

ИССЛЕДОВАНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ММВ В ГОРНЫХ УСЛОВИЯХ.

Исследования распространения радиоволн миллиметрового диапазона (ММД) были начаты в лаборатории радиофизики ИФ НАН в 1977 году. Совместно с сотрудниками ИРЭ РАН была разработана передвижная приемо-передающая аппаратура на длину волны 2мм и методика измерений характеристик сигнала на наклонных трассах протяженностью до 3км [1,2].

Передатчик миллиметровых волн (ММВ) выполнен по структурной схеме, показанной на Рис.1.

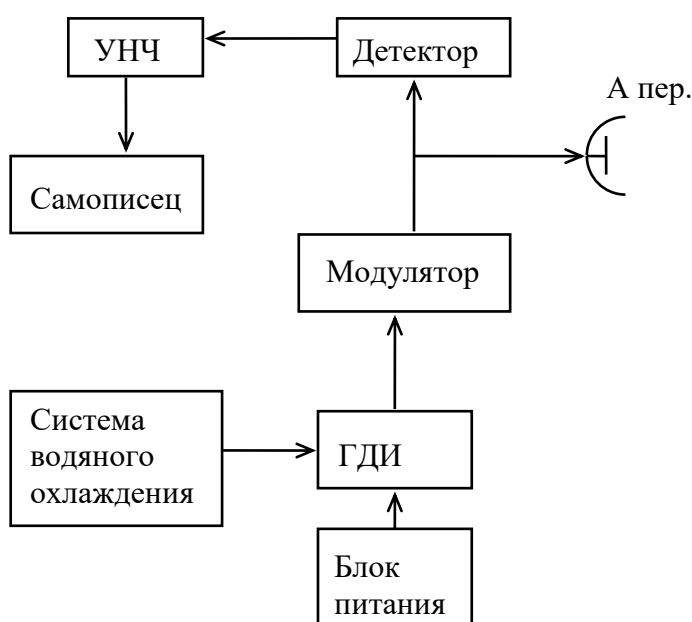


Рис. 1. Передатчик ММВ

Источником излучения служит генератор дифракционного излучения (ГДИ), размещенный между полюсами постоянного магнита. Напряженность магнитного поля между полюсами равна 3800 Гс.

СВЧ энергия подводится к передающей антенне по прямоугольному волноводу повышенного сечения. Потери в фидерном тракте составляли около дБ. Для фильтрации паразитных типов волн, возникающих при переходе на повышенное сечение применены уголковые и щелевые фильтры.

Для осуществления контроля выходной мощности в фидерном тракте используется направленный ответвитель, с помощью которого часть энергии ГДИ направляется в блок контроля мощности.

Блок контроля мощности передатчика состоит из: квадратичного детектора на диоде с барьером Шоттки (ДБШ), усилителя низкой частоты (УНЧ) и самописца. Последний регистрирует на бумажной ленте уровень мощности ГДИ за все время эксперимента.

В передатчике применена однозеркальная антенная система, состоящая из параболического зеркала диаметром 60см и рупорного облучателя. Ширина диаграммы направленности (ДН) антенны по уровню половинной мощности равна 15минут.

Передатчик, кроме блока питания и системы водяного охлаждения смонтирован на поворотном устройстве, обеспечивающем сканирование по азимуту и углу места в пределах 30градусов и фиксирование выбранного направления с точностью до 1минуты.

Прием излучения ГДИ осуществляется приемником прямого усиления, собранный по схеме на Рис.2.

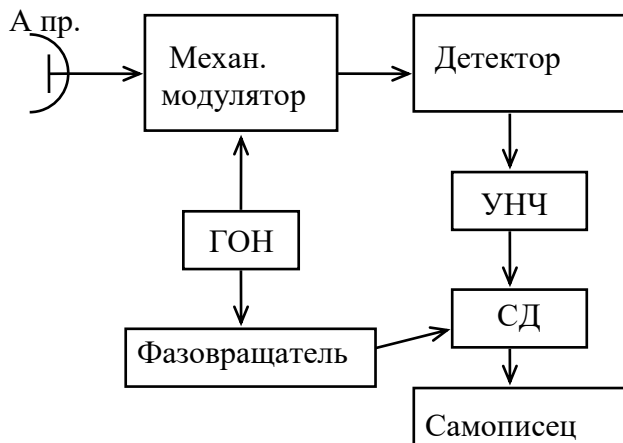


Рис. 2. Приемник ММВ.

На описанной выше приемо-передающей аппаратуре был выполнен цикл измерений амплитудных флуктуаций на открытых трассах различной протяженности. При этом выяснили, что чувствительность приемника позволяет проводить измерения на расстояниях не более 1500 метров. Было решено о создании более чувствительного приемника - супергетеродинного.

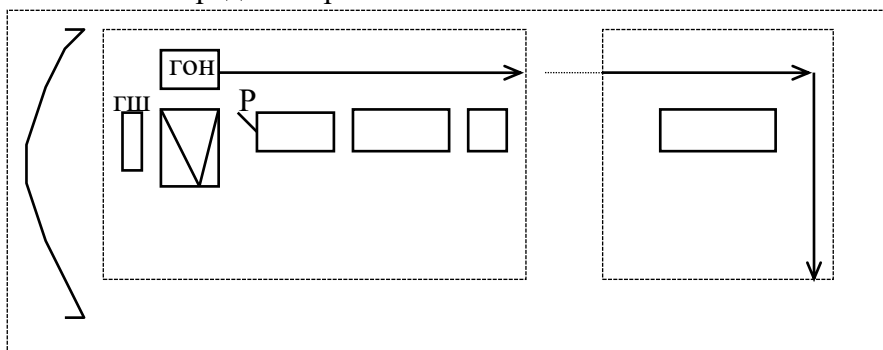
На втором этапе исследований распространения ММВ

в Институте физики НАН Кыргызской Республики, совместно с ИРЭ РАН и МГТУ им. Н.Баумана был разработан передвижной измерительный комплекс, позволяющий проводить исследования радиоярких характеристик атмосферы и зенитных покровов на различных высотах над уровнем моря [3,4].

Аппаратурный комплекс представляет собой передвижную измерительную радиометрическую систему, смонтированную в фургоне автомобиля повышенной проходимости ЗИЛ-157. Система позволяет проводить исследования распределений радиоярких температур изучаемых объектов, расположенных под различными зенитными и азимутальными углами относительно точки наблюдения.

Основу измерительного комплекса составляет радиометр коротко-волновой части ММ диапазона, выполненный по модуляционной супергетеродинной схеме [5].

Блок-схема радиометра показана на Рис.3.



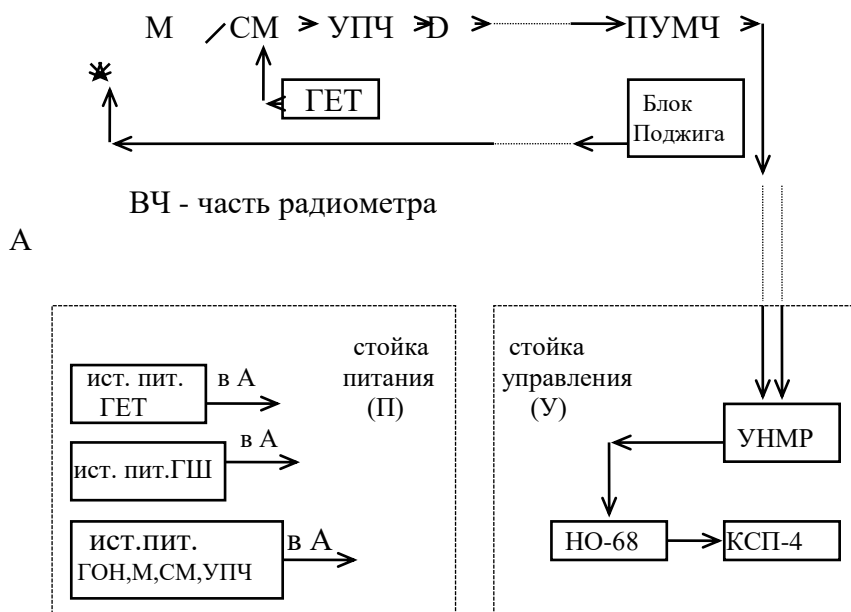


Рис. 3. Блок-схема радиометра ММ диапазона.

СВЧ - часть радиометра смонтирована в фокусе параболической антенны (А), имеющей диаметр 0,6 м и являющейся коллимирующим элементом системы. Ширина главного лепестка диаграммы направленности антенны на частоте 90 ГГц составляет 40 угл.мин. по уровню мощности - 13 дБ.

Антенна установлена на азимут - угломестном поворотном устройстве, позволяющем изменять угловое положение антенны в пределах: $\pm 20^\circ$ по азимуту и $\pm 10^\circ$ по углу места. Поворотное устройство снабжено ручным и электрическим приводами. Управление положением антенны с помощью электропривода возможно в автоматическом режиме, позволяющем производить построчное сканирование антенны в указанных выше пределах, относительно заранее заданного направления. Работа устройства в автоматическом режиме обеспечивается с помощью специально разработанного блока управления электроприводом. Схема блока управления основана на использовании гирконных переключателей, реле и реверсивных электродвигателей РД-09, которые являются соответственно чувствительными и регулируемыми элементами системы.

Излучение, сфокусированное антенной, попадает на вход радиометра - рупорный облучатель (Р), продолжением которого является гетеродинный смеситель (СМ). Ширина диаграммы направленности облучателя по уровню мощности - 13 дБ составляет 120 градусов .

Принимаемое излучение модулируется по амплитуде с помощью механического обтюлятора (М), на лопасти которого нанесено рыхлое поглощающее покрытие для уменьшения паразитной модуляции. Вращение обтюлятора осуществляется от электродвигателя постоянного тока ДПМ-20. Скорость вращения двигателя и количество лопастей обтюлятора таковы, что частота модуляции входного СВЧ-излучения составляет 160-180 Гц.

По обе стороны обтюлятора расположены соответственно миниатюрная лампа накаливания и фотодиод таким образом, чтобы при вращении обтюлятора на фотодиоде формировались прямоугольные импульсы тока с частотой модуляции входного излучения. Далее эти импульсы усиливаются по напряжению до уровня 2,4 В и используются в качестве опорного напряжения при последующем синхронном детектировании сигнала в низкочастотной части радиометра.

Гетеродинный смеситель [6] является основным элементом СВЧ-части радиометра. В качестве гетеродина (Г) использована лампа обратной волны ЛОВ-71. Мощность гетеродина подается на смеситель по диэлектрическому волноводу через резонатор связи с полосой пропускания 0,3 ГГц, который подавляет амплитудные шумы гетеродина в полосе сигнала и зеркального канала. Смесительный диод с барьером Шоттки, собранный на сотовой полупроводниковой структуре из арсенида галлия, оформлен в виде волноводной вставки, облегчающей сборку и замену диодов [7]. Конструкция резонатора связи и собственно смесителя позволяют производить их перестройку в диапазоне 85-95 ГГц. Однополосные потери преобразования смесителя составляют 7-9 дБ.

После смесителя сигнал промежуточной частоты поступает на вход усилителя УПЧ-0,5, включающего в себя: 1) усилитель промежуточной частоты (УПЧ) с полосой 75-500 МГц и коэффициентом шума не более 2 дБ, 2) развязывающее устройство для подачи напряжения смещения и контроля тока 3) смесительный диод (Д), 4) первый каскад усилителя низкой частоты (УНЧ).

Далее для низкочастотной обработки сигнала использован серийный прибор УНМР, в состав которого последовательно входят: предварительный усилитель низкой частоты, перестраиваемый полосовой фильтр, синхронный детектор и усилитель постоянного тока.

Для установки фазы опорного сигнала в синдродетекторе использован специально разработанный фазовращатель, обеспечивающий плавную регулировку фазы опорного напряжения в пределах 0-180 градусов. В ходе подготовки и настройки радиометра фаза опорного сигнала регулируется по максимуму выходного сигнала.

Система регистрации сигналов включает в себя аналоговый магнитограф НО-68 и ленточный самописец КСП-4. Магнитограф обеспечивает непрерывную запись выходного напряжения радиометра в динамическом и частотном диапазонах 36 дБ и 0-300 Гц соответственно. Самописец используется для визуального контроля регистрации сигнала и калибровки аппаратуры.

Для абсолютных измерений излучения атмосферы очевидно необходима калибровка всей измерительной системы, т.е. установление однозначной связи между показаниями приемника и интенсивности принимаемого излучения. При этом, вообще говоря, могут оставаться неизвестными некоторые параметры антенны и приемника.

Обычно телесный угол вокруг антенны разбивают на две области: область $\Omega_{\text{гл}}$, включающая главный лепесток ДН, и область $\Omega_{\text{бок}}$, охватывающая боковые и задние лепестки, которую называют областью рассеивания.

Для остронаправленной антенны, какой является антенна нашей системы, можно использовать модель ДН в виде пространственного конического главного луча $\Omega_{\text{гл}}$, и изотропного сферического тела в остальной области пространства $\Omega_{\text{бок}}$.

Наличие боковых лепестков $\Omega_{\text{бок}}$ может оказать существенное влияние на результаты измерений, т.к. для обычных антенн в боковые лепестки уходит 20+30% мощности принимаемого излучения.

Поэтому в излагаемой ниже методике абсолютных измерений излучения атмосферы в зависимости от зенитного угла достигается условие постоянства второго слагаемого, тем самым исключаются его влияние на величину T_a .

Измерение нисходящего излучения атмосферы при неподвижной приемной антенне осуществляется по схеме на Рис. 4.

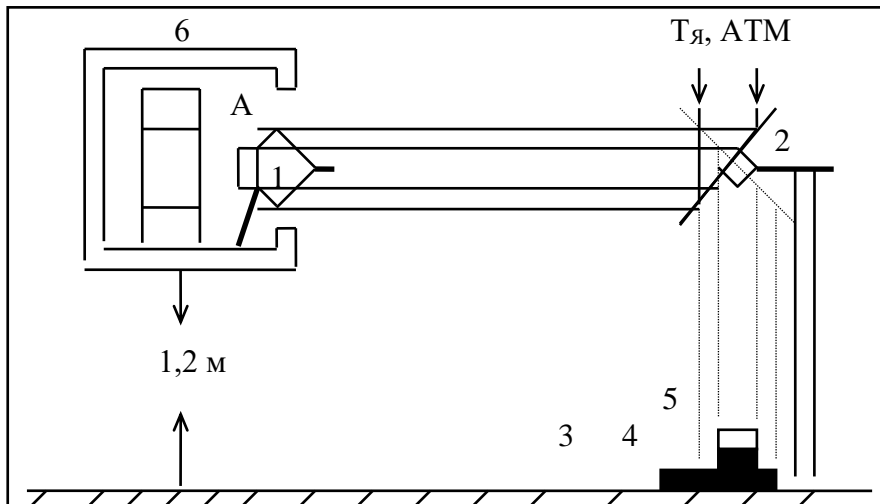


Рис. 4. Схема калибровки аппаратуры и измерений индикатрисы излучения атмосферы и покровов: 1-антенна, 2-отражатель, 3-большое черное тело, 4-кювета с черным телом, 5-лист металла, 6-кузов автомашины.

В сторону антенны -1, при соответствующем повороте отражателя -2 переизлучателя излучение неба с различных зенитных углов. При этом видимая (со стороны антенны) площадь отражателя остается неизменной, что позволяет исключить систематические ошибки измерений. Такая схема дает возможность осуществлять калибровку приемника по азоту, которая выполняется следующим образом.

Согласно методу замещения [8] поочередно устанавливая под отражателем -2 “теплое” черное тело-3 и “холодное” черное тело -4 (с температурами приземного слоя воздуха и жидкого азота соответственно), получаем калибровочную прямую. Затем, закрывая кювету -4 металлической пластинкой-5, получаем отклик радиометра -Илист, ордината которой соответствует яркостной температуре “опорной” области атмосферы Тяо. Вычислив зенитный угол, при котором получен отклик Илист, повернем отражатель-2 на этот угол и получим отклик Ио. Через точку 3 с координатами (Тяо , Ио) и точку 1 проведем прямую, которая будет уже рабочей прямой и с ее помощью можно будет определить яркостную температуру Тя при любом зенитном угле.

Для повышения точности измерений калибровку системы необходимо проводить в условиях чистой атмосферы и хорошей стабильности работы радиометра. Анализ ошибок измерений показывает, что для реализации относительной среднеквадратичной погрешности, равной 5%, достаточна чувствительность радиометра $Tя=1$ К.

В настоящей работе представлены основные результаты исследований распространения ММВ, выполненных в лаборатории радиофизики Института физики НАН КР. Исследования включают как теоретические расчеты, так и полевые эксперименты в трех пунктах Северного Кыргызстана. Эти пункты резко отличаются по географическим и метеорологическим условиям и разнесены как по высоте (760, 1600 и 3050 метров над уровнем моря), так и по горизонтали (расстояние от аэрологической станции “Бишкек” до 1-го пункта наблюдений - 5км, до 2-го - 250км и до 3-го - 70км).

Методика выполнения измерений позволяла: 1) фиксировать индикатрису нисходящего излучения атмосферы в пределах всей верхней полусферы, 2) регистрировать собственное излучение конкретного участка местности. После обработки данных эксперимента получали: 1) радиояркостную температуру (РЯТ) атмосферы - Тя и вертикальное поглощение - Г, 2) радиояркость покрова - Тэфф.

Для корректного планирования экспериментальных исследований нисходящего излучения атмосферы в горных условиях Северного Кыргызстана было необходимо создание численной модели атмосферы. Эти модели дали сезонные вариации излучения и поглощения волн ММД в атмосфере, на основе которых построено

измерительное устройство с нужными точностными показателями на конкретной длине волны.

Для горных условий Северного Кыргызстана модели излучающей атмосферы получены на основе радиозондовых данных аэрологической станции “Бишкек” и часть результатов опубликована в [9]. Радиозондовые данные позволяли учитывать в расчетах особенности распределения метеохарактеристик горной местности. Для вычислений $T_{я}$ и Γ использованы алгоритм и методика, предложенная в [10]. Принималось, что атмосфера плоско-слоистая и внутри каждого слоя метеохарактеристики не изменяются, а высотные профили задаются с шагом $H = 1\text{ км}$. Кроме того, для каждого пункта наблюдений в программу расчета вносилась поправка на “начальную высоту”. В качестве примера, на Рис. 5. приведены графики угловых и высотных зависимостей $T_{я}$ для июля месяца на волне 3мм.

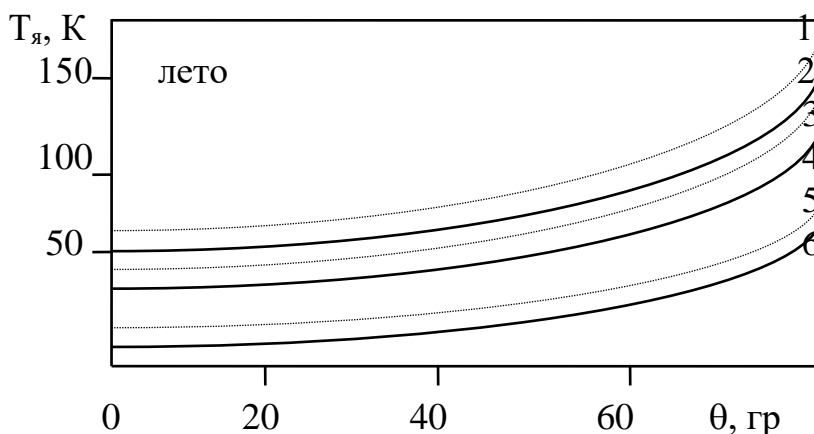


Рис. 5. Зависимость яркостной температуры атмосферы от зенитного угла: 1,2- высота 0,76 км, 3,4- высота 1,60 км, 5,6- высота 3,05 км.

Как видно, из графиков для зенитных углов вариации $T_{я}$ выражаются величинами: от 24,7К до 60,5К.

Выше было сказано, что для полевых экспериментов разработан измерительный комплекс на волне 3мм с точностью не хуже 0,5К. Индикатриса нисходящего излучения атмосферы фиксировалась для зенитных углов : от 0 до 90 градусов с шагом измерений 5 градусов “методом поворотного отражателя” [9]. При необходимости можно было регистрировать сигнал и через 1 градус (для углов близких к горизонту). Измерения РЯТ атмосферы для каждого пункта наблюдений сопровождалась калибровкой по эталонным излучателям : черное тело при температурах $T_{азот}$ и T_0 , где T_0 - температура приземного слоя воздуха. За период исследований охвачены практически все атмосферные ситуации: чистая атмосфера, облачная атмосфера, дождь, снег и туман на высоте 3050 метров над уровнем моря. Проведены круглосуточные измерения для всех пунктов наблюдений, которые дали суточный ход $T_{я}$ и Γ . Перед каждым сеансом измерений подробно отмечались условия наблюдений и снимались метеохарактеристики атмосферы. Выполнение этих условий “чистого эксперимента” позволили провести сравнение с теорией и данными других авторов при близких схемах наблюдений. При обработке данных эксперимента проведен анализ погрешностей измерений. Но главным вопросом все же было экспериментальное определение диапазона вариаций $T_{я}$ и Γ , в первую очередь для условий чистой атмосферы. Эти данные сведены в Таблицу 1.

Таблица 1

Сезон и высота	Вариации $T_{я}$	$T_{ср.}$	Погрешность	Вариации Γ	$\Gamma_{ср.}$
лето 760м.	31 - 72	62	4,8	0,42- 1,15	1,01
лето 1600м.	43 - 78	53	5,6	0,74 - 1,36	0,87

	3050м.	17 - 42	23	3,8	0,27 - 0,72	0,42
зима	760м.	27 - 44	35	3,2	0,33 - 0,70	0,53
	1600м.	28 - 66	33	5,2	0,53 - 1,22	0,60
	3050м.	12 - 23	16	3,4	0,20 - 0,42	0,26

Большой диапазон вариаций Γ и Γ для 2-го пункта наблюдений видимо можно объяснить влиянием водного бассейна озера Ысык-Куль, так как влажность атмосферы вносит основной вклад в РЯТ атмосферы.

В диапазоне миллиметровых радиоволн (30-300 Гигагерц) общее ослабление сигнала определяется поглощением в атмосфере Земли. При этом поглощение не зависит от состояния поляризации излучения. Основной вклад в поглощение безоблачной атмосферы вносят водяной пар и кислород. Квантово-механическая теория молекулярного поглощения радиоволн в кислороде и водяном паре впервые было предложено Ван-Флеком [11], затем развиты в работах С.А. Жевакина и А.Г.Кислякова и их сотрудников [12]. В последующие годы были разработаны приближенные методы расчета коэффициентов поглощения (эмпирические, полуэмпирические и инженерные) [13].

Интенсивность молекулярного поглощения зависит от структуры молекул, величины дипольного момента и вызвано вращательными квантовыми переходами молекул водяного пара из одного энергетического состояния в другое. Молекулы водяного пара обладают сравнительно большим электрическим дипольным моментом (асимметрический волчок) и вращательных линий достаточно много. Молекулы кислорода обладают магнитно-дипольным моментом и имеют спин-вращательный спектр поглощения. В реальной атмосфере вклад вышеназванных компонент в полное поглощение радиоволн суммируется.

Результаты исследований вариаций поглощения атмосферы на частоте 90 ГГц сведены в Таблицу 11.

Таблица 11

Сезон года	Высота Н, м	Вертикальное поглощение- Γ , дБ	Влажность w, мм	Температура T_0 , К
лето	760	0,42 - 1,15	9,8 - 19,8	299 - 309
	1600	0,74 - 1,36	8,7 - 14,3	283 - 298
	3050	0,27 - 0,72	5,7 - 7,2	280 - 285
зима	760	0,33 - 0,70	3,8 - 9,3	269 - 298
	1600	0,53 - 1,22	1,8 - 6,1	266 - 276
	3050	0,26 - 0,42	1,4 - 2,6	261 - 271

Используя данные по поглощению и соответствующие величины влажности атмосферы найдены коэффициенты аппроксимации этих зависимостей уравнением прямой методом наименьших квадратов. Коэффициенты корреляции при этом составили соответственно - 0,85; 0,62 и 0,67.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г.А.Андреев, Т.Орозобаков и др. - Тезисы докладов Всесоюзного симпозиума по технике и распространению ММВ, М. ИРЭ РАН, 1976, с. 23
2. Отчет о НИР "Исследование распространения и пассивной ретрансляции УКВ в климатических условиях Киргизии", Фрунзе, 1980, гл.3
3. К.Ш. Ашымканов, Т.Орозобаков и др. - Известия АН Кирг.ССР, сер. Физмат. 1988, № 2, с. 42 - 46

4. Отчет о НИР “Изучение закономерностей распространения радиоволн на трассах с пассивной ретрансляцией и исследование радиоизлучения окружающей среды в ММД”, Фрунзе, 1990, гл. 4
5. Б.А.Розанов, С.Б.Розанов - Приемники ММВ, М. Радио и связь, 1989.
6. Жаркова Н.А. и др.-Сб. 11 Всесоюзный симпозиум по ММВ, Харьков, 1978, т.2, с.53
7. Жаркова Н.А. и др.-Сб.111 Всесоюзный симпозиум по ММВ, Горький, 1980, т.1, с.112
8. Кисляков А.Г. и др.-Астрономический журнал, 1971, т.48, вып.1, с.39
9. Ашымканов К.Ш. и др.-Известия АН Кирг. ССР, сер. Физмат, 1. 1988, №2, с. 42
10. Исхаков И.А. и др.-препринт ИРЭ РАН, 1981, № 4
11. Van Flek J.H.,-Phys. Rev., 1947, v. 71, n. 7, p.413
12. Жевакин С.А. и др.-Известия ВУЗов, Радиофизика, 1963, т. 6, № 4, с. 674
13. Зражевский А.Ю.-Радиотехника и электроника, 1976, т. 21, № 5, с. 951