

УДК 621.382.2

НАЗЕМНОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ СРЕДНЕЙ АТМОСФЕРЫ В ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ 50÷60 ГГц

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

Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия

С помощью спектрометрического комплекса выполнены измерения спектров собственного излучения атмосферы в диапазоне частот 52,4÷53,2 ГГц. По полученным данным выполнено восстановление профилей температуры в интервале высот 10÷55 км. Восстановленные высотные профили температуры хорошо согласуются с результатами, полученными другими методами.

ВВЕДЕНИЕ

Термодинамическая температура воздуха является одним из важнейших параметров, влияющих на протекание динамических и химических процессов в атмосфере. Это определяет особое место исследований термической структуры среди множества задач физики атмосферы. Средняя атмосфера является ключевым компонентом климатической системы, поэтому большое значение придаётся методам и средствам получения данных о её термической структуре. Информация о вертикальном распределении температуры в средней атмосфере имеет также большое значение для процедуры восстановления распределения малых газовых составляющих (в т. ч. озона) по данным пассивного дистанционного зондирования.

Измерение температуры на всех высотах, кроме нижних слоёв, проводится практически исключительно дистанционными методами. Одним из таких методов является пассивное радиозондирование в полосе спин-вращательных переходов молекулярного кислорода (диапазон частот 50÷60 ГГц). Использование именно собственного радиоизлучения молекулярного кислорода определяется существенной зависимостью его интенсивности от термодинамической температуры, с одной стороны, и высокой стабильностью относительной концентрации смеси O_2 на всех высотах вплоть до уровня 90 км, с другой. Основной объём информации при использовании метода пассивного радиозондирования получается из спутниковых измерений, с помощью которых исследуют глобальную термическую структуру средней атмосферы Земли. В свою очередь, наблюдения с поверхности Земли позволяют решать задачу непрерывного получения данных о быстрых вариациях температуры (с характерными временами от десятков минут до нескольких часов) с горизонтальным разрешением 10÷100 км, что не могут обеспечить спутниковые наблюдения.

Пионерская работа [1] по наземному термическому зондированию в указанном диапазоне частот была выполнена около 40 лет назад с целью исследовать термическую структуру стратосферы. Тем не менее, к настоящему времени наибольшие успехи достигнуты при измерении профиля температуры тропосферы до высот 7÷10 км [2–4]. Что касается наземного пассивного радиозондирования термической структуры стратосферы, то, несмотря на ряд попыток разработать адекватную методику [1, 3, 5], вплоть до сегодняшнего дня задача не была решена. В [1] продемонстрирована возможность пассивного зондирования стратосферы путём наблюдения слабых линий на низкочастотном склоне (52÷54 ГГц) полосы спин-вращательных переходов молекулярного кислорода. Попытка сравнения экспериментальных данных с результатами решения

прямой задачи оказалась неудачной, в т. ч. из-за отсутствия на тот момент адекватной математической модели распространения электромагнитных волн данного диапазона в атмосфере. Позже попытка решения модельной задачи восстановления температуры стратосферы по собственному излучению кислорода в линии 27_{-} (53,0669 ГГц) была предпринята в работах [2, 5]. Несмотря на вывод о принципиальной возможности получения информации о термической структуре атмосферы на основании микроволнового зондирования, продвижения в построении адекватного алгоритма решения некорректной обратной задачи по регистрируемому интегральному сигналу достигнуто не было. Попытка модифицировать метод решения обратных задач, разработанный Шахиным для получения результата в линейном приближении [3], в условиях принципиально нелинейной связи измеряемой и восстанавливаемой величин не принесла желаемого результата. Отметим также, что создание приёмника с необходимыми параметрами, позволяющими извлечь информацию о термической структуре средней атмосферы из сигнала, формируемого на 95 % излучением нижних слоёв атмосферы, представляет собой отдельную нетривиальную задачу.

В настоящее время стало возможным преодолеть трудности, препятствовавшие реализации наземного термического радиозондирования средней атмосферы.

Во-первых, разработана и продолжает совершенствоваться модель МРМ (Millimeter-wave Propagation Model) [6], описывающая распространение в атмосфере электромагнитного излучения с необходимой точностью.

Во-вторых, в ИПФ РАН разработан и создан высокочувствительный спектрометр, позволяющий с высоким разрешением по частоте измерять спектр собственного излучения атмосферы на краю 6-миллиметровой полосы спин-вращательных переходов молекулярного кислорода в частотном диапазоне шириной 1 ГГц, включающем две резонансные линии излучения O_2 [7, 8].

В-третьих, в ИПФ РАН предложен новый алгоритм, позволяющий восстанавливать профиль температуры средней атмосферы с контролируемой точностью [7, 8], и создан реализующий его пакет программ.

Итогом стало выполнение наблюдений собственного излучения атмосферы и восстановлении профиля температуры в интервале высот 10÷55 км.

1. КОМПЛЕКС ДЛЯ НАЗЕМНОГО ТЕРМИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Для наземного термического зондирования средней атмосферы в ИПФ РАН используются две наиболее сильные линии, расположенные на длинноволновом склоне 6-миллиметровой полосы спин-вращательных переходов O_2 , и часть склона между ними. На центральных частотах этих линий 27_{-} (53,0669 ГГц) и 29_{-} (52,542 ГГц) радиояростная температура превышает на 8÷12 К фоновое значение на склоне, составляющее от 180 до 210 К. Такая малая интенсивность линий налагает особые требования на приёмную аппаратуру как по чувствительности, так и по спектральному разрешению. В [7–9] подробно описан созданный в ИПФ РАН спектрометрический комплекс, блок-схема которого приведена на рис. 1а. Антенная система комплекса (см. рис. 1б) представляет собой облучатель в виде конического рупора и внеосевую вырезку из парабооида вращения, которая поворачивается с помощью шагового двигателя вокруг оси рупора, что позволяет проводить наблюдения в трёх фиксированных положениях, обеспечивающих приём излучения атмосферы, нагрузки при температуре кипящего азота, нагрузки при температуре окружающего воздуха. Такая система позволяет периодически выполнять первичную абсолютную калибровку спектрометра. Для пересчёта измеряемого сигнала в яркостную температуру излучения атмосферы непосредственно в процессе измерений предусмотрена внутренняя калибровка с помощью модулятора-калибратора. Данный элемент совмещает функции модулятора и электрически управляемого шумового источника [10]. Ширина диаграммы

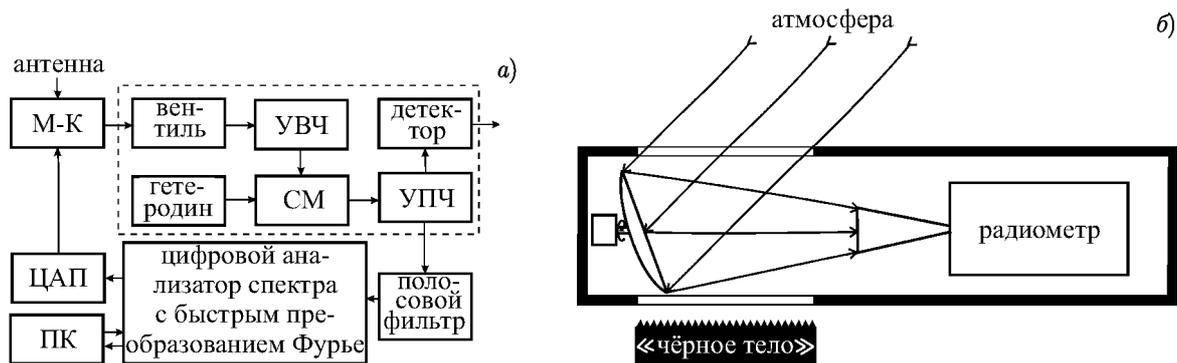


Рис. 1. Блок-схема спектрометрического комплекса и его антенной системы (М-К — модулятор-калибратор, СМ — смеситель, ПК — персональный компьютер, ЦАП — цифро-аналоговый преобразователь)

направленности антенны равна $3,5^\circ$. Шумовая температура приёмника, измеренная со входа антенны, составляет 1400 К; стабильность частоты гетеродина — порядка 10^{-7} ; полоса анализа — $52,45 \div 53,55$ ГГц; число спектральных каналов — 16384; спектральное разрешение — 61,04 кГц; флуктуационная чувствительность в режиме периодической автоматической калибровки 0,2 К при времени усреднения 60 мин. Указанное высокое спектральное разрешение обеспечивается включением в комплекс цифрового анализатора спектра «Acqiris» (AC240), осуществляющего быстрое преобразование Фурье. Созданное в ИПФ РАН оригинальное программное обеспечение позволяет в режиме реального времени полностью управлять процессом измерений: наблюдать спектр излучения атмосферы, визуализировать и записывать спектр яркостной температуры, варьировать полосу анализа, время накопления сигнала, параметры калибровочных сигналов.

С марта 2010 года началось выполнение экспериментов по термическому зондированию стратосферы с помощью спектрометрического комплекса. Приём собственного излучения атмосферы над Нижним Новгородом в диапазоне $52,45 \div 53,2$ ГГц (две линии переходов 27_+ , 29_+ и участок склона полосы между ними) осуществляется под зенитным углом 40° через затянутые

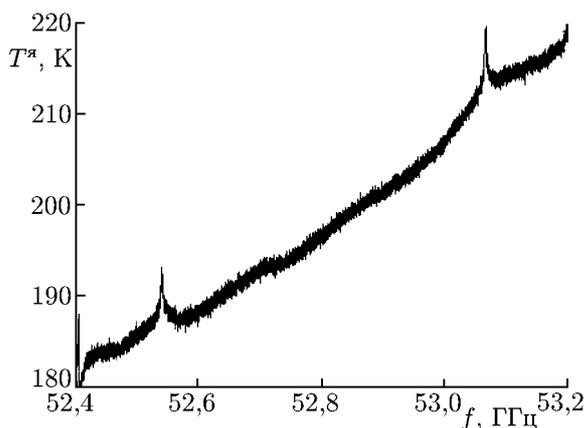


Рис. 2. Спектр яркостной температуры, полученный с помощью спектрометра 05.04.2010 (время усреднения 180 мин)

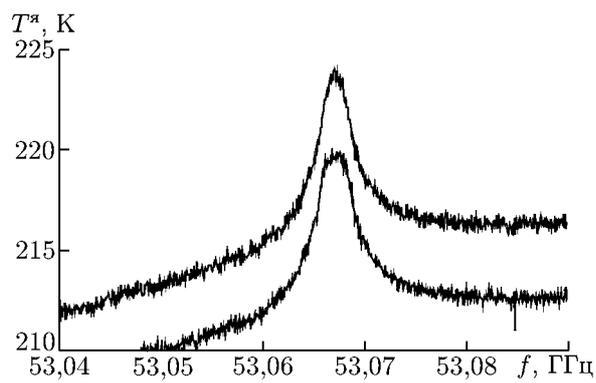


Рис. 3. Спектры линии 27_+ кислорода при наблюдении почти перпендикулярно магнитному полю (кривая 1, измерения 08.04.2010, время накопления сигнала 180 мин) и почти параллельно (кривая 2, измерения 26.03.2010, время накопления сигнала 180 мин)

лавсановой плёнкой окна, ориентированные на юг и на север. Последнее позволило провести измерения в двух направлениях по отношению к магнитному полю Земли: приблизительно вдоль силовых линий и почти поперёк к ним. В целом был выполнен достаточный объём наблюдений, включая две круглосуточные кампании.

В качестве примеров на рис. 2 приведён спектр излучения атмосферы (яркостной температуры), полученный 05.03.2010 со временем накопления сигнала 180 мин, а на рис. 3 — спектры вблизи перехода 27₋, полученные при наблюдении почти перпендикулярно магнитному полю (кривая 1) 08.04.2010 и приблизительно параллельно (кривая 2) 26.03.2010.

2. АЛГОРИТМ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ВЫСОТНОГО ПРОФИЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

Спектр яркостной температуры собственного излучения атмосферы $T^{\text{я}}(f_i)$, измеренный с поверхности Земли, связан с термодинамической температурой воздуха на разных высотах $T(h)$ выражением

$$T_i^{\text{я}}(f_i) = \int_0^{h_{\text{max}}} dz \frac{T(z)\eta[T(z), f_i]}{\cos \theta} \exp\left(-\int_0^z \frac{\eta[T(h), f_i]}{\cos \theta} dh\right) + \xi_i, \quad (1)$$

где $\eta[T(h), f_i]$ — коэффициент поглощения атмосферы в направлении наблюдения на высоте h и частоте f_i (соответствующей i -му каналу комплекса), который может быть вычислен с помощью модели МРМ (модель Либе—Розенкраца) [6]; h_{max} — верхняя граница слоя атмосферы, дающего существенный вклад в принимаемое на поверхности Земли излучение; ξ_i — погрешность измерений на соответствующей частоте, являющаяся случайной величиной с функцией совместного распределения вероятностей $P_{\xi}(\xi_1, \dots, \xi_n)$; θ — зенитный угол наблюдения.

Восстановление профиля температуры по данным наземного пассивного зондирования (решение интегрального уравнения (1)) является некорректной обратной задачей. Подынтегральное выражение принципиально нелинейно зависит от восстанавливаемой величины и, как отмечалось выше, попытка его линеаризовать [5] кардинально ухудшает качество восстановления (этот вопрос был специально исследован в [11]). В такой ситуации с физической точки зрения наиболее адекватным является байесов подход, который учитывает случайную природу погрешности измерения и предполагает вероятностное описание восстанавливаемой величины. В рамках данного подхода восстановление заключается в построении плотности вероятности ансамбля зависимостей $T(h)$ при условии, что в эксперименте получены данные $(T_i^{\text{я}}, f_i)_{i=1}^n$. Отбор решений («регуляризация») в процессе формирования ансамбля проводится на основе априорной информации о восстанавливаемой характеристике и статистических свойствах шума.

Очевидно, что для решения задачи необходимо провести её параметризацию, т. е. аппроксимировать профиль конкретным функциональным законом (моделью) $T(h, \boldsymbol{\mu})$, характеризуемым вектором параметров $\boldsymbol{\mu}$. В результате ищется апостериорная плотность вероятности параметров $P[\boldsymbol{\mu} | (T_i^{\text{я}}, f_i)]$, которая определяет статистическую значимость различных профилей температуры, позволяющих получить наблюдаемый спектр $(T_i^{\text{я}}, f_i)$. При её построении используется теорема Байеса, связывающая апостериорную и априорные условные плотности вероятности:

$$P[\boldsymbol{\mu} | (T_i^{\text{я}}, f_i)] \propto P[(T_i^{\text{я}}, f_i) | \boldsymbol{\mu}]P(\boldsymbol{\mu}), \quad (2)$$

где $P[(T_i^{\text{я}}, f_i) | \boldsymbol{\mu}]$ — плотность вероятности того, что модель с данным набором параметров генерирует наблюдаемый спектр. Вид этой функции, называемой часто правдоподобием, определяется априорными данными о шуме и в предположении об аддитивности шума, заложенном в

(1), имеет вид

$$P[(T_i^{\text{я}}, f_i) | \boldsymbol{\mu}] = P_{\xi} \left[T_i^{\text{я}} - \int_0^{h_{\text{max}}} T(z, \boldsymbol{\mu}) \eta[T(z, \boldsymbol{\mu}), f_i] \exp\left(-\int_0^z \eta[T(h, \boldsymbol{\mu}), f_i] dh\right) dz \right], \quad (3)$$

где $P_{\xi}(\xi_1, \dots, \xi_n)$ — функция совместного распределения вероятностей случайной величины, описывающей измерительный шум. Обычно предполагается, что шумы в различных каналах измерительного комплекса некоррелированы и нормально распределены с одинаковой дисперсией. В (3) $P(\boldsymbol{\mu})$ — априорная плотность вероятности параметров модели, которая включает имеющуюся априорную информацию о профиле и с помощью которой определяется класс интересующих нас решений. Функция априорного распределения параметров играет существенную роль в корректной регуляризации задачи, а её параметры определяют «жесткость» регуляризации.

Статистический ансамбль параметров модели, отвечающий апостериорной плотности вероятности $P[\boldsymbol{\mu} | (T_i^{\text{я}}, f_i)]$, формируется с помощью модифицированного алгоритма МСМС (Markov Chain Monte Carlo), подробно описанного в [12]. По нему рассчитывается соответствующий ансамбль вертикальных температурных профилей, с помощью которого вычисляются вероятностные распределения температуры на каждой высоте и находятся доверительные интервалы, определяющие точность восстановления.

Возможности алгоритма восстановления, основанного на байесовом подходе, были протестированы в работах [11, 13] на модельных задачах: восстановление профиля температуры по излучению атмосферы в линии молекулярного кислорода 27₂, рассчитанному с помощью модели Либс–Розенкраца. Поскольку наложение априорных ограничений на восстанавливаемую функцию начинается уже на стадии выбора аппроксимирующей её функциональной формы, данному вопросу в [13] было уделено особое внимание. Рассматривались две модели: кусочно-однородная и модель в виде искусственной нейронной сети. В [13] продемонстрированы преимущества аппроксимации профиля искусственной нейронной сетью, поскольку в этом случае разделяются параметры регуляризации, отвечающие за гладкость получаемого профиля, и параметры, определяющие количество участков монотонной зависимости $T(h)$. Это даёт возможность ослаблять с целью предотвращения смещённости решения ограничения на гладкость профиля без увеличения доверительного интервала, что особенно важно при восстановлении профилей с большими градиентами температуры. В целом аппроксимация в виде нейронной сети позволяет достигать лучшей точности восстановления, чем при обычно используемой кусочно-однородной модели.

В [11] показано, что учёт нелинейности подынтегрального выражения в (1) является принципиальным. С этой целью для среднесезонного зимнего профиля температуры атмосферы средних широт северного полушария была решена прямая задача расчёта спектра яркостной температуры излучения атмосферы в окрестности линии перехода кислорода 27₂. К полученному спектру был добавлен гауссов шум с дисперсией $\sigma_{\xi} = 0,3$ К. Зашумлённая линия использовалась для решения обратной задачи с аппроксимацией профиля искусственной нейронной сетью. Далее с помощью методики, подробно описанной в [14], было линеаризовано выражение для плотности вероятности (3) — её аппроксимировали нормальной функцией распределения параметров профиля температуры. Далее, следуя описанному выше алгоритму восстановления, был получен ансамбль профилей температуры. Для него решили прямую задачу и получили ансамбль спектров яркостной температуры. Это позволило оценить среднеквадратичные отклонения температуры в каждом канале от среднего значения. Среднеквадратичные отклонения сравнивались с изначально заложенной дисперсией. На рис. 4а хорошо видно, что полученное среднеквадратичное отклонение на всех частотах значительно больше изначально шумового рукава. Та же процедура была выполнена без линеаризации многомерной нелинейной функции

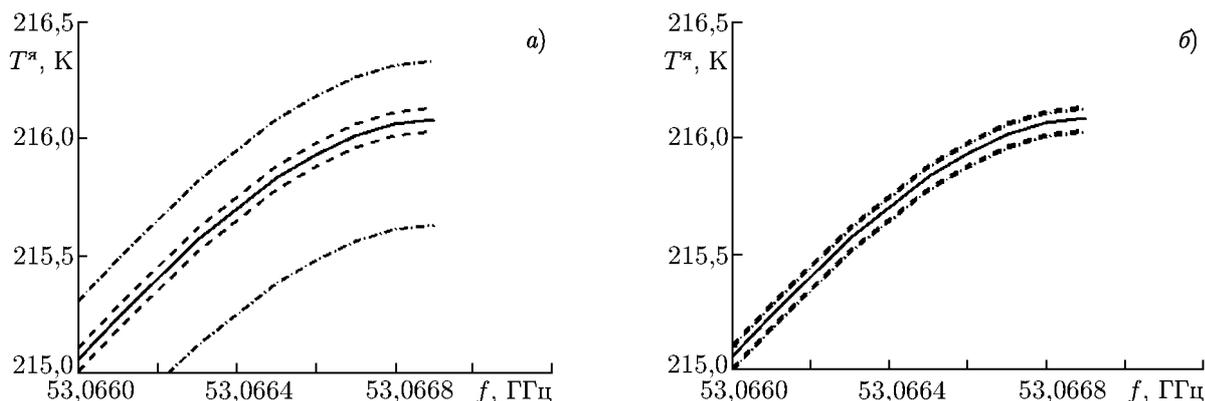


Рис. 4. Сравнение точности решений с использованием линейаризованной функции плотности вероятности (а) и полной нелинейной функции (б)

(4), результат приведён на рис. 4б. В этом случае полученное среднеквадратичное отклонение совпадает с исходным. Таким образом, отличие апостериорного распределения вероятности параметров модели от нормального закона является принципиальным, и корректное восстановление необходимо проводить с помощью нелинейаризованного апостериорного распределения (4).

После включения в спектрорадиометрический комплекс цифрового анализатора спектра «Acqiris» появилась возможность использовать для восстановления профиля температуры участок спектра значительно больший, чем окрестности перехода 27_{-} . Поэтому были написаны пакеты программ, реализующие описанный выше алгоритм для частотных диапазонов различной ширины: окрестности перехода 27_{-} ($53,0 \div 53,1$ ГГц); переход 27_{-} и участок склона полосы ($52,7 \div 53,1$ ГГц); переходы 29_{-} , 27_{-} и участок склона между ними ($52,45 \div 53,2$ ГГц).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ СОБСТВЕННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ АТМОСФЕРЫ

На рис. 5 приведены результаты восстановления высотного профиля температуры по данным наблюдений собственного излучения атмосферы над Нижним Новгородом 05.04.2010, выполненных под зенитным углом 40° со временем накопления сигнала 180 мин, приблизительно перпендикулярно силовым линиям магнитного поля. Восстановление выполнялось в соответствии с рассмотренным выше алгоритмом, температурный профиль аппроксимировался искусственной нейронной сетью из 5 нейронов. На рис. 5 приведены наиболее вероятные профили, доверительные интервалы 95% и данные спутникового зондирования для того же дня [15]. Случаи на рис. 5а–в отличаются величиной использованного частотного интервала: а — $53,0 \div 53,1$ ГГц; б — $52,7 \div 53,1$ ГГц; в — $52,45 \div 53,20$ ГГц. Из приведённых результатов видно, что восстановление профиля температуры возможно до высот 55 км. Границу интервала восстановления мы условно провели по уровню доверительного интервала 95%, равного 10 К. Положение нижней границы интервала восстановления существенно зависит от использованного частотного интервала. С увеличением его ширины нижняя граница опускается с 20 до 10 км, поскольку информация о нижних слоях атмосферы содержится в склоне полосы, формируемом крыльями линий O_2 , в т. ч. сильными линиями. В интервале высот $20 \div 40$ км для всех случаев полуширина доверительного интервала 95% составляет 2 К. Положение верхней границы интервала восстановления определяется, наряду с погрешностью измерений и точностью решения обратной задачи восстановления, влиянием эффекта Зеемана на форму линии излучения молекулярного кислорода [1, 5]. На рис. 3 видно, что ширина линии 27_{-} при наблюдении почти вдоль силовых линий магнитного поля

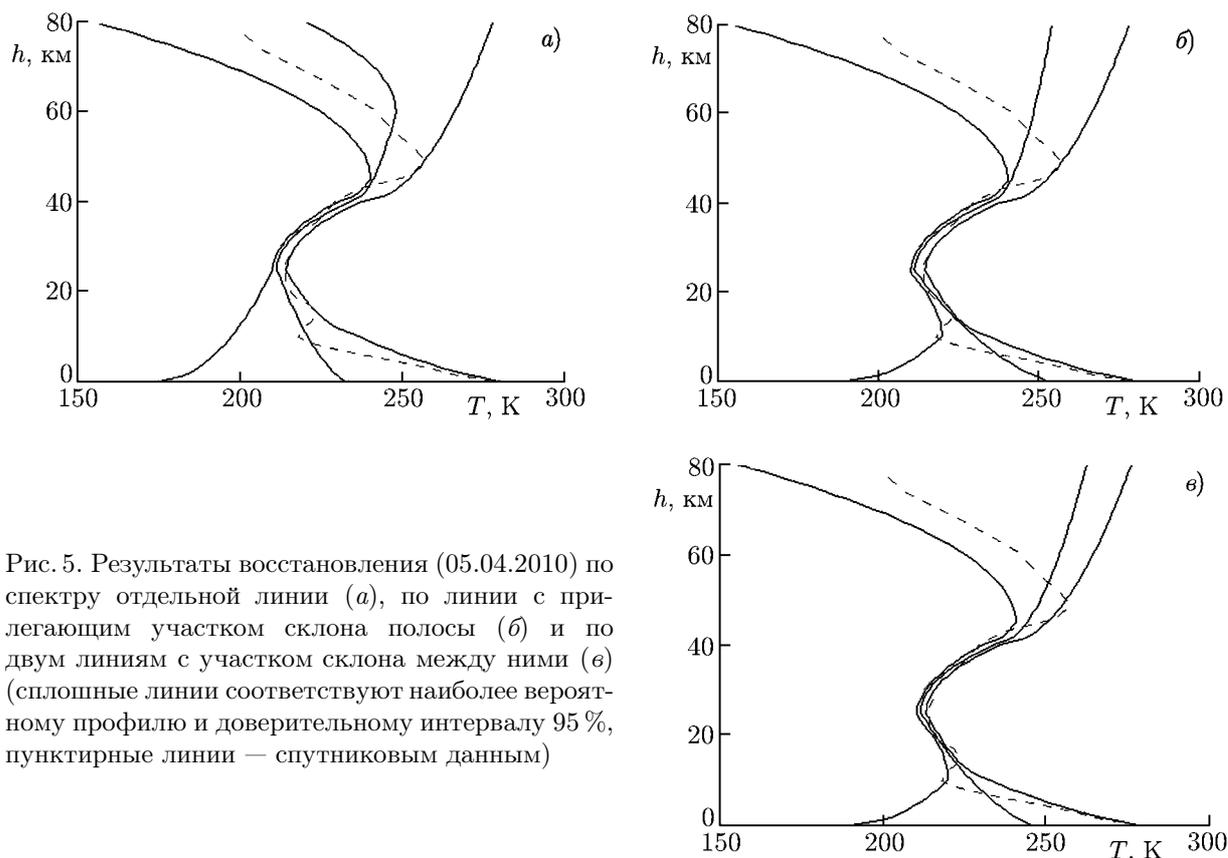


Рис. 5. Результаты восстановления (05.04.2010) по спектру отдельной линии (а), по линии с прилегающим участком склона полосы (б) и по двум линиям с участком склона между ними (е) (сплошные линии соответствуют наиболее вероятному профилю и доверительному интервалу 95 %, пунктирные линии — спутниковым данным)

(«продольный» эффект Зеемана) оказывается больше, чем в случае наблюдения почти перпендикулярно им («поперечный» эффект Зеемана). Поскольку в используемой нами модели MPM применяется феноменологическое выражение для зеемановского уширения (аддитивное увеличение ширины линии на постоянную величину, пропорциональную модулю среднего геомагнитного поля), при наблюдении в направлении почти вдоль силовых линий магнитного поля (также с условием, что доверительный интервал 95 % не больше 10 K), 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.

Результаты восстановления на рис. 5 хорошо согласуются с данными спутника Aura MLS несмотря на то, что последние усреднены по очень большой площади (порядка 10^5 км²). Отличие в гладкости профилей может быть связано с различиями моделей профилей температуры, используемых нами при обработке спутниковых данных (спутниковые профили обычно восстанавливаются с использованием кусочно-однородной модели). К сожалению, в [15] приведено недостаточно информации, чтобы оценить ошибку восстановления по спутниковым данным.

На рис. 6 приведены результаты восстановления по данным наблюдений 15.04.2010 в сравнении с результатами обработки данных эксперимента COSMIC, полученных радиозатменным методом, т. е. при помощи измерения рефракции радиоволн, излучаемых спутниками системы GPS, при их распространении в атмосфере [16]. Продемонстрировано очень хорошее согласование результатов, полученных разными методами. Различие в гладкости восстановленных профилей связано, в том числе, с использованием различных моделей параметризации термической структуры. При восстановлении по данным эксперимента COSMIC для температурного профиля использовалась кусочно-однородная модель.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

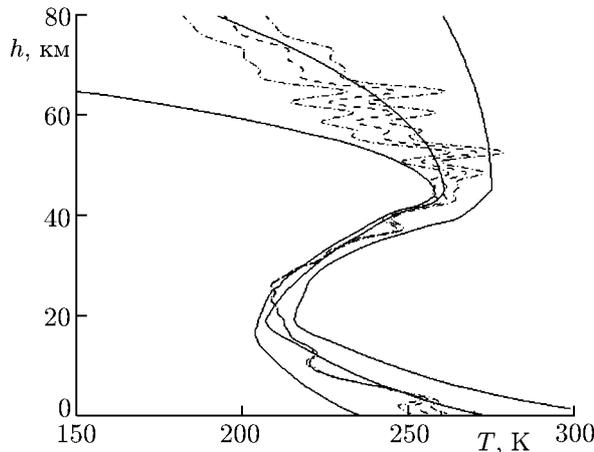


Рис. 6. Профиль температуры, восстановленный из наблюдений 15.04.2010. Сплошные линии — наиболее вероятный профиль и доверительный интервал 95 %, пунктирные линии — данные эксперимента COSMİK (профиль и среднеквадратичный разброс)

Создан лабораторный образец спектрометрического комплекса для наземного термического зондирования средней атмосферы посредством измерения спектров собственного излучения атмосферы в полосе спин-вращательных переходов молекулярного кислорода в диапазоне частот $52,4 \div 53,2$ ГГц.

Разработан алгоритм и создан реализующий его пакет программ, позволяющий по полученным спектрам восстанавливать профиль температуры атмосферы в интервале высот $10 \div 55$ км.

С помощью спектрометрического комплекса выполнены несколько серий наблюдений в Нижнем Новгороде, в т. ч. и при различных ориентациях диаграммы направленности по отношению к силовым линиям геомагнитного поля.

Восстановленные высотные профили температуры хорошо согласуются с результатами, полученными другими методами.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты 09–05–01041-а, 10–05–00849-а, 11–05–97050-р_поволжье_а), 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 и 02.740.11.0732).

Авторы благодарят NSPO и UCAR за возможность использовать для сравнения результаты эксперимента COSMİK.

Авторы благодарят М. Е. Горбунова за любезно предоставленные результаты восстановления профиля температуры по данным, полученным в рамках эксперимента COSMİK.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Waters J. W. // Nature. 1973. V. 242, No. 5 399. P. 506.
2. Troitskij A. V., Gaikovich K. P., Gromov V. D., et. al. // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensci. 1993. V. 31, No 1. P. 116.
3. Наумов А. П., Ошарина Н. Н., Троицкий А. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 1999. Т. 42, № 1. С. 45.
4. Троицкий А. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 1986. Т. 29, № 8. С. 878.
5. Маркина Н. Н. // Радиотехника и электроника. 1996. Т. 41, № 2. С. 175.
6. Rosenkranz P. W. // Radio Sci. 1999. V. 34. P. 1 025.
7. Караштин Д. А., Большаков О. С., Мухин Д. Н. и др. // Труды XIV Всерос. конф. молодых ученых «Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические эффекты». Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2010. С. 81.

8. Швецов А. А., Федосеев Л. И., Караштин Д. А. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2010. Т. 53, № 5–6. С. 356.
9. Швецов А. А., Демкин В. М., Федосеев Л. И. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2009. Т. 52, № 8. С. 671.
10. Федосеев Л. И., Швецов А. А., Шкаев А. П. и др. // Материалы Международной конф. «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо)». Севастополь: Изд-во «Вебер», 2008. Т. 2. С. 878.
11. Караштин Д. А., Мухин Д. Н., Скалыга Н. К., Фейгин А. М. // Изв. РАН. Сер. физическая. 2009. Т. 73, № 12. С. 1755.
12. Clib S., Greenberg E. // Amer. Statistician. 1995. V. 49, No. 4. P. 324.
13. Караштин Д. А., Мухин Д. Н., Скалыга Н. К., Фейгин А. М. // Изв. вузов. Радиофизика. 2009. Т. 52, № 10. С. 779.
14. Press W. H., Teukolsky S. A., Vetterling W. T., Flannery B. P. // Numerical Recipes in C. Cambridge Univ. Press, 1992.
15. <http://mirador.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/mirador/presentNavigation.pl?tree=project&project=MLS>
16. <http://cosmic-io.cosmic.ucar.edu/cdaac>.

Поступила в редакцию 17 июня 2011 г.; принята в печать 14 сентября 2011 г.

GROUND-BASED SOUNDING OF THE MIDDLE-ATMOSPHERE THERMAL STRUCTURE IN THE FREQUENCY RANGE 50–60 GHz

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

Using a spectroradiometric complex, we measure the atmospheric self-radiation spectra in the frequency range 52.4–53.2 GHz. The obtained data is used to recover the temperature profiles in the altitude interval 10–55 km. The recovered temperature profiles are in good agreement with the results of other methods.