

УДК 551.510.534+550.388.8

НАЗЕМНЫЙ МИКРОВОЛНОВЫЙ МОНИТОРИНГ СОДЕРЖАНИЯ ОЗОНА В СРЕДНЕЙ АТМОСФЕРЕ НАД ПЕТЕРГОФОМ И ТОМСКОМ ВО ВРЕМЯ СТРАТОСФЕРНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ ЗИМОЙ 2013–2014 ГОДОВ

*Д. А. Бочковский*¹, *Я. А. Виролайнен*², *Ю. Ю. Куликов*^{3*}, *В. Н. Маричев*¹,
*А. В. Поберовский*², *В. Г. Рыскин*³, *Ю. М. Тимофеев*²

¹ Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН, г. Томск;

² Санкт-Петербургский госуниверситет, г. Санкт-Петербург;

³ Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия

Изложены результаты исследования радиофизическим методом динамики содержания озона в средней атмосфере над Петергофом (60° с. ш., 30° в. д.) и Томском (56° с. ш., 85° в. д.) во время стратосферного потепления зимой 2013–2014 годов. В наземных наблюдениях были использованы одинаковые микроволновые озонметры (рабочая частота 110,8 ГГц) и одинаковые методики как для измерения спектров излучения молекулы озона, так и для оценок вертикального распределения озона в средней атмосфере. Эти результаты были сопоставлены со спутниковыми данными об общем содержании озона (спутник Aura, прибор OMI), с данными о высотных профилях озона и температуры в слое 20÷60 км (спутник Aura, прибор MLS), а также с данными о содержании озона в слое 25÷60 км, полученными с помощью инфракрасного фурье-спектрометра «Bruker IFS-125HR» в Петергофе. В атмосфере над Петергофом были отмечены значительные вариации содержания озона на высотах 40÷60 км, которые были вызваны стратосферным потеплением минорного типа. Продолжительность динамических возмущений над Петергофом составила 2,5 месяца. Над Томском были обнаружены динамические процессы, связанные с горизонтальным переносом воздушных масс, которые также оказали влияние на вертикальную структуру содержания озона в средней атмосфере, но это влияние в меньшей степени зависело от вариаций температурного фона.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время для исследования природы вариаций содержания озона и температуры в средней атмосфере широко используются средства микроволнового дистанционного зондирования как орбитального, так и наземного базирования [1, 2]. Изменения содержания озона значительно влияют на радиационный и термический режим атмосферы. Для интерпретации результатов микроволновых измерений необходимо привлекать данные о зависимости температуры от высоты. Эти данные могут быть представлены как в виде зональных моделей [3], так и в виде измеренных величин, например как результаты аэрологического или ракетного зондирования. Весьма успешными являются измерения вертикального профиля температуры с помощью лидаров, которые располагаются на поверхности Земли [4, 5]. Следует подчеркнуть, что наиболее сильное влияние изменений в температурном профиле на результаты микроволновых наблюдений содержания озона в средней атмосфере будет проявляться во время так называемых внезапных стратосферных потеплений [2]. Поэтому одновременные измерения реальных вариаций содержания озона и температуры в средней атмосфере могут дать возможность исследовать динамические процессы во время перестройки атмосферной циркуляции.

В данной работе изложены результаты измерений содержания озона в средней атмосфере над Петергофом (60° с. ш., 30° в. д.) и Томском (56° с. ш., 85° в. д.) с использованием одинаковых

* yuyukul@appl.sci-nnov.ru

микроволновых озонметров во время стратосферного потепления зимой 2013–2014 годов. Весьма важным здесь является использование одинаковых методик как для наблюдений, так и для оценок вертикального распределения содержания озона в средней атмосфере. Эти результаты были сопоставлены с данными об общем содержании озона (спутник Aura, прибор OMI), с микроволновыми данными о высотных профилях содержания озона и температуры в слое 20÷60 км (спутник Aura, прибор MLS), а также с данными о содержании озона в слое 25÷60 км, которые были получены с помощью инфракрасного фурье-спектрометра «Bruker IFS-125HR» в Петергофе [6].

1. МИКРОВОЛНОВОЕ ОБОРУДОВАНИЕ, ИСПОЛЬЗОВАННОЕ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ

Метод наземной микроволновой радиометрии основан на измерениях теплового излучения атмосферы в линиях озона в диапазонах миллиметровых и субмиллиметровых волн. Результаты микроволновых наблюдений слабо зависят от погодных условий и наличия в атмосфере аэрозолей. Это является их преимуществом по сравнению с наблюдениями в оптическом и инфракрасном диапазонах длин волн. Кроме того, микроволновые наблюдения содержания озона могут выполняться круглосуточно. В последние годы удалось сделать существенный шаг вперёд в создании мобильных микроволновых спектрометров нового поколения [7, 8]. Использование мобильных озонметров позволило в сложных экспедиционных условиях решить ряд задач, что было бы трудно сделать при использовании «стандартной» микроволновой техники.

Мобильный озонметр состоит из гетеродинного неохлаждаемого приёмника, настроенного на фиксированную частоту 110836,04 МГц, соответствующую вращательному переходу молекулы озона $6_{0,6} \div 6_{1,5}$, и многоканального анализатора спектра. На входе приёмника находится модуль, включающий в себя антенну (скалярный рупор) и коммутатор для калибровки уровня принимаемого атмосферного излучения в линии озона. Ширина диаграммы направленности рупорной антенны по уровню 3 дБ составляет $5,4^\circ$. Шумовая температура приёмника составляет 2500 К, режим приёма в одной полосе обеспечивается заградительным фильтром с прямыми потерями 0,5 дБ и подавлением зеркального канала более 20 дБ. Анализатор спектра с полной полосой анализа 240 МГц состоит из 31 фильтра с полосами пропускания от 1 до 10 МГц. Параметры прибора позволяют измерять за 15 мин спектр линии излучения озона с точностью примерно 2%. Измерения спектров теплового излучения атмосферы выполняются методом калибровки по двум «чёрнотельным» эталонам, которые находятся при температуре кипения жидкого азота и при температуре окружающего воздуха.

С помощью инверсии из получаемых спектров можно извлечь данные о вертикальном распределении содержания озона в атмосфере. Критерием правильности решения обратной задачи являлось наилучшее соответствие спектральной линии озона, рассчитанной по восстановленному профилю его концентрации, с исходным экспериментальным спектром. Погрешность определения вышеописанным прибором вертикального распределения озона по его измеренным спектрам не превышает 20%.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 приведены вариации содержания озона в период с ноября 2013 года по март 2014 года над Петергофом (а) и в период с декабря 2013 года по февраль 2014 года над Томском (б). Символами «+» показаны данные об общем содержании озона (ОСО), полученные на спутнике

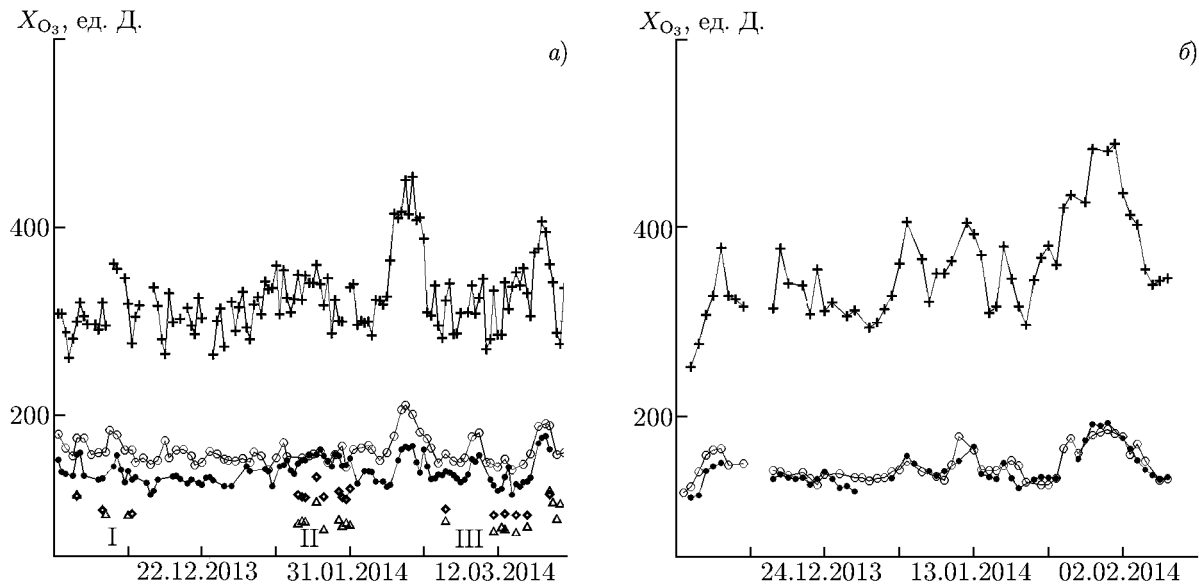


Рис. 1. Вариации содержания атмосферного озона зимой 2013–2014 годов над Петергофом (а) и Томском (б) в единицах Добсона (1 ед. Д. = $2,67 \cdot 10^{16}$ молекул/см²)

Aura прибором OMI [9]. Также на рис. 1 приведены временные изменения содержания озона в слое 22÷50 км по данным прибора MLS на спутнике Aura ($X_{O_3}^{MLS}$, символ \circ) и содержания озона в слое выше 22 км по данным наземного прибора ($X_{O_3}^{MMB}$, символ \bullet). Прибор MLS использует лимбовый метод измерения параметров атмосферы [10]. Нами были отобраны данные по содержанию озона и температуре, соответствующие временам пролёта спутника над Петергофом и Томском. С этой целью был выбран домен с координатами $(60 \pm 1,5)^\circ$ с. ш. и $(30 \pm 5)^\circ$ в. д. для Петергофа и $(56 \pm 1,5)^\circ$ с. ш. и $(85 \pm 5)^\circ$ в. д. для Томска. Данные наземного прибора соответствуют содержанию озона для дневных и ночных спектров его излучения. Отличие между ними практически отсутствует.

Над Петергофом средняя величина ОСО за весь период наблюдений составила (323 ± 4) ед. Д. С 11 февраля хорошо заметно увеличение ОСО, которое продержалось в течение 10 дней. Средняя величина ОСО при этом составила (413 ± 8) ед. Д. Максимум ОСО 454 ед. Д. пришёлся на 17 февраля 2014 года. Величины ОСО до и после возмущения составляли (313 ± 5) ед. Д. и (308 ± 6) ед. Д. соответственно. Кроме того, можно отметить кратковременное возрастание ОСО 24 марта до средней величины (388 ± 7) ед. Д. Над Петергофом хорошо просматриваются возмущения в содержании озона в средней атмосфере, которые начались с середины февраля и продолжались до конца марта. Первый максимум величины $X_{O_3}^{MMB}$ относится к 15 февраля, второй — 7 марта, и третий пришёлся на 25.03.2014. Интервал между максимумами составлял величину порядка 20 дней, при этом временной ход содержания озона в слое, полученный по спутниковым и наземным микроволновым измерениям, идентичен. Коэффициент корреляции между изменениями величин $X_{O_3}^{MLS}$ и $X_{O_3}^{MMB}$ в период «возмущения» имел величину 0,906. Коэффициент корреляции между этими величинами с ноября по 11 февраля (до «возмущения») составил 0,331, а за всё время наблюдений 0,718. Систематическое превышение содержания озона по бортовым данным над наземными данными за всё время наблюдений составило величину $X_{O_3}^{MLS}/X_{O_3}^{MMB} = 1,14 \pm 0,01$.

Отметим также, что величины $X_{O_3}^{MLS}$ и $X_{O_3}^{MMB}$ с середины и до конца января 2014 года были одинаковыми, при этом в период с декабря 2013 года по январь 2014 года временные изменения ОСО и $X_{O_3}^{MMB}$ согласуются лучше, чем изменения ОСО и $X_{O_3}^{MLS}$. Коэффициент корреляции между

изменениями ОСО и $X_{O_3}^{MMB}$ составляет 0,329, а коэффициент корреляции между изменениями ОСО и $X_{O_3}^{MLS}$ равен $-0,012$. Возможные причины возникновения этой особенности мы обсудим ниже.

На рис. 1а также сопоставлены данные о содержании озона в слое 25÷60 км, полученные при одновременных наземных микроволновых наблюдениях (символ \diamond) и в наземных измерениях прямого солнечного инфракрасного излучения (символ Δ). Инфракрасные измерения были выполнены фурье-спектрометром «Bruker IFS-125HR» в Петергофе. Из рис. 1а следует, что количество озона, по данным микроволновых измерений систематически выше, чем полученное по инфракрасным измерениям. Хорошо заметно, что расхождение этих величин для января (группа точек I) наибольшее и составляет 33 %, для группы точек III оно равняется 15 %, а для левой группы точек I расхождения практически нет. Следует отметить, что наибольшее расхождение пришлось на вторую половину января, когда величины $X_{O_3}^{MLS}$ и $X_{O_3}^{MMB}$ сравнялись. Кроме того, группы точек II и III соответствуют периоду времени, когда в средней атмосфере возникли динамические возмущения в содержании озона и температуры. К сожалению, ряд одновременных микроволновых и инфракрасных наблюдений является слишком коротким. Для лучшего сопоставления необходимы более длительные совместные измерения.

На рис. 1б приведён временной ход содержания озона в период с декабря 2013 года по февраль 2014 годов над Томском. Указанное время наблюдений было выбрано в связи с тем, что по данным нескольких лет лидарного зондирования температуры стратосферные потепления над Томском происходят, как правило, в январе [4]. В качестве примера наблюдений значительного стратосферного потепления в Западной Сибири можно привести работу [5]. Верхняя кривая на правой панели рис. 1 показывает изменения ОСО (прибор OMI/Aura), которые отражают временной ход содержания озона во всей толще атмосферы в течение зимы.

Средняя величина ОСО за рассматриваемый период времени составила (354 ± 7) ед. Д. Характерным в поведении ОСО в рассматриваемый период времени является его кратковременное увеличение до 483 ед. Д. (среднее по трём дням) в конце января. Величина роста ОСО составила около 40 % относительно его уровня до и после возмущения. Следует отметить, что наибольший вклад в изменения ОСО вносят вариации, происходящие в районе максимума озонового слоя (высоты 20÷24 км). Коэффициент корреляции между изменениями содержания озона $X_{O_3}^{MMB}$ и ОСО составил 0,905; между изменениями $X_{O_3}^{MLS}$ и ОСО 0,752 и между изменениями $X_{O_3}^{MMB}$ и $X_{O_3}^{MLS}$ 0,845. Временной ход вариаций содержания озона в течение всего периода наблюдений совпадает при измерениях как с поверхности Земли, так и с орбиты. Особенно заметен рост содержания озона в конце января 2014 года, зарегистрированный спутниковым и наземным микроволновым приборами. Систематическое превышение содержания озона по спутниковым микроволновым данным над содержанием озона, полученным из наземных данных за всё время наблюдений составило величину $X_{O_3}^{MLS}/X_{O_3}^{MMB} = 1,03 \pm 0,01$.

Рассмотрим характер изменчивости содержания озона и температуры на высотах средней атмосферы 25; 40 и 60 км над Петергофом и Томском. На рис. 2 представлен временной ход концентрации озона (данные наземного микроволнового зондирования, символ \bullet) и температуры (данные прибора MLS, сплошная кривая) на этих высотах над Петергофом зимой 2013–2014 годов.

Понижение температуры на высоте 25 км началось с середины декабря 2013 года. Минимум температуры 191,5 К пришёлся на конец декабря—начало января. Постепенный рост температуры, который продолжался в течение месяца, закончился достижением максимума 225,4 К 15 февраля 2014 года. Приращение этой величины по сравнению со среднемесячной температурой составило 27 К для января и 16 К для февраля 2014 года. Такое изменение термической структуры средней атмосферы свидетельствует о слабом стратосферном потеплении; подобное

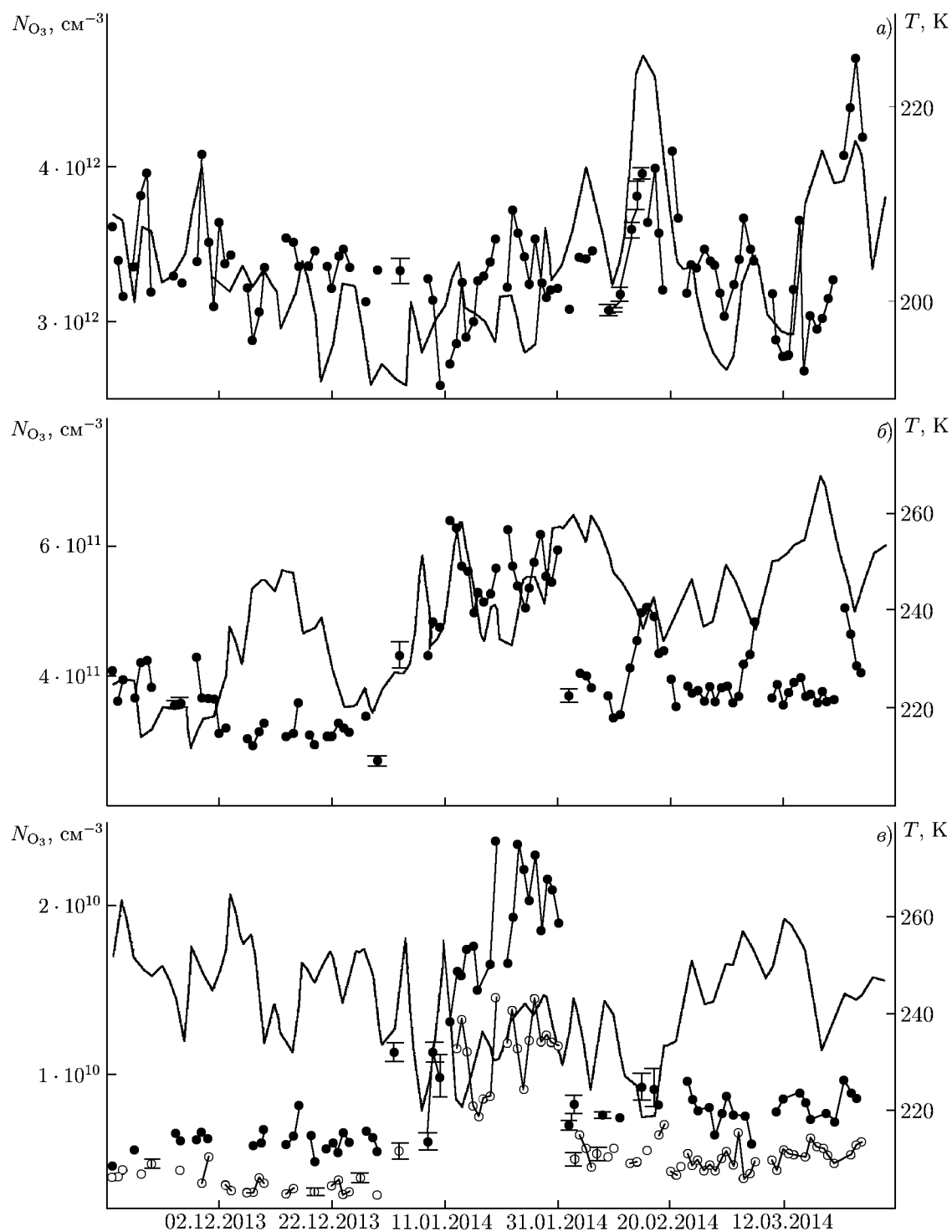


Рис. 2. Изменение во времени концентрации озона и температуры в атмосфере на высоте 25 км (а); 40 км (б) и 60 км (в) над Петергофом зимой 2013–2014 годов

явление характерно для полярных широт и отмечалось нами ранее над Апатитами (67° с. ш., 33° в. д.) [11]. Коэффициент корреляции между изменениями концентрации озона и температуры на высоте 25 км за весь период наблюдений составил 0,487, до пика температурного роста

(середина февраля) 0,237, и во время максимальной фазы стратосферного потепления 0,546. Аналогичные величины коэффициента корреляции между содержанием озона и температурой на высоте 25 км, полученными с орбиты, равнялись 0,308, $-0,018$ и $0,639$ соответственно. Отношение величин концентрации озона на высоте 25 км по спутниковым и наземным данным за весь период наблюдений составило $N_{O_3}^{MLS}/N_{O_3}^{MMB} = 1,04 \pm 0,04$.

Отмеченное выше развитие стратосферного потепления над Петергофом происходило сверху вниз по классической схеме. В пользу этого свидетельствуют обнаруженные изменения содержания озона и температуры на высоте 40 км (см. рис. 2б), сдвинутые по времени относительно данных на высоте 25 км (рис. 2а). Рост температуры и содержания озона на высоте 40 км опережал приблизительно на две недели аналогичные изменения на высоте 25 км. Наши микроволновые наблюдения в полярных широтах неоднократно подтверждали такой сценарий [12–15]. Обращает на себя внимание значительное возмущение содержания озона на высотах 40 км (рис. 2б) и 60 км (рис. 2в), которое началось во второй половине января 2014 года. Рост содержания озона на высоте 40 км относительно невозмущённого уровня составил около 70 %, а изменения содержания озона на высоте 60 км доходили до нескольких раз. Расхождения между спутниковыми и наземными данными, исключая вторую половину января, находились в пределах точности микроволновой радиометрии 10 %.

Масштаб изменения содержания озона на высотах средней атмосферы можно сравнить с масштабом ещё одного известного явления — суточного хода мезосферного озона. На рис. 2в показан суточный ход мезосферного озона (высота 60 км). Здесь символ \bullet соответствует содержанию озона по обработанным ночным спектрам теплового излучения, а символ \circ — содержанию озона по обработанным дневным спектрам. Среднее превышение за весь период наземных микроволновых наблюдений содержания ночного озона над дневным составило около 60 %. Во время развития потепления в средней и верхней части стратосферы спутниковый прибор не отметил возмущений в озоновом слое в отличие от данных, полученных с поверхности Земли. Возможно, это связано со спецификой лимбового метода измерений, часто используемого при спутниковых наблюдениях: этот метод обеспечивает пространственное разрешение по горизонтали несколько сотен километров, т. е. намного хуже, чем наземный прибор. При этом происходит усреднение сигнала радиоизлучения атмосферы вдоль луча зрения антенны за время сканирования. Следствием этого становится возможное получение в таких измерениях сглаженных значений содержания озона вдоль траектории полёта спутника. Вероятность ошибки будет особенно велика вблизи резких фронтальных барических разделов. В любом случае, отмеченный выше факт требует дополнительного изучения при сопоставлении данных спутниковых и наземных приборов.

Рассмотрим характер изменений содержания озона и температуры средней атмосферы зимой 2013–2014 годов над Томском. На рис. 3 приведены профили концентрации озона и температуры на высотах 25; 40 и 60 км с конца ноября по февраль. Наиболее низкие концентрации озона по данным наземного микроволнового зондирования наблюдались на всех высотах в конце ноября 2013 года. Далее шёл постепенный рост концентрации с незначительными вариациями до конца января 2014 года. Всё это время Томск находился на краю полярного стратосферного вихря [16]. Воздушные массы на краю циклона характеризуются высокими скоростями вдоль его границы и крайней неустойчивостью своего состава, которая может являться причиной обнаруженной нами вариативности содержания озона.

Иллюстрацией сказанному являются данные рис. 1, где хорошо видна более значительная изменчивость ОСО (по данным прибора ОМІ) в атмосфере над Томском по сравнению с Петергофом, который большую часть времени располагался внутри полярного вихря. Этот факт подтверждается также проведённым анализом обратных траекторий воздушных масс, расчёт которых был выполнен Британским центром атмосферных данных BADC [17]. Траектории, которые были

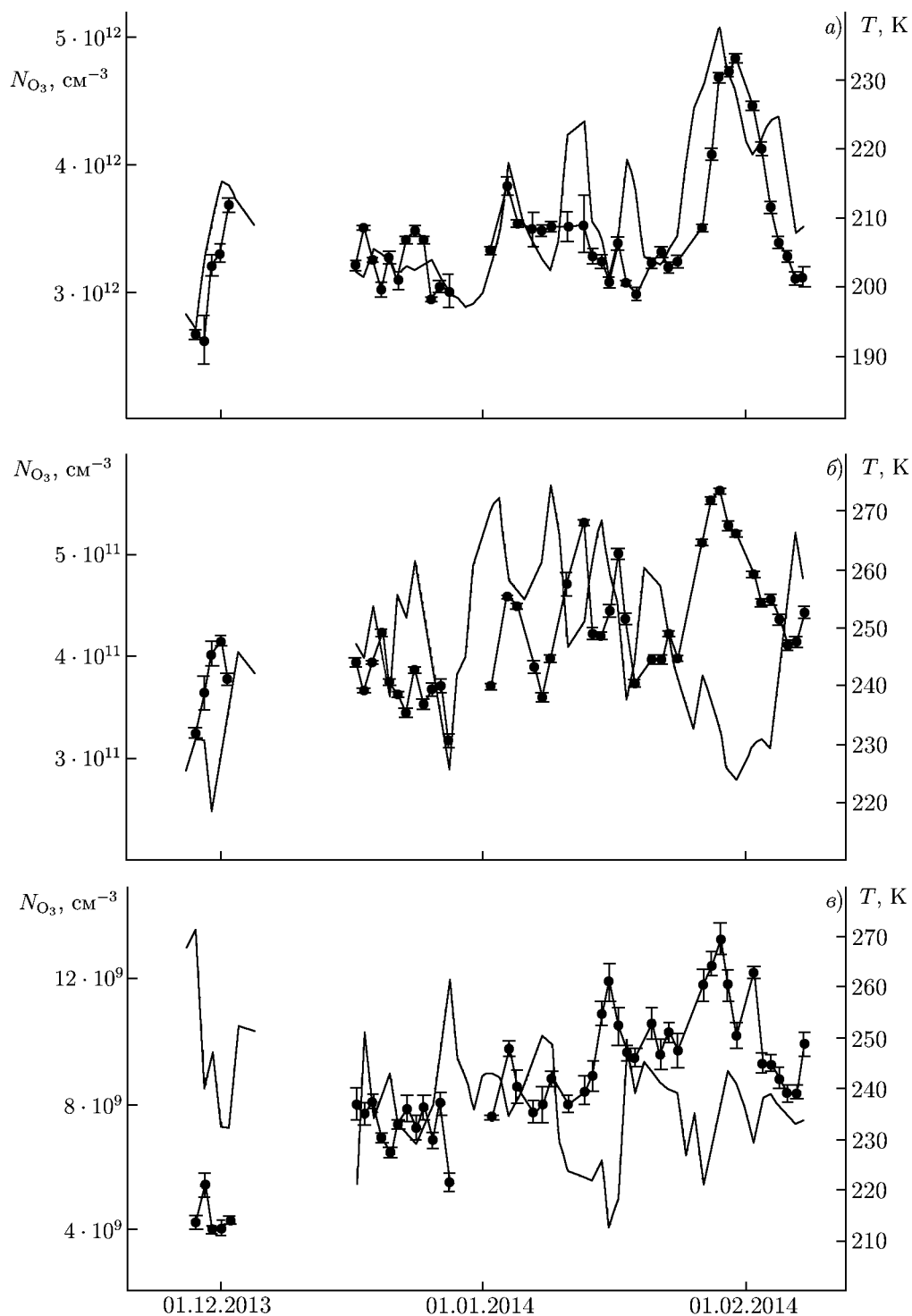


Рис. 3. Изменение во времени количества озона и температуры в атмосфере на высоте 25 км (а); 40 км (б) и 60 км (в) над Томском зимой 2013–2014 годов

рассчитаны для уровней средней атмосферы (отвечающих давлениям от 10 до 50 гПа), были циклическими и охватывали значительную площадь приполярной территории. В третьей декаде января полярный вихрь слегка деформировался и сместился в западном направлении, в результа-

те чего Томск оказался вне этого циклона. Циркуляция в средней атмосфере резко изменилась, скорости воздушных масс уменьшились. На всех высотах виден рост содержания озона в это время. При этом на высоте 25 км увеличение содержания озона в 1,5 раза сопровождалось повышением температуры примерно на 20 К. Было обнаружено, что рост температуры опережал рост концентрации озона примерно на два дня. Тем не менее, синфазное изменение концентрации озона и температуры указывает на динамическую природу этих процессов, в отличие от высот 40 и 60 км, где взаимосвязь содержания озона и температуры определяется фотохимическими процессами [18]. Из рис. 3 видно, что на высотах 40 и 60 км изменения концентрации озона и температуры происходили в основном в противофазе.

3. НЕКОТОРЫЕ ИТОГИ

Микроволновые наблюдения концентрации озона и температуры в средней атмосфере зимой 2013–2014 годов над Петергофом (60° с. ш., 30° в. д.) и Томском (56° с. ш., 85° в. д.) показали различие в поведении вышеуказанных атмосферных параметров. Следует отметить, что Петергоф располагался во внутренней части зимнего полярного вихря, в отличие от Томска, который значительную часть времени находился вблизи границы этого циклона. В атмосфере над Петергофом был зафиксирован динамический процесс: стратосферное потепление в интервале высот 22÷60 км с середины января до конца марта 2014 года. Развитие потепления происходило сверху вниз, и самые большие вариации озона (в несколько раз) пришлись на высоты 40÷60 км; на высотах менее 40 км изменения концентрации озона достигали 20÷50%. Задержка в изменениях концентрации озона между областями высот 40÷60 км и 22÷40 км составила около двух недель. Над Томском также были обнаружены динамические процессы в атмосфере, связанные с горизонтальным переносом воздушных масс, которые влияли на вертикальную структуру содержания озона в средней атмосфере, но это влияние в меньшей степени зависело от вариаций температурного фона.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты 12–05–00596, 13–05–01036 и 15–05–04249). Экспериментальные исследования в СПбГУ и ИОА СО РАН были выполнены при поддержке РФФИ (проекты 14–17–00096 и 14–27–00022 соответственно). Авторы благодарят Британский центр атмосферных данных BADC, обеспечивший расчёт траекторий с использованием данных Европейского центра среднесрочных прогнозов ECMWF.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Waters J. W., Froidevaux U., Harwood R. S., et al. // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2006. V. 44, No. 5. P. 1075.
2. Куликов Ю. Ю., Красильников А. А., Рыскин В. Г. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2002. Т. 38, № 2. С. 182.
3. Barnett J. J., Corney M. Handbook for MAP. Urbana: University of Illinois. 1985. V. 16. P. 47.
4. Маричев В. Н. // Оптика атмосферы и океана. 2011. Т. 24, № 5. С. 386.
5. Маричев В. Н., Матвиенко Г. Г., Лисенко А. А. и др. // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27, № 1. С. 46.
6. Виролайнен Я. А., Тимофеев Ю. М., Поберовский А. В. и др. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2015. Т. 51, № 2. С. 191.

7. Kulikov Yu. Yu., Krasilnikov A. A., Shchitov A. M. // Proc. 6th Int. Kharkov Symp. Phys. Engineering Microwaves, Millimeter, Submillimeter Waves, June 25–30 2007. Kharkov, Ukraine. 2007. V. 1. P. 62.
8. Красильников А. А., Куликов Ю. Ю., Рыскин В. Г. и др. // Приборы и техника эксперимента. 2011. № 1. С. 127.
9. http://gdata1.sci.gsfc.nasa.gov/daac-bin/G3/gui.cgi?instance_id=omi
10. <http://mirador.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/mirador/presentNavigation.pl?tree=projectandproject=MLS>
11. Куликов Ю. Ю., Красильников А. А., Кукин Л. М., Рыскин В. Г. Физика атмосферы: электрические процессы, радиофизические методы исследований. Материалы совещания, г. Нижний Новгород, 4–5 ноября 2003. С. 33.
12. Куликов Ю. Ю., Красильников А. А., Рыскин В. Г. // Геомагнетизм и аэронавигация. 2002. Т. 42, № 2. С. 265.
13. Kulikov Yu. Yu., Ryskin V. G., Krasil'nikov A. A. // Izvestiya RAS, Atmospheric and Oceanic Physics. 2003. V. 39, Suppl. 1. P. S56.
14. Куликов Ю. Ю., Рыскин В. Г., Красильников А. А., Кукин Л. М. // Изв. вузов. Радиофизика. 2005. Т. 48, № 2. С. 134.
15. Kulikov Yu. Yu., Ryskin V. G., Krasilnikov A. A., et al. // Proc. 28 Annual Seminar, Physics of Auroral Phenomena, Apatity, March 1–4, 2005. P. 211.
16. <http://www.pole-ether.fr/etherType/index.php?id=1663andL=1>
17. <http://badc.nerc.ac.uk/>
18. Kulikov Yu. Yu., Ryskin V. G. // Int. J. Geomagnetism Aeronomy. 1999. V. 1, No. 3. P. 253.

Поступила в редакцию 9 июля 2015 г.; принята в печать 16 ноября 2015 г.

GROUND-BASED MICROWAVE MONITORING OF MIDDLE-ATMOSPHERE OZONE OVER PETERHOF AND TOMSK DURING STRATOSPHERIC WARMING IN THE WINTER OF 2013–2014

*D. A. Bochkovsky, Ya. A. Virolainen, Yu. Yu. Kulikov, V. N. Marichev, A. V. Poberovsky, V. G. Ryskin,
and Yu. M. Timofeyev*

We present the results of studying the dynamics of ozone content in the middle atmosphere over Peterhof (60° N, 30° E) and Tomsk (56° N, 85° E) during stratospheric warming in the winter of 2013–2014 by the radiophysical method. In the ground-based observations we used the same microwave ozonemeters (operated frequency 110.8 GHz) and the same techniques both for measuring the radiation spectra of ozone molecules and estimates of the vertical distribution of ozone in the middle atmosphere. These results were compared with satellite data on the total ozone content TOC (OMI/Aura), altitude profiles of ozone and temperature in the layer of 20–60 km (MLS/Aura), and also with the data on ozone content in the layer of 25–60 km, which were obtained using a Bruker IFS-125HR infrared Fourier spectrometer in Peterhof. Significant variations in ozone, which were caused by stratospheric warming of the minor type, were observed in the atmosphere over Peterhof at altitudes of 40 to 60 km. The duration of dynamic perturbations over Peterhof was 2.5 months. Dynamic processes associated with the horizontal transport of air masses, which also had an impact on the vertical structure of ozone in the middle atmosphere, were also detected over Tomsk, but this effect was less dependent on the background temperature variations.