

Работа выполнена в Институте прикладной физики Российской академии наук (г. Нижний Новгород).

На правах рукописи

КАРАШТИН Дмитрий Анатольевич

**ПАССИВНОЕ НАЗЕМНОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ
ТЕРМИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ СРЕДНЕЙ АТМОСФЕРЫ
В МИЛЛИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН**

01.04.03 – радиофизика

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2011

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
А. М. Фейгин.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
А. В. Лапинов;

доктор физико-математических наук
А. В. Троицкий.

Ведущая организация: Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН (г. Москва).

Защита состоится «__» _____ 2011 г. в __ часов на заседании диссертационного совета Д 002.069.02 в Институте прикладной физики РАН (603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института прикладной физики РАН.

Автореферат разослан «__» _____ 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физико-математических наук,
профессор



Ю. В. Чугунов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

Предмет исследования и актуальность темы. Исследование термической структуры средней атмосферы (15–90 км) традиционно считается одной из основных задач исследования атмосферы Земли, поскольку температура воздуха является одним из ключевых параметров, определяющих условия протекания большинства фотохимических и динамических процессов на этих высотах [1]. Кроме того, информация о вертикальном профиле температуры воздуха играет важную роль в процедуре восстановления высотных зависимостей концентраций малых газовых составляющих средней атмосферы (в том числе озона) по данным пассивного дистанционного зондирования [2].

Существуют контактные и бесконтактные методы измерения температурного профиля атмосферы. К контактным методам относятся, во-первых, баллонные измерения [3] – такие измерения обеспечивают наиболее высокое временное и пространственное разрешение, но не позволяют вести непрерывный мониторинг и достаточно дороги. Вторым контактным методом являются ракетные измерения профиля температуры [4, 5]. Они позволяют непосредственно измерить распределение температуры атмосферы по вертикали с относительно небольшой задержкой по времени, но являются еще более дорогими и сложными, чем баллонные, и также не могут обеспечить постоянный мониторинг с пространственно-временным разрешением с характерными масштабами по горизонтальным координатам от нескольких десятков до нескольких сотен километров и временными масштабами от нескольких десятков минут до нескольких часов, необходимым как для корректного восстановления профилей малых газовых составляющих, так и при исследовании быстропотекающих процессов (связанных, например, с распространением и трансформацией внутренних гравитационных волн). Еще одним существенным недостатком ракетного зондирования является производимое в процессе измерений возмущение поля температуры, которое хотя и может быть учтено, но делает более сложной обработку результатов измерений и снижает точность.

Из-за наличия перечисленных недостатков контактных методов мониторинга профиля температуры средней атмосферы в настоящее время проводится почти исключительно дистанционными методами с помощью пассивных и активных приборов, работающих в различных диапазонах спектра электромагнитных волн. В оптическом диапазоне частот для таких измерений применяются лидары [6–9] – установки для измерения температурного профиля активным методом с помощью лазеров. Они обеспечивают достаточно высокую точность измерения, но имеют существенные недостатки. Один из них – это громоздкость установки, не позволяющая размещать ее на подвижных носителях или создавать наземную сеть, обеспечивающую необходимое пространственное разрешение. Вторым принципиальным недостатком является невозможность работы лидаров в светлое время суток, что не позволяет получать данные в этот период времени. В инфракрасном диапазоне для измерения температурного профиля атмосферы используются приемники, регист-

рирующие излучение атмосферы в линиях поглощения углекислого газа, форма и интенсивность которых зависят от температуры [10]. Основным недостатком такого метода является невозможность проводить измерения в светлое время суток, как и в случае лидаров.

Кроме наземных методов дистанционного термического зондирования, существуют также и методы измерения с борта самолета и со спутника [11–13]. Преимущественно это микроволновые методы пассивного зондирования в линиях поглощения молекулярного кислорода. Они имеют свои недостатки. Измерения с борта самолета не могут дать необходимое пространственно-временное разрешение. Спутниковые измерения могут обеспечить постоянный мониторинг температурного профиля атмосферы над всей поверхностью земного шара и необходимое разрешение по вертикали, но являются очень дорогими и не обеспечивают необходимое для решения целого ряда задач пространственного (по горизонтали) и временного разрешение.

Для решения перечисленных задач наиболее перспективным (в том числе благодаря относительной дешевизне) представляются пассивные наземные измерения собственного излучения атмосферы в линиях различных спин-вращательных переходов молекулярного кислорода, расположенных в миллиметровом диапазоне длин волн (частоты 50–60 ГГц, 118 ГГц) [14–18]. Для молекулярного кислорода – одного из основных составляющих атмосферу газов – характерны, во-первых, высокая стабильность относительной концентрации вплоть до высоты 90 км, и, во-вторых, существенная зависимость характеристик теплового радиоизлучения от температуры, что позволяет восстановить профиль температуры в очень широком диапазоне высот: от приземного слоя до мезосферы [14–18]. В диапазоне частот 50–60 ГГц молекулярный кислород имеет 37 основных спин-вращательных линий с вращательными квантовыми числами от 1 до 37. Ширины этих спектральных линий у поверхности Земли составляют порядка 1 ГГц при среднем частотном разнесении порядка 0.5 ГГц, поэтому они сливаются в так называемую полосу поглощения, центрированную к длине волны 5 мм [19–22]. Высокоинтенсивные линии с небольшими вращательными числами располагаются в центре полосы, обуславливая большую (десятки неперов) оптическую толщину атмосферы на соответствующих частотах. Они используются для термического зондирования стратосферы и мезосферы со спутников.

Для исследования термического профиля средней атмосферы с помощью наземных измерений оптимальным является зондирование в слабых линиях поглощения молекулярного кислорода, расположенных на склоне 5-миллиметровой полосы поглощения. Оптическая толщина здесь составляет от десятых долей до единиц неперов. В работах предшественников [23] было продемонстрировано, что пассивное зондирование с поверхности Земли позволяет наблюдать в этой области спектра отдельные линии, на центральной частоте которых яркостная температура собственного излучения атмосферы превосходит фоновый уровень на несколько градусов (амплитуда соответ-

вующих спектральных линий составляет примерно 5% от фонового уровня). Слабость разрешаемых спектральных линий и сложность решения некорректной обратной задачи извлечения из наземных спектральных измерений информации о вертикальном профиле температуры стратосферы привели к тому, что, несмотря на предпринятые попытки [24], высказанное в пионерской работе Уотерса (Waters, Nature, 1973) предложение об использовании таких измерений для восстановления термической структуры средней атмосферы, до настоящего момента реализовано не было.

Такое положение связано со следующими обстоятельствами.

Во-первых, как отмечено выше, содержащий информацию о термической структуре средней атмосферы спектральный сигнал представляет собой малое возмущение на фоне, формируемом нижними слоями атмосферы, что накладывает очень жесткие требования на чувствительность измерительной аппаратуры. Точность наземных измерений по регистрации разрешающихся линий низкочастотного склона 5-миллиметровой полосы поглощения кислорода, достигнутая в пионерской работе [23], не позволяла надеяться на достижение необходимой точности при восстановлении температурного профиля.

Во-вторых, восстановление высотного профиля температуры средней атмосферы по данным пассивного наземного зондирования – это некорректная обратная задача, так как связь искомого профиля с экспериментально измеряемой величиной (спектром яркостной температуры) задается интегральным соотношением и неизбежно содержит шум измерений. Наиболее распространенные методы решения таких задач [25–27] применимы в случае линейной зависимости подинтегрального выражения от восстанавливаемой величины. Обсуждаемая же задача существенно не линейна (в отличие, например, от подробно обсуждавшейся ранее задачи восстановления вертикального распределения озона по спектру излучения атмосферы в линиях данной малой составляющей [28–30]). В связи с этим в [24] была сделана попытка модифицировать один из «линейных» методов (итерационный метод Шахина [31]) для такого случая. Предложенный алгоритм не позволил, однако, решить задачу восстановления по данным наземного зондирования. В результате в [24] был сделан вывод о возможности термического зондирования средней атмосферы по измеренным спектрам линий поглощения молекулярного кислорода, расположенных на склоне 5-миллиметровой полосы поглощения, но с борта самолета (с высоты 10 км), а не с поверхности Земли.

В-третьих, долгое время не существовало достаточно точной модели, описывающей поглощение миллиметрового излучения в атмосфере. Адекватная реальности математическая модель, описывающая атмосферное поглощение электромагнитного излучения в рассматриваемом частотном диапазоне, была создана сравнительно недавно [19–22].

Целью работы является:

1. Разработка методики мониторинга вертикального профиля температуры стратосферы и нижней мезосферы по наземным измерениям спектра соб-

ственного излучения атмосферы в диапазоне частот, расположенном на низкочастотном склоне 5-миллиметровой полосы поглощения молекулярного кислорода.

2. Разработка и создание спектрометрического комплекса для измерений температурного профиля атмосферы с помощью созданной методики.
3. Испытания созданного комплекса в натурном эксперименте, сравнение полученных результатов с другими источниками данных и выявление границ применимости в различных условиях.

Научная новизна работы заключается в следующем: впервые разработана методика мониторинга вертикального профиля температуры стратосферы и нижней мезосферы по наземным измерениям спектра собственного излучения атмосферы в диапазоне частот, расположенном на низкочастотном склоне 5-миллиметровой полосы поглощения молекулярного кислорода и создан спектрометрический комплекс для измерений температурного профиля атмосферы с помощью созданной методики, а также определены пределы применимости последней в различных условиях.

Научная и практическая ценность.

Полученные с помощью созданного измерительного комплекса температурные профили средней атмосферы могут быть использованы для изучения быстропротекающих процессов в атмосфере (таких, как, например, внутренние гравитационные волны).

Также результаты измерений температурных профилей могут использоваться для восстановления профилей малых газовых составляющих атмосферы (например, озона) по данным наземного радиометрического зондирования.

Созданный измерительный комплекс благодаря своей мобильности и относительно невысокой стоимости может быть применен для создания сети измерения термической структуры атмосферы, данные которой могут быть использованы для климатического мониторинга и при моделировании климатических процессов, а также при прогнозировании погоды.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Разработка методики мониторинга вертикального профиля температуры стратосферы и нижней мезосферы по наземным измерениям спектра собственного излучения атмосферы в диапазоне частот, расположенном на низкочастотном склоне 5-миллиметровой полосы поглощения молекулярного кислорода. Данная методика обеспечивает измерение температурного профиля в интервале высот 10–55 км с точностью не хуже 10 К и временным разрешением порядка одного часа.
2. Создание и программная реализация алгоритма решения некорректной обратной задачи восстановления температурного профиля средней атмосферы по наземным измерениям спектра собственного излучения атмосферы в миллиметровых линиях поглощения молекулярного кислорода с помощью байесова подхода. Восстановление в интервале высот 10–55 км

с точностью не хуже 10 К и временным разрешением порядка одного часа возможно при погрешности измерения спектра порядка 0.1 К для ширины канала 1 МГц.

3. Разработка и создание спектрометрического комплекса для измерений температурного профиля атмосферы с помощью разработанной методики. Комплекс имеет шумовую температуру не хуже 1500 К и спектральное разрешение 61 кГц, что позволяет обеспечить измерение температурного профиля в интервале высот 10–55 км с точностью не хуже 10 К и временным разрешением порядка одного часа.
4. Экспериментальное исследование области применимости и точности разработанной методики в зависимости от параметров зондирования (ширины используемой спектральной полосы, направления зондирования). Использование спектра яркостной температуры в широком диапазоне частот (52.5–53.1 ГГц) позволяет опустить нижнюю границу области высот восстановления до 10 км. Измерение в направлении, квазиперпендикулярном силовым линиям магнитного поля Земли, позволяет поднять верхнюю границу области высот восстановления до 55 км.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на научных семинарах ИПФ РАН, а также конференциях “Нелинейные волны 2008, 2010” (Нижний Новгород), “Радиофизической конференции” (Нижний Новгород 2007), конференции “Волны-2009” (Звенигород 2009), ежегодной конференции “Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические эффекты” (Нижний Новгород 2007, Борок 2008, Звенигород 2009, Нижний Новгород 2010), конференции “Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред” (Муром 2009), международной конференции URSI-F “Microwave Signatures” (Флоренция 2010), Всероссийской конференции по распространению радиоволн (Йошкар-Ола 2011).

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, приложения и списка цитируемой литературы. Общий объем диссертации составляет 135 страницы, включая 58 рисунков и список литературы из 103 библиографических наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность темы, определены предмет исследования и задачи диссертации, кратко изложено содержание диссертации, а также приведены данные по апробации и публикациям включенных в диссертацию материалов.

Первая глава работы посвящена описанию и определению требований к созданной измерительной установке, позволяющей регистрировать спектр собственного излучения атмосферы в диапазоне частот 52.45–54.50 ГГц с чувствительностью, которая обеспечивает точность восстановления температурного профиля средней атмосферы лучше, чем при использовании других существующих методов мониторинга [32]. Установка включает в себя пара-

болическую антенну с рупорным облучателем, систему калибровки, супергетеродинный радиометр, анализатор спектра и цифровую систему сбора и обработки данных на базе персонального компьютера.

В **разделе 1.1** описан общий подход к созданию пассивных спектрометров и приведена стандартная схема его реализации.

Раздел 1.2 посвящен исследованию зависимости точности измерения температурного профиля атмосферы от точности измерения спектра яркостной температуры и определению необходимой точности измерения спектра. Приведено решение прямой задачи – расчет спектра яркостной температуры атмосферы по заданным профилям метеопараметров (температуры, давления и влажности). Проанализирована зависимость реакции спектра яркостной температуры атмосферы на изменения температуры слоя атмосферы фиксированной ширины на заданную величину от высоты расположения этого слоя. Показано, что при необходимых значениях толщины слоя и величины изменения его температуры (1 км и 10 К соответственно), полученных из требований к точности измерений, величина вариаций яркостной температуры на разных частотах в пределах линии поглощения молекулярного кислорода с центром на частоте 53.0669 ГГц составляет порядка 0.1 К в диапазоне высот от 20 км до 55 км. Эта величина принята за необходимую точность измерения спектра яркостной температуры.

В **разделе 1.3** описана антенная система установки с системой калибровки и рассчитаны погрешности, вносимые этим блоком в результаты измерений. Оценены оптимальные размеры антенны, времена калибровки и яркостные температуры калибровочных эталонов. Показано, что реализуемые характеристики позволяют обеспечить необходимую точность измерений.

Раздел 1.4 описывает блок приемника и связанные с ним погрешности измерения. Показано, что для обеспечения необходимой точности измерений шумовая температура приемника не должна превышать 1500 К. В ходе тестирования установки продемонстрировано, что эта величина в реализованном варианте составляет не более 1400 К.

Раздел 1.5 посвящен описанию реализации блока анализатора спектра. Рассмотрено и описано два варианта анализатора спектра – 32-канальный набор фильтров и широкополосный цифровой анализатор спектра с высоким разрешением.

Результаты тестирования созданного комплекса, приведенные в главе 1, подтвердили соответствие его характеристик изначально сформулированным требованиям, необходимым для решения поставленной задачи: зондирования с требуемой точностью и пространственно-временным разрешением термической структуры стратосферы и нижней мезосферы.

Во **второй главе** предложен и реализован численно алгоритм восстановления высотного профиля температуры средней атмосферы по результатам наземного наблюдения спектра собственного излучения атмосферы в миллиметровых линиях поглощения молекулярного кислорода [33]. Данный подход

позволяет, опираясь на информацию о шуме, неизбежно присутствующем в данных измерениях, и используя известные априори свойства восстанавливаемого профиля, сделать статистически корректные оценки искомой величины.

В **разделе 2.1** дается обзор существовавших ранее методов решения некорректных обратных задач.

Раздел 2.2 посвящен общему описанию байесова подхода к решению некорректных обратных задач в сравнении с существовавшими ранее методами.

В **разделе 2.3** приведены и описаны возможные варианты функций, аппроксимирующих температурный профиль атмосферы.

Раздел 2.4 посвящен решению модельной задачи восстановления профиля температуры по данным наземных измерений спектра солнечного излучения. Показано, что восстановление по данным наземных измерений спектра солнечного излучения в пределах одной линии поглощения молекулярного кислорода с центром на частоте 53.0669 ГГц возможно в диапазоне высот 20–55 км с точностью порядка 10 К.

В **разделе 2.5** описано решение модельной задачи восстановления профиля температуры по данным наземных измерений спектра собственного излучения атмосферы. Проведено исследование корректности аппроксимации апостериорной плотности вероятности гауссовым распределением. Показано, что этот вариант решения является некорректным. Проведено сравнение кусочно-однородной модели аппроксимации температурного профиля с моделью аппроксимации функцией в виде искусственной нейронной сети. Показано, что использование второго варианта модели целесообразно при наличии резких перепадов температуры с высотой в атмосфере. Исследовано решение задачи с использованием различных вариантов анализатора спектра. Показано, что использование широкополосного цифрового анализатора спектра с высоким разрешением (позволяющего анализировать при решении задачи спектр, включающий в себя две отдельные линии излучения молекулярного кислорода и часть спектра между ними, не включающего разрешающихся линий), в отличие от 32-канального набора фильтров, позволяет обеспечить необходимую точность измерения (3–7 К) в диапазоне высот 10–60 км.

Третья глава работы посвящена описанию и анализу проведенной с помощью созданного комплекса серии измерений спектра собственного излучения атмосферы в диапазоне частот 52.5–53.1 ГГц. По результатам измерений с помощью разработанного алгоритма проведено восстановление температурного профиля атмосферы, получены статистические оценки – наиболее вероятные профили и доверительные интервалы, по которым оценена точность восстановления. Полученные результаты проанализированы. Проведено их сравнение с результатами измерений, выполненными другими методами. Исследована зависимость положения нижней границы диапазона высот восстановления температурного профиля от ширины полосы спектрального анализа. Оценено влияние эффекта Зеемана на положение верхней границы области восстановления температурного профиля.

Раздел 3.1 описывает первые пробные измерения в узкой полосе частот, включающей только одно крыло одной спектральной линии, с использованием 32-канального набора фильтров в качестве анализатора спектра. Показано, что в данном варианте установка позволяет обеспечить точность измерения порядка 20 К в диапазоне высот 25–50 км.

Раздел 3.2 посвящен измерениям с использованием анализатора спектра Aqris. Показано, что этот вариант установки в лучших случаях позволяет обеспечить измерения с точностью 5–10 К в диапазоне высот 10–55 км. Проведено сравнение полученных результатов с данными спутниковых измерений MLS Aura и COSMIC. Показано, что полученные данные достаточно хорошо совпадают с данными этих источников (последние попадают в полученный 95% доверительный интервал). В разделе 3.2.2 исследована зависимость положения верхней границы восстановления от влияния эффекта Зеемана. Показано, что правильный выбор направления измерений (квaziперпендикулярно силовым линиям магнитного поля Земли), от которого зависит это влияние, позволяет поднять верхнюю границу области восстановления до высоты 55 км. В разделе 3.2.3 исследовано положение нижней границы восстановления от используемого спектрального диапазона. Показано, что включение в исследуемый спектр части, не содержащей разрешающихся линий, позволяет опустить нижнюю границу до высоты 10 км, что дает возможность контролировать положение и температуру тропопаузы на всех широтах. В разделе 3.2.5 приведено исследование результата измерений температурного профиля во время солнечного затмения. Показано, что в исследуемом диапазоне высот с получаемой точностью эффекты солнечного затмения не влияют на температурный профиль атмосферы.

В **заключении** сформулированы основные результаты работы.

Приложение содержит табличные величины, используемые в модели MPM (Millimeter Wave Propagation Model, Liebe-Rosenkranz) для расчета коэффициентов поглощения микроволнового радиоизлучения в атмосфере.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработана методика мониторинга вертикального профиля температуры стратосферы и нижней мезосферы по наземным измерениям спектра собственного излучения атмосферы в диапазоне частот, расположенном на низкочастотном склоне 5-миллиметровой полосы поглощения молекулярного кислорода.
2. Создан и программно реализован алгоритм решения некорректной обратной задачи восстановления температурного профиля средней атмосферы по наземным измерениям спектра собственного излучения атмосферы в миллиметровых линиях поглощения молекулярного кислорода.
3. Разработан и создан спектрорадиометрический комплекс для измерений температурного профиля атмосферы с помощью предложенной методики. Экспериментально продемонстрировано, что с помощью созданного ком-

плекса возможно восстановление температурного профиля атмосферы в интервале высот от 10 км до 55 км с точностью порядка 5 К.

4. Экспериментально исследована зависимость точности и высотного интервала восстановления профиля температуры от ширины спектрального интервала и направления луча зрения относительно направления магнитного поля Земли. Продемонстрировано, что использование для восстановления двух резонансных линий повышает точность восстановления, а учет заключенной между спектральными линиями полосы частот позволяет понизить нижнюю границу интервала восстановления до 10–12 км. Показано, что верхняя граница интервала восстановления при зондировании поперек направления магнитного поля Земли поднимается до 55 км (вдоль – расположена на высоте 45 км).

СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Brasseur G., Solomon S. *Aeronomy of the middle atmosphere*. Norwell, Mass: D. Reidel, 1986. P. 452.
2. Моченева О. С., Ерухимова Т. Л., Суворов Е. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 1995. Т. 38., No. 8. С. 751.
3. Митра С.К. *Верхняя атмосфера*. М., ИИЛ, 1995.
4. Ракетные исследования верхней атмосферы (обзор) “Вопросы ракетной техники”, No. 5, 1956.
5. Ed. by Boyd R. L. F., Seaton M. J. *Rocket Exploration of the Upper Atmosphere*. Pergamon Press. Ld, 1954.
6. Зуев В. Е. *Лазер-метеоролог*. Л.: Гидрометеиздат. 1974. 179с.
7. Захаров В. М., Костко О. К. *Метеорологическая лазерная локация*. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 222 с.
8. *Лазерный контроль атмосферы*. /Под ред. Э. Дэ Хинкли. М.: Мир. 1979. 416 с.
9. Межерис Р. *Лазерное дистанционное зондирование*. М.: Мир. 1987. 550 с.
10. Шефов Н. Н., Семенов А. И., Хомич В. Ю. // *Излучение верхней атмосферы – индикатор ее структуры и динамики*. М.: ГЕОС, 2006.
11. Кондратьев К. Я., Тимофеев Ю. М. *Термическое зондирование атмосферы со спутников*. Л.: Гидрометеиздат, 1970. 410 с.
12. Малкевич М. С. *Оптические исследования атмосферы со спутников*. М.: Наука. 1973. 303 с.
13. <http://mirador.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/mirador/presentNavigation.pl?tree=project&project=MLS>
14. Waters J. W., Froidevaux L., Harwood R. S., et al. // *IEEE Trans. Geos. Remote Sens.* 2006. V44. No. 5. P. 10754.
15. Blackwell W. J. // *IEEE Trans. Geos. Remote Sens.* 2005. V. 43. No. 11. P. 2535.
16. Von Engeln A., Buhler S. // *J. Geophys. Res. D.* 2002. V. 107, No. 19. P. 4395.
17. Troitskij F. V., Gaikovich K. P., Gromov V. D., et al. // *IEEE Trans. Geos. Remote Sens.* 1993. V. 31. No. 1. P. 116.
18. Наумов А. П., Ошарина Н. Н., Троицкий А. В. // *Изв. Вузов. Радиофизика*. 1999. Т. 52. No. 1, С. 45.
19. Liebe H. J. // *J. Infrared Millimeter Waves*. 1989. V. 10. P. 631.
20. Liebe H. J., Rosenkranz P. W., Hufford G. A. // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*. 1992. V. 48, No. 5-6, P. 629.
21. Rosenkranz P. W. // *Radio Science*. 1999. V. 34. P. 1025.

22. Tretyakov M. Yu., Koshelev M. A., Dorovskikh V. V., et al. // *J Molec. Spec.* 2005. V. 231. P. 1.
23. Waters J. W. // *Nature*. 1973. V. 242. P. 506.
24. Маркина Н. Н. // *Радиотехника и электроника*. 1996. Т. 41. No. 2. С. 172.
25. Rodgers C. D. // *Rev. Geophys. and Space Phys.* 1976. V. 14. P. 609-624.
26. Rodgers C. D. // *Adv. Space Res.* 1998. V. 21. No. 3. P. 361-367.
27. Rodgers C. D. // *J. Geophys. Res. D.* 1990. V. 95. No. 5. P. 5587.
28. Gaikovich K.P. // *Digest of IGARSS'94, Pasadena, USA, August 8-12, 1994*. V. 4. P. 1901.
29. Мольков Я. И., Мухин Д. Н., Суворов Е. В., Фейгин А. М. // *Изв. вузов. Радиофизика*. 2003. Т. 46. No. 8-9. С. 752.
30. Mukhin D. N., Feigin A. M., Molkov Ya. I., Suvorov E. V. // *Adv. Space Res.* 2006. V. 37. No. 12. P. 2292.
31. Chahine M. T. // *J. Opt. Soc. Am.* 1968. V. 58. No. 12. P. 1634.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- 1А. Караштин Д. А., Мухин Д. Н., Скалыга Н. К., Фейгин А. М. Восстановление вертикального профиля температуры стратосферы по данным наземных измерений спектра собственного излучения атмосферы в миллиметровых линиях поглощения молекулярного кислорода // *Изв. РАН. Сер. Физическая*, 2009. Т. 73, № 12. С. 1755-1761.
- 2А. Швецов А. А., Демкин В. М., Караштин Д. А., Скалыга Н. К., Федосеев Л. И. Микроволновый спектрорадиометрический комплекс для дистанционного исследования термической структуры стратосферы // *Изв. ВУЗов. Радиофизика*. 2009. Т. LII. № 8. С. 671-677.
- 3А. Караштин Д. А., Мухин Д. Н., Скалыга Н. К., Фейгин А. М. Байесов подход к восстановлению вертикального профиля температуры стратосферы по данным наземных измерений солнечного излучения в миллиметровых линиях поглощения молекулярного кислорода // *Изв. ВУЗов. Радиофизика*. 2009. Т. LII. № 10. С. 785-793.
- 4А. Швецов А. А., Федосеев Л. И., Караштин Д. А., Большаков О. С., Мухин Д. Н., Скалыга Н. К., Фейгин А. М. Измерение профиля температуры средней атмосферы с помощью наземного радиометрического комплекса // *Изв. ВУЗов. Радиофизика*. 2010. Т. LIII. №. 5-6. С. 356-361.
- 5А. Швецов А. А., Федосеев Л. И., Большаков О. С., Караштин Д. А. Микроволновый спектрорадиометр для наземного комплекса температурного зондирования стратосферы // *Приборы и техника эксперимента*. 2011. № 1. С. 134-135.
- 6А. Караштин Д. А., Мухин Д. Н., Скалыга Н. К., Федосеев Л. И., Фейгин А. М., Швецов А. А. Микроволновый спектрорадиометр для наземных измерений термической структуры стратосферы // *Тезисы докладов «Одиннадцатой всероссийской школы-конференции молодых ученых «Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические эффекты»*. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2007.
- 7А. Караштин Д. А., Мухин Д. Н., Скалыга Н. К., Федосеев Л. И., Фейгин А. М., Швецов А. А. Микроволновое дистанционное зондирование вертикального температурного профиля стратосферы // *Труды «Одиннадцатой научной конференции по радиофизике»*, электронное издание, Нижний Новгород, 7 мая 2007 года.
- 8А. Караштин Д. А., Мухин Д. Н., Скалыга Н. К., Федосеев Л. И., Фейгин А. М., Швецов А. А. Наземное зондирование высотного профиля температуры стратосферы по спектру яркостной температуры атмосферы в миллиметровом диапазоне длин волн // *Тезисы докладов 14-й научной школы «Нелинейные волны – 2008»*, с. 69. Нижний Новгород, ИПФ РАН, 2008.

ОГЛАВЛЕНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

- 9А. Караштин Д. А., Мухин Д. Н., Скалыга Н. К., Федосеев Л. И., Фейгин А. М., Швецов А. А. Наземное микроволновое зондирование высотного профиля температуры стратосферы // Тезисы докладов «12-ой всероссийской школы-конференции молодых ученых «Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы», с. 89. Борок Ярославской области, 20-22 мая 2008 года.
- 10А. Караштин Д. А., Мухин Д. Н., Скалыга Н. К., Фейгин А. М. О восстановлении вертикального профиля температуры стратосферы по данным наземных измерений солнечного излучения в миллиметровых линиях поглощения молекулярного кислорода // Труды 4-й Всероссийской научной школы и конференции «Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред», Муром, 30.06-3.07.2009г.
- 11А. Караштин Д.А., Мухин Д.Н., Скалыга Н.К., Фейгин А.М. Восстановление вертикального профиля температуры средней атмосферы по данным наземных измерений солнечного излучения в миллиметровых линиях поглощения молекулярного кислорода // Тезисы докладов 14-й Нижегородской сессии молодых ученых. Нижний Новгород, 2009.
- 12А. Караштин Д. А., Мухин Д. Н., Скалыга Н. К., Фейгин А. М. Байесов подход к восстановлению вертикального профиля температуры средней атмосферы по данным наземных измерений солнечного излучения в миллиметровых линиях поглощения молекулярного кислорода // Тез. докл. 13-й Межд. конф. молодых ученых «Состав атмосферы. Климатические эффекты. Атмосферное электричество». М., 2009.
- 13А. Караштин Д. А., Мухин Д. Н., Скалыга Н. К., Фейгин А. М. Восстановление вертикального профиля температуры стратосферы по данным наземных измерений спектра собственного излучения атмосферы в миллиметровых линиях поглощения молекулярного кислорода // Тезисы докладов 12-й Всероссийской школы-семинара «Физика и применение микроволн», Звенигород, 25-30 мая 2009 г.
- 14А. Караштин Д. А., Мухин Д. Н., Скалыга Н. К., Федосеев Л. И., Фейгин А. М., Швецов А.А. Микроволновый спектрорадиометр для исследования термической структуры средней атмосферы // Тезисы XV Научной школа «Нелинейные волны – 2010». Нижний Новгород, 6 – 12 марта 2010.
- 15А. Караштин Д. А., Большаков О. С., Мухин Д. Н., Скалыга Н. К., Федосеев Л. И., Швецов А. А., Фейгин А. М. О диапазоне высот восстановления вертикального профиля температуры атмосферы по данным наземных измерений собственного излучения в миллиметровых линиях поглощения молекулярного кислорода // Тез. докл. Всерос. школы-конф. молодых ученых «Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические эффекты», Нижний Новгород, 2010.
- 16А. Караштин Д. А., Большаков О. С., Мухин Д. Н., Скалыга Н. К., Федосеев Л. И., Швецов А. А., Фейгин А. М. О диапазоне высот восстановления вертикального профиля температуры атмосферы по данным наземных измерений собственного излучения в миллиметровых линиях поглощения молекулярного кислорода // Труды XIV Всероссийской школы-конференции молодых ученых «Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические эффекты». Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2010. С. 81-83.
- 17А. D. A. Karashtin, D. N. Mukhin, N. K. Skalyga, A. A. Shvetsov, L. I. Fedoseev, O. S. Bolshakov, A. M. Feigin. Complex for ground-based sounding of atmosphere: Setup description, results of first observation // Microwave Signature 2010, 4-8 October, Florence, Italy. Book of Abstracts, p.69.
- 18А. D. A. Karashtin, D. N. Mukhin, N. K. Skalyga, A. A. Shvetsov, L. I. Fedoseev, O. S. Bolshakov, A. M. Feigin. Ground-based thermosounding of atmosphere: retrieval procedure // Microwave Signature 2010, 4-8 October, Florence, Italy. Book of Abstracts, p.66.

Введение	4
I. Спектрорадиометрический комплекс для измерения температурного профиля	14
1.1. Введение.....	14
1.2. Требования к точности измерения спектра яркостной температуры	16
1.2.1. Метод решения прямой задачи.....	17
1.2.2. Результаты решения прямой задачи	25
1.2.3. Оценка чувствительности спектра яркостной температуры к изменениям температуры атмосферы.....	32
1.3. Антенная система и система калибровки.....	38
1.3.1. Антенная система	38
1.3.2. Система калибровки.....	42
1.3.2.1. Погрешность, обусловленная калибровкой по внешним эталонам.....	43
1.3.2.2. Смещение оценки величины яркостной температуры, связанное с калибровкой по внешним эталонам.....	46
1.3.2.3. Погрешность, обусловленная калибровкой с использованием модулятора-калибратора.....	48
1.4. Приемник	51
1.4.1. Необходимые характеристики блока приемника и его реализация.....	51
1.4.2. Тестирование блока приемника	52
1.5. Анализатор спектра.....	52
1.6. Выводы.....	56
II. Решение обратной задачи восстановления температурного профиля.....	58
2.1. Введение.....	58
2.2. Общее описание байесова подхода к решению обратной задачи	60
2.3. Модели аппроксимации температурного профиля	63
2.4. Модельная задача восстановления профиля температуры по данным наземных измерений спектра солнечного излучения	65
2.5. Модельная задача восстановления профиля температуры по данным наземных измерений спектра собственного излучения атмосферы	72
2.5.1. Особенности получения статистических характеристик температурного профиля из апостериорной плотности вероятности в случае использования спектра собственного излучения атмосферы....	72
2.5.2. Приближенное решение задачи с использованием гауссовой аппроксимации апостериорной плотности вероятности.....	81
2.5.3. Решение задачи с использованием полной процедуры сэмплирования апостериорной плотности вероятности	83

2.5.4. Сравнение кусочно-однородной функции аппроксимации температурного профиля с функцией аппроксимации в виде искусственной нейронной сети	85
2.5.5. Решение модельной задачи для случая использования цифрового анализатора спектра Asqiris	86
2.6. Выводы	88

III. Исследование возможностей спектрометрического комплекса на основе экспериментальных данных90

3.1. Пробные измерения; возможности восстановления с использованием 32-канального набора фильтров.....	90
3.2. Измерения с анализатором спектра Asqiris	93
3.2.1. Пробная серия измерений с анализатором спектра Asqiris	93
3.2.2. Оценка влияния эффекта Зеемана на результат восстановления температурного профиля	97
3.2.3. Влияние используемого диапазона частот измеренного спектра на результат восстановления температурного профиля	100
3.2.4. Сравнение результатов измерений с другими источниками данных	109
3.2.5. Качественная экспериментальная оценка влияния эффектов солнечного затмения на профиль температуры атмосферы.....	115
3.2.6. Обсуждение	118
3.3. Выводы	119

Заключение..... 121

Приложение123

Работы, содержащие материалы диссертации126

Литература130

КАРАШТИН Дмитрий Анатольевич

**ПАССИВНОЕ НАЗЕМНОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ
ТЕРМИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ СРЕДНЕЙ АТМОСФЕРЫ
В МИЛЛИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН**

Автореферат

Подписано к печати 15.7.2011 г.
Формат 60 × 90 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 1,0.
Тираж 100 экз. Заказ № 67 (2011).

Отпечатано в типографии Института прикладной физики РАН,
603950 г. Н.Новгород, ул. Ульянова, 46