

УДК 551.501.724

ОДНОВРЕМЕННЫЕ МИКРОВОЛНОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ОЗОНА И ТЕМПЕРАТУРЫ СРЕДНЕЙ АТМОСФЕРЫ С ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ

М. Ю. Куликов^{1,2*}, *А. А. Красильников*¹, *А. А. Швецов*^{1,2}, *Л. И. Федосеев*¹,
*В. Г. Рыскин*¹, *Л. М. Кукин*¹, *Д. Н. Мухин*^{1,2}, *М. В. Беликович*^{1,2},
Д. А. Караштин^{1,2}, *Н. К. Скалыга*¹, *А. М. Фейгин*^{1,2}

¹ Институт прикладной физики РАН;

² Нижегородский госуниверситет им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия

В работе представлены результаты первых одновременных микроволновых измерений концентрации озона и температуры средней атмосферы с поверхности Земли, проведённых в начале 2012 года над Нижним Новгородом (56° с. ш., 44° в. д.) в период резкой изменчивости структуры средней атмосферы, вызванной возникновением внезапного стратосферного потепления. Проведено сравнение зарегистрированных особенностей динамики атмосферы с данными спутникового зондирования, полученными с помощью прибора MLS на космическом аппарате «Aura».

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что вертикальные распределения концентрации озона и температуры воздуха являются важными характеристиками состояния атмосферы, поэтому изучение их пространственно-временной эволюции традиционно является одной из основных задач в исследовании атмосферы Земли. На высотах средней атмосферы эти характеристики оказываются взаимосвязанными: константы химических реакций, определяющие концентрацию озона на некоторой высоте, существенно зависят от температуры, а скорость локального фотохимического нагрева воздуха в значительной степени определяется интенсивностью поглощения ультрафиолетового излучения молекулами озона. Характер этой связи существенно зависит от высоты. Так, например, константа реакции образования озона $O + O_2 \rightarrow O_3$ уменьшается с ростом температуры. Этот факт оказывается важным на высотах верхней стратосферы и мезосферы. В то же время в нижней полярной стратосфере истощение озона происходит именно в областях низких температур, необходимых для образования полярных стратосферных облаков и протекания гетерогенных реакций. Поэтому мониторинг состояния и эволюции средней атмосферы, направленный на понимание протекающих в ней процессов, требует проведения одновременных измерений пространственных распределений данных характеристик.

Измерения концентрации озона и температуры средней атмосферы проводятся как с поверхности Земли, так и из космоса. Приборы спутникового базирования на данный момент являются основным поставщиком синхронных (по времени и пространству) экспериментальных данных, которые практически исчерпывающим образом описывают динамику средней атмосферы на сравнительно больших (например, планетарных) пространственных масштабах с характерными временами изменения от несколько суток и более. Однако в большинстве случаев они плохо подходят для исследования быстрых (с характерными временами от нескольких десятков минут до суток) локальных процессов, в частности внутренних гравитационных волн, генерируемых тропосферными источниками. Так, например, если рассматривать данные, полученные с помощью

* kulm@appl.sci-nnov.ru

прибора MLS на спутнике «Ауга», то в окрестность с центром в Нижнем Новгороде (56° с. ш., 44° в. д.) и диаметром 600 км попадает в среднем $1 \div 2$ и $3 \div 5$ измерений вертикальных профилей температуры и концентрации озона в сутки соответственно.

Наземные измерения указанных характеристик на высотах средней атмосферы осуществляются с помощью самолётов, ракет, стратостатов, зондов, лидаров и микроволновых пассивных приборов. Однако первые три типа измерений на сегодняшний момент проводятся лишь эпизодически. Регулярные зондовые измерения осуществляются с большой временной задержкой и, кроме того, они ограничены высотами $30 \div 35$ км, т. е. охватывают лишь часть стратосферы. В свою очередь, лидары сравнительно сложны, громоздки, требуют мощных источников питания и потому в большинстве немобильны, т. е. их применение фактически ограничено исходной областью их размещения. Кроме того, они, как правило, не работают в дневное время (из-за засветки солнечным излучением) и в условиях сильного аэрозольного рассеяния. В такой ситуации наиболее перспективными для исследования средней атмосферы с поверхности Земли являются мобильные микроволновые приборы. Во-первых, они являются пассивными и обеспечивают наблюдения в любое время суток. Во-вторых, развитие полупроводниковой промышленности за последние 10 лет позволяет сделать эти приборы компактными и дешёвыми по сравнению с вышеуказанными стационарными инструментами (радиозондами и лидарами). В-третьих, они практически всепогодны, а измерения спектров собственного излучения атмосферы могут осуществляться круглосуточно с высоким временным разрешением $15 \div 30$ мин. В настоящее время порядка десяти озонметров, измеряющих спектры излучения атмосферного озона в резонансных линиях, центрированных на длинах волн 1,3; 2,1 и 3,0 мм, работают практически в постоянном режиме под управлением международной организации NDACC (бывшая NDSC) [1], основной задачей которой является комплексное исследование изменений состава земной атмосферы. Тем не менее, данные озонметры также являются приборами стационарного базирования. Они размещены на специально оборудованных станциях наблюдений, в них используется классическая схема калибровки принимаемого сигнала атмосферы с использованием жидких охлаждающих газов, которые быстро испаряются, вследствие чего требуется их постоянное восполнение. Поэтому их применение в большинстве случаев также фактически ограничено областью их исходного размещения. Таким образом, на данный момент одновременные измерения пространственных распределений температуры и концентрации озона в средней атмосфере с высоким пространственно-временным разрешением может осуществляться всего в нескольких фиксированных точках на поверхности Земли.

В начале 2012 года впервые была проведена экспериментальная кампания по одновременному микроволновому зондированию концентрации озона и температуры средней атмосферы с поверхности Земли с помощью лабораторных макетов двух новых мобильных спектрометров миллиметрового диапазона длин волн, измеряющих собственное излучение атмосферы в линиях озона и молекулярного кислорода с высоким частотным разрешением. В данной работе представлены результаты, полученные в период с 12 по 27 января 2012 года и относящиеся ко времени резкой изменчивости термической структуры средней атмосферы при внезапном стратосферном потеплении.

Работа построена следующим образом. В разделе 1 представлено описание обоих спектрометров и приводятся их наиболее важные характеристики. В разделе 2 кратко изложен используемый алгоритм восстановления вертикальных распределений концентрации озона и температуры средней атмосферы по данным микроволнового зондирования. В разделе 3 суммированы результаты одновременного микроволнового определения данных характеристик с поверхности земли и проведено их сравнение с данными спутникового зондирования, полученными с помощью прибора MLS на космическом аппарате «Ауга». В разделе 4 обсуждаются возможности дальней-

шего применения новых микроволновых приборов для исследования физических и химических особенностей средней атмосферы.

1. ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ АППАРАТУРА

Экспериментальная кампания по одновременному микроволновому определению концентрации озона и температуры средней атмосферы проводилась с помощью лабораторных макетов двух мобильных микроволновых спектро радиометров, предназначенных для мониторинга озонового слоя Земли (озонметр) и термической структуры стратосферы («стратосферный термометр»), которые регистрировали спектры яркостной температуры в линиях собственного излучения озона и молекулярного кислорода. Оба спектро радиометра основаны на классическом супергетеродинном принципе приёма и анализа излучения миллиметрового диапазона длин волн и включают в себя антенну, систему калибровки (модулятор-калибратор), приёмник, цифровой анализатор спектра и систему управления, сбора и обработки данных на базе ноутбука или персонального компьютера. Основные характеристики озонметра на момент проведения экспериментальной кампании были следующие: центральная частота 110,83604 ГГц, полоса анализа 240 МГц, спектральное разрешение 61 кГц, число спектральных каналов 4096, шумовая температура 2500 К, суммарная масса порядка 15 кг, типичное время накопления сигнала для определения одного спектра, по которому далее проводится восстановление одного профиля концентрации озона, от 15 до 30 мин, полное энергопотребление менее 100 Вт. Основные характеристики стратосферного термометра следующие: полоса приёма 52,45÷54,5 ГГц, полоса анализа 52,45÷53,45 ГГц, спектральное разрешение 61 кГц, число спектральных каналов 16384, шумовая температура 1400 К, суммарная масса порядка 15 кг, время накопления одного спектра, по которому далее проводится восстановление одного профиля концентрации температуры стратосферы, составляло от 30 до 50 мин, полное энергопотребление не более 100 Вт. На данный момент полоса анализа данного спектро радиометра в два раза уже его полосы приёма, что обусловлено возможностями используемого цифрового анализатора спектра «Acqiris».

Отметим, что оба спектро радиометра разработаны и созданы в Институте прикладной физики РАН при активном участии ряда российских научно-исследовательских институтов. Отличительными особенностями приборов являются, во-первых, их уникальность (в частности, стратосферный термометр является первой в мире реализацией идеи Уотерса [2], высказанной около 40 лет назад); во-вторых, мобильность, т.к. масса каждого спектро радиометра с ноутбуком и экспедиционным аккумулятором составляет не более 15 кг; в-третьих, применение новой, ранее нигде не применявшейся системы калибровки измеряемых сигналов по внутреннему электрически управляемому эталону (модулятор-калибратор). Спектро радиометр представляет собой компактную микросхему с набором диодов с барьерами Шоттки, размещаемую внутри его приёмного тракта. Применение модулятора-калибратора делает возможным отказаться от классической схемы калибровки принимаемого сигнала атмосферы по внешним не очень надёжным эталонам (например, по согласованным нагрузкам, находящимся при температуре кипящего азота и при температуре окружающей среды). Это, в свою очередь, позволяет заметно улучшить точность калибровки принимаемого и анализируемого сигнала, уменьшить габариты комплекса в целом и исключить необходимость использования жидкого азота, который, как известно, быстро испаряется, так что требуется его постоянное восполнение. Кроме того, при таком подходе к калибровке отпадает необходимость применения электродвигателей, направляющих принимающие зеркала на внешние эталоны в стандартной комплектации измерительной аппаратуры. Более подробная информация о технических характеристиках модулятора-калибратора и спектро радиометров в целом изложена в работах [3–6].

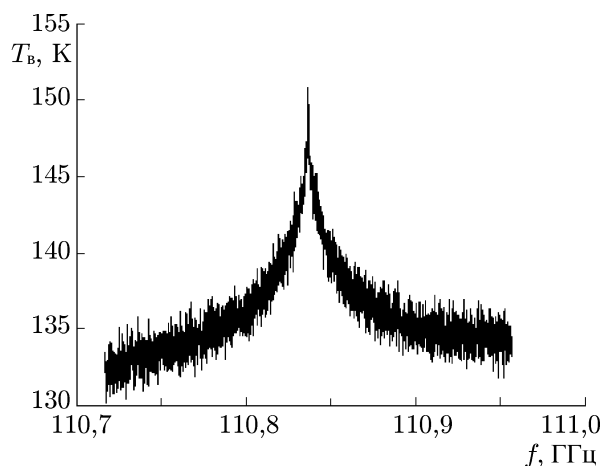


Рис. 1. Спектр яркостной температуры собственного излучения атмосферы, измеренный озонометром 21 января 2012 года над Нижним Новгородом. Время накопления сигнала 22:25–22:55

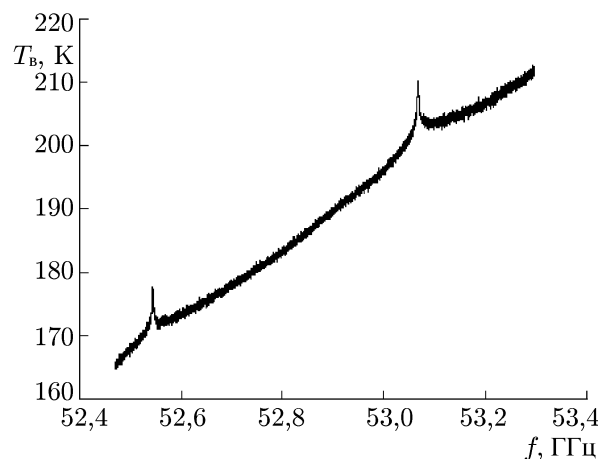


Рис. 2. Спектр яркостной температуры собственного излучения атмосферы, измеренный стратосферным термометром 21 января 2012 года над Нижним Новгородом. Время накопления сигнала 22:25–22:55

На рис. 1 и 2 представлены типичные примеры спектров яркостной температуры собственного излучения атмосферы, измеренных данными приборами. В частности, на рис. 2 можно видеть, что в частотном диапазоне $52,45 \div 53,45$ ГГц регистрируются две узкие спектральные линии, которые формируются излучением молекулярного кислорода, приходящим со стратосферных высот, и отвечают спин-вращательным переходам данной молекулы с азимутальными квантовыми числами 27 (центральная частота 53,066 ГГц) и 29 (52,542 ГГц) соответственно.

2. ВОССТАНОВЛЕНИЕ ВЕРТИКАЛЬНЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ОЗОНА И ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА

Восстановление вертикальной структуры концентрации озона и температуры средней атмосферы по данным микроволнового пассивного зондирования основано на байесовом подходе к решению некорректных обратных задач. Данный метод позволяет статистически корректно учесть как измерительный шум, неизбежно присутствующий в данных (т. е. спектрах яркостной температуры собственного излучения атмосферы), так и априорную информацию о восстанавливаемом профиле, необходимую для регуляризации задачи [7]. Он оказывается эффективным даже в случае существенно нелинейных задач, когда большинство известных методов восстановления [8–12] оказываются неприменимыми, что было продемонстрировано авторами данной работы при восстановлении температуры стратосферы по данным микроволновых измерений спектра теплового излучения атмосферы на склоне полосы молекулярного кислорода с длиной волны 5 мм [13, 14].

Так же, как и в других методах, в байесовом подходе используется модель, включающая в себя, во-первых, интегральный функционал, считающийся точно известным и дающий решение прямой задачи, 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)

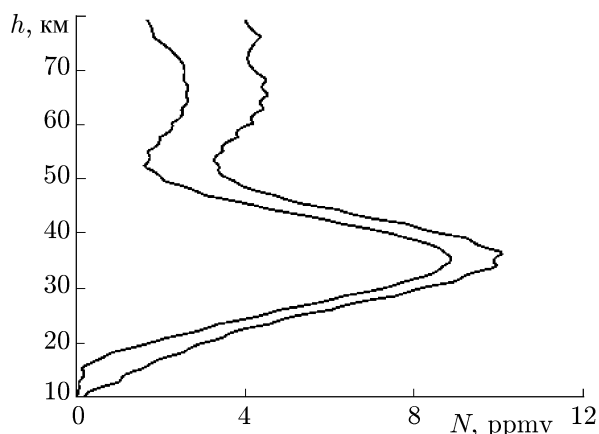


Рис. 3. Пример вертикального распределения концентрации озона, восстановленного по данным измерений 21 января 2012 года. Линиями показаны границы 65 % доверительного интервала. Концентрация озона выражена числом молекул, приходящимся на миллион молекул воздуха (parts per million by volume, ppmv)

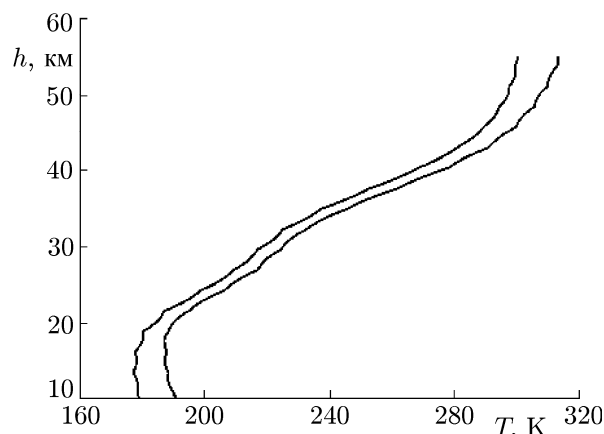


Рис. 4. Пример вертикального распределения температуры воздуха, восстановленного по данным измерений 21 января 2012 года. Линиями показаны границы 65 % доверительного интервала

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 искомым величин, позволяющие для каждой высоты оценить доверительные интервалы восстановления. Регуляризация в рамках такого подхода заключается в том, что решения ищутся на некотором ансамбле с априори заданным распределением вероятности (статистическая регуляризация), а параметры этого распределения (например, дисперсия в случае нормального распределения) определяют жёсткость регуляризации. В большинстве широко известных методов восстановления параметры регуляризации рассчитываются с помощью анализа невязки (так называемый апостериорный случай: заданное соотношение между невязкой и шумом измерений) [8, 9] или из ансамбля предыдущих данных измерений восстанавливаемой характеристики атмосферы [10]. 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 том числе, корректно решать задачу восстановления даже в случае событий, которые являются маловероятными с точки зрения статистики предыдущих данных измерений восстанавливаемой характеристики атмосферы.

Алгоритм восстановления температуры стратосферы по данным наземного микроволнового зондирования был предложен в работах [13, 14]. В рамках данного алгоритма байесов подход был реализован на основе модели высотного профиля температуры в виде искусственной нейронной сети, а атмосферное поглощение в миллиметровом диапазоне длин волн описывалось моделью Либбе–Розенкранца [15]. На типичных модельных примерах измерений одной из линий молекулярного кислорода (с центральной частотой 53,066 ГГц) показано, что выбранная аппроксимация высотного профиля температуры позволяет разделить параметры регуляризации на два типа: параметры первого типа отвечают за гладкость получаемого профиля, второго — за число участков его монотонности. Это делает возможным ослабить регуляризацию для предотвращения смещённости решения, что является важным при восстановлении профилей с высокими градиентами температур. В целом из проведённого анализа можно сделать вывод, что искусственная ней-

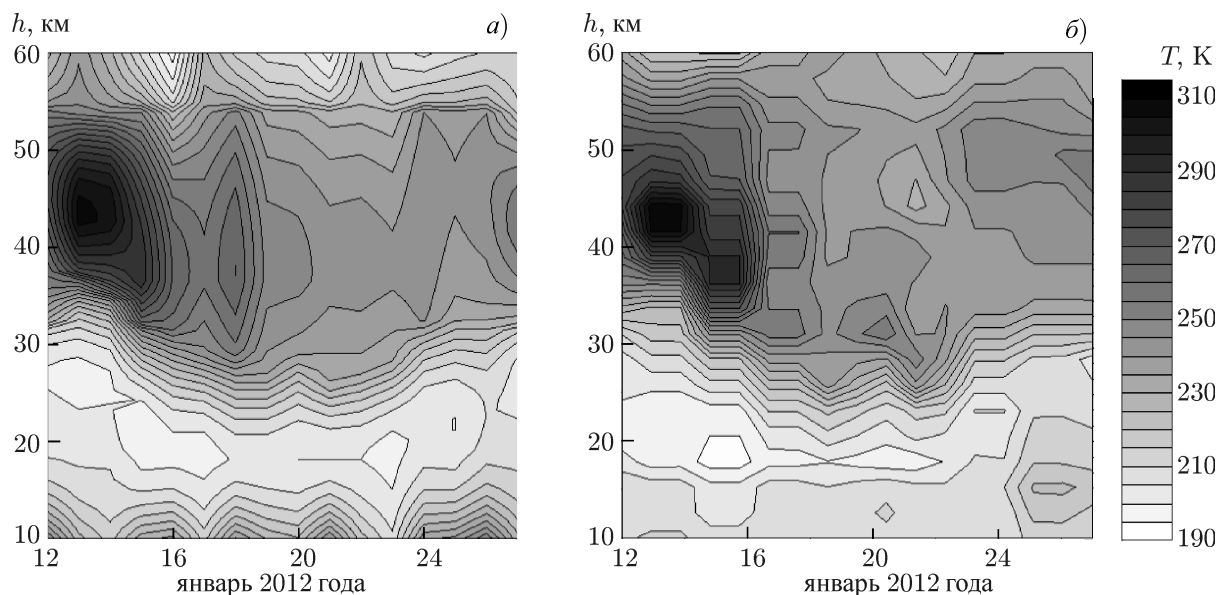


Рис. 5. Среднесуточная пространственно-временная эволюция температуры стратосферы, восстановленная по данным микроволнового зондирования над Нижним Новгородом (панель *a*). Пространственно-временная эволюция температуры стратосферы по данным спутникового зондирования (панель *b*). Горизонтальное отклонение спутниковых данных от Нижнего Новгорода составляет примерно 300 км, временное разрешение — примерно 24÷48 ч

ронная сеть позволяет достигать лучшей точности восстановления температуры стратосферы, чем кусочно-однородная модель, которая обычно используется при восстановлении характеристик атмосферы по данным дистанционного зондирования. Более подробно байесова процедура определения данной характеристики атмосферы изложена в работах [5, 6, 13, 14].

На рис. 3 и 4 показаны примеры вертикальных распределений концентрации озона $N(h)$ и температуры воздуха $T(h)$, где h — высота восстановленных по спектрам яркостной температуры собственного излучения атмосферы, представленным на рис. 1 и 2.

3. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕДЁННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В начале 2012 года была проведена двухнедельная серия непрерывных измерений концентрации озона и температуры над Нижним Новгородом с целью тестирования обоих спектро-радиометров в условиях долговременной работы аппаратуры, сравнения результатов наземных измерений с данными спутникового зондирования и регистрации возможных резких изменений состояния стратосферы в процессе развития внезапного стратосферного потепления. Данные измерения проводились с высоты примерно 180 м над уровнем моря под углом 40° к горизонту в направлении на север с типичным временем накопления сигнала для определения одного спектра собственного излучения атмосферы 30 мин. Необходимо отметить, что в это время в нижней тропосфере наблюдались разнообразные погодные условия: от сплошной низкой облачности (со снегом, высокой влажностью и приземными температурами около 0°C) в течение первой недели измерений до ясной вымороженной атмосферы (с температурами около -20°C) в течение второй недели.

При обработке спектров собственного излучения атмосферы было принято во внимание, что задача восстановления вертикального распределения концентрации озона по данным микроволнового пассивного зондирования чувствительна к выбору температурного профиля, являющегося

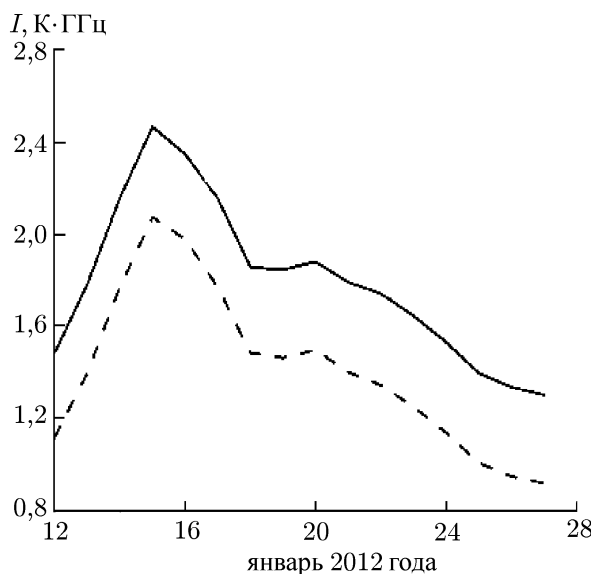


Рис. 6. Временная эволюция интегральной площади под резонансными линиями излучения молекулярного кислорода. Сплошная линия соответствует частоте 53,066 ГГц, штриховая — частоте 52,542 ГГц

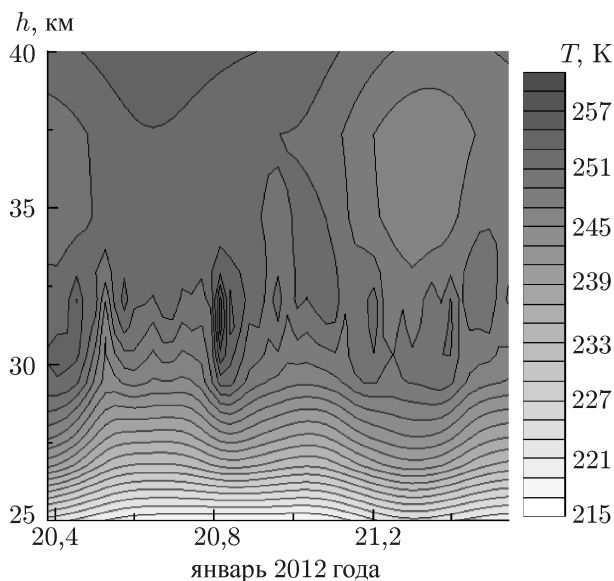


Рис. 7. Высотная зависимость температуры от времени (в сутках от 1 января 2012 года), демонстрирующая интенсивные мелкомасштабные вариации на высотах средней стратосферы

параметром данной задачи. Поэтому сначала проводилось восстановление температуры стратосферы, далее эта информация в виде срединных профилей, являющихся медианами распределений, определяющих границы 65 % доверительного интервала в диапазоне высот 10÷55 км (см. рис. 4), дополнялась подходящими по времени и месту данными спутникового зондирования температуры (прибор MLS на спутнике «Ауга») в тропосфере и мезосфере и затем использовалась для восстановления вертикальных профилей концентрации озона. В результате обработки экспериментальных данных всего было получено более 700 вертикальных профилей температуры воздуха и концентрации озона.

На рис. 5 представлена среднесуточная эволюция температуры над Нижним Новгородом в равнении с данными спутникового зондирования. Можно видеть, что результаты наземного зондирования температуры воздуха во многом (как качественно, так и количественно) соответствуют спутниковым данным в диапазоне высот 10÷55 км, а наблюдаемые отличия могут быть связаны со значительным удалением спутниковых измерений от Нижнего Новгорода. В частности, оба инструмента зарегистрировали один и тот же акт внезапного стратосферного потепления 12–15 января, когда температура на высотах верхней стратосферы (в окрестности 45 км) быстро (с характерным временем порядка 1÷2 суток) возросла до 310 К, после чего также быстро уменьшилась примерно на 50 К. В конце измерительной кампании 26–27 января наблюдаются признаки нового резкого подъёма температуры на этих высотах, который, как демонстрируют спутниковые данные (не показанные на данном рисунке), действительно имел место в первых числах февраля. В средней стратосфере (высота 20÷35 км) можно видеть обратную картину: 12–14 января данная часть стратосферы характеризовалась сравнительно низкими температурами (вплоть до 190 К на высотах 20÷25 км). По мере охлаждения верхней части стратосферы в её нижней части сначала происходило существенное потепление (на несколько десятков градусов), которое после 20–21 января сменилось похолоданием, так что к концу измерительной кампании температуры на этих высотах практически вернулись к исходным величинам. Отметим, что указанная динамика температуры средней стратосферы сопровождалась смещением областей очень низких

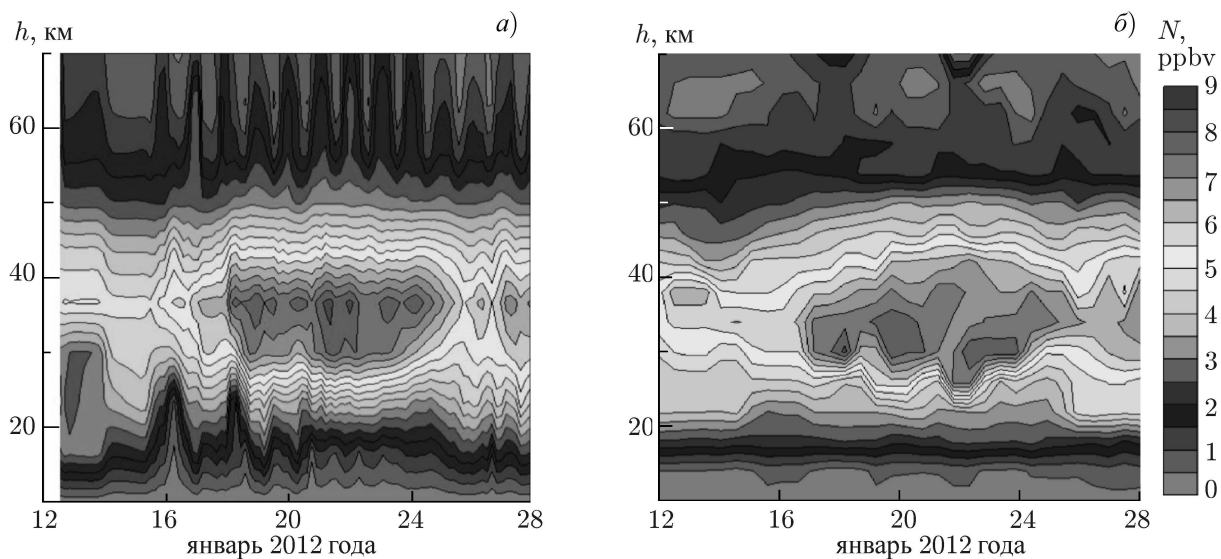


Рис. 8. Пространственно-временные эволюции концентрации озона: восстановленная по данным микроволнового зондирования над Нижним Новгородом (панель *а*) и по данным спутникового зондирования (панель *б*). Горизонтальное отклонение спутниковых данных от Нижнего Новгорода составляет $300 \div 600$ км, временное разрешение — 12 ч, наблюдения проводились днём и ночью. Концентрация озона выражена числом его молекул, приходящимся на миллиард молекул воздуха (parts per billion by volume, ppbv)

температур (порядка $190 \div 195$ К) в нижнюю стратосферу (высота менее 20 км). Напомним, что именно при таких величинах температуры воздуха происходит образование так называемых полярных стратосферных облаков, необходимых для эффективного фотохимического разрушения озонового слоя.

Следует отметить следующее. Во-первых, описанная изменчивость термической структуры стратосферы была хорошо заметна в исходных данных радиометрического зондирования, т. е. непосредственно в процессе проведения экспериментальной кампании, ещё до восстановления вертикальных профилей температуры. В частности, рис. 6 демонстрирует временную эволюцию интенсивностей I резонансных линий излучения молекулярного кислорода. Можно видеть, что данные характеристики достаточно неплохо отражают динамику стратосферы на Нижнем Новгородом, имевшую место в январе 2012 года. Это означает, что они могут выступать в качестве грубых индикаторов возникновения внезапного стратосферного потепления. Во-вторых, как следует из обработки результатов данной экспериментальной кампании, на высотах средней и верхней стратосферы неоднократно возникали интенсивные осцилляции температуры воздуха с характерными периодами в несколько часов (см. рис. 7), которые в принципе не могли разрешаться в процессе спутникового зондирования.

На рис. 8 представлена пространственно-временная эволюция концентрации озона над Нижним Новгородом в сравнении с данными спутникового зондирования в стратосфере и мезосфере соответственно. Прежде всего отметим, что выше примерно 50 км эволюции концентрации озона, определённые разными методами, существенно различаются. Можно видеть, что, в отличие от измерений с поверхности Земли, спутниковые измерения не позволяют регистрировать суточные фотохимические вариации концентрации озона выше 50 км, которые воспроизводятся всеми теоретическими моделями. В то же время на стратосферных высотах результаты наземного микроволнового зондирования концентрации озона неплохо соответствуют спутниковым дан-

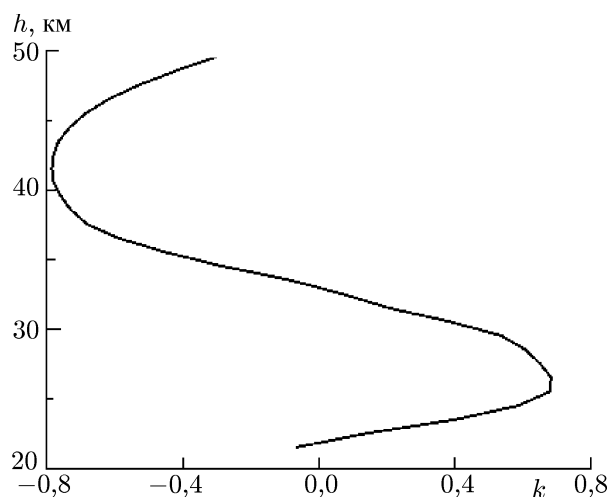


Рис. 9. Высотная зависимость коэффициента корреляции k среднесуточных значений концентрации озона и температуры воздуха

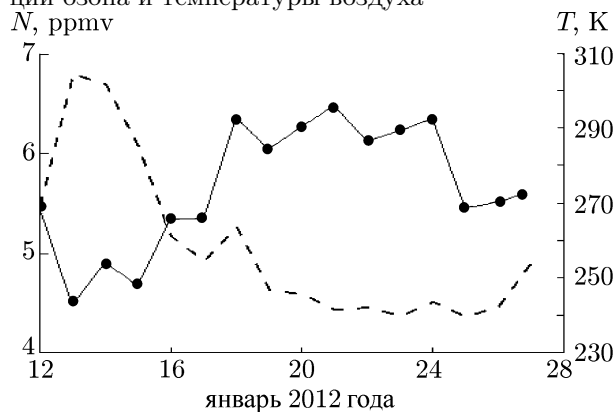


Рис. 10. Временная эволюция среднесуточных значений концентрации озона (сплошная линия) и температуры воздуха (штриховая линия) на высоте 42 км

ным. В период резкого потепления (12–15 января) на высотах верхней стратосферы озоносфера характеризовалась пониженным содержанием озона практически на всех высотах. Последующее понижение температуры на этих высотах и её повышение в средней стратосфере сопровождалось существенным увеличением (вплоть до $8 \div 9$ ppmv на высоте 40 км) концентрации озона практически во всей стратосфере, за исключением её нижней части. Такая ситуация наблюдалась вплоть до 20–21 января, когда вместе с охлаждением средней стратосферы началось уменьшение концентрации озона на высотах средней и верхней стратосферы.

На рис. 9 представлены результаты линейного корреляционного анализа связи между среднесуточными значениями концентрации озона и температурой воздуха, измеренными в рамках проведённой наблюдательной кампании, в зависимости от высоты. Можно видеть, что, несмотря на сравнительно короткие ряды данных, на высотах средней стратосферы имеется заметная корреляция (коэффициент корреляции достигает 0,7) между этими характеристиками, тогда как выше преобладает обратная ситуация. В частности, максимум антикорреляции достигается на высоте примерно 42 км. Динамика концентрации озона и температуры на этой высоте продемонстрирована на рис. 10.

4. ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены результаты первых одновременных микроволновых измерений концентрации озона и температуры средней атмосферы с поверхности Земли. Проведённая экспериментальная кампания и сравнение её результатов с данными спутникового зондирования демонстрируют, во-первых, что на временных масштабах порядка 1-х суток и более данные наземного зондирования температуры воздуха и концентрации озона в стратосфере хорошо (как качественно, так и количественно) соответствуют спутниковым данным. Это означает, что представленные приборы потенциально могут выступать в качестве валидационных инструментов для спутниковых измерений этих важных характеристик атмосферы. Во-вторых, в отличие от спутникового зондирования, наземный мониторинг позволяет регистрировать мелкомасштабные вариации температуры и концентрации озона с характерными временными масштабами меньше (и даже заметно меньше) суток, что позволяет ставить вопрос о возможности идентификации и исследования посредством указанных микроволновых приборов локальных возмущений сред-

ней атмосферы, вызываемых распространением внутренних гравитационных волн. В-третьих, уже на сравнительно коротких рядах данных зарегистрирована локальная взаимосвязь между эволюцией озона и температуры в стратосфере, которая существенно зависит от высоты. Более определённо на этот счёт можно будет высказаться после проведения более длинных экспериментальных кампаний.

Отметим, что к настоящему моменту авторами данной работы разработан набор методов (см., например, работы [16, 17]), основанных на использовании статистического, байесова подхода к восстановлению неизмеряемых параметров и переменных динамических моделей, который по данным суточных вариаций концентрации озона в мезосфере позволяет определять пространственно-временную эволюцию концентраций ещё целого ряда малых газовых составляющих в данной области мезосферы: атомарного водорода и кислорода, гидроксила, гидропероксида и паров воды, а также проводить оценку величины скорости зонального ветра на основе эффекта Зоннеманна—Доплера. С целью реализации перечисленных возможностей к настоящему времени проведена модернизация этих методов. Прежде всего, на базе описанного выше лабораторного образца озонметра создан новый спектрорадиометр с более широкой (до 1 ГГц) полосой приёма и анализа собственного излучения атмосферы [18]. К настоящему моменту оба инструмента исследования средней атмосферы доведены до уровня экспедиционных, полностью автоматизированных приборов. Также проводятся работы по существенному (в 2–3 раза) снижению их интегральной шумовой температуры, прежде всего за счёт использования новых антенных систем в виде конического гофрированного рупора с низким уровнем боковых лепестков и преусилителей на базе НЕМТ-микросхем. Кроме того, уже в этом году будет осуществлено сопряжение стратосферного термометра с новейшим цифровым анализатором спектра «Radiometer Physics» с полосой анализа 2,5 ГГц (32 768 спектральных каналов). Это, во-первых, позволит регистрировать ещё одну узкую резонансную линию собственного излучения молекулярного кислорода с азимутальным квантовым числом 25 (резонансная частота 53,5958 ГГц), что уже само по себе позволит улучшить точность восстановления температуры в стратосфере, а во-вторых, позволит опустить нижнюю границу восстановления температуры воздуха до высот верхней тропосферы.

В заключение хочется отметить, что наблюдаемая тенденция улучшения характеристик цифровых анализаторов спектра позволяет надеяться на скорое создание спектрорадиометра с полосой приёма и анализа 51÷59 ГГц, что позволит в рамках одного прибора и единой процедуры решения некорректной обратной задачи восстанавливать температуру стратосферы и тропосферы в диапазоне высот от 1 до 55 км.

Работа выполнена при поддержке ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса на 2014–2020 годы» (соглашение о предоставлении субсидии 14.607.21.0107 от 28 ноября 2014 года между Министерством образования и науки РФ и ФГБУН ИПФ РАН, универсальный идентификатор проекта RFMEFI60714X0107).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. <http://www.ndsc.ncep.noaa.gov>.
2. Waters J. W. // Nature. 1973. V. 242. P. 506.
3. Федосеев Л. И., Божков В. Г., Геннеберг В. А. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2007. Т. 50, № 10–11. С. 858.
4. Патент № 2488941 РФ. Электрически управляемый модулятор-калибратор миллиметрового диапазона длин волн / Федосеев Л. И., Божков В. Г., Геннеберг В. А., Петров И. В. Заявл. 27.04.2012; Оpubл. 27.07.2013. Бюл. № 21.

5. Швецов А. А., Федосеев Л. И., Караштин Д. А. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2010. Т. 53, № 5–6. С. 356.
6. Швецов А. А., Караштин Д. А., Федосеев Л. И. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2011. Т. 54, № 8–9. С. 631.
7. Mukhin D. N., Feigin A. M., Molkov Ya. I., et al. // Adv. Space Res. 2006. V. 37, No. 12. P. 2292.
8. Phillips D. L. // J. Assoc. Comput. Mach. 1962. V. 9. P. 84.
9. Тихонов А. Н. // Докл. АН СССР. 1963. Т. 153, № 1. С. 49.
10. Chahine M. T. // J. Opt. Soc. Am. 1968. V. 58, No. 12. P. 1634.
11. Randegger A. K. // Pure and Appl. Geophys. 1980. V. 118. P. 1052.
12. Rodgers C. D. // J. Geophys. Res. D. 1990. V. 95, No. 5. P. 5587.
13. Караштин Д. А., Мухин Д. Н., Скалыга Н. К. и др. // Изв. РАН. Серия физическая. 2009. Т. 73, № 12. С. 1750.
14. Караштин Д. А., Мухин Д. Н., Скалыга Н. К. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2009. Т. 52, № 10. С. 779.
15. Rosenkranz P. W. // Radio Sci. 1998. V. 33. P. 919.
16. Kulikov M. Yu., Feigin A. M., Sonnemann G. R. // Atmos. Chem. Phys. 2009. No. 9. P. 8199.
17. Куликов М. Ю., Мухин Д. Н., Фейгин А. М. // Изв. вузов. Радиофизика. 2009. Т. 52, № 9. С. 690.
18. Красильников А. А., Куликов М. Ю., Кукин Л. М. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2013. Т. 56, № 8–9. С. 699.

Поступила в редакцию 14 января 2015 г.; принята в печать 24 февраля 2015 г.

SIMULTANEOUS GROUND-BASED MICROWAVE MEASUREMENTS OF THE MIDDLE-ATMOSPHERE OZONE AND TEMPERATURE

*M. Yu. Kulikov, A. A. Krasil'nikov, A. A. Shvetsov, L. I. Fedoseev, V. G. Ryskin, L. M. Kukin,
D. N. Mukhin, M. V. Belikovich, D. A. Karashtin, N. K. Skalyga, and A. M. Feigin*

We present the results of the first simultaneous ground-based microwave measurements of the middle-atmosphere ozone and temperature performed at the beginning of 2012 over Nizhny Novgorod (56 N, 44 E) during a sudden stratospheric warming. The detected features of the atmosphere dynamics are compared with satellite sounding data from an MLS instrument onboard the Aura satellite.