

**ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ,
МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ**

УДК 504.064.38

**НОВЫЙ МАЛОГАБАРИТНЫЙ МИКРОВОЛНОВЫЙ
СПЕКТРОРАДИОМЕТР – ОЗОНОМЕТР**

© 2011 г. А. А. Красильников, Ю. Ю. Куликов, В. Г. Рыскин, В. М. Демкин, Л. М. Кукин,
В. Л. Михайловский*, В. Н. Шанин, М. З. Шейнер*, В. А. Шумилов*, А. М. Щитов*

Институт прикладной физики РАН

Россия, 603950, Нижний Новгород, ГСП-120, ул. Ульянова, 46

** Нижегородский научно-исследовательский приборостроительный институт “Кварц”*

Россия, 603009, Нижний Новгород, просп. Гагарина, 176

E-mail: alakras@appl.sci-nnov.ru

Поступила в редакцию 16.07.2010 г.

Описан мобильный микроволновый спектрометрический прибор нового поколения для исследований озонового слоя Земли. Прибор обеспечивает прием теплового радиоизлучения стратосферного озона на частоте его вращательного перехода 110836 МГц в полосе частот 240 МГц. Спектральное разрешение в центре линии $O_3 - 1$ МГц. Эффективная шумовая температура неохлаждаемого приемника при однополосном режиме ~2000 К. Озонометр оснащен автоматизированной системой управления процессом измерения, калибровки и предварительной обработки данных. Прибор позволяет получать распределения озона по высоте в интервале от 20 до 60 км в течение 15–20 мин.

ВВЕДЕНИЕ

Среди газовых составляющих земной атмосферы следует выделить водяной пар и озон, которые, несмотря на незначительное их содержание, играют ключевую роль в формировании климата планеты. Известно также, что озон эффективно защищает биосферу от опасного ультрафиолетового излучения Солнца. Учитывая, что содержание этого газа в атмосфере существенно изменяется [1], становится важным непрерывный мониторинг озонового слоя Земли.

Изучение состояния озонового слоя ведется как контактными, так и дистанционными способами. В первом случае предполагается использование носителя (ракеты или баллона), на котором располагается датчик количества газа. Эти измерения носят дискретный характер, так как частота запуска таких устройств невелика, поэтому при контактных измерениях исключается возможность непрерывного слежения за состоянием озонового слоя.

Среди дистанционных методов наиболее предпочтительным является пассивное микроволновое зондирование на миллиметровых длинах волн, которое благодаря слабой зависимости от погодных условий может выполняться практически непрерывно [2]. В основе этого метода лежит измерение спектра излучения газа, молекулы которого имеют линии вращательных переходов в миллиметровом диапазоне длин волн. О содержании газа можно судить по интенсивности и ширине спектра. Благодаря соударительному механизму уширения вращательной линии, т.е. зависимости

ее ширины от атмосферного давления, решением обратной задачи по измеренному спектру находится вертикальное распределение газа в атмосфере.

Для дистанционного микроволнового зондирования атмосферы традиционно используются многоканальные гетеродинные спектрометрические миллиметрового диапазона длин волн со смесителем на диоде с барьером Шоттки [2–4]. В их приемниках в качестве гетеродина применяются лампы обратной волны (л.о.в.), требующие высоковольтных источников питания и довольно громоздкой системы стабилизации частоты гетеродина с использованием промышленных генераторов стандартных сигналов, измерителей частоты и других устройств, необходимых для функционирования всей системы. Входной сигнальный тракт радиометров выполнен на сверхразмерных волноводах, система обработки сигналов изготовлена на базе модулей КАМАК. Таким образом, данные приборы можно отнести к стационарным установкам, поскольку они имеют большие вес и габариты, хотя по таким важным характеристикам, как, например, чувствительность и спектральное разрешение, они вполне отвечают требованиям, необходимым для регистрации и анализа линий вращательного спектра атмосферного озона.

Дальнейшим развитием микроволновой диагностики озонового слоя стала разработка мобильного микроволнового озонометра (м.м.о.), созданного в ИПФ РАН с учетом опыта предыду-

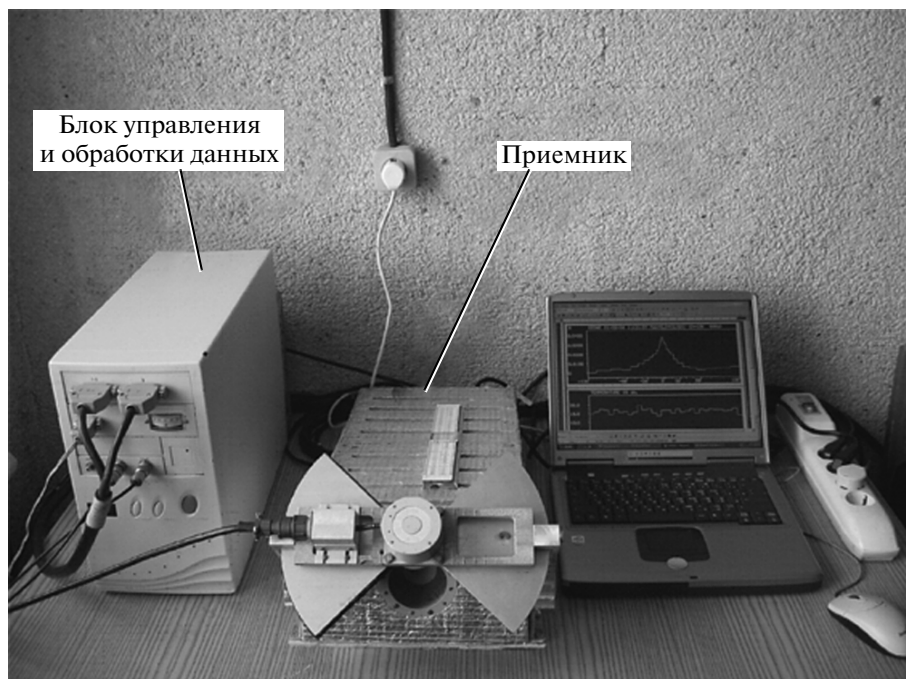


Рис. 1. Общий вид микроволнового озонметра.

щих разработок и использованием новейшей полупроводниковой с.в.ч.-техники.

Цель данной работы – создание надежного мобильного малогабаритного спектро радиометра, который можно перемещать и устанавливать в различных регионах для проведения мониторинга стратосферного озона.

ОБЩАЯ СХЕМА МИКРОВОЛНОВОГО СПЕКТРОРАДИОМЕТРА – ОЗОНОМЕТРА. НОВЫЕ ПОДХОДЫ В РАЗРАБОТКЕ МАЛОГАБАРИТНОГО ПРИБОРА

Основным типом приемника в диапазоне коротких миллиметровых волн, за редким исключением, является гетеродинный со смесителем на входе. В качестве гетеродина используются либо электровакуумные л.о.в., либо твердотельные генераторы Ганна. В последнее время благодаря значительному прогрессу в области полупроводниковой электроники появились устройства (усилители, преобразователи частоты, генераторы и пр.), которые надежно работают в с.в.ч.-диапазоне от единиц до десятков гигагерц. Использование таких элементов при проектировании нового поколения малогабаритных приемников миллиметрового излучения для атмосферных исследований позволило не только существенно снизить габариты и массу приборов, уменьшить энергопотребление, но и повысить надежность их работы.

В Институте прикладной физики РАН разработан новый микроволновый спектро радиометр

для исследования озонового слоя. Этот прибор представляет собой многоканальный спектро радиометр миллиметрового диапазона, рабочая частота которого соответствует резонансной частоте вращательного перехода молекулы озона 110836.04 МГц. Полоса анализируемых частот ~240 МГц. Спектральное разрешение при анализе в центральной части линии озона 1 МГц. Шумовая температура неохлаждаемого приемника при однополосном режиме приема составляет 2000 К. Озонметр работает в так называемом режиме полного приема (total power) с периодической калибровкой входного сигнала.

На рис. 1 показан общий вид мобильного спектро радиометра – озонметра. Прибор состоит из блока приемника и блока управления и обработки данных. Структурная схема представлена на рис. 2. Перед рупором P размещен квазиоптический переключатель – симметричная плоская крыльчатка на оси шагового двигателя D , одна половина которой зеркальная, а на другой наклеено поглощающее микроволны вещество, являющееся в данном случае теплой калибровочной нагрузкой для приемника. Управляемый программно этот переключатель обеспечивает подачу на вход приемника последовательно сигналов от атмосферы и двух калибровочных нагрузок: теплой (при температуре окружающего воздуха) и холодной (при температуре жидкого азота). Холодной нагрузкой в данном случае является аналогичный указанному выше поглотитель, помещенный в сосуд с жидким азотом.

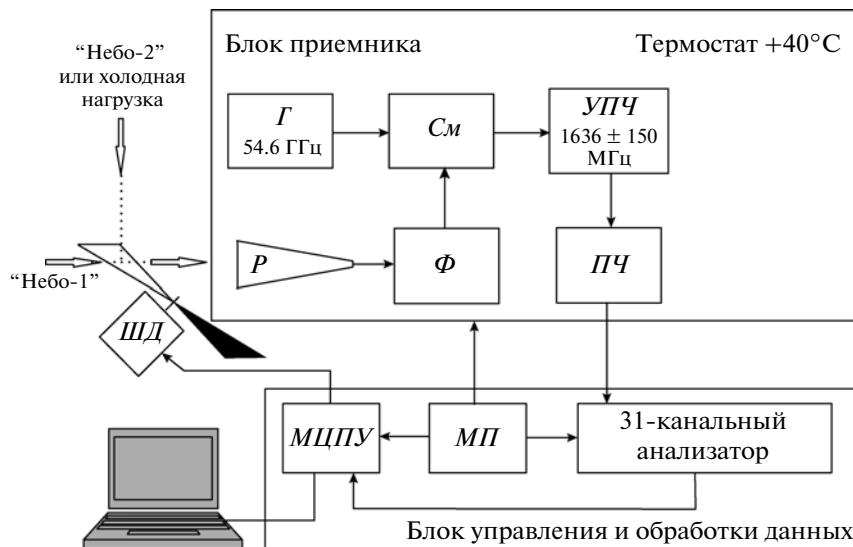


Рис. 2. Структурная схема микроволнового озонметра. *Г* – гетеродин; *См* – смеситель; *УПЧ* – усилитель промежуточной частоты; *Р* – рупор; *Ф* – фильтр; *ПЧ* – преобразователь частот; *ШД* – шаговый двигатель; *МЦПУ* – модуль цифрового преобразования и управления; *МП* – модуль питания; “Небо-1”, “Небо-2” – сигналы теплового радиоизлучения атмосферы в направлении зенитных углов 1 и 2 соответственно.

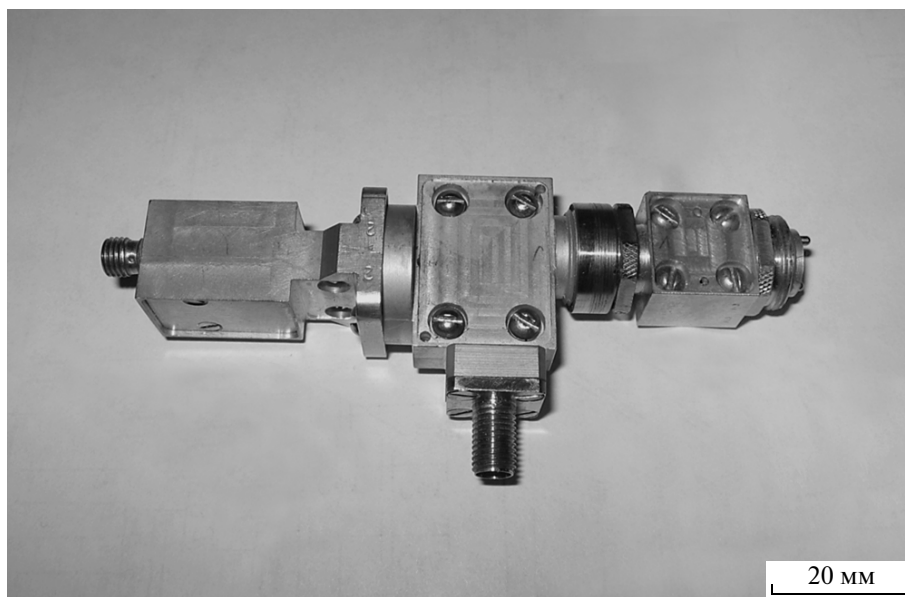


Рис. 3. Модуль входного волноводного тракта приемника миллиметрового диапазона.

Диаграмма направленности на входе формируется скалярным рупором *Р* и составляет около 4°. Для однополосного режима работы приемника используется волноводный заградительный фильтр *Ф*, подавляющий сигнал на нижней боковой частоте. Коэффициент подавления сигнала зеркальной частоты ≥ 20 дБ. Потери сигнала в рабочей полосе частот ≤ 0.5 дБ. Смеситель выполнен на основе диода с барьером Шоттки и работает на второй гармонике гетеродина *Г*.

На рис. 3 показан общий вид модуля входного волноводного тракта. Благодаря его малым размерам удалось свести к минимуму искажения спектра принимаемого сигнала, возникающие из-за интерференции собственных входных шумов приемника.

Гетеродин приемника (рис. 4) состоит из задающего транзисторного генератора с варакторной подстройкой на частоту $f_0 = 18.2$ ГГц; опорного кварцевого генератора 100 МГц; стробоскопического преобразователя, работающего в режиме

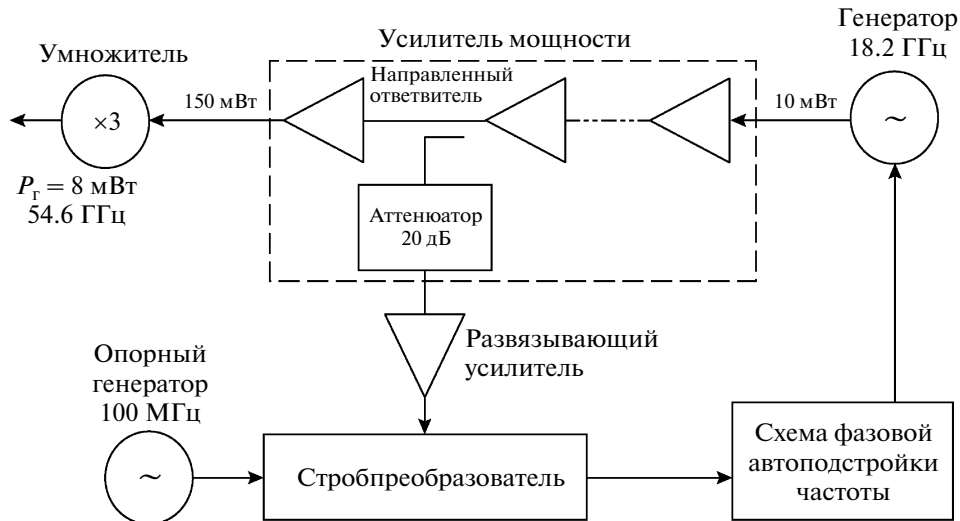


Рис. 4. Блок-схема гетеродина приемника миллиметрового диапазона.

фазового детектора с нулевой промежуточной частотой, и схемы фазовой автоподстройки частоты гетеродина под гармонику опорного генератора. Сигнал генератора (с уровнем фазовых шумов 80 дБ/Гц при отстройке от несущей на 20 Гц), обеспечивающего выходную мощность 10 мВт, усиливается многокаскадным транзисторным усилителем до уровня ~ 150 мВт, а затем подается на утроитель частоты.

Для исключения паразитного прохождения гармоник опорного генератора 100 МГц на выход гетеродина сигнал генератора, поступающий на вход стробпреобразователя, ответвляется направленным ответвителем перед последним каскадом усиления, ослабляется аттенюатором до уровня 0.1–0.2 мВт и проходит через развязывающий усилитель. Утроитель частоты обеспечивает выходную мощность гетеродина ~8 мВт на частоте 54.6 ГГц при входной мощности 120–150 мВт.

Различные модификации приемника предусматривают использование задающих транзисторных генераторов-синтезаторов, настроенных на частоты $f_0 = 2.275$ ГГц и 6.825 ГГц. Работа элементов схемы формирования сигнала гетеродина отличается от описанной выше (рис. 4) лишь тем, что в первом случае используется 8-кратный умножитель частоты до 18.2 ГГц с полосовым фильтром побочных гармоник и усилитель мощности сигнала частоты 18.2 ГГц, а затем – утроитель частоты до 54.6 ГГц. Во втором случае использовано 8-кратное умножение сигнала 6.825 ГГц до частоты 54.6 ГГц.

После первого преобразования сигнал с выхода смесителя на центральной частоте 1.6 ГГц поступает на усилитель промежуточной частоты УПЧ с полосой ~300 МГц, в качестве первого каскада которого используется маломощный уси-

литель с шумовой температурой 50 К и коэффициентом усиления ~25 дБ. С выхода УПЧ сигнал подается на преобразователь частот ПЧ для второго преобразования, после чего по кабелю поступает на 31-канальный анализатор спектра, расположенный в блоке анализа и обработки данных. Все узлы, расположенные в блоке приемника, термостатированы при температуре около +40°C.

Схема второго преобразователя частот ПЧ приведена на рис. 5. Сигнал первой промежуточной частоты поступает на двухканальный усилитель, где разделяется на два диапазона: низкочастотный (н.ч.) – 1511–1640 МГц и высокочастотный (в.ч.) – 1640–1761 МГц.

Сигнал н.ч.-диапазона преобразуется с помощью гетеродина частоты 1815 МГц в диапазон 175–304 МГц, затем из него выделяется участок частот 176–182 МГц и с помощью третьего преобразования (гетеродин частоты 100 МГц) конвертируется в диапазон 76–82 МГц. Этот последний диапазон является центральным для нашего анализатора спектра и соответствует центральной части регистрируемой линии озона. Оставшаяся часть н.ч.-диапазона 183–304 МГц будет соответствовать левому крылу спектральной линии озона. Соответственно сигнал в.ч.-диапазона преобразуется с помощью гетеродина частоты 1457 МГц в аналогичный диапазон 183–304 МГц, который будет соответствовать правому крылу линии озона.

Отметим, что все используемые гетеродины в приемнике стабилизированы по частоте с помощью системы ФАП по сигналу опорного кварцевого генератора.

После указанных преобразований сигналы центрального, н.ч.- и в.ч.-диапазонов поступают в блок управления и обработки данных на 31-канальный анализатор. Анализатор включает в себя 7 узкопо-

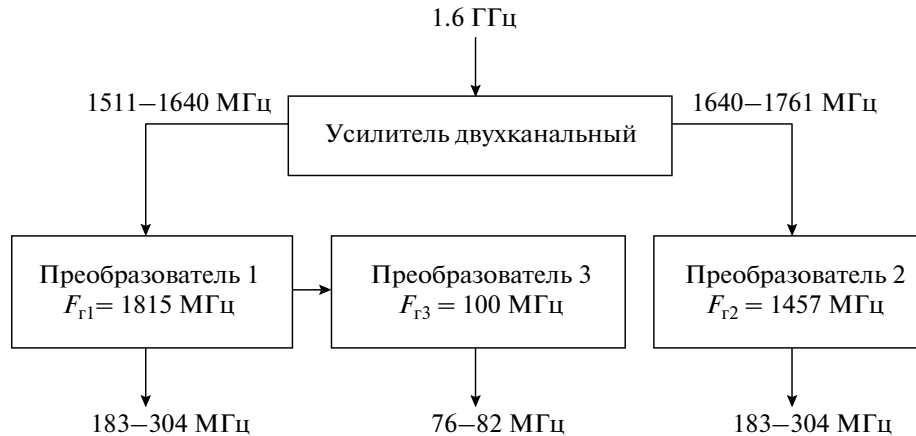


Рис. 5. Схема устройства второго преобразователя частот спектро радиометра.

лосных (ширина полосы 1 МГц) фильтров в центральном диапазоне и по 12 фильтров в н.ч.- и в.ч.-диапазонах. Основная особенность фильтров в н.ч.- и в.ч.-диапазонах анализатора состоит в том, что ширина полосы в них увеличена от 3 до 10 МГц, возрастает также и расстояние между фильтрами по мере их удаления от центра анализатора спектра. Это позволило обеспечить полосу анализа озонметра 240 МГц.

Выходные сигналы в анализаторе после квадратичного детектирования и усиления в усилителях постоянного тока поступают в модуль цифрового преобразования и управления *МЦПУ* с последующей компьютерной обработкой по заданной программе. Программа обработки включает в себя вычисление средних значений сигналов и их среднеквадратичных ошибок за заданное время наблюдения. Конечным продуктом измерений является спектр озона в графической и цифровой форме, который записывается в файл данных.

На основе полученных данных восстанавливается распределение озона по высоте. Процедура восстановления вертикального распределения озона осуществляется с помощью однопоточного *Windows*-приложения, разработанного с использованием библиотеки классов *Qt* (*Trolltech*) [5].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ МИКРОВОЛНОВОГО ОЗОНОМЕТРА

Лабораторные испытания прибора состояли в измерении его эффективной шумовой температуры $T_{ш}$ с помощью двух эталонных нагрузок, находящихся в кювете при комнатной температуре T_h (теплая) и при температуре жидкого азота T_c (холодная). В качестве нагрузки использован материал на основе вспененного кварца, излучательные свойства которого близки к абсолютно черному телу. Коэффициент отражения его <1%.

Эффективная шумовая температура вычисляется по формуле

$$T_{ш} = \frac{T_h - \beta T_c}{\beta - 1}, \quad (1)$$

где $\beta = \gamma_h/\gamma_c$ – отношение отсчетов на детекторе каждого канала, пропорциональных интенсивностям излучения теплой и холодной нагрузок соответственно.

Результаты калибровки показали, что $T_{ш}$ приемника при однополосном режиме (ослабление зеркального канала ≥ 20 дБ) составляет 2030 ± 40 К. Эта величина соответствует чувствительности в спектральном канале шириной 1 МГц, равной примерно 0.1 К за время наблюдения 20 мин.

Далее были проведены натурные измерения спектра излучения атмосферы в окрестности линии озона методом абсолютной калибровки интенсивности излучения. Методика наблюдений стратосферного озона основана на периодическом подключении к рупору приемника участка неба под некоторым зенитным углом θ и калибровочных нагрузок, находящихся при температурах окружающей среды и жидкого азота. Тогда эффективная температура излучения атмосферы на входе приемника на частоте ν спектро радиометра равна

$$T_e(\nu, \theta) = T_h - (T_h - T_c) \frac{\gamma_h(\nu) - \gamma_e(\nu)}{\gamma_h(\nu) - \gamma_c(\nu)}, \quad (2)$$

где T_h и T_c – температуры нагрузок, находящихся при температуре окружающего воздуха и при температуре кипящего азота (77 К) соответственно; $\gamma_h(\nu)$, $\gamma_c(\nu)$ и $\gamma_e(\nu)$ – отсчеты на детекторе каждого канала спектро радиометра, пропорциональные температурам излучения теплой и холодной нагрузок, а также температуре излучения атмосферы соответственно.

Пример полученного спектра, соответствующего излучению стратосферного озона, приведен

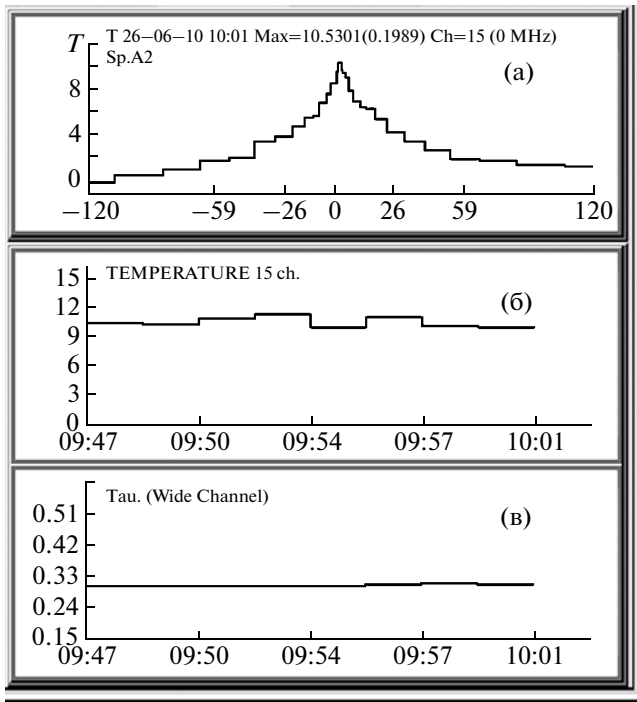


Рис. 6. а – спектр излучения O_3 – антенная температура излучения стратосферного озона в зависимости от частоты отстройки от резонансной частоты вращательного перехода 110836 МГц; б – вариации интенсивности линии O_3 – временная зависимость температуры излучения озона в центре линии; в – изменение в процессе наблюдений оптической толщины тропосферы в неперях.

на рис. 6. Особенностью спектра является резонансный характер, проявляющийся в виде одиночной линии излучения O_3 , которая сформирована в атмосфере в результате соударений с другими молекулами. Благодаря соударительному механизму уширения этой линии, когда ширина линии пропорциональна атмосферному давлению, можно решением обратной задачи восстановить высотное распределение озона по измеренному спектру. Эта задача была решена, и на рис. 7 приведен пример такого восстановления.

Описанный прибор неоднократно испытывался в лабораторных и экспедиционных условиях в различных климатических зонах. С его помощью проведены многочисленные наблюдения озонового слоя в полевых условиях на Байконуре во время пуска ракеты “Протон” (рис. 8), в Апатитах за Полярным кругом, на борту ледокола в Северном Ледовитом океане, в поезде по маршруту Москва–Владивосток и обратно (трансконтинентальный проект “Тройка”), во время солнечных затмений в Кисловодске [6] и на Алтае, в эксперименте по воздействию мощного коротковолнового излучения на озоновый слой на установке «Сура» [7] и в длительных измерениях в Институте физики Санкт-Петербургского университета [8]. Можно

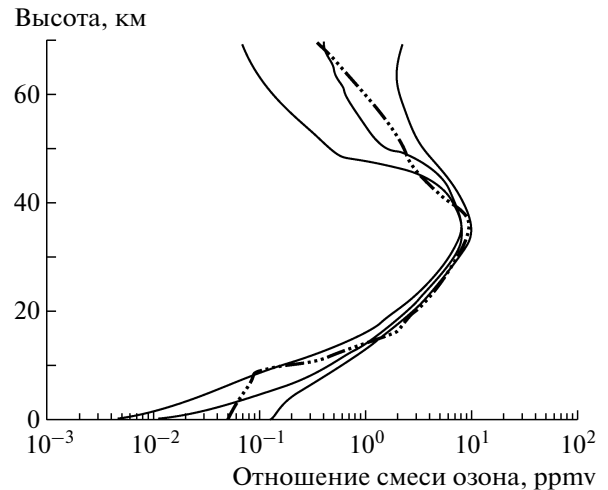


Рис. 7. Результат восстановления высотного профиля озона по данным микроволнового зондирования 25 июня 2010 г. Сплошными линиями обозначен наиболее вероятный профиль и его 65%-ный доверительный интервал, штриховой линией – спутниковые данные MLS AURA.

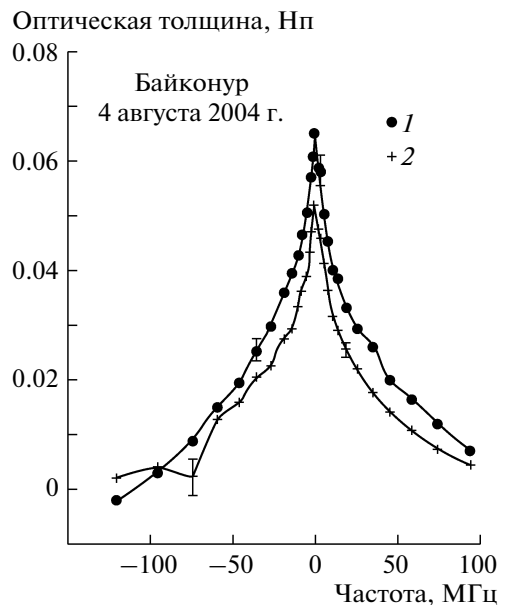


Рис. 8. Изменение формы и интенсивности спектра озона во время пуска ракеты “Протон”. 1 – до запуска ракеты, 2 – через 30 мин после прохождения ракеты через стратосферу.

отметить высокую надежность и эффективность прибора как средства исследования стратосферного озона. На наш взгляд, данный прибор мог бы стать основой сети наземного микроволнового мониторинга озонового слоя Земли.

Авторы благодарят Российский фонд фундаментальных исследований за поддержку данной

работы (гранты №№ 08-05-99047-р-офи, 09-05-97015-р_поволжье_a).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. World Meteorological Organization (WMO). Scientific Assessment of Stratospheric Ozone depletion. Geneva, 2002.
2. Красильников А.А., Куликов Ю.Ю., Рыскин В.Г., Федосеев Л.И. // Изв. вузов. Радиофизика. 1998. Т. 41. № 11. С. 1405.
3. Воронов В.Н., Демкин В.М., Куликов Ю.Ю. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 1986. Т. 29. № 12. С. 1403.
4. Красильников А.А. // Изв. вузов. Радиофизика. 1995. Т. 38. № 6. С. 608.
5. Гинзбург А.Н., Дёмкин В.М. // Сб. "Проблемы управления и моделирования в сложных системах". Труды X Международной конференции. Самара: Самарский научный центр РАН, 2008. С. 518.
6. Куликов Ю.Ю., Красильников А.А., Дёмкин В.М., Рыскин В.Г. // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2008. Т. 44. № 4. С. 522.
7. Kulikov Yu. Yu., Frolov V. L. // Proc. 2010 International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves. Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW'2010). (Kharkov, Ukraine, June 21–26, 2010) Kharkov: IRE of NAS of Ukraine, 2010. Session F. INV F-1.
8. Косцов В.С., Поберовский А.В., Тимофеев Ю.М. и др. // Сб. тезисов Междунар. симпозиума стран СНГ "Атмосферная радиация и динамика" (МСАРД-2009). (22–26 июня 2009. Санкт-Петербург). СПб.: СПбГУ, 2009. С. 50.