

УДК 621.372:551.508.8

НАЗЕМНЫЕ РАДИОФИЗИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ ВЫСОТНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОЗОНА НАД РЕГИОНОМ СРЕДНЕЙ АЗИИ

А. Т. Орозобаков, Б. Б. Саякбаева, Э. У. Орозобаков

Институт физико-технических проблем и материаловедения им академика
Ж.Ж.Жеенбаева Национальной Академии Наук Кыргызской Республики
720071, Бишкек, проспект Чуй, 265-а

Статья поступила в редакцию 29 ноября 2018 г.

Аннотация. В статье приводятся основные предпосылки создания радиофизической микроволновой обсерватории в Средней Азии благодаря проектам МНТЦ. Первые шаги опирались в основном на работы Российских ученых, к тому времени уже обладающих достаточным опытом исследований озоносферы радиометрическими методами. Ими была создана серия многоканальных спектрорадиометров миллиметрового диапазона длин волн, разработаны методы измерений теплового радиоизлучения атмосферы в линиях O_3 , апробированы методики определения полного содержания озона и его высотного профиля по данным радионаблюдений. Это позволило вести наблюдения атмосферного озона в ранее неисследованном на миллиметровых волнах географическом районе на высоте 1600м над уровнем моря, 43° северной широты, 77° восточной долготы. Определение содержания озона в стратосфере выполнялось методом пассивного микроволнового зондирования, основанного на измерении спектра селективного теплового радиоизлучения молекул атмосферного озона в окрестности одной из линий вращательного спектра этого газа. В статье представлены только некоторые результаты наблюдений линий озона на длине волны 2,7 мм, позволяющих определять содержание, концентрацию озона в стратосфере Земли. Видно, что на высоте от 20-ти до 30-ти километров озона содержится почти вдвое больше, чем в выше находящихся 30-ти. По данным мировой сети наземных станций, над районом измерений обсерватории общее содержание озона составляет около 290-310 еД, т.е. по данным обсерватории в пределах высот 20-60 км озона

содержится 70-75% от всего общего содержания. Известно, что в низких широтах основной максимум озонного слоя находится выше, чем в верхних. В нашем случае наиболее насыщенным озоном является интервал высот 22-35 км, что подтверждается многолетними наблюдениями. В зависимости от поставленных задач, по более длительным наблюдениям можно установить суточный ход, сезонные вариации концентрации озона.

Ключевые слова: концентрация озона, миллиметровые волны, обтюратор.

Abstract. In this article, the basic factors for creation of the radiophysical microwave observatory in Central Asia thanks to the ISTC projects are set forth. First steps mainly grounded on works of Russian scientists who by that time had already obtained enough experience in researches of the ozonosphere using radiometric methods. They created a series of multi-channel spectroradiometers of a millimeter waveband and developed measuring methods of atmosphere thermal radiation in lines O_3 . The methods of determination of completed ozone content and its vertical profile on data of radio observations were tested. This allowed to conduct observations of atmospheric ozone in earlier not studied on a millimeter waveband geographical region at a height of 1600 m above sea level, 43° north latitude, 77° east longitude. The content of ozone in stratosphere was determined by the method of passive microwave probing on the basis of measurement of spectrum of atmospheric ozone molecules selective thermal radiation near one of the lines of rotational spectrum of this gas. Only some observation results of the ozone lines at the wavelengths of 2.7 mm are presented in the article which allow determination of the ozone content and concentration in the Earth's stratosphere. The results show that at altitude 20 to 30 kilometers the ozone content is twice as much as it is at altitudes higher than 30 km. According to observation data of the world net of ground stations over region of the observatory measurements, a general ozone content is around 290-310 Dobson Units, that is, within altitudes 20-60 km the ozone content makes 70-75% from its total content. It is known that in lower widths a general maximum of the ozone layer is higher than in upper ones. In our case the most saturated with ozone layer is at heights interval 22 to 35 km, that is proved by many-year observations. Depending

on assigned tasks, it is possible to establish by longer observations a diurnal and seasonal variations of ozone.

Key words: concentration of ozone, millimeter waves, shutter.

Введение

В настоящее время одной из главных задач исследования природы изменчивости атмосферного озона является изучение пространственно-временных вариаций его содержания в средней атмосфере и тесно связанных с ними процессов (планетарные волны, внутренние гравитационные волны, заряженные частицы и т.п.). За содержанием озона в атмосфере следит мировая сеть «WMO WOUDC – World Meteorological Organization World Ozone and Ultraviolet Radiation Data Centre, Toronto, Canada», в составе которой около полутора десятка наземных озонметрических станций, распределенных неравномерно вокруг Земли. Такая сеть практически не может регистрировать аномалии в глобальном распределении озона, даже если их линейный размер достигает тысячи километров. Более детальные данные об озоне, охватывающие почти весь земной шар, получают с помощью оптической аппаратуры, установленной на искусственных спутниках Земли. Эти данные получают ежедневно, они доступны на сайте NASA.

Изначально и по сей день в исследованиях озонового слоя применяются методы, использующие оптические спектрофотометры: Добсона, или его российский вариант М-124. На основе результатов измерений интенсивности прямого или рассеянного солнечного оптического излучения в полосе поглощения озона они позволяют получить данные об интегральном содержании озона во всей толще атмосферы. Однако данный метод не дает возможности проводить измерения в темное время суток и в условиях полярной ночи, а также не дает информации о высотном профиле озона. Спектрофотометрами Добсона (или М-124) оснащены все пункты мировой озонметрической сети. Комплекс, основанный на аналогичном принципе и установленный на борту спутника TOMS (Total Ozone's Mapping Spectrometer –

спектрометр для картирования общего содержания озона) и SBUVS (The Solar Backscatter Ultraviolet Spectrometer – спектрометр обратно рассеянного УФ солнечного излучения), позволяет в течение суток получать карты ОСО по всему земному шару в любое время года. Но, несмотря на неоспоримые преимущества, они дают сглаженную в пространстве картину. Поэтому исследование пространственных неоднородностей озонового слоя с разрешением, на порядок превышающем спутниковое, можно с успехом проводить с помощью наземной сети станций микроволнового зондирования.

Радиофизические исследования озонового слоя

Микроволновая Иссък-Кульская обсерватория по наблюдению линий вращательного спектра атмосферного озона в ранее неисследованном на миллиметровых волнах географическом районе была создана благодаря проектам МНТЦ в 2005 г. совместно с Нижегородской группой заявителей проекта [1,2]. К тому времени они уже обладали достаточным опытом в исследованиях озоносферы радиометрическими методами (работы велись с начала 70-х гг.) [3,4]. Исследования велись, в основном, силами сотрудников Института прикладной физики РАН и, начиная с 1994 г., - Нижегородского госуниверситета им. Н.И.Лобачевского (ННГУ). Была создана серия многоканальных спектрорадиометров миллиметрового диапазона длин волн, разработаны методы измерений теплового радиоизлучения атмосферы в линиях O_3 , апробированы методики определения полного содержания озона и его высотного профиля по данным радионаблюдений. Выполнены обширные циклы наблюдений линий O_3 в регионе Нижнего Новгорода, а также в ряде высокоширотных районов (о. Хейсса, Апатиты и Антарктида). Теоретически и экспериментально (в сопоставлениях с данными контактных измерений) была доказана возможность измерений вертикального профиля плотности озона радиометрическими методами с точностью $\pm 10-20\%$ в интервале высот 20-60 км. Радиофизические методы исследования предусматривают регистрацию с поверхности Земли собственного теплового излучения озона на частотах одной из вращательных спектральных линий его молекул. Наиболее удобны для

измерений линии с центральными частотами 110,836 и 142,175 ГГц (длины волн 2,7 и 2,1). Эти оптически тонкие линии расположены в окнах прозрачности атмосферы между сильными линиями поглощения кислорода и водяного пара. На высотах 75 км их ширина определяется столкновениями молекул и пропорциональна давлению воздуха. Выше 75 км преобладает доплеровское уширение. Результирующая линия имеет узкий центральный пик, формирующийся на больших высотах, и широкие крылья, соответствующие вкладу озона с малых высот. Форма линии отражает вклад излучения озона из различных слоев атмосферы и содержит информацию о ВРО. Она очень чувствительна к вариациям содержания озона на луче зрения. В миллиметровом диапазоне уширение линий определяется столкновениями, т.е. пропорционально давлению. Поэтому результирующий контур спектральной линии содержит информацию о вертикальном распределении молекул озона. Основными атмосферными газами, поглощающими радиоволны миллиметрового диапазона, являются водяной пар и молекулярный кислород. В [3-5] показано, что в «окнах» прозрачности, т.е. в интервалах частот между сильными линиями поглощения O_2 и H_2O , вращательные спектры почти всего семейства малых газовых составляющих (озон, окислы азота, окись углерода) имеют линии, интенсивность которых вполне достаточно для их обнаружения. Было отмечено, что при благоприятных условиях (зима, высокогорье) полное вертикальное ослабление вблизи резонансных частот озона сравнимо с фоновым ослаблением, обусловленным водяным паром и кислородом, а в коротковолновой части миллиметрового диапазона превышает его. Эти выводы полностью подтвердились в экспериментах по обнаружению спектральных линий атмосферного озона в «окнах» прозрачности, имеющих центральные длины волн около 1.3 мм, 2.1 мм и 3.0 мм [6-8]. Результаты этих работ стали основой для постановки задачи исследования газового состава средней атмосферы с помощью средств микроволнового зондирования. Интерес к этому был вызван обнаружением больших вариаций интенсивности и формы спектральной линии, обусловленной озоном [9].

Для того чтобы подтвердить (или опровергнуть) значительную изменчивость озона верхней атмосферы, необходимо было выполнить длинные ряды непрерывных наблюдений в различных широтах (включая полярные), по возможности, независимо от погодных условий. Последнее обстоятельство потребовало оптимизировать рабочие частоты спектрометров и методику измерений. Выполненные сопоставления микроволновых наблюдений с глобальной спутниковой системой слежения за озоновым слоем - прибор TOMS на разных космических аппаратах [10], подтверждают, что наземные измерения содержания O_3 в стратосфере являются хорошим дополнением спутниковых в поверочных (валидационных) экспериментах. Результаты сравнения продемонстрировали надёжность регистрации вариаций в озоновом слое методами микроволновой радиометрии. Ниже приводятся вкратце основы и некоторые результаты такого зондирования в Средней Азии.

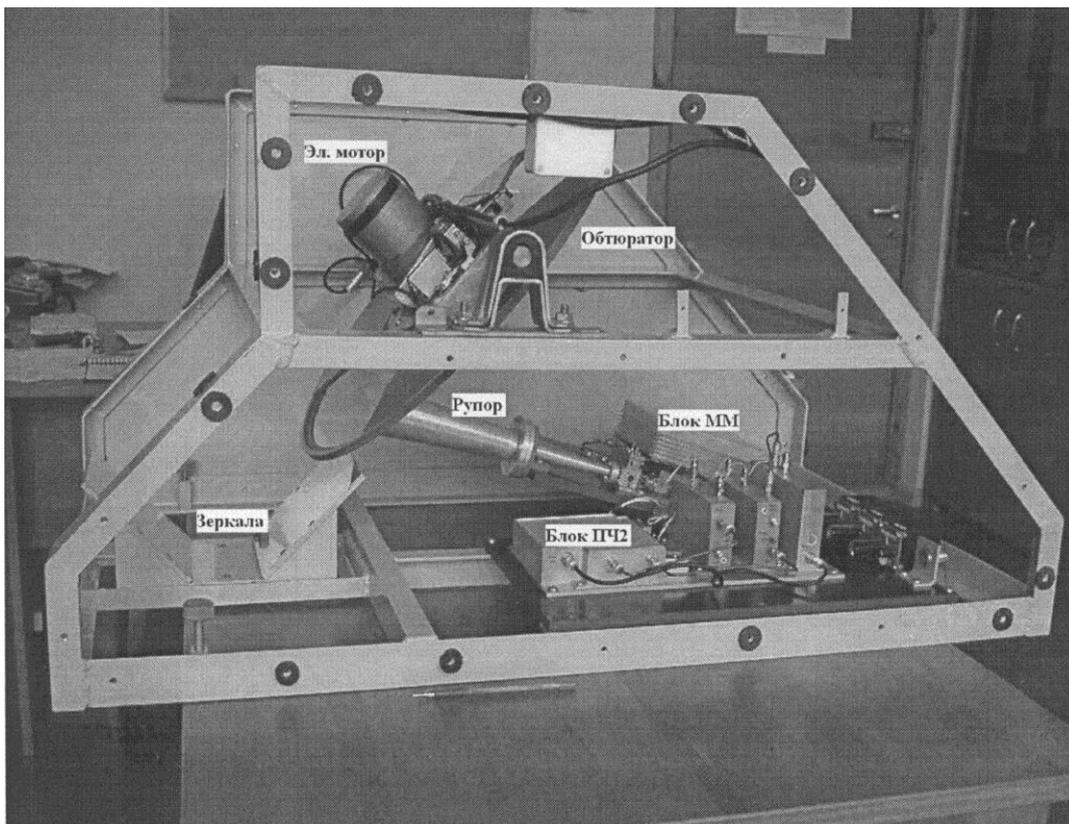


Рис. 1. Внешний вид радиоспектрометра при снятом кожухе.

Принцип наблюдений заключается в измерении собственного излучения озона и сравнения его с эталонными (зенит или «черное тело»). Для этого предусмотрен обтюратор Рис.1., благодаря которому [11] за один его оборот в

компенсационном режиме при наблюдениях “Черное тело – Угол – Азот” (абсолютная калибровка) в различные интервалы времени на вход приемника поступают сигналы:

- от черного тела, расположенного на обтюраторе и имеющего температуру окружающей среды;
- излучение атмосферы под углом наблюдения;
- излучение от черного тела, находящегося при температуре кипящего азота.

Собранные после обтюратора антенной излучения сравниваются, анализируются, в итоге которых выстраиваются спектральные линии собственно озона Рис.2.

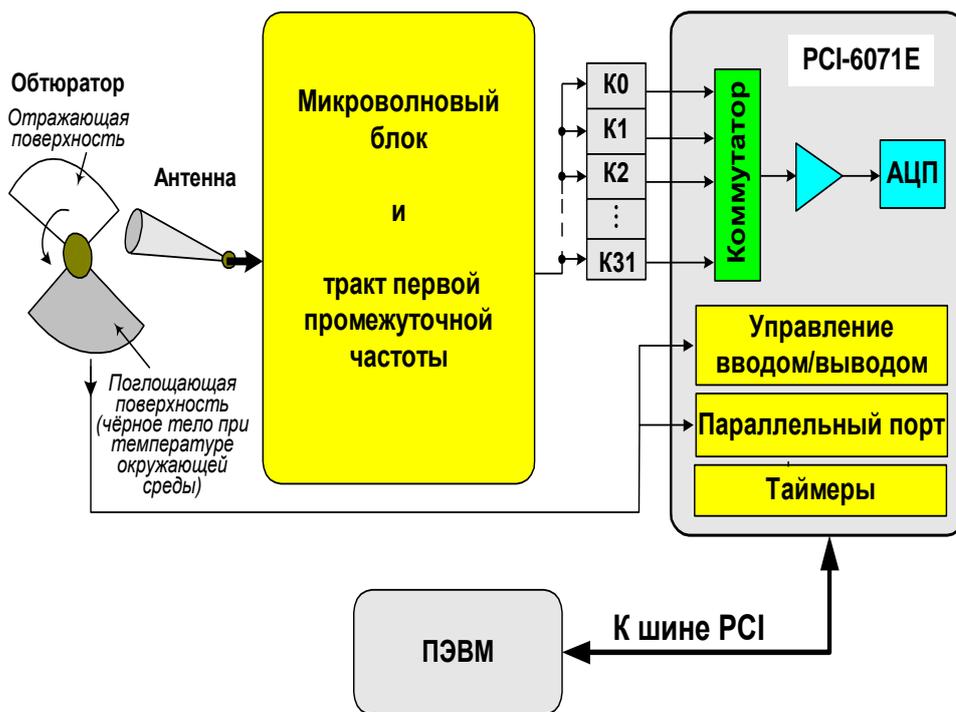


Рис. 2. Упрощенная структурная схема радиоспектрометра.

Далее по программам определения высотного распределения озона восстанавливаются профили озона методом подбора параметров заданной модели озонового слоя путем минимизации среднеквадратичных разностей измеренных спектров и рассчитанных по восстановленным профилям озона [12]. Он основан на использовании априорной информации о характере

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

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

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

т.е. выполнялось условие:

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

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 спектро радиометра – $\delta[\Delta\tau_{oz}^e(\nu_i)]$. На практике условие (2) сводится к следующему:

$$\sum_i [\Delta\tau_{oz}^c(\nu_i) - \Delta\tau_{oz}^e(\nu_i)]^2 \leq \sum_i \{\delta[\Delta\tau_{oz}^e(\nu_i)]\}^2 \quad (3)$$

На рисунках 3 и 4 представлены панель восстановления высотного распределения озона после проведения процедур приближения расчетного спектра (кривая линия) к экспериментальному (точки) и окончательный результат измерений за 06.08.16.

Обычно проводятся подобные сеансы в течение трех часов с небольшими перерывами, в зависимости от задач ночью, днем, посезонно. В таблице приведены результаты некоторых измерений конца лета и начала осени. В летних измерениях замечены, как и раньше, ночные превышения количества озона (1 е.Д. $\approx 2,7 \cdot 10^{16}$ молекул / см²). Максимальная концентрация озона как всегда в пределах высот 25-26км.

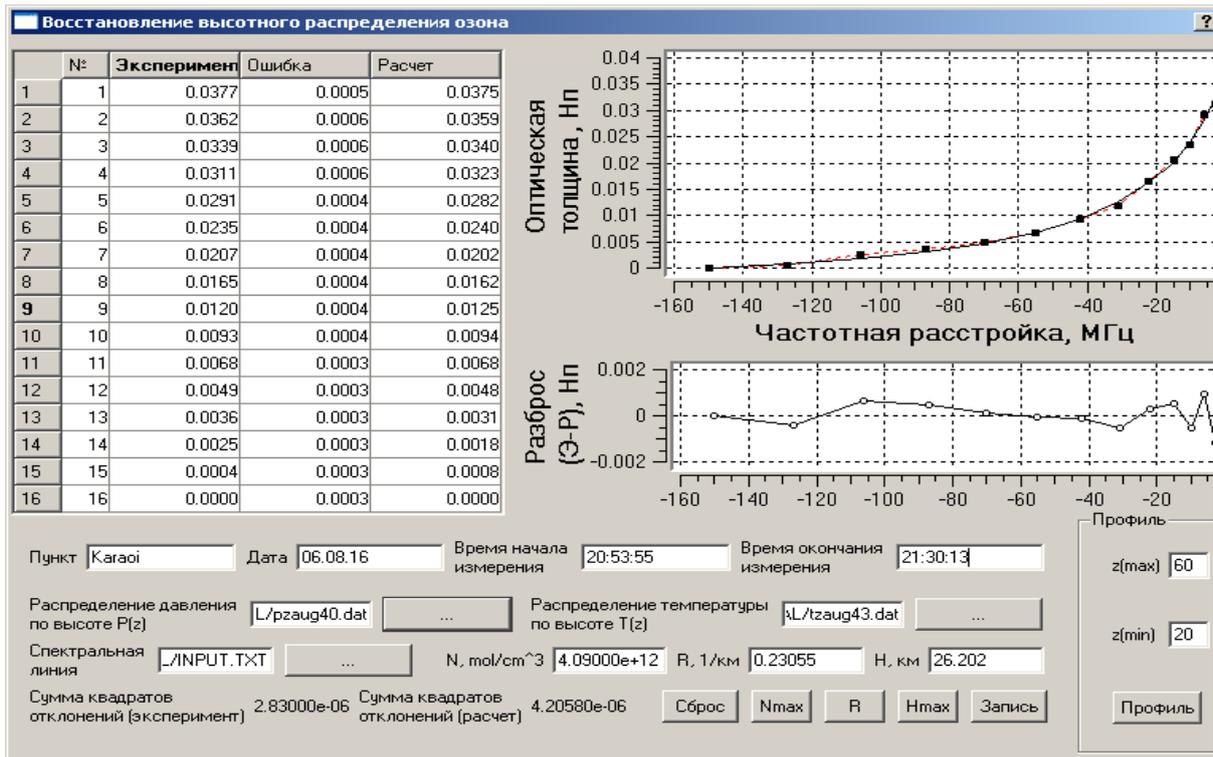


Рис. 3. Панель восстановления высотного распределения озона.

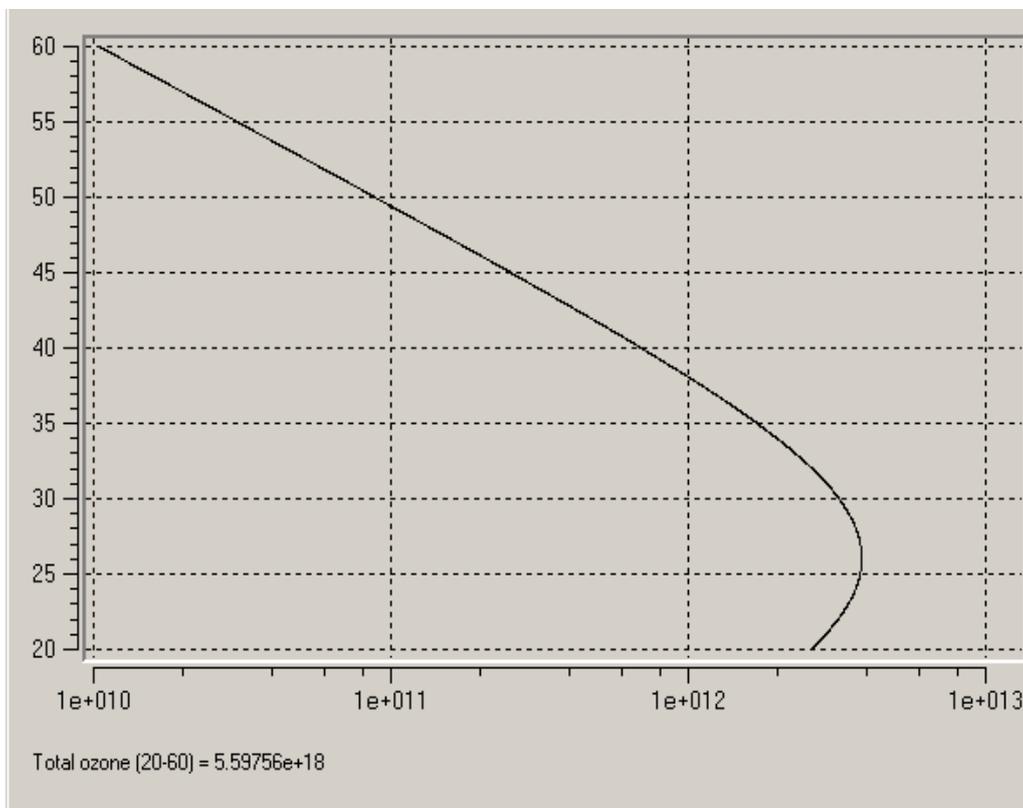


Рис. 4. Профиль высотного распределения озона за 06.08.16 с 19:54:59 до 20:53:53.

Таблица. Содержание озона по данным микроволновых наземных измерений

Дата	06.08.16				11.08.16		
Местн. время	19:54-20:53	20:53-21:30	22:33-23:37	23:00-23:50	09:35-10:37	10:37-11:28	21:51-22:52
X(20-30)км 10^{18} мол/см ²	3,752	3,930	3,729	4,145	3,474	3,723	3,936
X(30-60)км 10^{18} мол/см ²	1,846	1,793	1,892	1,938	1,641	1,673	1,727
X(20-60)км е.Д.	207	211	208	225	189	200	210

Дата	14.09.18	15.09.18	16.09.18	17.09.18	18.09.18	19.09.18	
Местн. время	17:38-19:19	20:35-21:57	18:40-19:58	11:50-12:50	21:30-22:30	12:30-13:30	12:50-13:50
X(20-30)км 10^{18} мол/см ²	3,671	3,685	3,684	3,517	3,516	3,553	3,523
X(30-60)км 10^{18} мол/см ²	1,635	1,882	1,583	1,485	1,549	1,521	1,515
X(20-60)км е.Д.	197	207	196	185	188	189	187



Рис. 5. Результаты микроволновых измерений в сравнении с данными мировой сети наземных станций (сентябрь 2017г.).

С целью верификации результаты микроволновых измерений Иссик-Кульской обсерватории сравниваются с данными других станций. Так из рисунка 5 видно, что почти 75% от всего общего содержания озона находится в интервале высот 20-60км., также прослеживается хорошая корреляция (сетевая шкала).

Выводы

Радиофизические наблюдения на миллиметровых волнах за озоновым слоем над регионом Средней Азии в Иссик-Кульской обсерватории позволяют определять высотное распределение, концентрацию озона в пределах высот 20-60км. По результатам измерений установлен суточный ход содержания озона, зоны максимальной концентрации. По данным мировой сети наземных станций над районом измерений обсерватории общее содержание озона составляет около 290-310 е.Д., т.е. по данным обсерватории в пределах высот 20-60км. озона содержится 70-75% от всего общего содержания кроме суточного хода, определения максимума, суммарного озона, в зависимости от поставленных задач, в обсерватории отслеживаются также сезонный ход, межгодовые вариации стратосферного озона.

Литература

1. Орозобаков Т.О., Кисляков А.Г., Орехов Ю.И., Орозобаков А.Т. и др. Обсерватория для мониторинга озонового слоя Земли в миллиметровом диапазоне длин волн в Среднеазиатском регионе. // Вестник Нижегородского университета им. Н.И.Лобачевского, 2007, №6, Нижний Новгород, с. 44-52.
2. Вдовин В.Ф., Зинченко И.И., Кисляков А.Г., Орозобаков А.Т., Орозобаков Т.О. и др. Обсерватория для мониторинга озонового слоя земли в мм диапазоне длин волн в Среднеазиатском регионе. Первые наблюдения // Международный симпозиум «Физика атмосферы: Наука и образование». 11-13 сент. 2007г. Санкт-Петербург, с. 118-122.

3. Кисляков А.Г., Куликов Ю.Ю., Рыскин В.Г. Поглощение микрорадиоволн примесными газами атмосферы. В сб. «Спектральные исследования космического и атмосферного излучения». Под ред. А.Г Кислякова. ИПФ РАН, Горький, 1979. 171 с.
4. Куликов Ю.Ю., Ризов Е.Ф., Федосеев Л., Швецов А., Кузнецов И., Кукина Э. Измерение оптической толщи атмосферы Земли в линиях CO и O₃ ($\lambda = 1.3-1.4$ мм) // Изв. АН СССР, сер. «Физика атмосферы и океана», 1975, т .11, № 10, с. 1071-1075.
5. Куликов Ю.Ю., Рыскин В.Г. Зависимость содержания озона от температуры в стратосфере Арктики. *Геомагнетизм и аэрономия*, 1999, № 3, с. 253-257
6. Буров А.Б., Воронов В.Н., Красильников А.А. , Куликов Ю.Ю., Рыскин В.Г. Дистанционное определение общего содержания озона в стратосфере Земли по измерениям на миллиметровых волнах. // Известия АН СССР. Серия «Физика атмосферы и океана», 1981, т. 17, № 7, с.775-777.
7. Борисов О.Н., Дёмкин В.М., Куликов Ю.Ю., Рыскин В.Г., Шанин В.Н., Юрков В.М. Вариации стратосферного озона в полярных широтах // Известия АН СССР. Серия «Физика атмосферы и океана», 1989, т. 25, № 10, с. 1033-1039.
8. Андриянов А.Ф., Дрягин С.Ю., Кузнецов И.В. , Кукин Л.М., Никифоров П.Л. Предварительные результаты наблюдений стратосферного озона на мм волнах в Антарктиде // Препринт № 295. Н. Новгород: ИПФ РАН, 1991.
9. Куликов Ю.Ю., Кузнецов И.В., Пегеев В.П., Рыскин В.Г., Стен А., Суворов Е.В., Витт Г. Микроволновые наблюдения стратосферного озона в Кируне. // *Геомагнетизм и аэрономия*, 1994, т. 34, № 5, с. 117-111.
- 10.Ионов Д.В., Тимофеев Ю.М., Шаламянский А.М. Сравнения спутниковых (аппаратура TOMS) и наземных измерений общего содержания озона // *Исследование Земли из космоса*, 2002, № 3, с.10-19.
- 11.Орозобаков А.Т., Саякбаева Б.Б., Ашымканов К.Ш., Рыскул кызы Г. Микроволновые наблюдения стратосферного озона над Среднеазиатским регионом с помощью радиоспектрометра (PMS-001) миллиметрового

диапазона // Журнал Радиоэлектроники, 2015, № 11, Режим доступа <http://jre.cplire.ru/jre/nov15/6/text.pdf>.

12. 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 «Альтернативная энергетика и проблемы энергобезопасности», Бишкек, 22-24 апреля 2008 г.

Для цитирования:

А. Т. Орозобаков, Б. Б. Саякбаева, Э. У. Орозобаков. Наземные радиофизические наблюдения высотного распределения озона над регионом Средней Азии. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2018. № 12. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/dec18/9/text.pdf>
DOI 10.30898/1684-1719.2018.12.9