

УДК 621.382.2

ИЗМЕРЕНИЕ ПРОФИЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ СРЕДНЕЙ АТМОСФЕРЫ С ПОМОЩЬЮ НАЗЕМНОГО СПЕКТРОРАДИОМЕТРИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

*А. А. Швецов, Л. И. Федосеев, Д. А. Караштин, О. С. Большаков, Д. Н. Мухин,
Н. К. Скалыга, А. М. Фейгин*

Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия

Разработан и изготовлен спектрометрический комплекс для наземного термического зондирования средней атмосферы. Проведены наблюдения собственного излучения атмосферы в диапазоне, включающем две линии (27– и 29–) спин-вращательных переходов молекулярного кислорода. По данным наблюдений восстановлены профили температуры атмосферы в интервале высот 10÷55 км.

ВВЕДЕНИЕ

Термическая структура стратосферы и верхней тропосферы является одной из важнейших характеристик атмосферы, определяющих происходящие в ней динамические и фотохимические процессы. Данные о высотном распределении температуры атмосферы в настоящее время получают почти исключительно дистанционными методами, основным из которых является радиометрическое зондирование со спутников в линиях спин-вращательных переходов атмосферного кислорода, образующих так называемую полосу поглощения, центрированную к длине волны 5 мм. Такие измерения позволяют восстанавливать профиль температуры в очень широком диапазоне высот: от приземного слоя до мезосферы. Однако они не обеспечивают непрерывное получение данных над областью с поперечным размером 10÷100 км, необходимое для исследования быстро протекающих локальных процессов. Отметим, что ещё до появления спутникового зондирования указанный диапазон уже использовался для наземного термического зондирования атмосферы. К настоящему времени практически решена задача измерения температуры атмосферы с поверхности Земли таким методом для её нижних слоёв (до высот 7÷10 км) [1–3]. Возможности наземного пассивного зондирования средней атмосферы обсуждаются также довольно давно [2, 4, 5], но в силу ряда аппаратных и алгоритмических причин, подробно рассмотренных в [2, 5], реализовать термическую диагностику средней атмосферы с поверхности Земли до сих пор не удавалось. За последние годы в ИПФ РАН был разработан метод, позволяющий восстановить высотный профиль температуры средней атмосферы по результатам наземного наблюдения излучения в линиях на склоне полосы поглощения [6, 7] и создан комплекс для такого зондирования.

В данной работе описаны особенности устройства и характеристики вышеупомянутого комплекса для дистанционного температурного зондирования атмосферы, а также приведены результаты первых проведённых с его помощью экспериментов по наблюдению собственного излучения атмосферы и восстановлению по полученным данным профилей температуры в интервале высот 10÷55 км.

1. СПЕКТРОРАДИОМЕТРИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС

Комплекс включает в себя следующие основные блоки: антенную систему, модулятор-калибратор, блок приёмника, цифровой анализатор спектра, систему управления, сбора и обработки данных на базе персонального компьютера (рис. 1).

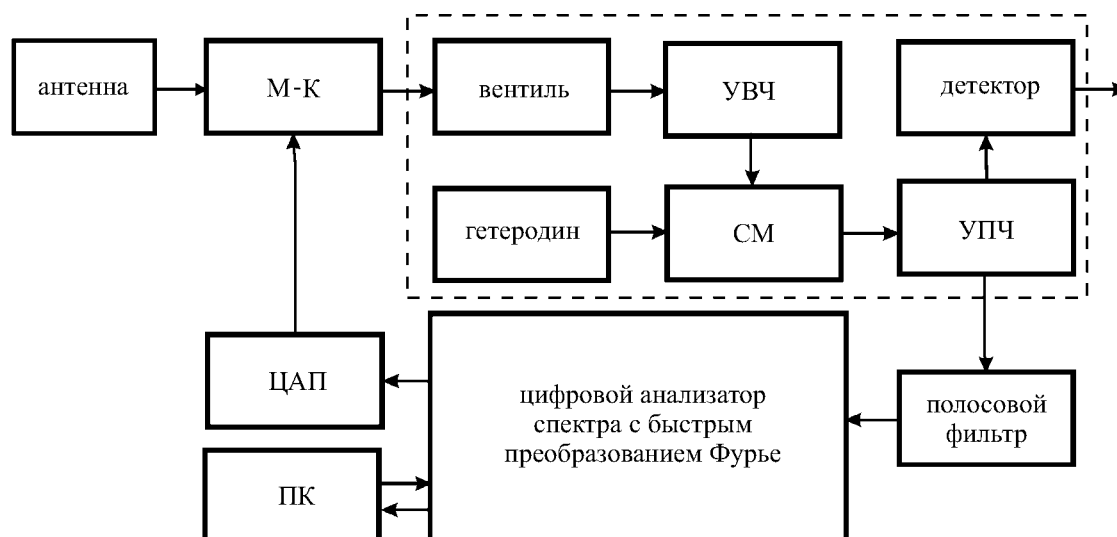


Рис. 1. Блок-схема комплекса для наземного термического зондирования атмосферы; здесь М-К — модулятор-калибратор, УВЧ и УПЧ — усилители высокой и промежуточной частоты соответственно, СМ — смеситель на базе диода с барьером Шоттки, ЦАП — цифро-аналоговый преобразователь, ПК — персональный компьютер

Антенная система состоит из внеосевой вырезки из параболоида вращения с облучателем в виде конического рупора с изломом, обеспечивающего малые потери на переоблучение зеркала и низкий уровень боковых лепестков. Ширина диаграммы направленности по половинному уровню мощности составляет $3,3^\circ$.

Модулятор-калибратор представляет собой управляемое током волноводное устройство с рядом параллельных цепочек диодов с барьером Шоттки (ДБШ) [8], обеспечивающее или подключение ко входу приёмника при нулевом токе антенны (с потерями порядка 0,5 дБ), или подачу на него калибровочного шумового сигнала, эффективная температура которого может изменяться от 155 до 350 К в зависимости от величины тока [9].

На входе приёмника (выделен пунктиром на рис. 1) используется малощумящий усилитель высокой частоты (УВЧ) на базе интегральной микросхемы СНА2159 с шумовой температурой около 850 К. Выходная полоса УВЧ ограничена с помощью режекторного фильтра диапазоном $52,45 \div 54,50$ ГГц с целью подавления зеркального канала следующего за усилителем супергетеродина. Уровень подавления сигнала в зеркальной полосе не менее 22 дБ.

Гетеродинный сигнал с частотой 52,39709 ГГц, подаваемый на ДБШ-смеситель, формируется синтезатором и последовательной цепочкой умножителей частоты и усилителей мощности (стабильность и точность установки частоты не хуже 10^{-7}). После усилителя промежуточной частоты с полосой $0,1 \div 2,0$ ГГц одна часть выходного сигнала подаётся на квадратичный детектор с усилителем постоянного тока, а другая через низкочастотный фильтр с полосой пропускания $0,1 \div 1,0$ ГГц — на цифровой анализатор спектра. Приёмник вместе с антенной системой размещён в термостатированном кожухе с радиопрозрачным окном. Шумовая температура приёмника, измеренная со входа антенны, не превышает 1 400 К.

Цифровой анализатор спектра «Acqiris» (модель АС240), работающий в режиме быстрого преобразования Фурье, осуществляет непрерывную параллельную работу 16 384 эффективных спектральных каналов в полосе 1 ГГц [10], обеспечивая частотное разрешение 61,04 кГц. Включённый между усилителем промежуточной частоты и анализатором спектра фильтр с резкой высокочастотной границей предотвращает искажения спектра, связанные с дискретностью используемого преобразования Фурье [10].

Система управления контролирует работу модулятора-калибратора, сбор и обработку данных с помощью модуля аналого-цифрового и цифро-аналогового преобразования (АЦП-ЦАП) типа ЛА2-USB, сопряжённого с персональным компьютером. Соответствующее программное обеспечение позволяет в режиме реального времени получать спектр излучения атмосферы, визуализировать и записывать в файлы спектры яркостной температуры, варьировать полосы анализа, время накопления сигналов, параметры калибровочных сигналов, т. е. полностью управлять процессом измерений.

2. АЛГОРИТМ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ВЫСОТНОГО ПРОФИЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

Алгоритм восстановления основан на байесовом подходе к решению некорректных обратных задач, позволяющем статистически корректно учесть как измерительный шум, неизбежно присутствующий в данных, так и априорную информацию о восстанавливаемом профиле, необходимую для регуляризации задачи. Данный алгоритм реализован с помощью модели высотного профиля температуры в форме искусственной нейронной сети. Возможности алгоритма были продемонстрированы на модельных задачах как для существенно более простого случая восстановления вертикального профиля температуры атмосферы по данным наземного наблюдения солнечного излучения в линии поглощения молекулярного кислорода [6], так и для случая регистрации и спектрального анализа собственного излучения атмосферы в линии спин-вращательного перехода кислорода 27_- [7]. В [6, 7] показано, что выбранная аппроксимация в виде искусственной нейронной сети позволяет разделить параметры регуляризации, отвечающие за гладкость получаемого профиля температуры, и параметры, определяющие число участков его монотонности. Это даёт возможность ослаблять регуляризацию с целью предотвращения смещённости решения. Такое преимущество особенно важно при восстановлении профилей с большими градиентами температуры. В целом аппроксимация в виде нейронной сети позволяет достигать лучшей, чем при обычно используемой кусочно-однородной модели, точности восстановления. Для описания атмосферного поглощения в алгоритме используется модель Либе–Розенкранца [11].

Поскольку описанный выше комплекс позволяет наблюдать достаточно широкий участок спектра излучения атмосферы, был написан численный код для восстановления профиля температуры по результатам наблюдений в диапазоне $52,7 \div 53,1$ ГГц, включающем линию перехода 27_- (53,066 ГГц) и участок склона полосы без разрешающихся линий, а также для случая наблюдений в ещё более широком частотном интервале, захватывающем две спектральные линии кислорода, 27_- (53,066 ГГц) и 29_- (52,542 ГГц).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

В марте–апреле 2010 года с помощью описанного в разделе 1 комплекса был выполнен цикл измерений собственного излучения атмосферы над Нижним Новгородом. Измерения излучения в диапазоне частот $52,45 \div 53,2$ ГГц, включающем две спектральные линии молекулярного кислорода (52,542 и 53,066 ГГц) и часть склона 5-миллиметровой кислородной полосы поглощения между ними, велось круглосуточно под зенитным углом 40° через затянутые тонкой лавсановой плёнкой окна, ориентированные на север и юг. Использование двух направлений зондирования позволило получать данные наблюдений при разной ориентации луча зрения по отношению к магнитному полю Земли: приблизительно вдоль силовых линий и почти поперёк к ним. С целью контроля стабильности работы комплекса один раз в сутки проводилась его дополнительная калибровка по излучению двух согласованных нагрузок (находящейся при комнатной температуре

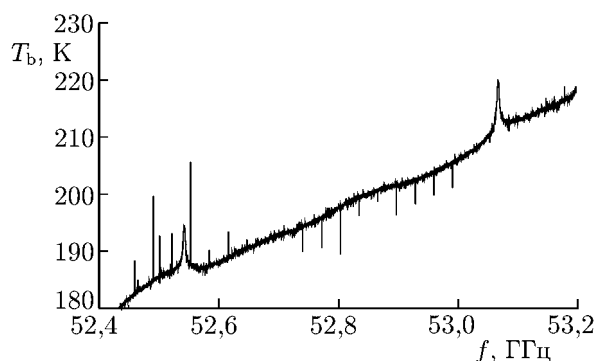


Рис. 2. Спектр яркостной температуры T_b атмосферы (измерения над Нижним Новгородом 26.03.2010, время накопления сигнала 96 минут)

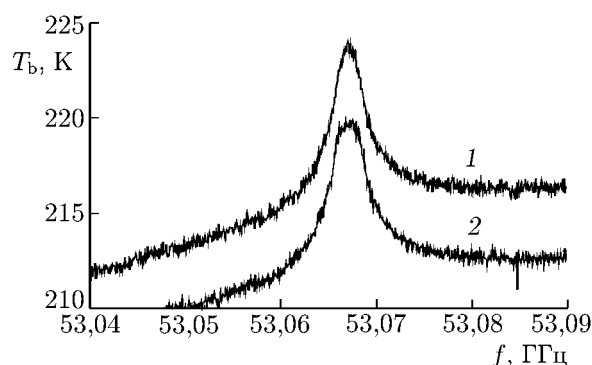


Рис. 3. Спектры линии 27_ при наблюдении почти перпендикулярно магнитному полю (кривая 1; измерения 08.04.2010, время накопления сигнала 180 минут) и почти параллельно магнитному полю (кривая 2; измерения 26.03.2010, время накопления сигнала 180 минут)

и охлаждаемой кипящим азотом). На рис. 2 приведён пример записи наблюдавшегося в течение приблизительно двух часов спектра яркостной температуры атмосферы в направлении, примерно параллельном магнитному полю.

При сравнении результатов зондирования под разными углами к магнитному полю (рис. 3) наибольшая ширина линий получилась при наблюдении почти вдоль магнитного поля. Такой факт, очевидно, обусловлен эффектом Зеемана: при наблюдении вдоль силовых линий («продольный» эффект Зеемана) уширение получается больше, чем при наблюдении перпендикулярно силовым линиям («поперечный» эффект Зеемана) [4, 5].

По полученным спектрам были восстановлены высотные профили температуры. При использовании для восстановления участка спектра в пределах одной линии ($53,0 \div 53,1$ ГГц) интервал восстановления (с условием, что 95-процентный доверительный интервал не больше 10 К) ограничен снизу высотой 20 км. При расширении полосы анализа до $52,7 \div 53,1$ ГГц эта граница опускается до 10 км. При этом 95-процентный доверительный интервал на высотах $30 \div 40$ км составляет 5 К. Положение верхней границы восстановления профиля температуры по данным наземного зондирования (наряду с погрешностью измерений и точностью решения обратной задачи восстановления) определяется высотой, где уширение линии перехода молекулярного кислорода, обусловленное эффектом Зеемана, начинает преобладать над столкновительным уширением. При использовании феноменологического выражения для зеемановского уширения, примененного в модели Либе–Розенкранца, и наблюдении в направлении почти вдоль силовых линий магнитного поля (при условии, что 95-процентный доверительный интервал не больше 10 К) восстановление возможно до высот порядка 45 км, а при наблюдении в перпендикулярном к силовым линиям направлении — до высот порядка 55 км. Более аккуратный учёт эффекта Зеемана позволит поднять верхнюю границу восстановления и будет выполнен в отдельной работе.

На рис. 4 приведён пример восстановления высотного профиля температуры атмосферы по спектру отдельной линии и по линии с прилегающим участком склона полосы. На рис. 4 приведены наиболее вероятные профили температуры и границы 95-процентного доверительного интервала, а также результаты спутникового зондирования для того же дня [12]. Результаты восстановления хорошо согласуются со спутниковыми данными, несмотря на то, что последние усреднены по очень большой площади (порядка 350 км^2). Отличие в гладкости профилей может быть связано с различиями моделей профилей температуры, используемых нами и при обработке

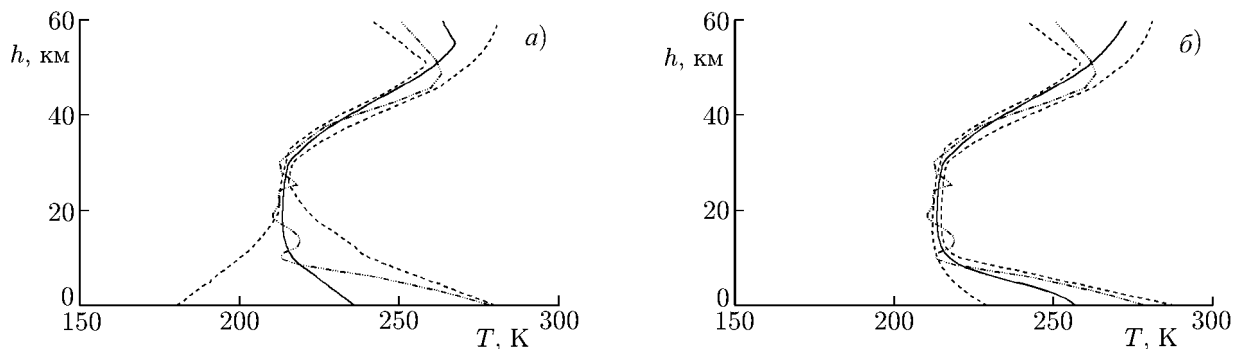


Рис. 4. Результаты восстановления высотного профиля температуры атмосферы 26.03.2010 по спектру отдельной линии (а) и по линии с прилегающим участком склона полосы (б). Сплошная линия соответствует наиболее вероятному профилю, пунктирные линии отмечают 95-процентный доверительный интервал, штрих-пунктирная линия — спутниковые данные

спутниковых данных (спутниковые профили обычно восстанавливаются с использованием кусочно-однородной модели). К сожалению, в [12] приведено недостаточно информации, чтобы оценить ошибку восстановления по спутниковым данным.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан и изготовлен лабораторный образец спектрометрического комплекса для наземного термического зондирования средней атмосферы, позволяющий на основе измеренных спектров собственного излучения атмосферы в диапазоне частот $52,45 \div 53,2$ ГГц восстанавливать вертикальное распределение температуры в стратосфере и верхней тропосфере.

С помощью комплекса выполнен цикл круглосуточных наблюдений собственного излучения атмосферы при двух ориентациях направления зондирования относительно магнитного поля Земли.

Восстановлены профили температуры атмосферы по данным наблюдений в интервале высот $10 \div 55$ км. Полученные профили хорошо согласуются со спутниковыми данными.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 07–05–00595), Программы фундаментальных исследований ОФН РАН «Проблемы радиофизики» (проекты 3.4, 4.1, 4.5), Программы фундаментальных исследований ОФН РАН «Физика атмосферы: электрические процессы, радиофизические методы исследования» (проекты 2.1, 2.3, 2.4), ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы (госконтракты П2318 от 16 ноября 2009 года и 02.740.11.0732 от 05 апреля 2010 года).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Troitskij A. V., Gaikovich K. P., Gromov V. P., et. al. // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 1993. V. 31, No. 1. P. 116.
2. Наумов А. П., Ошарина Н. Н., Троицкий А. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 1999. Т. 42, № 1. С. 45.
3. Троицкий А. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 1986. Т. 29, № 8. С. 87.
4. Waters J. W. // Nature. 1973. V. 242, No. 5399. P. 506.
5. Маркина Н. Н. // Радиотехника и электроника. 1996. Т. 41, № 2. С. 175.

6. Караштин Д. А., Мухин Д. Н., Скалыга Н. К., Фейгин А. М. // Изв. вузов. Радиофизика. 2009. Т. 52, № 10. С. 779.
7. Караштин Д. А., Мухин Д. Н., Скалыга Н. К., Фейгин А. М. // Изв. РАН. Сер. физическая. 2009. Т. 73, № 12. С. 1755.
8. Федосеев Л. И., Божков В. Г., Геннеберг В. А. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2007. Т. 50, № 10–11. С. 948.
9. Федосеев Л. И., Швецов А. А., Шкаев А. П. и др. // Материалы международной конф. «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь: Изд-во «Вебер», 2008. Т. 2. С. 878.
10. Müller S. C., Kämpfer N., Monstein C., et al. // Proc. SPIE. 2005. V. 5979. P. 280.
11. Rosenkranz P. W. // Radio Sci. 1999. V. 34. P. 1025.
12. <http://mirador.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/mirador/presentNavigation.pl?tree=project&project=MLS>

Поступила в редакцию 6 июня 2010 г.; принята в печать 30 июня 2010 г.

MEASUREMENT OF THE MIDDLE-ATMOSPHERE TEMPERATURE PROFILE USING A GROUND-BASED SPECTRORADIOMETER FACILITY

*A. A. Shvetsov, L. I. Fedoseev, D. A. Karashtin, O. S. Bolshakov, D. N. Mukhin, N. K. Skalyga, and
A. M. Feigin*

The spectroradiometer facility for ground-based thermal sounding of the middle atmosphere is developed and manufactured. Observation of the atmospheric self-radiation in the range including two lines (27₋ and 29₋) of spin-rotational transitions of molecular oxygen is performed. The atmospheric-temperature profiles in the altitude interval 10–55 km are recovered from the observation data.