

УДК 551.510.534:621.37/39.029.65

## АНАЛИЗАТОР СПЕКТРА МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ВОЛН И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ОЗОНА ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЫ

*В. Н. Воронов, В. М. Демкин, Ю. Ю. Куликов,  
В. Г. Рыскин, В. М. Юрков*

Приведены описание многоканального супергетеродинного приемника диапазона частот 110—150 ГГц со спектральным разрешением  $0,0001 \text{ см}^{-1}$  и методика наблюдений. Изложены результаты измерений атмосферной линии  $\text{O}_3$ , вращательный переход  $Q_R(10_0)$  с резонансной частотой  $\nu_{ij} = 142175,10 \text{ МГц}$ . По данным наблюдений радиолинии озона определено его количество в стратосфере Земли. Средняя величина суммарного  $\text{O}_3$  выше 30 км для района Алма-Аты (1—3 апреля 1983 г.) составила  $1,1 \cdot 10^{18} \text{ мол/см}^2$ .

Исследование малых составляющих атмосферы Земли ( $\text{O}_3$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{H}_2\text{O}_2$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{ClO}$  и др.) ведутся в основном с помощью двух групп методов: дистанционных и контактных. Дистанционные методы для получения информации (общее содержание на луче зрения) о малых примесях используют ультрафиолетовую, видимую и инфракрасную области спектра. Контактные методы оперируют с непосредственным забором воздуха и его последующим анализом. Эти методы в большинстве случаев применяются для определения вертикальных профилей атмосферных компонентов. Для подъема приборов, служащих для наблюдений газовых примесей непосредственно в верхней атмосфере, используются ракеты, самолеты и другие летательные аппараты. Среди дистанционных методов самым распространенным в настоящее время является метод абсорбционной спектроскопии, использующий оптический и инфракрасный диапазоны длин волн. Ошибки наблюдений с помощью оптических методов связаны, главным образом, с учетом молекулярного и аэрозольного рассеяния. Основная причина, ограничивающая точность измерений, — аэрозольная поправка. Она связана с переменностью в пространстве и времени характеристик (количество, состав) атмосферного аэрозоля. В инфракрасной области длин волн для наблюдения малых составляющих широко используются фурье-спектрометры. Однако трудности количественной интерпретации получаемых колебательно-вращательных спектров и недостаточная разрешающая способность по частоте приборов этого диапазона ограничивают эффективность данного метода.

В конце шестидесятых годов в практике исследования малых примесей атмосферы появились два перспективных метода — лазерная локация и пассивное зондирование на миллиметровых волнах [1—4]. Оба метода могут взаимно дополнять друг друга. Наземные лазерные методы имеют сравнительно небольшую дальность действия, порядка 20 — 30 км [5], тогда как наблюдения на миллиметровых волнах дают возможность располагать информацией о составе верхней атмосферы. Например, в работах [6—8], получены данные о количествах  $\text{O}_3$  и  $\text{CO}$  в интервале высот 60 — 80 км.

Метод микроволнового зондирования атмосферы основан на наблюдениях резонансных линий ряда молекул, имеющих чисто вращательные спектры в диапазоне миллиметровых волн. Несмотря на то, что существует довольно много способов измерения газовых примесей, использование радиодиапазона по ряду причин является привлекатель-

ным. Во-первых, важным достоинством является высокое частотное разрешение, реализуемое в спектральных приемниках миллиметрового диапазона волн. Как известно, контур атмосферной радиолнии до высоты  $\sim 70$  км определяется соударениями, а выше — тепловым движением молекул (эффект Доплера) [14]. Полуширина линий атмосферных газов на высотах более 70 км составляет  $\sim 250$  КГц. Таким образом, высокое частотное разрешение позволяет детально исследовать контур отдельных линий и определять вертикальное распределение газов вплоть до высот порядка 80 — 100 км. Во-вторых, атмосферные линии газов в миллиметровом диапазоне волн слабо перекрываются по сравнению с инфракрасным и оптическим диапазонами. Кроме того, наблюдения малых составляющих с помощью радиоволн в отличие от оптических и инфракрасных менее зависят от погодных условий, присутствия аэрозолей и могут выполняться круглосуточно.

**1. Аппаратура.** Для измерения содержания атмосферного озона и других малых составляющих атмосферы радиофизическим методом был разработан и изготовлен супергетеродинный анализатор спектра (САС), работающий в диапазоне 2,0 — 2,7 мм. Блок-схема его приведена на рис. 1. Она содержит в себе три основные части:

- 1) модуляционный многоканальный супергетеродинный приемник;
- 2) систему стабилизации частоты гетеродина (лампа обратной волны ОВ-22);
- 3) систему сбора и накопления данных наблюдений с их последующей обработкой.

В качестве антенны на входе САС использована двухзеркальная система Кассегрена. Она состоит из параболического основного зеркала диаметром 1000 мм (фокусное расстояние 360 мм) и гиперболического дополнительного зеркала диаметром 120 мм. Антенна и САС смонтированы на вертикально-азимутальном поворотном устройстве, позволяющем устанавливать координаты с точностью  $\pm 5'$ .

Традиционным становится применение сверхразмерных волноводов и интерферометров типа Маха—Цендера [9,10] во входных цепях приемника, работающего на коротких миллиметровых волнах, что позволяет реализовать следующие возможности. Во-первых, удастся обеспечить малые потери во входных цепях до смесителя для принимаемого излучения и гетеродина, во-вторых, удастся в значительной степени ослабить влияние паразитной модуляции на ток смесителя [9] и подавить шумы гетеродина [11].

Рассмотрим принципы работы САС (см. рис. 1). С выхода антенны измеряемый сигнал подается на один из входов модулятора. Конструкция модулятора описана в работе [12]. Диск модулятора вращается с помощью двигателя постоянного тока ДПМ-20. Модулятор поочередно подключает к приемнику антенну и эталонную нагрузку. Эталонная нагрузка представляет собой либо черное тело при температуре окружающего воздуха, либо высокотемпературный ( $\sim 3000$  К) источник излучения. Частота переключений равна 120 Гц. Потери в модуляторе не более 0,5 дБ.

Выход модулятора соединен с интерферометром  $I_1$ , который в данной схеме играет роль преселектора, т. е. служит для «вырезания» зеркального канала. Для настройки  $I_1$  используется дополнительное устройство (не показанное на рис. 1), состоящее из ЛОВ (ОВ-22) и волноводного тракта с волномером. Частота ЛОВ перестраивается в пределах основного и зеркального каналов САС с периодом 20 мс. Изменяя разность хода  $I_1$ , можно добиться максимального подавления сигнала в одном из каналов, обеспечив однополосный режим приема. Реализованное ослабление канала в полосе 500 МГц составляет 15 — 20 дБ. Устранение зеркального канала в САС необходимо для однозначной интерпретации результатов спектральных измерений. Для грубого контроля частоты каналов используется волномер, установленный в тракте дополнительной ЛОВ.

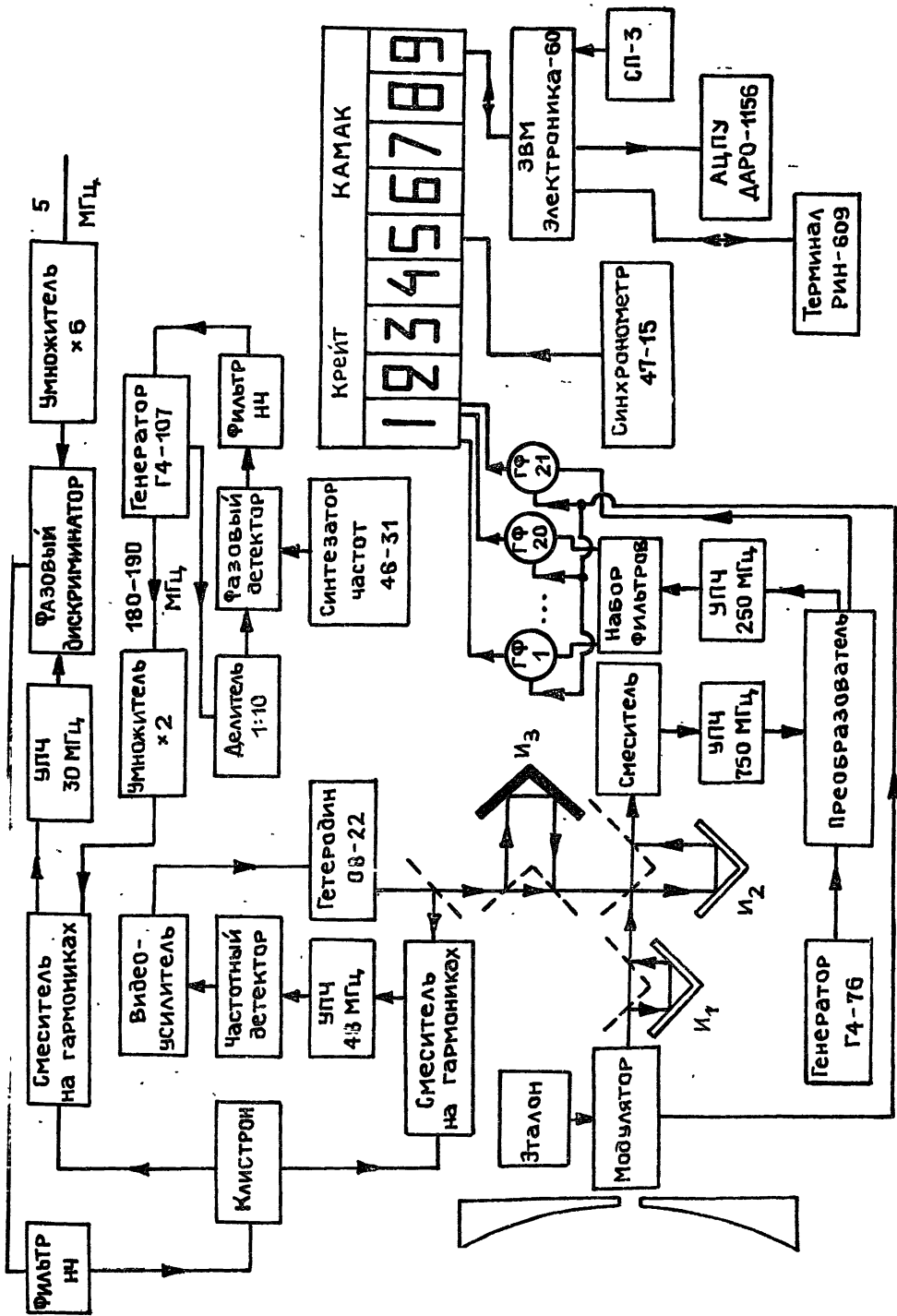


Рис. 1. Блок-схема супергетеродинного анализатора спектра диапазона волн 2,0—2,7 мм.

С выхода  $I_1$  сигнал поступает на вход интерферометра  $I_2$ , на другой вход  $I_2$  подается сигнал гетеродина ОВ-22. В данной схеме  $I_2$  играет роль направленного ответвителя, а интерферометр  $I_3$  предназначен для подавления шумов ЛОВ. Измеренная величина ослабления шумов гетеродина на частотах сигнала в данном приемнике составила 5—10 дБ. Высокочастотный тракт САС выполнен на сверхразмерных волноводах сечением  $23 \times 10$  мм<sup>2</sup>. Подробное описание конструкции интерферометров  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  и физических принципов их работы приводится в [9]. В качестве полупрозрачных делительных пластин (на рис. 1 отмечены штриховыми линиями) в  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  используется слюда марки СТА толщиной 0,1 мм. Общие потери в тракте от антенны до смесителя не превышают 1—1,5 дБ.

В смесителе САС применен арсенидно-галлиевый диод с барьером Шоттки. В качестве усилителя первой промежуточной частоты использованы два каскада транзисторных усилителей дециметрового диапазона с полосой пропускания 500 МГц, коэффициентом усиления около 60 дБ и коэффициентом шума 4,5 дБ. Разделение на спектральные каналы выполнено после второго преобразования к промежуточной частоте (250 МГц). Роль второго гетеродина играет серийный генератор Г4-76. Набор каналов представляет собой двадцать двухзвенных фильтров с полосой пропускания около 3 МГц каждый и общей полосой анализа 100 МГц. Спектральные каналы (для данной полосы анализа) отстоят друг от друга на разную величину расстройки. Первые одиннадцать имеют одинаковую частотную расстройку 3 МГц, а затем величина расстройки увеличивается на 1 МГц от канала к каналу. Флуктуационный порог чувствительности САС в полосе 3 МГц не превышал 10 К при постоянной времени выходных цепей 1с (однополосный режим).

В качестве гетеродина САС используется лампа обратной волны (ЛОВ) ОВ-22 с собственной относительной нестабильностью по частоте около  $10^{-3}$ . ОВ-22 обладает широким диапазоном перестройки и хорошей монохроматичностью выходного сигнала [13]. Для реализации спектрального разрешения порядка 3 МГц необходимо обеспечить величину нестабильности частоты ЛОВ не хуже  $10^{-6}$ . Для этой цели служит трехкольцевая система стабилизации частоты ОВ-22 (см. рис. 1). Частота ЛОВ стабилизирована системой частотной автоподстройки (третье кольцо). В качестве опорного сигнала используются гармоники клистрона, работающего в диапазоне 8,5—10 ГГц. Смеситель на гармониках третьего кольца выполнен на диоде с барьером Шоттки. Сигнал с этого смесителя подается на УПЧ с центральной частотой 48 МГц (полоса 4 МГц) и далее на частотный детектор. Сигнал ошибки с выхода частотного детектора через видеоусилитель воздействует на гетеродин ОВ-22 таким образом, чтобы разность частоты его и частоты гармоники клистрона составила 48 МГц. Частота клистрона в свою очередь стабилизирована системой фазовой автоподстройки (ФАП, второе кольцо) по опорному генератору Г4-107. Для ФАП клистрона использован преобразователь частоты Ч5-13 после некоторой модернизации. Сигнал промежуточной частоты 30 МГц, образованный при смешении сигналов клистрона и соответствующей гармоники Г4-107, сравнивается по фазе с сигналом кварцевого генератора такой же частоты: Сигнал ошибки с фазового дискриминатора через низкочастотный (НЧ) фильтр управляет частотой клистрона. Частота генератора Г4-107 также стабилизирована системой ФАП по кварцевому опорному сигналу (первое кольцо). Опорным генератором является синтезатор частот Ч6-31, который перестраивается в пределах 50 Гц—49,99 МГц с шагом 0,01 Гц. Необходимость использования первого кольца в схеме стабилизации частоты ЛОВ вызвана довольно высоким уровнем шумов в спектре выходного сигнала Ч6-31. Данная система стабилизации частоты ЛОВ обеспечивает устойчивую работу САС в течение нескольких часов с нестабильностью частоты не хуже  $10^{-6}$  и позволяет перестраивать частоту сигнала ОВ-22 во всем ее диапазоне генерации. Отметим,

что принципы построения системы стабилизации частоты ЛОВ (ОВ-14) для целей радиоастрономии изложены в работе [24].

Для автоматизации исследований радиолиний примесных газов в диапазоне миллиметровых волн при помощи САС разработан измерительно-вычислительный комплекс на базе ЭВМ «Электроника-60» и аппаратуры КАМАК. В состав системы входят (рис. 1):

- а) микро-ЭВМ с набором интерфейсных плат и ОЗУ (24 кслов);
- б) крейт КАМАК с набором модулей;
- в) кварцевый синхронизатор Ч7-15;
- г) алфавитно-цифровой дисплей РИН-609;
- д) алфавитно-цифровое печатающее устройство ДАР0-1156;
- е) фотосчитывающее устройство СП-3.

В состав крейта КАМАК входят следующие модули (обозначены на рис. 1 арабскими цифрами): 1 — релейный мультиплексор, 2 — буферный усилитель, 3 — АЦП десятиразрядный, 4 — модуль запуска АЦП, 5 — входной регистр, 6 — регистр запросов, 7 — генератор тактовых импульсов, 8 — индикатор магистрали, 9 — контроллер крейта.

Модули КАМАК управляются от контроллера крейта 9, подключенного к ЭВМ через интерфейсную плату. Все внешние устройства также управляются через свои интерфейсные платы.

Низкочастотные сигналы с гетеродинных фильтров каждого спектрального канала поступают на вход мультиплексора 1, который через буферный усилитель 2 последовательно подключает каждый канал к АЦП 3. Так как в работе использовался модуль АЦП 712, преобразующий аналоговые сигналы только одной полярности (положительной), а исследуемый сигнал был разнополярным, возникла необходимость в смещении уровня нуля. Для этой цели и использовался буферный усилитель, служащий, кроме того, и для подавления синфазной помехи. Преобразованные в цифровой код сигналы через контроллер крейта 9 поступают в ЭВМ, где подвергаются соответствующей математической обработке. Одним из параметров, используемых в вычислениях, является местное время, которое в цифровом коде снимается с выхода кварцевого синхронизатора Ч7-15 и через модуль «входной регистр» 5 вводится в машину. Синхронизация работы всей системы осуществляется от тактового генератора 7 через регистр запросов 6. Индикатор магистрали 8 использовался для контроля и идентификации сигналов, посылаемых по шинам крейта КАМАК.

Комплекс обработки обеспечивает сбор и накопление данных и их предварительную обработку (усреднение, расчеты яркостной температуры и оптической толщины атмосферы), а также проведение метрологических исследований аппаратуры (измерение чувствительности САС по всем спектральным каналам). Программное обеспечение комплекса представляет собой интерактивный монитор с простым входным языком управляющих директив и пакет программ, реализующих функциональные возможности комплекса, собранные в один загрузочный модуль. Языки программирования Ассемблер и Фортран операционной системы РАФ0С.

**2. Методика измерений.** Миллиметровые волны поглощаются в атмосфере Земли газами, молекулы которых имеют постоянные или индуцированные дипольные моменты. Характеристикой поглощения радиоволн всей толщей атмосферы (политропная модель) является величина

$$\tau_0 = \int_0^{\infty} \alpha(\nu, h) dh, \quad (1)$$

где  $\alpha(\nu, h)$  — коэффициент поглощения как функция частоты и высоты над уровнем моря. Величину  $\tau_0$  называют оптической толщиной атмосферы в направлении зенита. Оптическая толщина  $\tau$  под зенитным углом  $\theta$  (поглощение на луче зрения) при  $\theta \leq 85^\circ$  определяется выражением

$$\tau = \tau_0 \sec \theta.$$

При наблюдениях спектральных линий примесных газов измеряется зависимость оптической толщины от частоты  $\tau(\nu)$  в окрестности резонанса их вращательных переходов. Расчет интенсивностей и полуширин радиолиний ряда молекул ( $O_3$ ,  $N_2O$ ,  $NO$ ,  $CO$ ) приводится в работе [14]. Специфика наблюдения радиолиний в некотором интервале частот, определяемом полосой анализа приемника, связана с тем, что их приходится измерять на фоне сильного поглощения миллиметровых волн в водяном паре и кислороде. Причем, оптическая толщина, определяемая поглощением радиоволн  $H_2O$  и  $O_2$ , подвержена сезонным и суточным изменениям. Переменность  $\tau$  связана, в основном, с вариациями полного содержания и распределения по высоте водяного пара, большая часть которого сосредоточена в интервале высот 0—3 км. Оптическая толщина, связанная с  $O_2$ , подвержена, главным образом, незначительным сезонным изменениям.

Методы определения оптической толщины атмосферы основаны на измерениях интенсивности внеатмосферного радиоизлучения, прошедшего через всю атмосферу, а также на измерениях собственного теплового излучения атмосферы.

Из уравнения переноса излучения в предположении локального термодинамического равновесия, позволяющего ввести понятие эквивалентной яркостной температуры, при наблюдении с поверхности Земли следует известное интегральное соотношение

$$T_{\pi}(\nu, \theta) = T_{\pi}(\nu) \exp \left[ - \int_0^{\infty} \alpha(\nu, h) \sec \theta dh \right] + \int_0^{\infty} T(h) \alpha(\nu, h) \sec \theta \exp \left[ - \int_0^h \alpha(\nu, h') \sec \theta dh' \right] dh, \quad (3)$$

где  $T_{\pi}(\nu)$  — яркостная температура источника,  $T(h)$  — вертикальный профиль температуры. Первый член правой части (3) характеризует излучение космического источника, ослабленного из-за поглощения в атмосфере, второй — собственное излучение атмосферы.

В наблюдениях радиолиний примесных газов мы использовали классический для астрономии метод Бугера. Внеатмосферным источником излучения служило Солнце. Для определения  $\tau(\nu)$  измерялась величина  $T_{\odot}(\nu) \exp[-\tau(\nu) \sec \theta]$  (см. выражение (3)) в зависимости от зенитного расстояния  $\sec \theta$ . Достоинством подобных измерений является то, что в них реализуется довольно высокое отношение сигнал/шум ( $T_{\odot} \sim 6000$  К, шумовая температура САС  $\sim 1000 - 3000$  К) и, кроме того, устраняется влияние боковых лепестков диаграммы направленности антенны на точность определения  $\tau(\nu)$ .

При использовании многоканального САС приращение сигнала  $\Delta \xi(\nu_i)$  в  $i$ -м канале (частота  $\nu_i$ ), пропорциональное разнице излучений Солнца и самой атмосферы, записывается следующим образом:

$$\Delta \xi(\nu_i) = K(\nu_i) \eta_i (1 - \beta_i) T_{\odot}(\nu_i) \exp[-\tau(\nu_i) \sec \theta], \quad (4)$$

где  $K(\nu_i)$  — коэффициент передачи САС в  $i$ -м канале,  $\eta_i$  — КПД антенны,  $\beta_i$  — коэффициент рассеяния антенны. Для учета изменений  $K(\nu_i)$  САС в процессе наблюдения необходимо проводить калибровку по эталонному источнику излучения. Приращение сигнала в этом случае равно разнице излучений Солнца и эталона:

$$\Delta \xi_{\text{эт}}(\nu_i) = K(\nu_i) T_{\text{эт}}(\nu_i), \quad (5)$$

где  $T_{\text{эт}}$  — эффективная шумовая температура эталона излучения.

Составив отношение левых и правых частей (4) и (5) и прологарифмировав их, получим следующее выражение:

$$\ln \frac{\Delta \xi_i(\nu_i)}{\Delta \xi_{\text{эт}}(\nu_i)} = -\tau(\nu_i) \sec \theta + \ln \frac{T_{\odot}(\nu_i)}{T_{\text{эт}}(\nu_i)} + \ln \eta_i (1 - \beta_i). \quad (6)$$

Отсюда по линейной зависимости  $\ln (\Delta \xi_i(\nu_i) / \Delta \xi_{\text{эт}}(\nu_i))$  от  $\sec \theta$  находим оптическую толщину для  $i$ -го канала САС. Типичная экспериментальная зависимость (6) приведена на рис. 2.

Для нахождения собственно радиолинии примесного газа берется разница оптических толщин  $\Delta \tau(\nu_i)$  в каждом спектральном канале относительно опорного канала. В качестве опорного канала мы использовали фильтр, расположенный на краю полосы анализа САС, а частоту первого фильтра настраивали на резонанс вращательного перехода примесного газа. При вычитании оптических толщин устраняются слабо зависящие от частоты слагаемые  $\tau(\nu_i)$ , обусловленные водяным паром и кислородом. Таким образом, метод Бугера позволяет исключить влияние на точность измерений  $\Delta \tau(\nu_i)$  частотной неравномерности полосы пропускания САС и «медленного» изменения ее во времени, а также вариаций фонового поглощения. Существенно, что при измерениях по такой методике не требуется знать абсолютные значения эффективных температур Солнца и эталона.

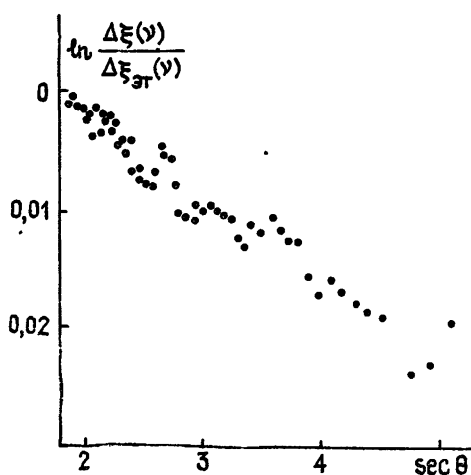


Рис. 2.

Рис. 2. Экспериментальная зависимость  $\ln(\Delta \xi(\nu) / \Delta \xi_{\text{эт}}(\nu))$  от  $\sec \theta$  для определения оптической толщины в спектральном канале (метод Бугера).

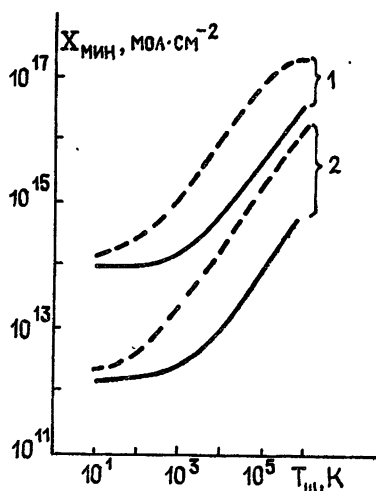


Рис. 3.

Рис. 3. Зависимость минимально обнаружимой величины общего количества  $O_3$  от шумовой температуры САС (1—время накопления 1 с, 2—1 ч; полоса анализа 1 МГц; фоновое затухание 0,05, сплошная кривая—поглощение, штриховая—излучение).

В наблюдениях радиолиний  $O_3$  мы также использовали метод измерения поглощения по радиоизлучению атмосферы. Применительно к миллиметровому диапазону этот метод подробно изложен в работе [15]. В противоположность методу Бугера измерения  $\Delta \tau(\nu_i)$  по собственному радиоизлучению атмосферы могут быть выполнены в любое время суток, что позволяет получить сведения об изменениях во времени  $\Delta \tau(\nu_i)$ . При измерениях  $\Delta \tau(\nu_i)$  по собственному излучению основной источник ошибок заключается в том, что при движении антенны САС в пространстве изменяется доля излучения, попадающая в боковые и задние лепестки диаграммы направленности. Таким образом, для изучения природной изменчивости той или иной примеси необходимо учитывать как дифракционные потери в антеннах, так и изменение во времени излучения подстилающей поверхности вокруг антенны.

Представляет интерес оценить минимально обнаружимую  $\Delta \tau$  при использовании разных методов ее определения. При наблюдении атмосферной линии в поглощении измеряется приращение яркостных температур (см. (3)), которое записывается в виде

$$\Delta T = T(\nu_0) - T(\nu_{ij}) = (T_{\odot} - T_{cp}) \exp[-\tau_{\phi} \sec \theta] \times \{1 - \exp[-\Delta\tau(\nu_{ij}) \sec \theta]\}, \quad (7)$$

где  $\nu_0$  — частота опорного канала,  $\nu_{ij}$  — резонансная частота вращательного перехода,  $\tau_{\phi}$  — фоновое поглощение,  $T_{cp}$  — средняя температура атмосферы в направлении  $\theta$  [16],  $\Delta\tau(\nu_{ij})$  — оптическая толщина в линии примесного газа. Выражение (7) получено при условии  $T_{\odot}(\nu_0) = T_{\odot}(\nu_{ij}) = T_{\odot}$ ,  $T_{cp}(\nu_0) = T_{cp}(\nu_{ij}) = T_{cp}$ ,  $\tau_{\phi}(\nu_0) = \tau_{\phi}(\nu_{ij}) = \tau_{\phi}$ . Из (7) легко получить выражение для

$$\Delta\tau(\nu_{ij}) = -\frac{1}{\sec \theta} \ln \left\{ 1 - \frac{\Delta T}{T_{\odot} - T_{cp}} \exp[\tau_{\phi} \sec \theta] \right\}. \quad (8)$$

Для оптимального угла наблюдения  $\sec \theta_{opt} = 1/\tau_{\phi}$  [17], и для разности температур  $\Delta T$ , равной флуктуационному порогу чувствительности САС,

$$\delta T \sim \frac{T_{ш} + T_{\odot} \exp[-\tau_{\phi} \sec \theta] + T_{cp} \{1 - \exp[-\tau_{\phi} \sec \theta]\}}{\sqrt{\Delta\nu t}},$$

где  $T_{ш}$  — шумовая температура приемника,  $\Delta\nu$  — полоса анализа,  $t$  — время накопления, и при  $T_{ш} \ll T_{\odot}$  реализуется предельный случай для наблюдения линии в поглощении:

$$\Delta\tau(\nu_{ij}) \sim \tau_{\phi} / \sqrt{\Delta\nu t}. \quad (9)$$

Рассмотрим, какое количество газа на луче зрения можно определить, исходя из минимально обнаружимой  $\Delta\tau(\nu)$ . Связь общего количества примеси  $X$  с измеряемой  $\Delta\tau$  можно получить из следующих соображений. Коэффициент поглощения, определяющий  $\Delta\tau$  (см. (1)), записывается в виде

$$\alpha(\nu, h) = \frac{AN(h)}{T^n(h)} F(\nu, \nu_{ij}, h), \quad (10)$$

где  $N(h)$  — вертикальный профиль концентрации газа в атмосфере,  $A$  и  $n$  — некоторые структурные константы,  $F(\nu, \nu_{ij}, h)$  — функция, описывающая контур спектральной линии. Проинтегрируем обе части равенства (10) по  $\nu$  и  $h$ , учитывая условие нормировки  $\int_0^{\infty} F(\nu, \nu_{ij}, h) d\nu = 1$ , получим

$$X(h_1, h_2) = A \cdot \bar{T}^n \int_{\nu_{ij}}^{\nu_{ij} + \Delta\nu} \Delta\tau(\nu) d\nu, \quad (11)$$

здесь  $\bar{T}$  — средняя физическая температура в интервале высот  $(h_1, h_2)$ . Как видно из (8) и (11),  $X$  зависит от фонового поглощения, шумовой температуры САС, полосы анализа и времени накопления. На рис. 3 показана зависимость минимально обнаружимой величины общего количества озона от шумовой температуры САС. Общее количество  $O_3$  рассчитано по формуле (11) для вращательного перехода с резонансной частотой  $\nu_{ij} = 142175,10$  МГц. Сплошная кривая  $X(T_{ш})$  приведена для случая измерения линии в поглощении, пунктирная кривая — для случая измерения линии в излучении. В случае, когда «фоновое» затухание при наблюдениях изменяется от 0,05 (характерная величина для высокогорных зимних условий) до 0,5 (типичное значение для летней атмосферы средних широт), минимально обнаружимая величина  $X$  ухудшается на порядок.

**3. Экспериментальные результаты и выводы.** В апреле 1983 г. в горах Заилийского Ала-Тау (Высокогорная экспедиция ГАИШ, высота 1410



над уровнем моря около 3000 метров) были проведены измерения прозрачности атмосферы на волне 2 мм с целью определения количества некоторых примесных газов. Наблюдения были выполнены как методом Бугера, так и по собственному излучению атмосферы (метод разрезов). В течение трех дней (с 01.04.83 г. по 03.04.83 г.) были получены спектры поглощения и излучения линии  $O_3$  с резонансной частотой  $\nu_{ij} = 142175,10$  МГц (см. рис. 4). Данные наблюдений были использованы для определения количества озона в стратосфере Земли согласно формуле (11). В табл. 1 приведены данные о содержании  $O_3$  в слое 23—50 км, полученные над районом Алма-Аты. Там же помещены  $X$  (30—50 км) для сравнения с ранее опубликованными данными [18] (апрель 1979 г., Горький).

Таблица 1

Дата	$X$ (30—50 км) $10^{18}$ мол/см <sup>2</sup>	$X$ (23—50 км) $10^{18}$ мол/см <sup>2</sup>	Место наблюдения
01. 04. 83 г. (утро)	$0,98 \pm 0,22$	$4,31 \pm 0,48$	ВЭ ГАИШ, Алма—Ата
01. 04. 83 г. (вечер)	$1,39 \pm 0,13$	$4,60 \pm 0,29$	
02. 04. 83 г. (утро)	$1,01 \pm 0,07$	$3,60 \pm 0,17$	
03. 04. 83 г. (утро)	$1,05 \pm 0,10$	$3,03 \pm 0,22$	
05. 04. 79 г.	$0,51 \pm 0,02$	—	Горький

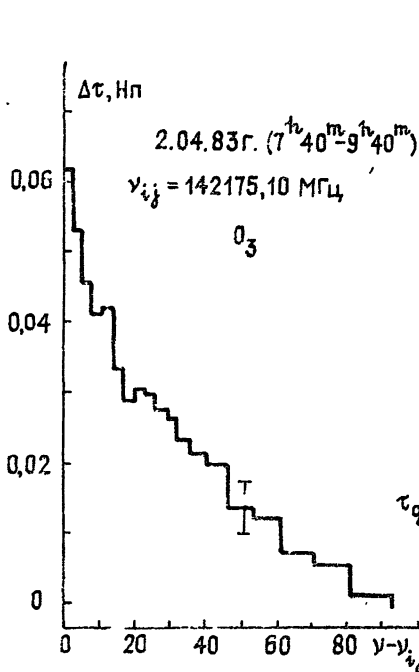


Рис. 4.

Рис. 4. Спектр поглощения миллиметровых волн в окрестности линии атмосферного озона  $\nu_{ij} = 142175,10$  МГц.

Рис. 5. Спектры оптической толщины для радиолнии  $O_3$  ( $\nu_{ij} = 142175,10$  МГц) в зависимости от времени суток.

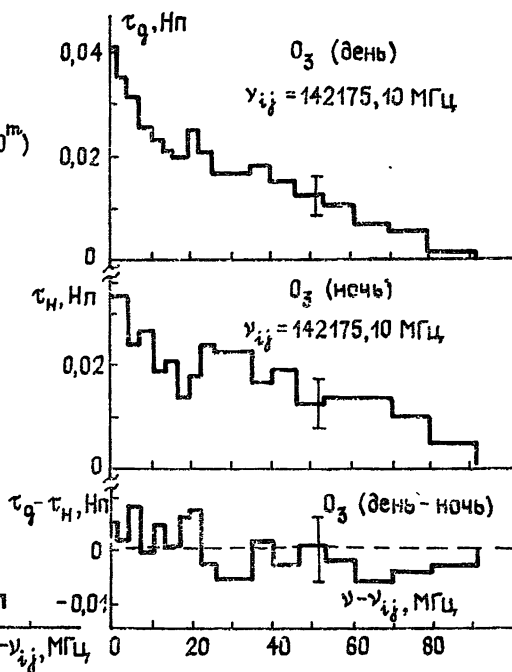


Рис. 5.

Сравнение табличных данных указывает на то, что в одном и том же высотном интервале количество  $O_3$  над Алма-Атой превышает аналогичное  $X$  над Горьким примерно вдвое. Табличные значения  $X$  получены как для Горького, так и для Алма-Аты в предположении

одинаковой температуры в слое 30 — 50 км (см. выражение (11)), что, вообще говоря, не соответствует реальности. Неопределенность значения средней температуры для слоя порядка 10% приводит (как показано в работе [15]) к 40-процентной ошибке в определении  $X$ , но расхождение табличных количеств  $O_3$  для разных пунктов наблюдения существенно больше. Данный факт объясняется следующим образом: на низких широтах основной максимум озонного слоя смещается вверх [19], в результате чего интервал высот 30 — 50 км становится более насыщен  $O_3$ . Интересно отметить, что недавние зарубежные измерения озона в ИК области спектра с аэростата дали весьма близкую к нашей (в пределах погрешности измерения) величину содержания  $O_3$  выше 29 км —  $(1,72 \pm 0,55) \cdot 10^{18}$  мол/см<sup>2</sup> [20].

Для выяснения суточных изменений  $O_3$  линия  $\nu_{ij} = 142175,10$  МГц наблюдалась также в излучении днем и ночью с 01.04.83г. по 03.04.83 г. На рис. 5 изображены усредненные величины  $\Delta t$  по данным трех дней наблюдений, в нижней части рисунка помещен разностный спектр день — ночь. В пределах ошибок измерений разницы между дневными и ночными значениями  $X$  (23 — 50 км) не обнаружено, хотя проведенные расчеты [21] указывают на возможные значительные вариации количества  $O_3$ , а в работе [22] сообщается о 10—15-процентном превышении в стратосфере дневного озона над ночным. Данные [22] получены с помощью ракетных озонзондов.

Помимо исследований  $O_3$ , молекулы которого находятся в основном колебательном состоянии, была предпринята попытка зарегистрировать в поглощении молекулы озона, находящиеся в наименьшем колебательно-возбужденном состоянии  $\omega_2 = (716,0 \pm 0,2)$  см<sup>-1</sup>. Наблюдения вращательных линий в колебательно-возбужденном состоянии могут дать сведения о влиянии переменной ультрафиолетовой радиации Солнца на состояние верхней атмосферы. Частоты вращательных переходов для таких молекул были рассчитаны и экспериментально проверены в лаборатории [23]. Наблюдения атмосферной линии  $O_3$   $\nu_{ij} = 144851$  МГц ( $\omega_2 = 716$  см<sup>-1</sup>) не увенчались успехом (с точки зрения надежного обнаружения линии), и пока лишь можно говорить о верхнем пределе интегрального содержания молекул озона  $\sim 10^{16}$  мол/см<sup>2</sup>. Такое количество возбужденных молекул  $O_3$  не противоречит их равновесному распределению в интервале высот от 30 до 50 км.

В заключение отметим, что результаты работ [6—8, 18], полученные с помощью техники миллиметровых волн, дают основание надеяться на широкое использование радиофизического метода исследования малых газовых составляющих атмосферы наряду с традиционными методами.

Авторы выражают глубокую благодарность за внимание и поддержку данной работы А. Н. Гинзбургу, А. Г. Кислякову, Д. Г. Павельеву, Ю. К. Постоенко и А. В. Миронову.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Caton W. M., Mannella G. G., Kalaghan P. M., Barrington A. E., Ewen H. I. — *Astrophys. J.*, 1968, 151, № 3, p. 153.
2. Shimabukuro F. I., Wilson W. J. — *J. Geophys. Res.*, 1973, 78, p. 6136.
3. Куликов Ю. Ю., Ризов Е. Ф., Федосеев Л. И., Швецов А. А., Кузнецов И. В., Кукина Э. П. — *Изв. АН СССР. Сер. Физика атмосферы и океана*, 1975, 11, № 10, с. 1071.
4. Костко О. К., Портасов В. С., Хаттатов В. У., Чайнов Э. А. Применение лазеров для определения состава атмосферы. — Л.: Гидрометеониздат, 1983.
5. Pelon J., Megie G. — *Nature*, 1982, 229, p. 137.
6. Clancy R. I., Muhleman D. O., Berge G. L. — *J. Geophys. Res.*, 1982, 87, № С7, p. 5009.
7. Kunzi K. F., Carlson E. R. — *J. Geophys. Res.*, 1982, 87, № С9, p. 7235.
8. De La Noe J., Baudry A., Perault M., Dierich P., Monpanteuil N., Colmont J. M. — *Planet Space Sci.*, 1983, 31, № 7, p. 737.
9. Федосеев Л. И., Куликов Ю. Ю. — *Радиотехника и электроника*, 1971, 16, № 4, с. 554.
10. Erickson N. R. — *IEEE Trans.*, 1977, MTT-25, p. 865.
11. Дрягин Ю. А., Кукин Л. М., Лубяко Л. В. — *Радиотехника и электроника*, 1974, 19, № 8, с. 1779.

12. Воронов В. Н., Киракосян Р. — Изв. вузов — Радиофизика, 1973, 16, № 9, с. 1439.
13. Голант М. Б., Виленская М. Л., Зюлина Е. А., Каплун З. Ф., Негирев А. А., Парилов В. П., Реброва П. Б., Савельев В. С. — ПТЭ, 1965, № 4, с. 136.
14. Кисляков А. Г., Куликов Ю. Ю., Рыскин В. Г. — Сб. Спектральные исследования космического и атмосферного излучения. — Горький: ИПФ АН СССР, 1979, с. 84.
15. Кисляков А. Г. — Радиотехника и электроника, 1968, 13, № 7, с. 1161.
16. Жевакин С. А., Троицкий В. С., Цейтлин Н. М. — Изв. вузов — Радиофизика, 1958, 1, № 2, с. 19.
17. Зинченко И. И., Кисляков А. Г. — Изв. АН СССР. Сер. Физика атмосферы и океана, 1974, 10, № 12, с. 1275.
18. Буров А. Б., Воронов В. Н., Красильников А. А., Куликов Ю. Ю., Рыскин В. Г. — Изв. АН СССР. Сер. Физика атмосферы и океана, 1981, 17, № 7, с. 775.
19. Хргиан А. Х. Физика атмосферного озона. — Л.: Гидрометеониздат, 1973.
20. Naylor D. A., Clark T. A., Boreiko K. I. — Infrared Phys., 1981, 21, № 5, p. 271.
21. Nerman J. R. — J. Geophys. Res., 1979, 84, p. 3701.
22. Leap J. L. — J. Geophys. Res., 1982, 87, p. 4973.
23. Баскаков О. И., Москиенко М. В., Дюбко С. Ф. — Сб. Спектральные исследования космического и атмосферного излучения. — Горький: ИПФ АН СССР, 1979, с. 124.
24. Буров А. Б., Воронов В. Н., Красильников А. А., Серов Н. В. — Изв. вузов — Радиофизика, 1976, 19, № 12, с. 1795.

Институт прикладной физики  
АН СССР

Поступила в редакцию  
16 мая 1985 г.

## MILLIMETER SPECTRUM ANALYZER AND THE RESULTS OF INVESTIGATION OF OZONE IN THE UPPER ATMOSPHERE

*V. N. Voronov, V. M. Dymkin, Yu. Yu. Kulikov, V. G. Ryskin, V. M. Yurkov*

A 110 — 150 GHz multi-channel heterodyne receiver with resolution  $0.0001 \text{ cm}^{-1}$  and observation method are described. Measurement results are given for atmospheric  $\text{O}_3$  line, rotational transition  $Q_R(10_0)$ , resonant frequency  $\nu_{ij} = 142175,10 \text{ MHz}$ . Ozone density in the earth stratosphere is defined from observational data of this radioline. For three days (1 — 3 April 1983) a mean value of the ozone column density above 30 km is equal to  $1,1 \cdot 10^{16} \text{ mol/cm}^2$  for Alma-Ata region,