интерфейс процедуры восстановления, где представлена графическая и цифровая информация о получаемом ВРО.

По спектрам излучения озона были рассчитаны зависимости оптической толщины линии от частоты, которые позволили решить уравнение переноса теплового излучения в атмосфере относительно величины содержания озона на луче зрения, т.е. определить вертикальное распределение озона (ВРО).

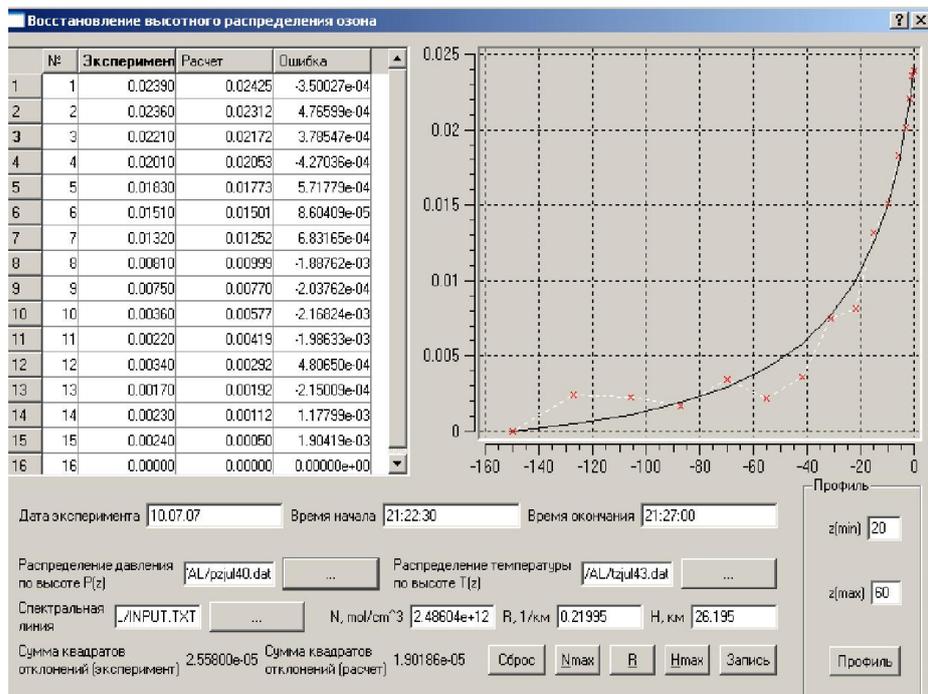


Рис.2. Восстановление высотного распределения озона.

Слева сверху таблица содержит экспериментальный спектр оптической толщины озона и рассчитанный в прямой задаче по параметрической модели озонового слоя, параметры которой подбираются. В третьей колонке приведены отклонения эксперимента и расчета в каждом канале спектроанализатора (в расчетах используется левое крыло спектральной линии озона). Справа на графике точками обозначен измеренный спектр озона, сплошная линия – результат решения прямой задачи с использованием подобранной модели озонового слоя, которая обеспечивает наименьшие среднеквадратичные отклонения от экспериментальных точек. В нижней части указаны дата и время измерений, а также параметры восстановления – концентрация озона в максимуме слоя, высотный параметр убывания и высота максимума слоя.

Связь измеряемой оптической толщины озона $\tau_{oz}(v)$ и его высотного профиля концентрации $N_{oz}(z)$ определяется известным уравнением Фредгольма 1-го рода:

$$\tau_{oz}(v) = \int N_{oz}(z) \cdot K(v, z) dz, \quad (1)$$

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

В этом случае применяют различные способы регуляризации решения. В данной работе использовался метод подбора параметров заданной модели озонового слоя путем минимизации среднеквадратичных разностей измеренных спектров и рассчитанных по восстановленным профилям озона [4]. Он основан на использовании априорной информации о характере вертикального

распределения озона, которое задается аналитически в виде «параболического» слоя:

$$N_{oz}(z) = 4N_m \frac{\exp[(z - z_m)R]}{\{1 + \exp[(z - z_m)R]\}^2}. \quad (2)$$

Изменяя параметры слоя – концентрацию в максимуме N_m , высоту максимума z_m и фактор убывания концентрации R , а также, используя методику последовательных приближений, добивались, чтобы в результате решения прямой задачи расчетный спектр $\Delta\tau_{oz}^c(v_i)$ был близок к экспериментальному $\Delta\tau_{oz}^e(v_i)$, т.е. выполнялось условие:

$$D = \sum_i [\Delta\tau_{oz}^c(v_i) - \Delta\tau_{oz}^e(v_i)]^2 = \min. \quad (3)$$

Из условия равенства нулю производных функционала D по N_m, z_m, R , можно получить параметры искомого профиля. Критерием завершения процедуры подбора параметров озонового слоя является величина среднеквадратичных ошибок измерения спектра O_3 в каналах спектрометра – $\delta[\Delta\tau_{oz}^e(v_i)]$. На практике условие (3) сводится к следующему:

$$\sum_i [\Delta\tau_{oz}^c(v_i) - \Delta\tau_{oz}^e(v_i)]^2 \leq \sum_i \{\delta[\Delta\tau_{oz}^e(v_i)]\}^2. \quad (4)$$

По итогам процедуры подгонки результаты всех измерений записаны в файл и хранятся в базе данных обсерватории в виде таблиц и графиков. Используемый пакет программ позволяет получать вертикальные профили озона с разным временем накопления – от 1 часа до 1 суток. Среднемесячные значения суточных измерений стратосферного озона в столбе 20-60 км., сечением в 1см^2 приведены в таблице.

t(час)	03	04	05	09	10	11	15	16	17	21	22	0
Содерж. озона, ед.Д	140,5	140	128	123	120	119	118	120	125	132	136	140,5
N_{max} (км)	26,322	25,828	25,393	24,524	23,796	23,809	26,354	24,922	25,729	26,321	26,066	26,350
$N_{max} \cdot 10^{12}$ (мол/см ³)	2,632	2,743	2,486	2,610	2,547	2,723	2,245	2,364	2,020	2,447	2,264	2,610

По результатам летних измерений установлено, что максимальная концентрация озона находилась в пределах высот 23-26 км., днем на высоте 23,796 км она составляла $2,547 \cdot 10^{12}$ молекул/см³, ночью на высоте 25,828-2,743*10¹². Между 0:00 – 4:00 общее содержание озона в столбе 20-60 км составляло 140 – 140,5 ед.Д., днем содержание озона заметно уменьшалось и составляло 118-120 ед.Д.

Следует отметить, выше указанные данные – это результат первых летних периодических наблюдений, основной целью которых было

восстановление высотных профилей распределения стратосферного озона за данный период. Дальнейшие измерения позволят определить толщину озонового слоя в регионе и выявить области её уменьшения (потенциальные озонные дыры). Сопоставления измерений в различные промежутки времени позволят определить краткосрочную динамику неоднородности профиля: деформацию обедненной области озонового слоя и тенденцию её эволюции. Осреднение полученных результатов за длительный период времени позволит выявить

сезонные вариации озонового слоя над Средней Азией и годовой тренд. Для этого необходимо продолжать систематические, круглогодичные измерения озонового слоя на миллиметровых радиоволнах, которые послужат значительным дополнением к ранее проводимым наземным оптическим исследованиям в других станциях.

Литература

1. *Токтомышев С.Ж., Семенов В.К., Сияков В.П., Колбаев К.Б.*, «Озоновый слой и геоморфологические процессы горного региона Кыргызского Тянь-Шаня». //Известия НАН КР, 2007/4 С. 49-67
2. *Арсеньян Т.И., Короленко П.В., Лелевкин В.М., Чен Б.Б.*, «Лидарный мониторинг стратосферного

аэрозольного слоя над центрально-азиатским регионом». //2-я Всероссийская научная конференция «Физические проблемы экологии (физическая экология)», январь 1999, Москва, С. 124.

3. *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
4. *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.