

УДК 621.382.2

МОБИЛЬНЫЙ СПЕКТРОРАДИОМЕТРИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ЗОНДИРОВАНИЯ ОЗОНА СРЕДНЕЙ АТМОСФЕРЫ

*А. А. Красильников*¹, *М. Ю. Куликов*^{1,2}, *Л. М. Кукин*¹, *В. Г. Рыскин*¹, *Л. И. Федосеев*¹,
А. А. Швецов^{1,2}, *Д. Н. Мухин*^{1,2}, *М. В. Беликович*^{1,2}, *О. С. Большаков*¹, *А. М. Щитов*³,
*В. Л. Михайловский*³, *В. А. Шумилов*³, *А. М. Фейгин*^{1,2}

¹ Институт прикладной физики РАН;

² Нижегородский госуниверситет им. Н. И. Лобачевского;

³ Нижегородский научно-исследовательский приборостроительный институт «Кварц»,
г. Нижний Новгород, Россия

Разработан и изготовлен новый мобильный малогабаритный озонметр с широкой полосой приёма в диапазоне 110,4÷111,2 ГГц, цифровым методом анализа спектра собственного излучения атмосферы и уникальной системой калибровки измеряемого сигнала по внутреннему электрически управляемому эталону. Продемонстрировано, что применение статистического (байесового) подхода к решению некорректной обратной задачи позволяет удовлетворительно восстанавливать вертикальный профиль концентрации озона в диапазоне высот от 20 до 75 км.

ВВЕДЕНИЕ

Озон является одной из важнейших малых газовых составляющих атмосферы, поэтому изучение его пространственно-временной эволюции традиционно считается одной из основных задач в исследовании атмосферы Земли. Во-первых, озоновый слой, расположенный в основном на высотах нижней и средней стратосферы, защищает всё живое на нашей планете от губительного воздействия ультрафиолетовой части спектра солнечного излучения. В последнее время наибольшее опасения вызывает проблема озонового слоя в Северном полушарии. Как известно, в начале 2011 года впервые зафиксировано возникновение огромной озоновой дыры над Арктикой, площадь которой составила около $2 \cdot 10^6$ км² [1]. После разрушения циркумполярного вихря осколки этой дыры были обнаружены над Северной Канадой, Северной Европой, Центральной Россией и Северо-Восточной Азией. Во-вторых, эволюция озона управляется фотохимическими процессами, которые являются одним из основных источников нагрева воздуха в средней атмосфере (высоты 10÷90 км) и поэтому оказывают влияние на большинство атмосферных параметров данной области атмосферы. В свою очередь, фотохимия озона подвержена влиянию всех типов атмосферного переноса, чувствительна к температуре, солнечной активности и другим атмосферным факторам. Поэтому мониторинг динамики атмосферного озона является важной составляющей анализа возможных изменений состояния всей земной атмосферы.

Экспериментальное наблюдение за пространственно-временной эволюцией озона на высотах средней атмосферы проводится с помощью двух групп методов: контактных и дистанционных. Контактные измерения осуществляются посредством самолётов, озонзондов и стратостатов и, как правило, обеспечивают более высокую точность измерений. При этом они имеют существенное ограничение по высоте (примерно 25 км для самолётов, 30÷35 км для зондов и 45÷50 км для стратостатов), являются сравнительно дорогостоящими и поэтому проводятся лишь эпизодически. Дистанционные методы позволяют зондировать атмосферу в существенно большем диапазоне высот. В настоящее время эти методы реализованы в двух классах приборов: наземных и спутниковых.

Специфика спутниковых измерений обусловлена быстрым вращением прибора относительно Земли (вместе со спутником), при котором сканирование вертикального распределения концентрации озона проводится через каждые $200 \div 300$ км и более с длинным периодом повторяемости (сутки и более). Подобная особенность не позволяет накапливать достаточно длинные ряды данных, отвечающих «нужной» точке пространства, и неизбежно приводит к недостаточному временному разрешению и пространственному покрытию, например, по долготе. Это препятствует изучению быстрых (с характерными временами от десятка минут до нескольких часов) локальных процессов, в частности, внутренних гравитационных волн, генерируемых тропосферными источниками (см., например, обзор [2]). Так, например, если рассматривать данные зонда «MLS Aura», то в окрестность с центром в Нижнем Новгороде (56° с. ш., 44° в. д.) и диаметром 300 км попадает в среднем одно измерение вертикального профиля концентрации озона в сутки.

В отличие от спутниковых наблюдений, дистанционное зондирование средней атмосферы с поверхности Земли позволяет, в принципе, проводить измерения с высоким временным разрешением практически в любой интересующей точке пространства с выбранными географическими координатами. Ещё в конце 60-х годов в практике измерения озона появились два перспективных наземных метода: лазерная локация (лидары) [3, 4] и пассивное микроволновое зондирование в соответствующих «окнах» прозрачности атмосферы [5–9]. Метод микроволнового зондирования основан на наблюдениях резонансных линий молекул, имеющих вращательные спектры в диапазонах миллиметровых и субмиллиметровых волн. По сравнению с измерениями в оптическом и инфракрасном диапазонах, осуществляемых с помощью лидаров, микроволновые измерения менее зависят от погодных условий и аэрозольной компоненты атмосферы. Кроме того, микроволновые спектральные приборы позволяют круглосуточно регистрировать вариации озона на высотах средней атмосферы с высоким временным разрешением¹.

Первые микроволновые спектральные наблюдения озона были выполнены в конце 60-х и в начале 70-х годов [5–9]. В настоящее время около десяти озонметров, измеряющих линии собственного излучения атмосферного озона, центрированные к длинам волн 1,3; 2,1 и 3,0 мм, практически в постоянном режиме работают в составе международной организации NDACC (бывшая NDSC) [10], основной задачей которой является комплексное исследование изменений состава земной атмосферы. Следует отметить, что данные озонметры являются приборами стационарного базирования. Они размещены на специально оборудованных станциях наблюдений, расположенных на Гавайях [11], в горах Калифорнии [12], в Антарктиде [13], Лаудере (Новая Зеландия) [14], Кируне (Швеция) [15], Нью-Алесунде (Шпицберген) [16, 17], в Берне (Швейцария) [18] и Цукубе (Япония) [19], сравнительно громоздки, и их применение фактически ограничено областью исходного размещения. Анализ спектра собственного излучения атмосферного озона осуществляется посредством фильтровых, акусто-оптических и цифровых спектроанализаторов с быстрым преобразованием Фурье. Также во всех приборах используется классическая схема калибровки принимаемого сигнала атмосферы по внешним эталонам, в частности, по согласованным нагрузкам, находящимся при температуре кипящего азота и при температуре окружающей среды.

Начиная с 2004 года, ИПФ РАН совместно с рядом российских научно-исследовательских институтов осуществляет разработку и изготовление мобильных спектрорадиометров миллиметрового диапазона длин волн различного назначения (для мониторинга озонового слоя Земли [20], температуры стратосферы [21–23] и тропосферы, дистанционного мониторинга состояния земных покровов с использованием излучения атмосферы в качестве подсветки) и в настоящее время является мировым лидером в данном направлении. Первый в мире мобильный озонметр [20] с центральной частотой принимаемого сигнала 110,836 ГГц и последующие его модификации были

¹ Напомним, что лидарные измерения эффективны только ночью.

успешно использованы в работах [24–28] на космодроме Байконур для исследования возмущений озонового слоя при пусках тяжёлых ракет, мониторинга состояния озонового слоя в Арктике с борта ледокольного судна «Академик Драницын», в составе вагона-лаборатории (экспедиция «Тройка») для построения меридиональных разрезов вертикального распределения озона над российской частью Евразии, для регистрации вариаций стратосферного озона во время солнечного затмения 2006 года на высокогорной научной станции ИФА РАН (г. Кисловодск), во время ионосферных экспериментов на стенде «Сура» (г. Васильсурск), в совместных измерениях с лидаром ИОА РАН (г. Томск), осуществляющем активное зондирование температуры нижней и средней атмосферы и др. Вместе с тем в процессе эксплуатации первого прибора были выявлены конструкционные несовершенства приёмного модуля, приводящие к его слабой защищённости от высокочастотных помех, которые неизбежно присутствуют в крупных городах (в частности, сотовая связь), а также вблизи промышленных объектов. Последующая модернизация привела к созданию ещё двух мобильных озонметров [29, 30], в которых приёмный модуль стал более компактным и выполненным с лучшей экранизацией от внешних помех.

В настоящее время все три мобильных озонметра продолжают достаточно активно использоваться, они имеют примерно одинаковые характеристики: относительно небольшую полосу анализа (240 МГц) и ограниченное количество спектральных фильтровых каналов (31) с разрешением $1 \div 10$ МГц в зависимости от номера канала. Типичное время измерения одного спектра собственного излучения атмосферы в режиме периодической калибровки составляет примерно 10 с. Флуктуационная чувствительность, определяемая полной шумовой температурой каждого прибора, составляет $0,03 \div 0,10$ К за время накопления сигнала 30 мин (примерно 160 спектров). Ещё одним недостатком применения указанных приборов для мониторинга озонового слоя Земли является несовершенство используемой ранее процедуры восстановления, в основе которой лежит трёхпараметрическая аппроксимация искомого высотного профиля концентрации озона. Также во всех приборах используется классическая схема калибровки принимаемого сигнала атмосферы, что затрудняет их длительную работу, особенно в экспедиционных условиях, поскольку требует постоянного использования жидкого азота, который, как известно, быстро испаряется и требует постоянного восполнения.

В данной работе мы представляем новый, значительно усовершенствованный мобильный озонметр, предназначенный для длительного пассивного мониторинга вертикального профиля концентрации озона стратосферы и мезосферы с высоким пространственно-временным разрешением. Он представляет собой мобильный малогабаритный спектрорадиометр с цифровым анализатором спектра и уникальной системой калибровки измеряемого сигнала по внутреннему электрически управляемому эталону. Данный прибор позволяет непрерывно и практически вне зависимости от погодных условий с хорошей точностью и высоким частотным разрешением измерять особенности спектра теплового излучения атмосферы в более широкой, чем ранее, полосе частот с характерным временем накопления сигнала несколько десятков минут. Применение статистических (байесовых) алгоритмов решения некорректных обратных задач, разработанных авторами данной работы ранее [31–33], делает возможным по каждому полученному спектру восстанавливать с контролируемой точностью вертикальный профиль концентрации озона на высотах от 20 до 75 км даже в отсутствие априорной информации о статистике предшествующих измерений данной малой газовой составляющей атмосферы.

Работа построена следующим образом. В разделе 1 представлены отдельные блоки спектро-радиометра и его основные характеристики. В разделе 2 кратко описан используемый алгоритм восстановления вертикального распределения концентрации озона по данным микроволнового зондирования. В заключение обсуждаются дальнейшие пути модернизации спектрорадиометра, которые уже в ближайшем будущем позволят заметно повысить точность измерений и за счёт

этого расширить диапазон научных задач, которые можно будет решать посредством данного прибора.

1. СПЕКТРОРАДИОМЕТРИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС

Комплекс основан на классическом супергетеродинном принципе приёма и анализа излучения миллиметрового диапазона длин волн и включает в себя антенну, модулятор-калибратор, приёмник, цифровой анализатор спектра, систему управления, сбора и обработки данных на базе ноутбука или персонального компьютера.

Структурная схема приёмного модуля озонметра показана на рис. 1. Собственное излучение атмосферы принимается рупорной антенной с шириной диаграммы направленности 4° . Далее сигнал поступает на модулятор-калибратор, представляющий собой волноводную секцию, содержащую полуволновой отрезок волноводно-щелевой линии с рядом шунтирующих её цепочек последовательно включённых диодов с барьером Шоттки (ДБШ) [34, 35]. Как указано во введении, это устройство управляется постоянным током и предназначено для осуществления непрерывной автоматической калибровки принимаемого теплового излучения атмосферы с длинами волн в окрестности 3 мм. В зависимости от управляющего тока модулятор-калибратор может находиться в различных состояниях. При нулевом токе смещения вход и выход модулятора-калибратора хорошо согласованы с антенным и приёмным трактами, между которыми он установлен: относительные потери, вносимые модулятором-калибратором, составляют примерно 1,3 дБ. В этом состоянии комплекс принимает и анализирует собственное излучение атмосферы. При увеличении тока смещения модулятор-калибратор, во-первых, запирает вход приёмника, ослабляя принятое антенной излучение на $20 \div 30$ дБ (в зависимости от силы тока), во-вторых, направляет в приёмник

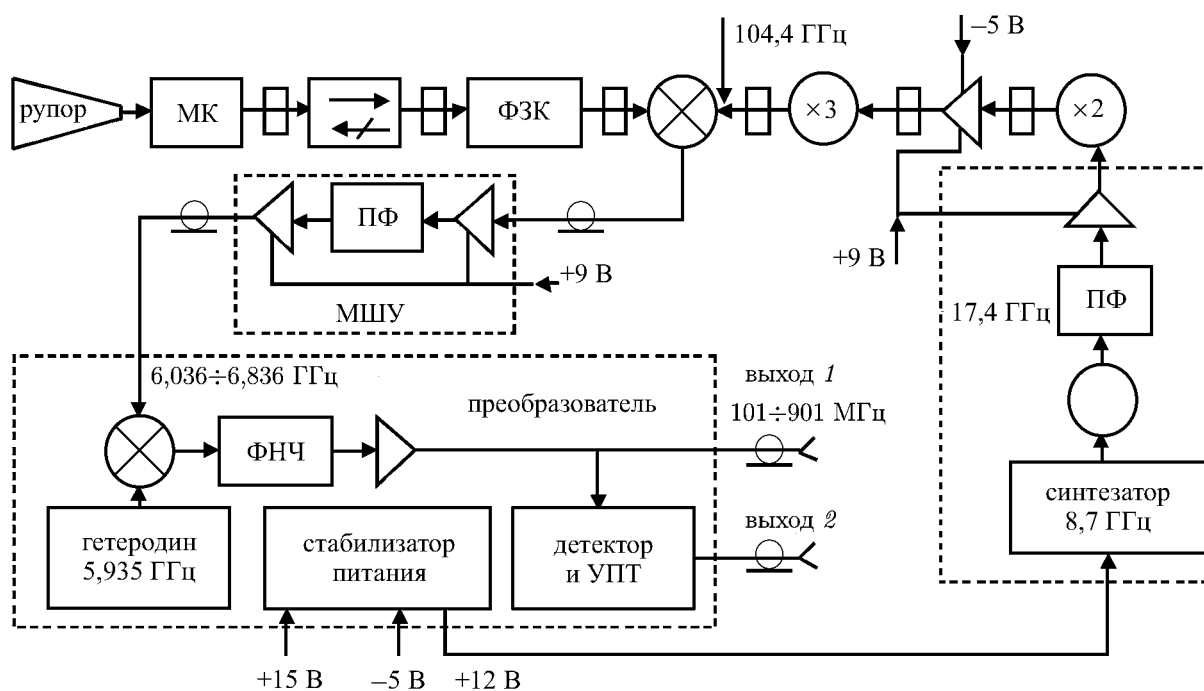


Рис. 1. Блок-схема приёмной части озонметра: МК — модулятор-калибратор, ФЗК — фильтр зеркала, ПФ — полосовой фильтр, МШУ — малошумящий усилитель, ФНЧ — фильтр низких частот, УПТ — усилитель постоянного тока

собственный шумовой сигнал, яркостная температура которого в зависимости от силы тока устанавливается на уровнях 150 К («холодная» нагрузка) или 350 К («тёплая» нагрузка). Полученная от калибровочных нагрузок информация используется для определения абсолютной яркостной температуры собственного излучения атмосферы.

Непосредственно сама калибровка данного устройства, т. е. определение зависимостей коэффициента пропускания и яркостной температуры калибровочного шумового сигнала от тока смещения, осуществляется перед началом каждой экспериментальной кампании по согласованным нагрузкам, находящимся при температуре кипящего азота и при температуре окружающей среды. Как показывает наш опыт работы с данным устройством, указанные зависимости демонстрируют хорошую стабильность на протяжении длительного времени квазинепрерывной работы модулятора-калибратора. В частности, в процессе тестовой многомесячной измерительной кампании, когда эксперименты прерывались в целом не более чем на несколько суток в месяц (прежде всего, для новой калибровки модулятора-калибратора по внешним эталонам), было зафиксировано, что абсолютные величины яркостной температуры «холодной» и «тёплой» нагрузок имеют флуктуации, не превышающие 0,5 К, что определяется точностью термостатирования модулятора-калибратора.

Входной элемент приёмника, вентиль, предназначен для эффективного подавления (более 20 дБ) отражённого от модулятора-калибратора излучения входных цепей самого приёмника. Далее следует фильтр зеркального канала, после которого сигнал подаётся на смеситель на диодах с барьером Шоттки, работающий по первой гармонике гетеродина. Гетеродинный сигнал с частотой 104,4 ГГц формируется синтезатором и последовательной цепочкой умножителей частоты (с коэффициентами 2, 2 и 3) и усилителей мощности (стабильность и точность установки частоты не хуже 10^{-7} , т. е. в абсолютных единицах меньше 10,5 кГц). Промежуточная частота после смесителя составляет около 6,5 ГГц — значительно выше, чем в прежних мобильных озонometрах (1,5 МГц), что позволяет существенно снизить промышленные помехи. Сигнал на промежуточной частоте в полосе $6,036 \div 6,836$ ГГц, формируемой полосно-пропускающим фильтром, усиливается маломощным усилителем (см. рис. 1) и с помощью второй ступени преобразования частоты согласуется с входной полосой цифрового анализатора спектра $101 \div 901$ МГц. Конструктивно приёмник вместе с антенным рупором и модулятором-калибратором размещён в термостатированном корпусе (размеры $46 \times 24 \times 13,5$ см), где поддерживается температура $40 \pm \pm 0,5$ °С. В отличие от предыдущих озонometров, в блоке питания спектро радиометра применены импульсные низковольтные источники, что позволило значительно снизить его суммарный вес и габариты.

Цифровой анализатор спектра «Acqiris» (модель «AC240»), работающий в режиме быстрого преобразования Фурье, осуществляет непрерывную параллельную работу 16 384 эффективных спектральных каналов в полосе 1 ГГц. Это обеспечивает частотное разрешение 61,04 кГц, необходимое для анализа частотного профиля линии озона, формируемой в мезосфере (тем не менее данное разрешение в 5,8 раз больше, чем возможные флуктуации частоты гетеродинного сигнала).

Показанный на рис. 1 выход 2 является вспомогательным: на него подаётся продетектированный и усиленный сигнал в полной полосе анализа, — и служит для оперативного контроля собственного излучения атмосферы и оценки поглощения в тропосфере.

Система управления, сбора и обработки данных включает в себя ноутбук, сопряжённый с анализатором спектра через специальный интерфейсный комплект «NI PXIe-ExpressCard8360» и модуль управления модулятором-калибратором. Соответствующее программное обеспечение, разработанное авторами данной работы, полностью автоматизирует непрерывные экспериментальные кампании. Оно контролирует сбор и спектральный анализ информации, содержащейся

Таблица 1. Основные характеристики спектрорадиометра

центральная частота	110,83604 ГГц
полоса приёма и анализа	110,4÷111,2 ГГц
число спектральных каналов	16384
шумовая температура	3 000 К
суммарный вес	порядка 10 кг
типичное время накопления одного спектра	30 мин
спектральное разрешение	61 кГц

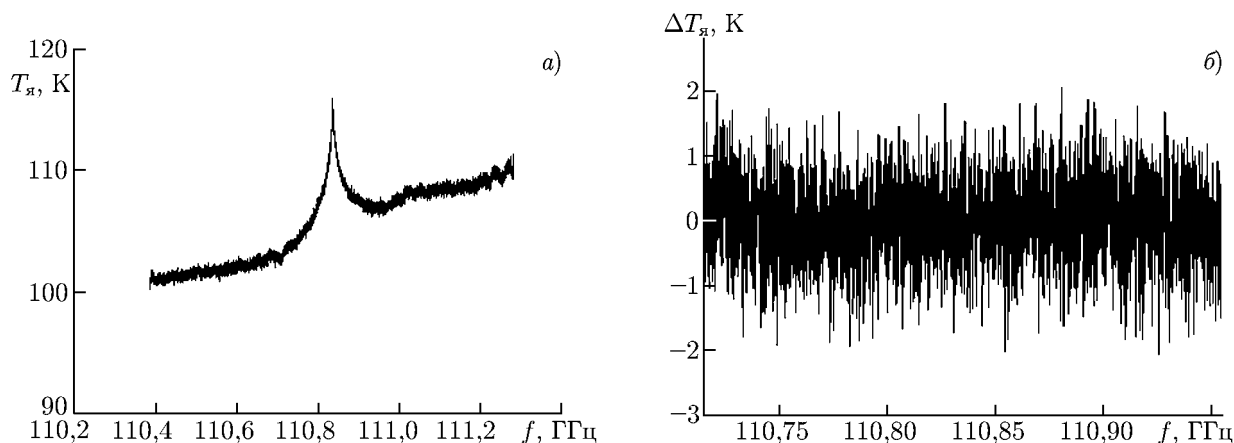


Рис. 2. Спектр яркостной температуры $T_{\text{я}}$ собственного излучения атмосферы, измеренный 27.03.2013 над Нижним Новгородом (а). Время накопления сигнала 20:00–22:00 LT, всего усреднено примерно 900 спектров. На панели б представлена разность между измеренным спектром и модельным спектром, отвечающим высотному профилю концентрации озона с максимумом вероятности (см. рис. 3 и раздел 2)

в собственных излучениях атмосферы и калибровочных нагрузок, позволяет в режиме реального времени получать спектры собственного излучения атмосферы, в том числе визуализировать их на экране, варьировать полосу анализа, частотное разрешение, время накопления сигнала, параметры калибровочного сигнала, временную характеристику модулятора-калибратора и т. д. Таким образом программное обеспечение позволяет полностью управлять процессом измерений, в том числе удалённо через Интернет, что было продемонстрировано непосредственно во время выступления на последней Генеральной ассамблее Европейского союза наук о Земле (Вена, Австрия) [36].

Основные характеристики спектрорадиометра приведены в табл. 1. На рис. 2 представлен типичный пример спектра яркостной температуры собственного излучения атмосферы, измеренный данным прибором, ориентированным под углом 20° к горизонту. Отметим, во-первых, что полоса анализа нового озонметра более чем в три раза шире полосы приёма предыдущих приборов. Это позволяет контролировать возникновение стоячих волн в приёмном тракте нового прибора и лучшим образом исключать «подставку» в измеряемом спектре яркостной температуры собственного излучения атмосферы, формируемую тропосферным излучением молекулярного кислорода и парами воды (см. рис. 2). Во-вторых, цифровой анализ с большим количеством «узких» спектральных каналов позволяет значительно эффективнее, чем с помощью предыдущих озонметров, регистрировать узкополосные промышленные помехи и удалять их в процессе восстановления вертикального профиля концентрации озона.

2. ВОССТАНОВЛЕНИЕ ВЕРТИКАЛЬНОГО ПРОФИЛЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ОЗОНА ПО ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ МОБИЛЬНОГО ОЗОНОМЕТРА

Как было указано во введении, используемый в данной работе метод восстановления вертикального распределения концентрации озона по данным микроволнового пассивного зондирования основан на байесовом подходе к решению некорректных обратных задач [37]. Данный метод позволяет статистически корректно учесть как измерительный шум, неизбежно присутствующий в данных (спектрах яркостной температуры собственного излучения атмосферы), так и априорную информацию о восстанавливаемом высотном профиле, необходимую для регуляризации задачи [31]. Он оказывается эффективным даже в случае существенно нелинейных задач, когда большинство известных методов восстановления [38–42] оказываются неприменимы, что было продемонстрировано авторами данной работы при восстановлении температуры стратосферы по данным микроволновых измерений спектра теплового излучения атмосферы на склоне полосы поглощения молекулярного кислорода с характерной длиной волны 5 мм [32, 33].

В байесовом подходе так же, как и в других методах, используется модель, включающая в себя, во-первых, интегральный функционал, считающийся точно известным и решающий прямую задачу, т. е. позволяющий по определённому высотному распределению искомой величины рассчитать спектр принимаемого излучения. Во-вторых, в модель входит функция аппроксимации высотного распределения, параметризующая задачу. Таким образом, восстанавливаемый профиль определяется набором (вектором) параметров этой функции (параметров модели).

Кроме того, в модель вводится принципиально новый элемент, включающий решаемую задачу в рамки байесова подхода: предполагается, что неизбежная (из-за наличия шумовой компоненты) случайность принимаемого сигнала позволяет применять вероятностный формализм к расчёту параметров модели. Тем самым задача восстановления сводится к поиску вероятностного распределения параметров, которое, в свою очередь, определяет вероятностные распределения для искомой величины, позволяющие для каждой высоты оценить доверительные интервалы восстановления.

В рамках такого подхода регуляризация заключается в том, что решения ищутся на некотором ансамбле с априори заданным распределением вероятности, а параметры этого распределения (например, дисперсия в случае нормального распределения) определяют жёсткость регуляризации. В большинстве широко известных методов восстановления параметры регуляризации рассчитываются из условия невязки (так называемый апостериорный случай: заданное соотношение между невязкой и шумом измерений) [38, 39] или из ансамбля предыдущих данных измерений восстанавливаемой характеристики атмосферы [40]. В байесовом же подходе эти параметры могут быть определены на основе априорных, существенно более слабых ограничений, которые напрямую не связаны с вероятностными характеристиками ансамбля предыдущих измерений. В результате применяемый нами алгоритм позволяет, в частности, корректно решать задачу восстановления даже в случае событий, которые являются маловероятными с точки зрения статистики предыдущих данных измерений восстанавливаемой характеристики атмосферы. Более подробно байесова процедура восстановления вертикальных распределений характеристик атмосферы по данным микроволнового пассивного зондирования изложена в работах [31–33].

На рис. 3 показан пример вертикального распределения концентрации озона $O_3(z)$ в диапазоне высот $z = 15 \div 75$ км, восстановленного по спектру яркостной температуры собственного излучения атмосферы, представленному на рис. 2. Данное распределение представляет собой два профиля $O_3 \max(z)$ и $O_3 \min(z)$, определяющие границы доверительного интервала восстановления с вероятностью 65 %. Если представить результат решения некорректной обратной задачи в виде

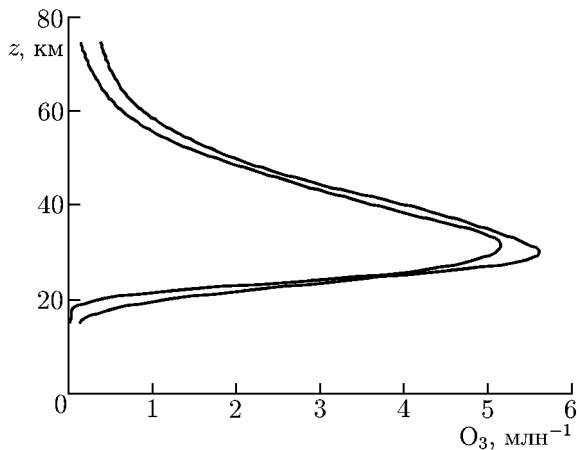


Рис. 3. Пример вертикального распределения концентрации озона, восстановленного по данным измерений 27.03.2013. Толстыми сплошными линиями показаны границы доверительного интервала с вероятностью 65 %. Концентрация озона представлена в миллионных долях от концентрации воздуха на соответствующей высоте (млн⁻¹, или ppmv)

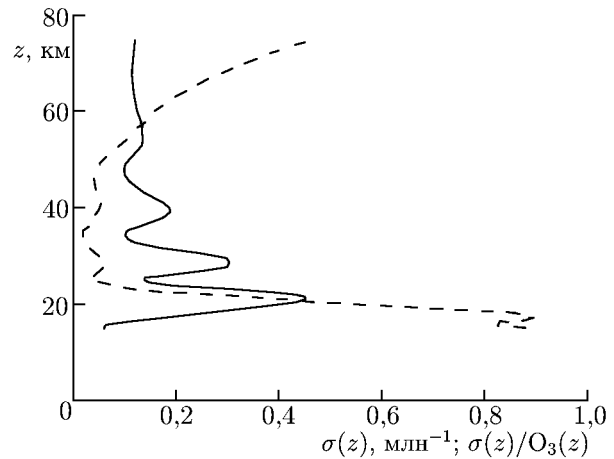


Рис. 4. Вертикальные профили абсолютной (сплошная линия) и относительной (пунктир) ошибок восстановления концентрации озона по данным измерений 27.03.2013

$O_3(z) \pm \sigma(z)$, где $O_3(z) = [O_3 \max(z) + O_3 \min(z)]/2$, $\sigma(z) = [O_3 \max(z) - O_3 \min(z)]/2$, то таким образом можно получить количественные данные о распределениях абсолютной ($\sigma(z)$) и относительной ($\sigma(z)/O_3(z)$) ошибок измерения (см. рис. 4).

Из рис. 4 можно видеть, что диапазон высот удовлетворительного восстановления, где относительная ошибка не превышает 50 %, составляет 20÷75 км, т. е. это практически вся стратосфера и половина мезосферы. При этом на высотах 25÷50 км она оказывается меньше 5 %, а ниже 25 км резко нарастает с понижением высоты. Отметим, во-первых, что такая неопределённость концентрации озона оказывается много меньше, чем характерные вариации данной малой газовой составляющей атмосферы на этих высотах. Это означает, что измерения посредством нового прибора позволяют уверенно регистрировать как медленные изменения в содержании озона стратосферы, связанные с её сезонной перестройкой, так и быстрые, вызываемые, например, внезапными стратосферными потеплениями [36]. Кроме того, в нижней и средней мезосфере хорошо разрешаются суточные фотохимические осцилляции концентрации озона, вызываемые эволюцией мезосферной фотохимии [36]. Во-вторых, абсолютная ошибка концентрации варьируется в диапазоне 0,1÷0,5 молекул озона на миллион молекул воздуха в зависимости от высоты, что неплохо соотносится с точностью измерения концентрации озона на высотах средней атмосферы (0,1÷0,9 молекул на миллион молекул воздуха) с помощью лучших зарубежных спектро радиометров миллиметрового диапазона длин волн, таких, как SOMORA [43], OZORAM [44] и др., которые, в отличие от нашего озонметра, являются стационарными приборами.

3. ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе представлен новый мобильный озонметр, предназначенный для непрерывного пассивного мониторинга вертикального профиля концентрации озона стратосферы и мезосферы с высоким пространственно-временным разрешением. Он представляет собой мобильный малогабаритный спектро радиометр с цифровым анализатором спектра и уникальной системой

калибровки измеряемого сигнала по внутреннему электрически управляемому эталону. Данный прибор позволяет с хорошей точностью и высоким частотным разрешением измерять спектр теплового излучения атмосферы в существенно более широкой, чем ранее, полосе частот с характерным временем накопления сигнала несколько десятков минут. Применение статистических (байесовых) алгоритмов к решению некорректной обратной задачи делает возможным по каждому полученному спектру восстанавливать с контролируемой точностью вертикальный профиль концентрации озона на высотах от 20 до 75 км, в том числе без привлечения априорной информации о статистике предшествующих измерений.

Это означает, во-первых, что новый озонметр потенциально может выступать поверочным инструментом для спутниковых измерений данной важной характеристики атмосферы. Во-вторых, наземный мониторинг позволяет регистрировать резкие вариации концентрации озона на высотах средней атмосферы с характерными временными масштабами порядка нескольких часов, которые плохо разрешаются спутниковыми измерениями. В ближайшее время планируется проведение серии измерений с помощью нового озонметра одновременно с озонзондовыми и лидарными измерениями структуры озонового слоя и термической структуры средней атмосферы. Это позволит более определённо судить как о пределах применимости прибора при проверке спутниковых данных, так и о его возможностях при исследовании быстроразвивающихся локальных процессов, в частности, внутренних гравитационных волн.

Отметим, что данный прибор, в отличие, например, от лидаров, характеризуется сравнительно малым энергопотреблением (примерно 60 Вт), 50 % которого приходится на систему термостатирования. Кроме того, новая технология калибровки измеряемого сигнала по внутреннему электрически управляемому эталону (блок модулятор-калибратор) позволила отказаться от классической схемы калибровки принимаемого сигнала атмосферы по внешним и не очень надёжным эталонам (например, по согласованным нагрузкам, находящимся при температуре кипящего азота и при температуре окружающей среды). Это, в свою очередь, позволяет полностью автоматизировать работу озонметра, заметно повысить точность калибровки принимаемого и анализируемого сигналов, уменьшить габариты комплекса в целом и исключить использование жидкого азота, который быстро испаряется и требует постоянного восполнения. Кроме того, при таком подходе к калибровке отпадает необходимость постоянной работы шаговых электродвигателей, направляющих принимающие зеркала на внешние эталоны при стандартной калибровке собственного излучения атмосферы в миллиметровом диапазоне длин волн, которые, как известно, могут быть источниками помех. В результате, с учётом указанных преимуществ, озонметр представляет собой полностью автоматизированный мобильный прибор с малым весом (не более 10 кг). Это позволяет проводить измерения практически в любой интересующей нас точке пространства с выбранными географическими координатами, в том числе размещать озонметр на автомобилях, поездах, самолётах, кораблях и накапливать длинные ряды данных наблюдений за озоном средней атмосферы. Вышеперечисленные характеристики мобильного озонметра позволяют рассматривать его в качестве прототипа сетевого прибора для организации постоянного наземного мониторинга озона на территории России с высоким пространственно-временным разрешением.

Необходимо также отметить перспективы модернизации нового прибора, что в ближайшем будущем позволит заметно повысить точность восстановления концентрации озона на высотах средней атмосферы (прежде всего за счёт уменьшения шумовой температуры прибора, которая на данный момент составляет 3000 К в однополосном режиме) и в целом увеличить диапазон высот удовлетворительного восстановления данной характеристики атмосферы. Шумовая температура озонметра определяется коэффициентами пропускания и собственными шумами вентиля, модулятора-калибратора и приёмника, а также потерями в антенной системе. В бли-

жайшее время будет изготовлена новая антенная система в виде конического гофрированного рупора с низким (менее $1 \div 2\%$) уровнем боковых лепестков, понижен уровень прямых потерь модулятора-калибратора, а между вентилем и смесителем будет включён малошумящий усилитель на базе транзисторов с высокой подвижностью электронов (HEMT) с рабочей полосой $109,0 \div 113,5$ ГГц, усилением больше 20 дБ и шумовой температурой не более 900 К. По нашим оценкам, такая модернизация почти в 2 раза уменьшит интегральную шумовую температуру прибора (до $1500 \div 1600$ К), что существенно повысит точность измерения спектров яркостной температуры собственного излучения озона и последующего восстановления вертикального распределения его концентрации.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты 12-05-00999-а и 13-05-00656-а), программы фундаментальных исследований ОФН РАН «Физика атмосферы: электрические процессы, радиофизические методы исследований» (проекты 2.1 и 2.3), ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (контракт 14.740.11.1025 и соглашение № 8665) и гранта Правительства Российской Федерации (договор 11.G34.31.0048).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Manney G. L., Santee M. L., Rex M., et al. // *Nature*. 2011. V. 478. P. 469.
2. Fritts D. C., Alexander M. J. // *Rev. Geophys.* 2003. V. 41. P. 1.
3. Schotland R. M. // *J. Appl. Meteorology*. 1974. V. 13. P. 71.
4. Megie G., Allain J. Y., Chanin M. L., et al. // *Nature*. 1977. V. 270. P. 329.
5. Caton W. M., Welch W. J., Silver S. // *J. Geophys. Res.* 1967. V. 72, No. 24. P. 6137.
6. Caton W. M., Mannella G. G., Kalaghan P. M., et al. // *Astrophys. J.* 1968. V. 151, No. 3. P. 153.
7. Воронов В. Н., Кисляков А. Г., Кукина Э. П. и др. // *Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана*. 1972. Т. 8, № 1. С. 29.
8. Shimabukuro F. I., Wilson W. J. // *J. Geophys. Res.* 1973. V. 78, No. 27. P. 6136.
9. Куликов Ю. Ю., Ризов Е. Ф., Федосеев Л. И. и др. // *Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана*. 1975. Т. 11, № 10. С. 1071.
10. <http://www.ndsc.ncep.noaa.gov>.
11. de Zafra R. L., Parrish A., Solomon P. M., et al. // *Int. J. Infrared Millimeter Waves*. 1983. V. 4. P. 757.
12. Parrish A., Connor B. J., Tsou J. J., et al. // *J. Geophys. Res.* 1992. V. 97. P. 2541.
13. Connor B. J., Barrett J. W., Parrish A., et al. // *J. Geophys. Res. D*. 1987. V. 92, No. 11. P. 13221.
14. Tsou J. J., Connor B. J., Parrish A., et al. // *J. Geophys. Res. D*. 2000. V. 105, No. 19. P. 24263.
15. Raffalski U., Hochschild G., Kopp G., et al. // *Atmos. Chem. Phys.* 2005. V. 5, No. 5. P. 1399.
16. Sinnhuber B.-M., Langer J., Klein U., et al. // *Geophys. Res. Lett.* 1998. V. 25, No. 17. P. 3327.
17. Langer J., Barry B., Klein U., et al. // *Geophys. Res. Lett.* 1999. V. 26, No. 5. P. 599.
18. Calisesi Y., Wernli H., Kämpfer N. // *J. Geophys. Res. D*. 2001. V. 106, No. 8. P. 7903.
19. Nagahama T., Nakane H., Fujinuma Y., et al. // *Earth Planets Space*. 1999. V. 51. P. 1287.
20. Красильников А. А., Куликов Ю. Ю., Рыскин В. Г. и др. // *Сб. тез. Международного симпозиума стран СНГ «Атмосферная радиация», 22–25 июня 2004 г., Санкт-Петербург*. С. 146.
21. Швецов А. А., Федосеев Л. И., Караштин Д. А. и др. // *Изв. вузов. Радиофизика*. 2010. Т. 53, № 5–6. С. 350.
22. Швецов А. А., Федосеев Л. И., Большаков О. С. и др. // *Приборы и техника эксперимента*. 2011. № 1. С. 134.

23. Швецов А. А., Караштин Д. А., Федосеев Л. И. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2011. Т. 54, № 8–9. С. 641.
24. Рыскин В. Г., Куликов Ю. Ю., Красильников А. А. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2007. Т. 50, № 10–11. С. 961.
25. Кропоткина Е. П., Куликов Ю. Ю., Рыскин В. Г. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2007. Т. 50, № 10–11. С. 954.
26. Куликов Ю. Ю., Красильников А. А., Кукин Л. М. и др. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2007. Т. 43, № 2. С. 260.
27. Рыскин В. Г., Куликов Ю. Ю. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2008. Т. 44, № 2. С. 199.
28. Куликов Ю. Ю., Красильников А. А., Демкин В. М. и др. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2008. Т. 44. С. 522.
29. Тимофеев Ю. М., Косцов В. С., Поберовский А. В. и др. // Вестник СПбГУ. 2008. № 4. С. 44.
30. Красильников А. А., Куликов Ю. Ю., Рыскин В. Г. и др. // Приборы и техника эксперимента. 2011. № 1. С. 127.
31. Mukhin D. N., Feigin A. M., Molkov Ya. I., et al. // Adv. Space Res. 2006. V. 37, No. 12. P. 2292.
32. Караштин Д. А., Мухин Д. Н., Скалыга Н. К. и др. // Изв. РАН. Сер. физическая. 2009. Т. 73, № 12. С. 1750.
33. Караштин Д. А., Мухин Д. Н., Скалыга Н. К. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2009. Т. 52, № 10. С. 779.
34. Федосеев Л. И., Божков В. Г., Геннеберг В. А. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2007. Т. 50, № 10–11. С. 858.
35. Патент № 2488941 РФ. Электрически управляемый модулятор-калибратор миллиметрового диапазона длин волн / Л. И. Федосеев, В. Г. Божков, В. А. Геннеберг, И. В. Петров; Заявл. 27.04.2012.
36. Shvetsov A. A., Krasil'nikov A. A., Kulikov M. Y., et al. // Geophys. Res. Abstracts. 2012. V. 15. Art. no. EGU2013-10047.
37. Турчин В. Ф., Козлов В. П., Малкевич М. С. // УФН. 1970. Т. 102, № 3. С. 345.
38. Phillips D. L. // J. Assoc. Comput. Mach. 1962. V. 9. P. 84.
39. Тихонов А. Н. // Докл. АН СССР. 1963. Т. 153, № 1. С. 49.
40. Chahine M. T. // J. Opt. Soc. Am. 1968. V. 58, No. 12. P. 1634.
41. Randegger A. K. // Pure Appl. Geophys. 1980. V. 118. P. 1052.
42. Rodgers C. D. // J. Geophys. Res. D. 1990. V. 95, No. 5. P. 5587.
43. Hocke K., Kampfer N., Ruffieux D., et al. // Atmos. Chem. Phys. 2007. V. 7. P. 4117.
44. Palm M., Hoffmann C. G., Golchert S. H. W., et al. // Atmos. Meas. Tech. 2010. V. 3. P. 1533.

Поступила в редакцию 28 мая 2013 г.; принята в печать 30 сентября 2013 г.

MOBILE SPECTRORADIOMETER COMPLEX FOR SOUNDING THE MIDDLE ATMOSPHERE OZONE

*A. A. Krasil'nikov, M. Yu. Kulikov, L. M. Kukin, V. G. Ryskin, L. I. Fedoseev,
A. A. Shvetsov, D. N. Mukhin, M. V. Belikovich, O. S. Bol'shakov, A. M. Shchitov,
V. L. Mikhailovsky, V. A. Shumilov, and A. M. Feigin*

A new mobile small-size ozone meter with a broad reception band in the range 110.4–111.2 GHz, the digital method for analyzing the spectrum of the natural atmospheric radiation, and a unique

system for calibrating the measured signal by the internal electrically controlled sample is developed and manufactured. It is shown that using the statistical (Bayesian) approach to solving incorrect inverse problem, one can satisfactorily recover the vertical profile of ozone concentration in the altitude range 20–75 km.