

УДК 551.510.534.3

ОБНАРУЖЕНИЕ БОЛЬШИХ ФЛУКТУАЦИЙ В СОДЕРЖАНИИ ОЗОНА СРЕДНЕЙ АТМОСФЕРЫ ВО ВРЕМЯ ВНЕЗАПНЫХ СТРАТОСФЕРНЫХ ПОТЕПЛЕНИЙ В ПРИПОЛЯРНЫХ ШИРОТАХ АРКТИКИ

© 2020 г. Ю. Ю. Куликов¹, *, А. В. Поберовский², **, В. Г. Рыскин¹, В. А. Юшков³

¹Институт прикладной физики РАН (ИПФ РАН),
г. Нижний Новгород, Россия

²Санкт-Петербургский государственный университет (СПбГУ),
г. Санкт-Петербург, Россия

³Центральная аэрологическая обсерватория (ЦАО),
г. Долгопрудный (Московская обл.), Россия

*e-mail: yuyukul@appl.sci-nnov.ru

**e-mail: avpob@troll.phys.spbu.ru

Поступила в редакцию 26.02.2019 г.

После доработки 27.05.2019 г.

Принята к публикации 26.09.2019 г.

Изложены результаты исследования методом микроволновой радиометрии динамики содержания озона в средней атмосфере над Петергофом во время стратосферных потеплений для двух зим 2015–2016 и 2016–2017 гг. В наземных наблюдениях был использован мобильный микроволновый озонометр (рабочая частота 110.8 ГГц). Выполнены оценки вертикального распределения озона в области высот 22–60 км. Эти результаты были сопоставлены как с бортовыми данными об общем содержании озона и высотными профилями озона и температуры в средней атмосфере, так и с данными озонозондов. В средней атмосфере над Петергофом были отмечены значительные (в несколько раз) вариации содержания озона на высотах 40–60 км, которые были вызваны стратосферным потеплением минорного типа.

DOI: 10.31857/S0016794020020091

1. ВВЕДЕНИЕ

В последнее время возник интерес к исследованию взаимодействия средней (высоты 20–100 км) и верхней (высоты выше 100 км) атмосферы. В результате проведенных экспериментов по искусственному воздействию на нижнюю ионосферу мощным КВ-радиоизлучением было обнаружено новое физическое явление – уменьшение интенсивности микроволнового излучения мезосферы в линии озона при модификации ионосферы стендом СУРА [Куликов и др., 2012, 2013]. В качестве интерпретации наблюдаемого эффекта рассматривались следующие гипотезы. Первая связана с усилением образования отрицательных ионов в мезосфере вследствие увеличения температуры электронов при нагреве нижней ионосферы мощными радиоволнами [Kulikov and Frolov, 2010]. Другой причиной может быть воздействие на нейтральную компоненту мезосферы, в частности молекулярный озон, внутренних гравитационных волн, генерируемых в E -области ионосферы при ее нагреве мощной радиоволной [Куликов и др., 2012; Григорьев и Трахтенгерц, 1999].

Нельзя исключать и влияние ионной химии на взаимосвязь между изменениями содержания мезосферного озона и полного содержания электронов в ионосфере [Пахомов и Князев, 1988; Muscari et al., 2005]. И наконец, обмен между ионосферой и мезосферой возможен из-за вертикальных движений воздушных масс [Беликович, 1998].

Возмущения ионосферы и мезосферного озона могут быть также вызваны внезапными стратосферными потеплениями (ВСП). Иллюстрацией такого события может служить потепление 2012–2013 гг., которое охватывало огромную территорию северного полушария. В микроволновых и оптических наблюдениях в Томске были отмечены значительные вариации озона и температуры на всех высотах средней атмосферы [Маричев и др., 2014; Matvienko et al., 2016]. Концентрация озона на высотах от 25 до 60 км изменялась в несколько раз. Это было уникальное потепление, которое вызвало приращение температуры на уровне 10 гПа на 70 К относительно среднемесячного уровня. При этом суточные ко-

лебания озона на высоте 60 км, связанные с заходом и восходом Солнца, составили всего ~30%. Кроме того, это же потепление вызвало вариации полного электронного содержания в экваториальной ионосфере ~100% [Goncharenko et al., 2013]. В средних и полярных широтах изменения содержания электронов [Kazimirovsky, 2002; Laštovička, 2006; Черниговская и др., 2014] также связывают с вариациями нейтрального состава во время возмущений в тропосфере и стратосфере. В работе [Goncharenko et al., 2012] предполагается, что флуктуации в озоне средней атмосферы, вызванные потеплениями, могут воздействовать на ионосферу через приливные волны. Известно, что при ВСП изменяется также состав, плотность, температура верхней термосферы (400 км над земной поверхностью). Изменения величины электронной плотности во время потепления такое же, как во время умеренной геомагнитной бури [Pedatella et al., 2018].

В настоящей статье мы представляем результаты микроволновых наблюдений озона средней атмосферы в Петергофе (60° N, 30° E) в январе–марте 2015–2016 гг. и в ноябре–марте 2016–2017 гг. во время стратосферных потеплений.

2. МОБИЛЬНЫЙ МИКРОВОЛНОВЫЙ ОЗОНОМЕТР И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Метод микроволновой наземной радиометрии основан на измерениях вращательных спектров излучения малых газовых составляющих (в том числе озона) в диапазонах миллиметровых и субмиллиметровых волн. Микроволновые наблюдения слабо зависят от погодных условий и присутствия в атмосфере аэрозолей, что является преимуществом по сравнению с наблюдениями в оптическом и инфракрасном диапазонах длин волн. Кроме того, микроволновые наблюдения озона могут выполняться круглосуточно. В последнее десятилетие нам удалось достичь определенных успехов на пути создания мобильных микроволновых спектрометров [Красильников и др., 2003; Kulikov et al., 2007].

Микроволновый озонометр состоит из гетеродинного неохлаждаемого приемника, настроенного на фиксированную частоту 110836.04 МГц, которая соответствует вращательному переходу молекулы озона $6_{06}-6_{15}$, и многоканального анализатора спектра. На входе приемника находится модуль, который включает в себя антенну (скалярный рупор) и коммутатор для калибровки интенсивности принимаемого атмосферного излучения в линии озона. Ширина диаграммы направленности рупорной антенны по уровню –3 дБ составляет 5.4°. Однополосная шумовая температура приемника составляет 2500 К, режим приема в одной полосе обеспечивается запрельным фильтром с прямыми потерями 0.5 дБ и

подавлением зеркального канала более 20 дБ. Анализатор спектра состоит из 31 фильтра с полосой пропускания от 1 до 10 МГц и полной полосой анализа 240 МГц.

Параметры прибора позволяют измерять за 15 мин спектр линии излучения озона с точностью ~2%. Измерения спектров теплового излучения атмосферы выполняются методом калибровки по двум “чернотельным” эталонам, которые находятся при температуре кипения жидкого азота и при температуре окружающего воздуха.

Информация о количестве O_3 содержится в измеряемом спектре интегрального радиоизлучения средней атмосферы. С помощью инверсии получаемых спектров можно получить данные о вертикальном распределении озона (ВРО) в атмосфере. Критерием правильности решения обратной задачи являлось наилучшее соответствие спектральной линии озона, рассчитанной по восстановленному профилю концентрации O_3 с исходным экспериментальным спектром. Погрешность определения ВРО по его измеренным спектрам вышеописанным прибором не превышает 10–15%.

Один из таких мобильных озонометров был установлен в 2007 г. в лаборатории физического факультета Санкт-Петербургского университета в Петергофе [Тимофеев и др., 2008]. С помощью этого прибора выполняются непрерывные микроволновые наблюдения озона средней атмосферы по настоящее время.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 1 приведены данные бортовых измерений температуры на уровне 10 гПа (приблизительно соответствует высоте 30 км) над Петергофом, полученные прибором MLS/Aura (миллиметровый диапазон длин волн), для двух зим 2015–2016 и 2016–2017 гг. В эти сезоны были отмечены минорные стратосферные потепления примерно в одно и то же время в конце второй декады января, а именно 19 января. Данные для января 2016 г. обозначены тонкой кривой, а для января 2017 г. – жирной кривой. Каждое потепление продолжалось ~10 дней при этом максимальное отклонение температуры от фонового значения составляло ~40 К. Для сравнения минорное потепление над Петергофом зимой 2013–2014 гг. имело продолжительность динамических возмущений в стратосфере (выше 20 км) ~2.5 месяцев [Бочковский и др., 2016].

Вначале мы решили исследовать характер изменения содержания озона в эти зимние сезоны по результатам измерений орбитальными и наземными средствами. На рисунке 2 приведены вариации содержания озона в январе–марте

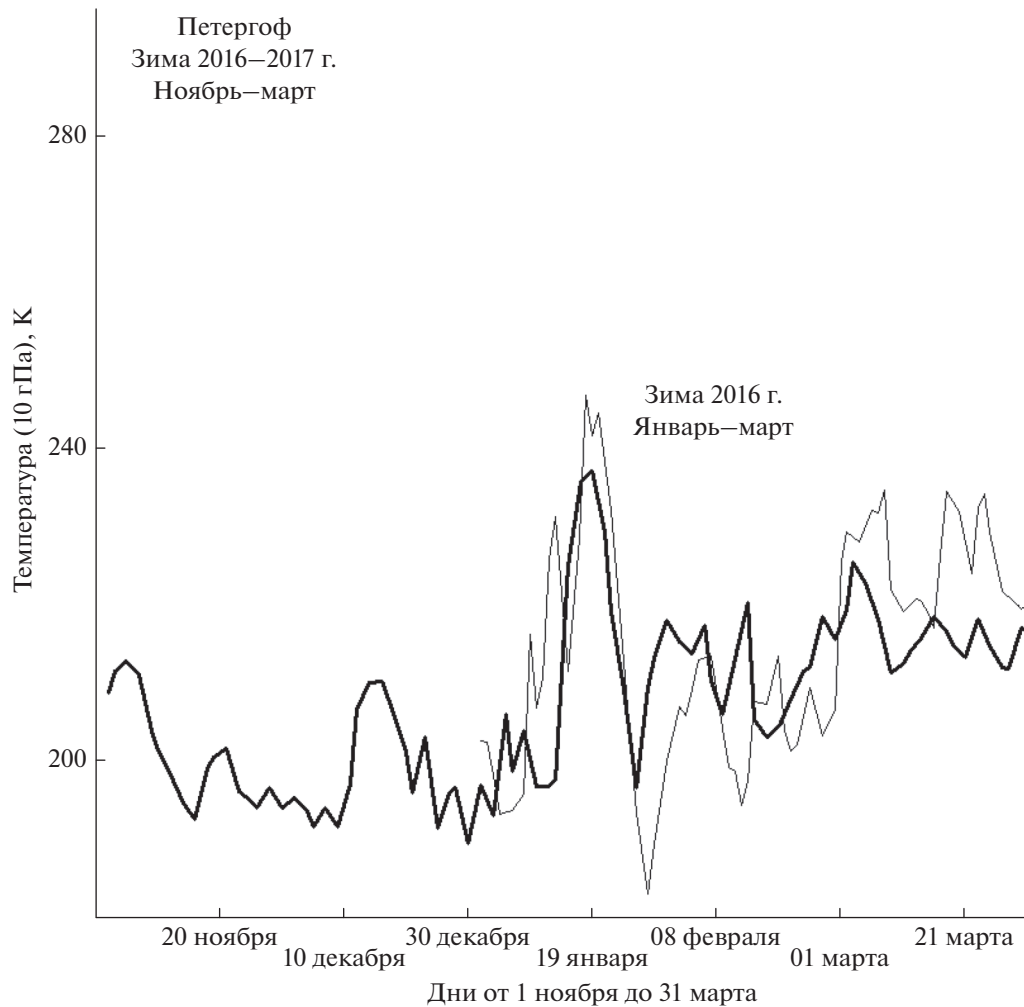


Рис. 1. Временной ход температуры на уровне 10 гПа над Петергофом по данным MLS/Aura. Жирная линия – зима (ноябрь–март) 2016–2017 гг.; тонкая линия – зима (январь–март) 2016 г.

2015–2016 гг. (левая панель) и в ноябре–марте 2016–2017 гг. (правая панель) над Петергофом. На левой панели сплошной линией приведены данные об общем содержании озона (ОСО), которые были измерены бортовым прибором OMI/Aura (<http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/aura/>). Среднее ОСО за период с 01.01.2016 г. по 31.03.2016 г. составило 339 ± 5 е.Д. Максимальная величина ОСО за данный период наблюдений была 482 е.Д. (18.03.2016 г.), а минимальная 249 е.Д. (03.03.2016 г.). Аналогичное среднее значение ОСО за период с 01.11.2016 г. по 31.03.2017 г. (правая панель) составило 324 ± 4 е.Д. В этом сезоне наблюдались два максимума ОСО 447 е.Д. (15.01.2017 г.) и 467 е.Д. (24.03.2017 г.), а минимальная величина ОСО 228 е.Д. (22.11.2016 г.).

В нижней части рис. 2 на левой и правой панели приведены временные изменения содержания озона в слое 22–50 км по данным бортового прибора MLS/Aura $X^{\text{MLS}}(22\text{--}50 \text{ км})$ е.Д. (сплошная

линия) и содержания озона в слое выше 22 км по данным микроволнового озонметра $X^{\text{MMB}}(\geq 22 \text{ км})$ е.Д. (кресты). Прибор MLS/Aura использует лимбовый метод измерения параметров атмосферы [Waters et al., 2006]. Нами были отобраны данные по озону и температуре, соответствующие времени пролета спутника над Петергофом. С этой целью был выбран домен с координатами $(60 \pm 1.5)^\circ \text{N}$ и $(30 \pm 5)^\circ \text{E}$ для Петергофа. Данные X^{MMB} соответствуют содержаниям озона для дневных и ночных его спектров. Отличие между ними практически отсутствует. За период с 01.01.2016 г. по 31.03.2016 г. средние содержания X^{MLS} и X^{MMB} (левая панель) имели величины (158.6 ± 2.7) е.Д. и (155.0 ± 3.0) е.Д. соответственно. При этом максимальная величина $X^{\text{MLS}} \sim 199$ е.Д. была отмечена 13.03.2016 г., а минимальная ~ 117 е.Д. 3.03.2016 г. Отношение максимума к минимуму составило 1.7. Максимальная величина $X^{\text{MMB}} \sim 203$ е.Д. по данным наземных микровол-

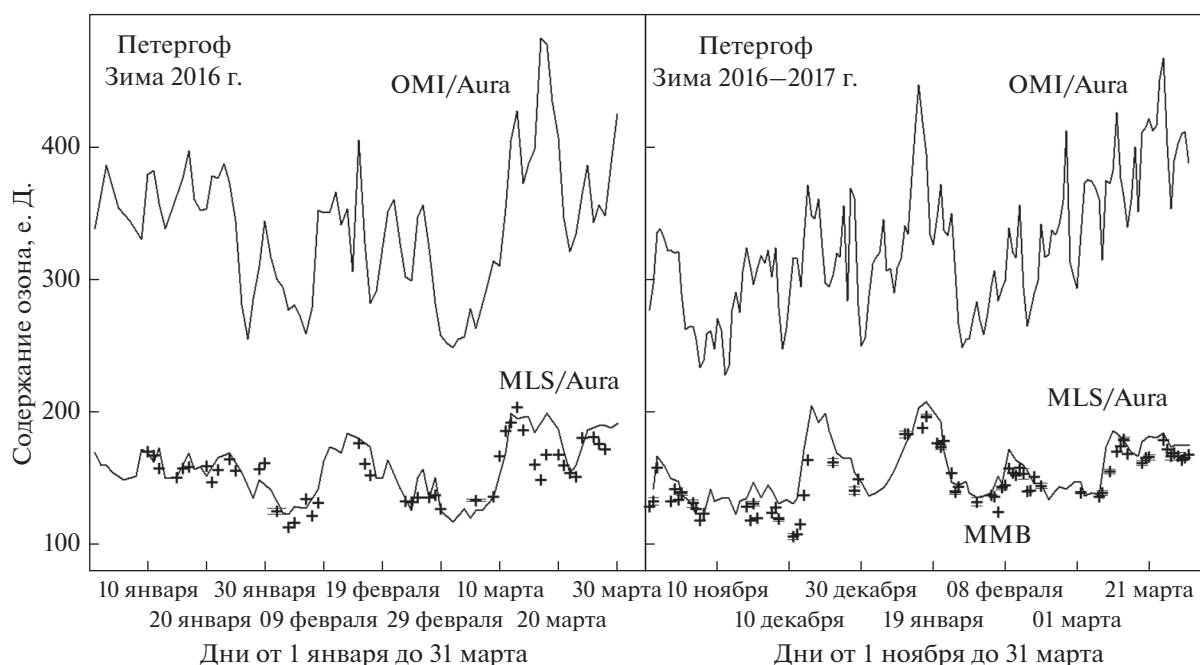


Рис. 2. Изменения содержания озона над Петергофом зимой 2016–2017 гг. по данным спутниковых измерений и наземного микроволнового спектрометра. Левая панель – зима (январь–март) 2016 г.; правая панель – зима (ноябрь–март) 2016–2017 гг. Верхняя сплошная линия – общее содержание озона по данным бортового прибора OMI/Aura на обеих панелях. Нижняя сплошная линия – это содержание озона в слое 22–50 км по данным микроволновых бортовых измерений MLS/Aura на обеих панелях. Крестами обозначены содержание озона выше 22 км (MMB) по данным наземных микроволновых наблюдений.

новых наблюдений была отмечена 14.03.2016 г., а минимальная ~ 113 е.Д. 03.02.2016 г. Отношение между ними составило 1.79. В сезоне с 01.11.2016 г. по 31.03.2017 г. (правая панель) аналогичные средние X^{MLS} и X^{MMB} были равны (160.0 ± 4.0) е.Д. и (148.9 ± 2.5) е.Д. Максимальная величина $X^{\text{MLS}} \sim 208$ е.Д. была отмечена 17.01.2017 г., а минимальная 123 е.Д. во второй половине ноября 2016 г. Отношение максимума к минимуму составило 1.7. Максимальная величина $X^{\text{MMB}} \sim 197$ е.Д. по данным наземных микроволновых наблюдений была отмечена 17.01.2017 г., а минимальная ~ 118 е.Д. 25.11.2016 г. Отношение между ними составило 1.6. Поведение содержания озона, по данным бортового и наземного приборов, указывает на слабую взаимосвязь с потеплением 19 января 2016 г. В январе 2017 г. стратосферное потепление вызвало рост ОСО до 447 е.Д. и содержания O_3 в слое атмосферы от 22 км X^{MLS} и X^{MMB} . Характер вариаций содержания озона, полученный обоими инструментами, который представлен на рис. 2, практически одинаков. Данные сравнения указывают на репрезентативность результатов дистанционных измерений содержания озона с поверхности земли.

Рассмотрим взаимосвязи изменений озона и температуры на избранных высотах средней атмосферы 25, 40 и 60 км во время ВСП. Эти резуль-

таты представлены на рисунках 3 и 4. На рисунке 3 приводятся данные бортовых измерений температуры прибором SABER, работающим в инфракрасном диапазоне длин волн и MLS/Aura (миллиметровый диапазон длин волн) для января–марта 2016 г. Хотя оба инструмента зарегистрировали схожие заметные температурные возмущения в интервале высот 40–60 км, однако отметим, что наблюдаются расхождения в измерениях температуры, которые в ряде случаев достигают 10–20 К. Хорошо заметны температурные возмущения в средней атмосфере в интервале высот 40–60 км, которые были отмечены SABER и MLS/Aura. На высоте 60 км после 30.01.2016 г. наблюдались изменения температуры с размахом от минимальной до максимальной ~ 20 К и квазипериодом около двух недель. Продолжительность этих вариаций составила около двух месяцев с 25.01. по 31.03.2016 г. С 13.01. по 24.01.2016 г. бортовыми приборами (на уровне 60 км) была зарегистрирована минимальная температура, которая по данным MLS/Aura составила в среднем (219.8 ± 3.2) К и по данным SABER – (224.7 ± 1.9) К, продолжительностью с 13.01. по 24.01.2016 г. В это же время наблюдалось возмущение в концентрации озона. По данным наземных микроволновых наблюдений концентрация O_3 (на уровне 60 км) увеличилась в два раза по сравнению с фоновыми значениями в первой де-

каде января и в три раза по сравнению с относительно “спокойным” периодом в феврале и марте. Максимальная концентрация O_3 15–17.01.2016 г. имела величину 2.3×10^{10} мол/см³. При этом средняя концентрация для невозмущенного периода составила $(4.7 \pm 0.2) \times 10^9$ мол/см³ для дневных наблюдений (полые кружки на верхней панели рис. 3) и $(7.8 \pm 0.3) \times 10^9$ мол/см³ для ночных наблюдений – это заполненные кружки. Таким образом, суточный ход озона на высоте 60 км (превышение концентрации O_3 ночью над его дневными величинами) в феврале–марте 2016 г. достигал 70%. На рисунке 3 (средняя панель, которая соответствует 40 км) хорошо заметны два температурных максимума, один из них приходился на период с 6 по 7 февраля, и величина его достигала 275 К, а другой приходился на период с 4 по 5 марта, его величина 285 К. Продолжительность обоих температурных возмущений была около недели. Заметим, что в начальный период наблюдений, когда температурный фон на высоте 40 км был невозмущенный, нами зарегистрировано максимальное количество озона в этом сезоне – $\sim(6.6 \pm 0.1) \times 10^{11}$ мол/см³. Во время первого всплеска температуры была отмечена минимальная концентрация озона $\sim(3.30 \pm 0.08) \times 10^{11}$ мол/см³. Причем вариации озона в течение февраля–марта были незначительны. Следует отметить, что продолжительность по времени возмущения концентрации O_3 на высоте 60 км существенно меньше возмущения озона на высоте 40 км. На рисунке 3 (нижняя панель) отображены изменения температуры на уровне 25 км по данным бортовых приборов MLS/Aura и SABER. Минорное потепление в середине января сопровождалось ростом температуры на этом уровне более чем на 20 К.

В это время полярный вихрь сильно деформировался, при этом он имел неоднородную структуру по высоте (<http://cdsespri.ipsl.fr/etherType/index.php?id=1663&L=1>). Верхние слои стратосферы над Петергофом, которые до середины января были за пределами вихря, после 20 января оказались во внутренней его части и оставались здесь до середины марта, когда вихрь разрушился. Зарегистрированное нами резкое снижение содержание озона на уровнях 40 и 60 км, по-видимому, обусловлено временной эволюцией полярного циклона, внутренние области которого характеризуются пониженными значениями концентрации O_3 . Высотный уровень 25 км дважды за период наблюдений оказывался за пределами вихря – 16–17 февраля в результате его деформации и 10–15 марта во время его полного разрушения. В эти периоды времени нами наблюдался значительный рост содержания озона (см. рис. 3, нижняя панель). Проведенный траекторный анализ (<https://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT>) показал, что в эти дни воздух в район наблюдений был пе-

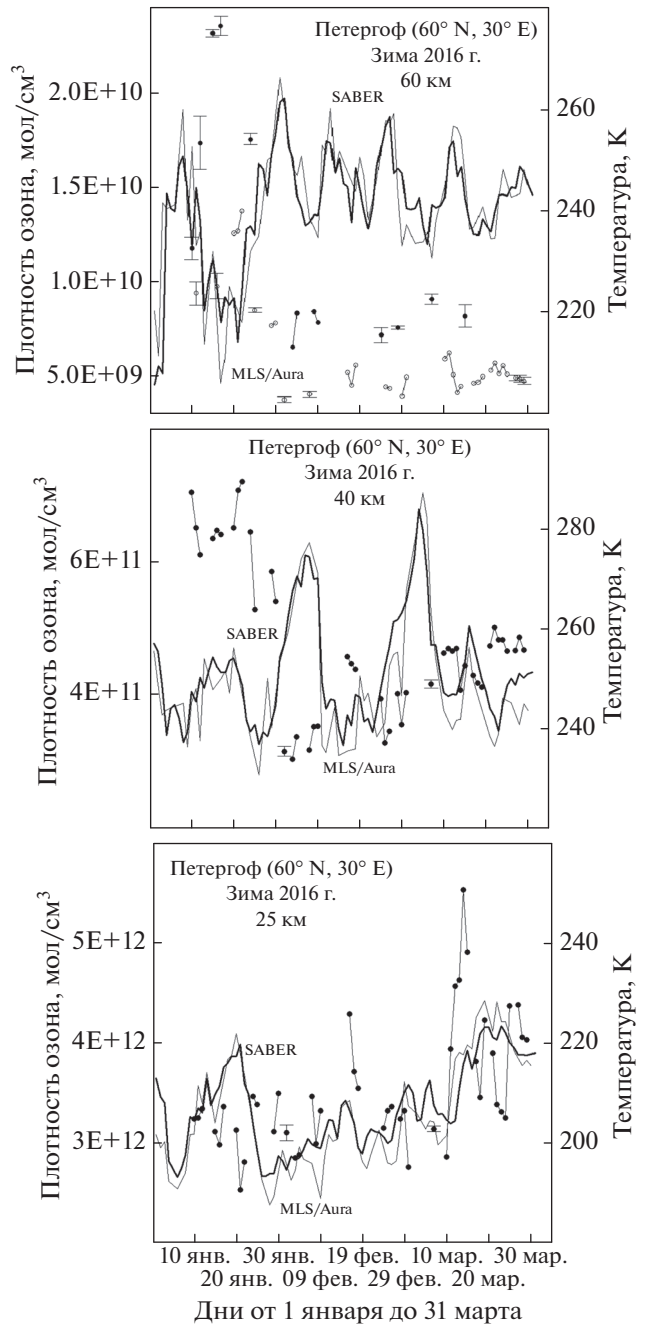


Рис. 3. Поведение концентрации озона (кружки) и температуры (жирные и тонкие сплошные линии) на высоте 25, 40 и 60 км зимой (январь–март) 2016 г. Жирная сплошная линия – данные бортовых измерений прибором SABER, а тонкая сплошная линия – данные бортовых измерений MLS/Aura. На верхней панели рисунка заполненные и полые кружки (концентрация O_3 на высоте 60 км) соответствуют данным, полученным из обработки ночных и дневных наблюдений соответственно.

ремещен из районов, богатых озоном, – из Восточной Сибири (<http://exp-studies.tor.ec.gc.ca/cgi-bin/selectMap>). Для сравнения в остальные дни февраля и марта траектории воздушных масс лежали в границах полярного циклона, при этом

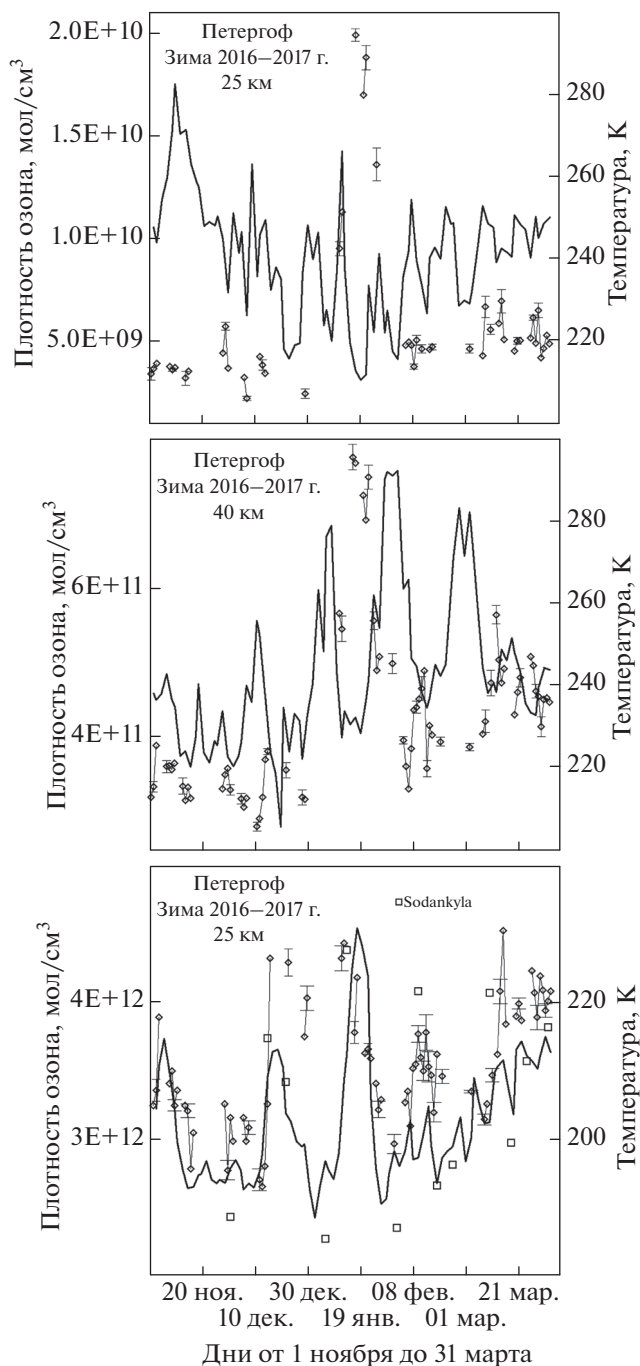


Рис. 4. Поведение концентрации озона (ромбы) и температуры (сплошная линия) на высотах средней атмосферы 25, 40 и 60 км. Данные по озону являются результатом измерений методом наземной микроволновой радиометрии, а данные по температуре – результат бортовых измерений MLS/Aura. Квадратами на нижней панели рисунка приведены результаты прямых измерений озона на высоте 25 км на ст. Sodankyla зимой (ноябрь–март) 2016–2017 гг.

концентрация озона слабо росла по мере ослабления силы вихря. В это время нами обнаружено увеличение количества озона на высоте 25 км почти в два раза. Следует отметить, что такой рост

озона был также зарегистрирован на ряде арктических станций.

На рисунке 5 показаны изменения плотности озона на высоте 25 км в период с 01.01–31.03.2016 г. Они были получены методом наземной микроволновой радиометрии в Петергофе (заполненные кружки). Кроме того, на рис. 5 приведены данные прямых измерений вертикальных профилей озона в обсерваториях, которые расположены за полярным кругом – это (пустые квадраты) Sodankyla (67° N, 27° E), (заполненные треугольники) Summit (73° N, 38° W) и (кресты) Салехард (67° N, 67° E). На первых двух станциях происходят регулярные запуски баллонных озонзондов. Характер взаимосвязи озона и температуры в стратосфере по данным анализа многолетних спутниковых измерений озона [Finger et al., 1995] указывает на существование положительной корреляции между содержанием озона и температуры в нижней стратосфере и отрицательной на высотах выше 30 км. В наземных микроволновых наблюдениях стратосферного озона в полярных широтах во время стратосферных потеплений отмечалась положительная корреляция между изменениями озона и температуры на высотах 20–30 км. Во время мощных потеплений положительная корреляция наблюдалась на всех высотах стратосферы [Куликов и др., 2002а, б, 2005, 2007].

На рисунке 4 представлены временные изменения концентрации озона (ромбы, наземное микроволновое зондирование) и температуры (сплошная линия, данные MLS/Aura) на высотах средней атмосферы 25, 40 и 60 км над Петергофом зимой 2016–2017 гг. На нижней панели, помимо этого, приведены данные измерений O_3 на станции Sodankyla (полюе квадраты). В течение этого зимнего сезона полярный циклон неоднократно подвергался деформации. При этом наблюдались значительные температурные колебания на всех высотах стратосферы. На уровне 25 км можно увидеть три, а на 40 км четыре мощных всплеска температуры. Данные рис. 4 показывают, что в этот период были также зарегистрированы и вариации содержания озона в стратосфере. Видно, что на уровне 25 км изменения озона и температуры были синхронны не только по данным наземного микроволнового зондирования, но и по данным баллонных озонзондов в Sodankyla. Следует обратить внимание на очень низкие концентрации озона, полученные на этой станции – менее 2×10^{12} мол/см³, когда она находилась внутри полярного вихря. Близкие по величине значения неоднократно отмечались нами ранее при микроволновых измерениях O_3 в Апатитах [Куликов и др., 2002б, 2005] – эта станция расположена на той же широте, что и Sodankyla. Изменчивость озона на высотах 40–60 км зимой 2016–2017 гг. была существенно выше, чем

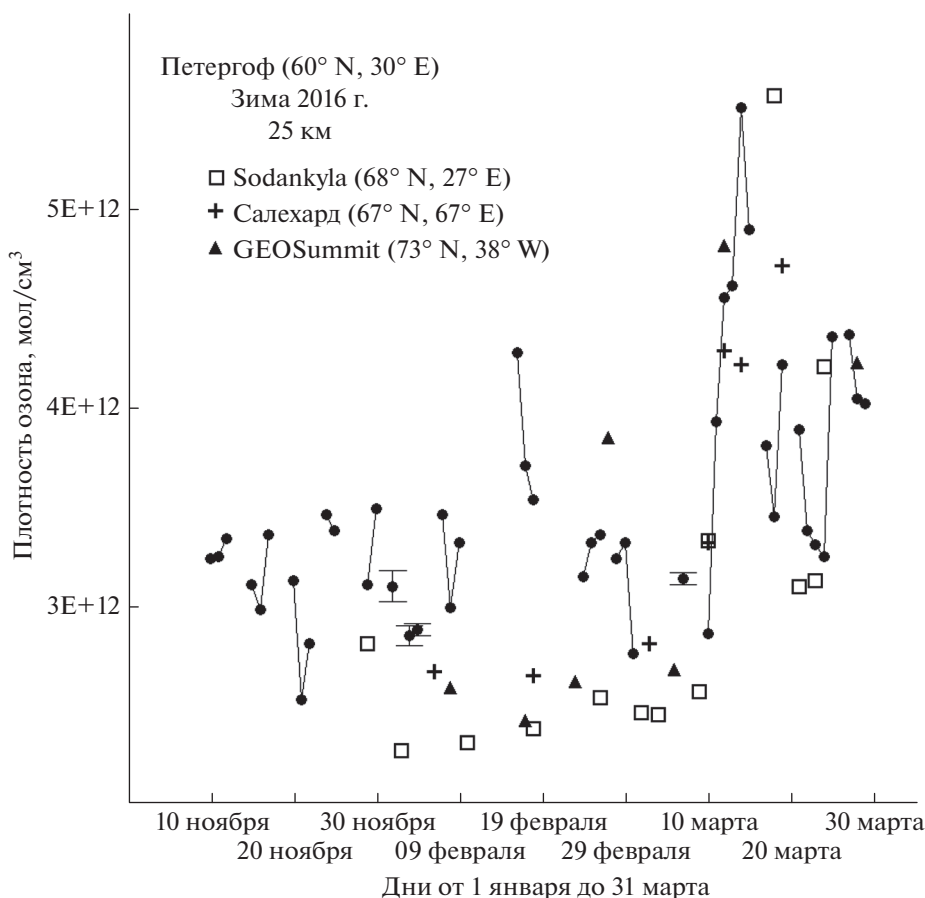


Рис. 5. Сопоставление данных наземных микроволновых наблюдений в Петергофе с данными прямых измерений концентрации озона на высоте 25 км в Арктике зимой (январь–март) 2016 г.

зимой 2015–2016 гг. При этом всплеск озона произошел также в районе 19 января. На верхней панели (рис. 4) приведен временной ход концентрации O_3 (пустые ромбы) на уровне 60 км только по дневным наблюдениям. Максимальная средняя концентрация O_3 с 17 по 21 января 2017 г. составляла $(1.86 \pm 0.07) \times 10^{10}$ мол/см³. При этом средняя концентрация для невозмущенного периода ноябрь–декабрь 2016 г. и февраль–март 2017 г. составила величины $(3.66 \pm 0.18) \times 10^9$ мол/см³ и $(5.10 \pm 0.15) \times 10^9$ мол/см³ соответственно. Подобные флуктуации концентрации озона на высотах 40–60 км были зарегистрированы в приполярных широтах (Петергоф) зимой 2013–2014 гг. [Бочковский и др., 2016]. Обращаем внимание, что величина возмущения концентрации озона на высотах 40–60 км превышает изменения O_3 на высоте 25 км. Следует отметить, что изменчивость озона в средней атмосфере в этом сезоне связана с деформацией и перемещением полярного циклона. Так, в середине декабря 2016 г. он сильно деформировался, и вся европейская часть оказалась за его пределами. Траекторный анализ (<https://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT>) показал, что

на высотном уровне 25 км состояние озонового слоя в это время определялось горизонтальным переносом воздуха из района Сибири, где наблюдалось повышенное содержание озона (см. карты полей озона (<http://exp-studies.tor.ec.gc.ca/cgi-bin/selectMap>)). Видно (рис. 4), что в третьей декаде декабря на высоте 25 км по микроволновым данным наблюдался рост озона. Такое же увеличение было обнаружено и на станции в Sodankyla (прямые измерения O_3). На высотах 40 и 60 км содержание озона практически не изменялось. Аналогичная картина наблюдалась в середине января 2017 г., когда Петергоф снова оказался вне полярного вихря. В это время изменился циркуляционный режим в стратосфере над пунктом наблюдений, когда воздушные массы из внутренней замкнутой области циклона сменились пришедшими из области северной части Атлантики, где наблюдалось повышенное содержание озона. В течение всей второй половины января нами отмечен рост озона на всех высотных уровнях (рис. 4). Вариации стратосферного озона в феврале были схожи с декабрьскими и были вызваны изменением циркуляции только в нижней части

стратосферы, которое в свою очередь было вызвано деформацией и перемещением полярного вихря (<https://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT>). Наконец, в начале марта 2017 г. этот вихрь сильно ослаб и разрушился (<http://cds-espri.ipsl.fr/etherType/index.php?id=1663&L=1>). В это время наблюдался умеренный рост озона, связанный с горизонтальной адвекцией воздуха из Восточной Сибири.

В настоящей работе отмечается факт возникновения повышенного содержания озона в области высот 40–60 км во время внезапных стратосферных потеплений. Флуктуации в содержании озона могут вызвать дополнительный нагрев стратосферы и мезосферы из-за поглощения молекулами O_3 солнечной ультрафиолетовой радиации. Изменение температурного режима этой области может генерировать разного рода волновую активность. В работе [Ясюкевич и др., 2018] отмечается связь увеличений стратосферного озона, термосферного O/N_2 и ионосферной электронной концентрации на средних широтах в течение довольно длительного периода времени (до 20 дней) после максимума ВСП. В дальнейшем планируется провести подобное исследование в полярных широтах.

4. ВЫВОДЫ

В длительных микроволновых наблюдениях в Петергофе отмечены значительные вариации озона на высотах 40–60 км для двух зимних сезонов, которые возникли во время внезапных стратосферных потеплений (минорного типа) в середине января 2016 и 2017 гг.

Нами впервые обнаружено, что масштаб изменений концентраций озона на высотах 40–60 км превышает его изменения на высоте 25 км в период потепления минорного типа.

Все изменения в озоновом слое средней атмосферы, отмеченные нами, происходили в результате перемены циркуляционного режима в стратосфере над пунктом микроволновых измерений. Эти изменения в значительной степени определялись деформацией и перемещением полярного вихря.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 15-05-04249 и № 18-45-520009).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

– Беликович В.В. Зимняя аномалия нижней ионосферы и ее природа // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 38. № 3. С. 156–159. 1998.
– Бочковский Д.А., Виролайнен Я.А., Куликов Ю.Ю., Маричев В.Н., Поберовский А.В., Рыскин В.Г., Тимофеев Ю.М. Наземный микроволновый мониторинг озона средней

атмосферы над Санкт-Петербургом и Томском во время стратосферного потепления зимой 2013–2014 гг. // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 59. № 4. С. 299–307. 2016. <https://doi.org/10.1004/s11141-016-9702-x>

– Григорьев Г.И., Трахтенгерц В.Ю. Излучение внутренних гравитационных волн при работе мощных нагревательных стенов в режиме временной модуляции // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 39. № 6. С. 90–94. 1999.

– Красильников А.А., Куликов Ю.Ю., Рыскин В.Г., Щитов А.М. Микроволновые приемники для диагностики малых газовых составляющих земной атмосферы // Известия РАН. Сер. физическая. Т. 67. № 12. С. 1788–1792. 2003.

– Куликов Ю.Ю., Красильников А.А., Рыскин В.Г. Результаты микроволновых исследований структуры озонового слоя полярных широт во время зимних аномальных потеплений стратосферы // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. Т. 38. № 2. С. 182–191. 2002а.

– Куликов Ю.Ю., Красильников А.А., Рыскин В.Г. Особенности поведения озона верхней атмосферы зимой 1999/2000 гг. по результатам одновременных микроволновых наблюдений в Нижнем Новгороде (56° с.ш., 44° в.д.) и Апатитах (67° с.ш., 35° в.д.) // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 42. № 2. С. 265–273. 2002б.

– Куликов Ю.Ю., Рыскин В.Г., Красильников А.А., Кукин Л.М. Микроволновые наблюдения изменчивости озона в стратосфере высоких широт зимой 2002–2003 годов // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 48. № 2. С. 134–141. 2005.

– Куликов Ю.Ю., Красильников А.А., Кукин Л.М., Рыскин В.Г., Белоглазов М.И., Савченко В.Р. О поведении стратосферного озона в Западном секторе Арктики зимой–весной 2003/2004 гг. // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. Т. 43. № 2. С. 260–265. 2007.

– Куликов Ю.Ю., Григорьев Г.И., Красильников А.А., Фролов В.Л. Вариации микроволнового излучения мезосферы при нагреве нижней ионосферы мощными КВ радиоволнами // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 55. № 1–2. С. 57–65. 2012.

– Куликов Ю.Ю., Фролов В.Л., Григорьев Г.И., Демкин В.М., Комраков Г.П., Красильников А.А., Рыскин В.Г. Отклик мезосферного озона на нагрев нижней ионосферы мощным КВ радиоизлучением // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 53. № 1. С. 102–109. 2013.

– Маричев В.Н., Матвиенко Г.Г., Лисенко А.А., Бочковский Д.А., Куликов Ю.Ю., Красильников А.А., Рыскин В.Г., Демкин В.М. Микроволновые и оптические наблюдения озона и температуры средней атмосферы во время стратосферного потепления в Западной Сибири // Оптика атмосферы и океана. Т. 27. № 1. С. 46–52. 2014.

– Пахомов С.В., Князев А.К. Озон в мезосфере и электронная концентрация среднеширотной области D // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 28. № 6. С. 976–979. 1988.

– Тимофеев Ю.М., Косцов В.С., Поберовский А.В., Куликов Ю.Ю., Красильников А.А. Измерения вертикальных профилей содержания озона над Санкт-Петербургом наземной микроволновой аппаратурой // Вестн. Санкт-Петербургского ун-та. Сер. 4 (Физика и химия). Вып. 4. С. 44–53. 2008.

- Черниговская М.А., Сутырина Е.Н., Ратовский К.Г. Метеорологические эффекты ионосферной возмущенности над Иркутском по данным вертикального радиозондирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Т. 11. № 2. С. 264–274. 2014.
- Ясюкевич А.С., Клименко М.В., Куликов Ю.Ю., Клименко В.В., Бессараб Ф.С., Кореньков Ю.Н., Маричев В.Н., Ратовский К.Г., Колесник С.А. Изменения параметров средней и верхней атмосферы во время внезапного стратосферного потепления в январе 2013 года // Солнечно-земная физика. Т. 4. № 4. С. 62–75. 2018. <https://doi.org/10.12737/szf-43201807>
- Finger F.G., Nagatani R.M., Gelman M.E., Long C.S., Miller A.J. Consistency between variations of ozone and temperature in the stratosphere // Geophys. Res. Lett. V. 22. № 24. P. 3477–3480. 1995. <https://doi.org/10.1029/95gl02786>
- Goncharenko L.P., Coster A.J., Plumb R.A., Domeisen D.I.V. The potential role of stratospheric ozone in the stratosphere-ionosphere coupling during stratospheric warmings // Geophys. Res. Lett. V. 39. L08101. doi: 2012. <https://doi.org/10.1029/2012GL051261>
- Goncharenko L., Chau J.L., Condor P., Coster A., Benkevitch L. Ionospheric effects of sudden stratospheric warming during moderate-to-high solar activity: Case study of January 2013 // Geophys. Res. Lett. V. 40. P. 4982–4986. 2013. <https://doi.org/10.1002/grl.50980>
- <http://cds-espri.ipsl.fr/ether/Type/index.php?id=1663&L=1>
- <http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/aura/>
- <http://exp-studies.tor.ec.gc.ca/cgi-bin/selectMap>
- <https://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT>.
- Kazimirovsky E.S. Coupling from below as a source of ionospheric variability: a review // Ann. Geophys. V. 45. № 1. P. 1–29. 2002.
- Kulikov Y.Y., Krasilnikov A.A., Shchitov A.M. New mobile ground-based microwave instrument for research of stratospheric ozone (some results of observation) // The Sixth International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter, and Submillimeter Waves (MSMW'07) Proceedings. V. 1. P. 62–66. 2007.
- Kulikov Yu. Yu., Frolov V.L. Influence of HF powerful radio waves on the ozone number density in the Earth's atmosphere / The Seventh International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter, and Submillimeter Waves (MSMW'10) Proceedings. <https://doi.org/10.1109/MSMW.2010.5545979>. 2010.
- Laštovička J. Forcing of the ionosphere by waves from below // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 68. P. 479–497. 2006.
- Matvienko G.G., Kulikov Y.Y., Marichev V.N., Bochkovsky D.A., Krasilnikov A.A., Ryskin V.G. Study of the influence of the stratospheric warming in January 2013 on the vertical structure of ozone and temperature in the middle atmosphere over Tomsk using microwave and lidar diagnostics / ILRC 27 EPJ Web of Conferences 119. 24002. 2016. <https://doi.org/10.1051/epjconf/2016119224002>
- Muscari G., Pezzopane M., Romaniello V., de Zafra R.L., Bianchi C., Fiocco G. On the potential impact of large electron concentrations on mesospheric ozone // Mem. S. A. It. V. 76. P. 1007–1010. 2005.
- Pedatella N.M., Chau J.L., Schmidt H., Goncharenko L.P., Stolle C., Harvey V.L., Funke B., Siddiqui T. How sudden stratospheric warming affects the whole atmosphere // EOS. 99. 6. 2018. <https://doi.org/10.1029/2018EO092441>
- Waters J.W., Froidevaux L., Harwood R.S. et al. The earth observing system microwave limb sounder (EOS MLS) on the Aura satellite // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. V. 44. P. 1075–1092. 2006.