

Новые аспекты исследований полярного озона в средней атмосфере в диапазоне миллиметровых радиоволн

Ю.Ю. Куликов

Институт прикладной физики РАН 603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46

E-mail: yuyukul@appl.sci-nnov.ru

Представлены результаты наземных микроволновых наблюдений озона средней атмосферы за Полярным кругом на Кольском полуострове в Апатитах (67°N, 33°E) во время нескольких зимних сезонов, начиная с 2017–2018 гг. В наблюдениях был использован мобильный озонметр (рабочая частота 110.8 ГГц), который позволяет отслеживать вариации озона средней атмосферы с 15-ти минутным разрешением по времени. Выполнены оценки вертикального профиля озона в интервале высот 22 – 60 км. Эти результаты были сопоставлены с бортовыми данными MLS/Aura о высотных профилях озона и температуры в средней атмосфере. Обнаружено значительное влияние внезапных стратосферных потеплений и полярных вихрей на вертикальное распределение озона на высотах 22 – 60 км. При этом масштаб изменчивости мезосферного озона (60 км) над Апатитами сопоставим или превышает известные модельные расчёты по оценке воздействия солнечных протонных событий и высыпания авроральных электронов на изменчивость полярного озона.

Ключевые слова: озон средней атмосферы, полярный мезосферный озон, наземная микроволновая радиометрия, полярный вихрь, внезапное стратосферное потепление

New aspects of investigations of a middle atmosphere polar ozone in a band millimeter radiowaves

Y.Y. Kulikov

IAP RAS

The results of ground-based microwave observations of the middle atmosphere ozone in the Arctic Circle at Kola Peninsula, Apatity (67°N, 33°) during several winter seasons (since 2017-2018) are presented. In measurements was used the mobile ozonemeter (observation frequency 110.8 GHz) which allows to trace variations of the middle atmosphere ozone with temporal resolution 15 min. The vertical profile of ozone in the altitude range of 22 – 60 km was estimated. These results were compared to satellite data MLS/Aura on altitude profiles of ozone and temperatures in a middle atmosphere. Significant influence of sudden stratospheric warming on vertical distribution of ozone at altitudes 22 – 60 km is revealed. Thus the scale of variability mesospheric ozone (60 km) above Apatity is comparable or exceeds known model calculations according to influence of solar proton events and auroral electrons precipitation on variability of polar ozone.

Keywords: middle atmosphere ozone, polar mesospheric ozone, ground-based microwave radiometry, polar vortex, sudden stratospheric warming

Введение

Целью наблюдений было исследование изменения озона средней атмосферы при воздействии внезапных стратосферных потеплений (ВСП) и полярных вихрей в авроральной зоне на вертикальную структуру озона на высотах выше 20 км. Зимняя средняя атмосфера над Апатитами, как правило, оказывается внутри полярного вихря и с этим связано понижение температуры и концентрации озона в стратосфере (25 км), которое неоднократно отмечалось [1-4]. ВСП являются наиболее важными событиями, которые воздействуют на динамику и термическую структуру зимней средней

атмосферы в Северном полушарии [5-7]. Развитие ВСП связано с вертикальным распространением планетарных волн, которые диссипируют (теряют энергию) сначала в мезосфере и затем постепенно в стратосфере. Эти волны, взаимодействуя с западной зимней циркуляцией атмосферы, модифицируют ее тепловой профиль от верхней тропосферы до мезосферы [8]. Известно [9], что ВСП с разделением и перемещением вихря по-разному влияют на циркуляцию средней атмосферы, а значит и на процессы переноса и эволюцию химического ее состава. Для исследования средней атмосферы широко используют средства микроволнового дистанционного зондирования как наземного, так и орбитального базирования [2, 10]. Наземные микроволновые одновременные наблюдения O_3 в полярных и средних широтах [1, 11] показали, что наиболее глубокое и продолжительное влияние ВСП оказывают на вертикальный профиль полярного озона. Из проведенных модельных расчетов последнего времени следует, что солнечные протонные события и высыпания авроральных электронов могут вызвать изменчивость полярного озона на 12–24% в мезосфере и на 5–7% в средней и верхней стратосфере [12-14].

Кроме того, следует отметить, что наши измерения выполнялись во время минимума солнечной активности и в условиях полярной ночи. На настоящий момент до конца неясно влияние солнечной активности на образование и разрушение мезосферного озона в авроральной зоне. Крайне важным моментом является удачное расположение ст. Апатиты по отношению к полярному вихрю. Впервые наши микроволновые наблюдения в полярных широтах для трех зимних сезонов, начиная с 2017–2018 гг., были выполнены в виде непрерывных серий (несколько суток подряд) с временным разрешением 15 мин. Подчеркнем, что метод наземной микроволновой радиометрии один из немногих, который позволяет непрерывно следить за поведением озона во всей средней атмосфере в одном месте с высоким временным разрешением [15-18].

Мобильный микроволновый озонометр и методика измерений

Метод микроволновой наземной радиометрии основан на измерениях вращательных спектров излучения малых газовых составляющих (озон и др.) 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 проводиться круглосуточно.

В последнее время нам удалось достичь определенных успехов на пути создания мобильных микроволновых спектрометров [19-21], что позволило эффективно выполнять наблюдения в экспедиционных условиях. Микроволновый озонометр состоит из гетеродинного неохлаждаемого приемника, настроенного на фиксированную частоту 110836.04 МГц (длина волны $\lambda = 2.7$ мм), которая соответствует вращательному переходу молекулы озона с квантовыми числами $J = 6_{0,6} - 6_{1,5}$, 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 2500 К, режим приема в одной полосе обеспечивается заградительным 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 МГц до 10 МГц и полной полосой анализа 240 МГц. Параметры прибора позволяют измерять за 15 мин спектр линии излучения озона с точностью

порядка 2%. Измерения спектров теплового излучения атмосферы выполняются методом абсолютной калибровки излучения 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 спектров можно получить данные о вертикальном распределении озона (ВРО) в атмосфере. Определение ВРО в интервале высот 22–60 км по измеренному спектру выполняется по методике, которая изложена в работе [22]. Характерное разрешение по высоте данного метода восстановления ВРО составляет около 10 км. В процедуре восстановления использовались как модельные зависимости давления и температуры от высоты, так и реальные, полученные в результате измерений в пункте микроволновых наблюдений. Точность восстановления ВРО зависит в основном от ошибок радиометрических измерений спектров O_3 и от погрешности определения профиля температуры. С помощью численного эксперимента были получены оценки влияния на точность восстановления ВРО ошибок первого типа путем добавления к измеренному спектру шума с дисперсией, равной дисперсии результатов измерений. Для типичных значений погрешности измерения спектров O_3 около 1% разброс восстановленных профилей по 100 реализациям достигал 10% в интервале высот 25–60 км. Влияние возможных отклонений температурного профиля от реального профиля оценивается в 10–20%. И, наконец, следует упомянуть о систематической погрешности измерений спектра, связанной с возникновением интерференционных эффектов в высокочастотном тракте приемника. В целом верхний предел неопределенности восстановления ВРО на высотах 30–60 км не превышает 20%. Справедливость этих оценок подтверждают многочисленные результаты сопоставления наших данных с данными баллонных электрохимических озонозондов ECC-4 [23, 24] и валидационные измерения в рамках международного эксперимента CRISTA/MAHRSI [25]. Для сопоставления с полученными данными наземного микроволнового зондирования озонового слоя были использованы результаты измерений с помощью спутникового прибора MLS/Aura [<http://mls.jpl.nasa.gov>] при пролетах спутника над местом наземных наблюдений Апатиты. Прибор MLS использует лимбовый метод измерения параметров атмосферы. Его разрешение по горизонтали составляет 160–210 км, по вертикали – 2–4 км [<https://mls.jpl.nasa.gov/data/NRT-user-guide-v42.pdf>]. Верхняя граница погрешности определения содержания озона оценивается в 10% в интервале высот от 20 до 40 км, которая увеличивается до 30–40% в нижней мезосфере. Нами были отобраны данные по содержанию озона и температуре, соответствующие временам пролета спутника над Апатитами. С этой целью был выбран домен с координатами $(67.5 \pm 1.5)N$ и $(33 \pm 5)E$.

Общая картина изменений вертикального профиля озона и температуры в минимуме солнечной активности

Микроволновые измерения озона средней атмосферы в Апатитах были выполнены для трех зимних сезонов 2017–2018, 2018–2019 и 2019–2020 гг. Для лучшего понимания природы вариаций озона необходимо иметь представление об изменениях температуры на высотах средней атмосферы. Изменения температуры указывают на влияние полярного вихря и внезапного стратосферного потепления на структуру средней атмосферы. Продолжительное время с 26.11.2017 г. по 20.01.2018 г. над Апатитами на уровне 10 гПа наблюдались очень низкие температуры. Средняя величина температуры в этот период составила (193.4 ± 0.3) К. В середине февраля 2018 г. в полярной стратосфере произошло внезапное потепление мажорного типа по классификации ВМО [5, 26], в результате которого полярный вихрь разделился на две части, когда теплый воздух устремился в полярную шапку [<https://gmao.gsfc.nasa.gov>].

По данным MLS [<http://mls.jpl.nasa.gov>] над Кольским п-овом на уровне 10 гПа была зарегистрирована максимальная температура 243.5 К. Продолжительность ВСП составила около двух недель. В начале марта 2018 г. температура вышла на уровень 220 К, что соответствует зональной модели на широте Апатит, т.е. возмущения в стратосфере закончились [27]. Зимой 2018–2019 гг. в стратосфере над Апатитами было зарегистрировано локальное повышение температуры с 24 декабря по 1 февраля продолжительностью около 40 дней. Полярный стратосферный вихрь в эту зиму был самым сильным, устойчивым и холодным за всю историю наблюдений в Арктике [28]. Характерной особенностью потепления над Апатитами является наличие двух максимумов температуры, которые обусловлены высокой волновой активностью в стратосфере [https://acd-ext.gsfc.nasa.gov/Data_services/met/ann_data.html]. Первый максимум имел величину 239 К (28.12.2018 г.), что превышало среднюю температуру невозмущенной стратосферы (192.5 ± 0.5) К за первые две декады декабря на 46 К. Величина второго максимума 252 К (09.01.2019 г.), что на 54 К выше средней температуры невозмущенной стратосферы в период от 01.02.2019 г. до 01.03.2019 г. И только к концу марта температура на высоте около 30 км вышла на уровень зональной модели [27]. Зимой 2019–2020 гг. ВСП началось в середине января. Общая характеристика ВСП для Северного полушария в эту зиму приведена в работе [29]. Так 17.01.2020 г. над Апатитами было достигнуто максимальное значение температуры 232.4 К. Потепление было недолгим по времени – около недели. Обращают на себя внимание очень низкие температуры с 01.12.2019 г. по 18.01.2020 г., средняя величина которых составила (191.8 ± 0.7) К. При этом 22.12.2019 г. было зарегистрировано минимальное значение температуры 183.5 К. Такие низкие температуры являются необходимым условием для возникновения на высотах от 15 до 25 км полярных стратосферных облаков. В последней декаде декабря 2019 г. и в начале января 2020 г. над Скандинавией и Кольским п-овом регистрировались полярные стратосферные облака (ПСО). В течение трех зим потепления происходили в разное время и были разной продолжительности. Общим итогом после воздействия полярного вихря на стратосферу для этих зим является то, что в марте месяце температура на уровне 10 гПа возвращается к средней многолетней величине 220 К. Следует отметить, что на высоте 60 км по данным измерений MLS/Aura не было больших возмущений температуры, а только наблюдался значительный разброс ее значений. Зимы 2017–2018 и 2019–2020 гг. выделяются продолжительным существованием полярного вихря (декабрь–январь) над Апатитами, когда температура на уровне 25 км опускалась до 195 К, и на непродолжительное время до 188 К. Эта температура достаточно редкая для Арктики и является порогом образования кристаллических стратосферных облаков, наличие которых способствует возникновению весенних понижений общего содержания озона. Подробности процессов разрушения озонового слоя в зимне-весенний сезон 2019–2020 гг. рассмотрены в работе [6, 7]. Итогом рассмотрения температурных полей в средней атмосфере является то, что в декабре–январе 2017–2018 и 2019–2020 гг. возникли подходящие условия для образования дефицита содержания озона над Кольским п-овом.

Рассмотрим поведение озона средней атмосферы на высотах 25, 40 и 60 км в течение трех зимних периодов, которое проиллюстрировано на рис 1. Среднесуточные данные о концентрации озона (наземные микроволновые наблюдения) обозначены отдельными крестами. Сплошными линиями указаны данные по озону на этих же высотах из бортовых наблюдений MLS/Aura во время пролетов над Апатитами.

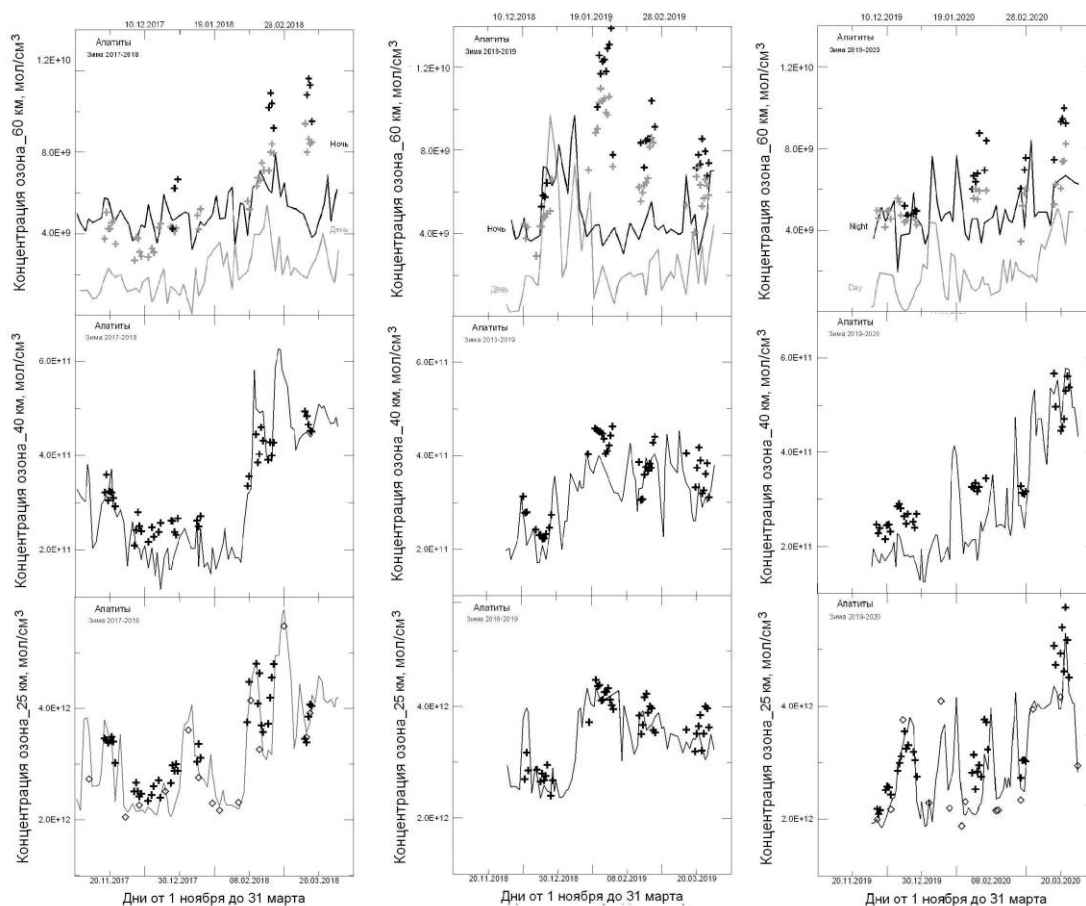


Рис. 1. Вариации озона средней атмосферы на высотах: нижний ряд – 25 км, средний ряд – 40 км, верхний ряд – 60 км в течение трех зимних периодов: левая панель – 2017–2018 г., средняя панель – 2018–2019 г., правая панель – 2019–2020 г. Жирные кресты на высотах 25 и 40 км – среднесуточная концентрация O_3 из наземных микроволновых наблюдений. Сплошные линии на высотах 25 и 40 км – концентрация O_3 (данные спутниковых наблюдений MLS/Aura при пролетах над Апатитами). Жирные и полупрозрачные кресты на высоте 60 км – ночные и дневные концентрации O_3 из наземных микроволновых наблюдений, а сплошная жирная линия и полупрозрачная – ночные и дневные концентрации O_3 (данные спутниковых наблюдений MLS/Aura при пролетах над Апатитами). Полые ромбы на высоте 25 км – данные озонзондов на ст. Sodankylä.

Процедура сопоставления результатов наземных и спутниковых измерений озона описана в работе [30]. Изменения концентрации O_3 на высотах 25 и 40 км для зимних сезонов удовлетворительно согласуются с данными спутниковых наблюдений. Анализ показал, что коэффициент корреляции измеренных величин содержания озона на этих высотах находился в пределах от 0.85 до 0.94 с уровнем значимости лучше 1%. При этом наземные результаты в среднем превышали спутниковые на $(8-10) \pm 2\%$ на 25 км и на $(9-12) \pm 4\%$ на 40 км. Что касается уровня 60 км, то для сезонов 2017–2018 и 2019–2020 гг. корреляция результатов была около 0.6 с 5%-ным уровнем значимости, а различие полученных данных достигало 60%. Для зимы 2018–2019 гг. результаты обоих измерений практически некоррелированы. Следует отметить, что заметные отличия наземных и спутниковых результатов могут наблюдаться после сильных атмосферных возмущений, которые возможно связаны с атмосферными неоднородностями, возникшими в результате разрушения или деформации полярного

вихря [см. карты вихря <http://cds-espri.ipsl.fr/etherTypo/index.php?id=1663&L=1>], и обусловлены спецификой лимбового метода спутниковых измерений. Она состоит в том, что горизонтальное разрешение в этом методе составляет несколько сот километров, которое зависит от высоты. В этом случае, если измерение происходит вблизи края полярного вихря, геофизические условия по обе стороны которого различны, спутниковые данные будут содержать дополнительную погрешность, вызванную усреднением вдоль луча зрения сигнала, пришедшего от двух различных по составу областей атмосферы. Дальнейший анализ данных наземных наблюдений стратосферного озона в Апатитах свидетельствует о появлении низких концентраций озона на высотах от 20 до 60 км в зимней полярной атмосфере по сравнению с данными зональной модели [31]. Из наших многолетних наблюдений была установлена повторяющаяся в разные годы (сезон зима–весна) устойчивая связь одновременного понижения температуры и концентрации O_3 на уровне 25 км [3]. Средняя концентрация озона на высоте 25 км в декабре 2002 г. составляла $(1.99 \pm 0.23) \cdot 10^{12}$ мол/см³, а температура на уровне 20 гПа опускалась ниже 195 К. Согласно зональной модели для средней атмосферы [31] концентрация озона на указанной высоте в декабре превышает среднемесячную величину, полученную нами, на (30–50)%. Очевидно, низкие температуры являются фактором воздействия на стратосферу полярного вихря, степень влияния которого на нее изменчива от года к году. Вихрь препятствует обмену воздушными массами между полярными и умеренными широтами, а это приводит к значительному понижению температуры на высотах 20–30 км. Причина уменьшения концентрации озона на высотах около 25 км внутри вихря не совсем понятна. Известно, что фотохимическое время жизни озона на этих высотах порядка нескольких месяцев. Впервые наши микроволновые наблюдения в полярных широтах для трех зимних сезонов были выполнены в виде непрерывных серий (несколько суток подряд) с временным разрешением 15 мин. Еще раз подчеркнем, что метод наземной микроволновой радиометрии один из немногих, который позволяет непрерывно следить за поведением озона во всей средней атмосфере в одном месте с высоким временным разрешением. Можно сделать вывод, что поведение озона в интервале высот 22–60 км управляется как полярным вихрем, так и внезапными стратосферными потеплениями.

Следует обратить внимание, что нами обнаружен суточный ход концентрации O_3 на высоте 60 км (см. рис. 1), который связан с восходом и заходом Солнца, – эти данные получены из наземных микроволновых наблюдений. Ночные и дневные концентрации мезосферного O_3 обозначены жирными и полупрозрачными крестами, соответственно. Сплошными линиями обозначены данные MLS/Aura во время пролета над Апатитами. Обращает на себя внимание систематическая разница в поведении мезосферного озона (60 км) по наземным и бортовым измерениям (см. верхнюю часть рис. 1). Следует отметить, что бортовые измерения также регистрируют суточный ход мезосферного озона. Эти данные о концентрации озона получены в одни и те же сутки для ночных (жирная сплошная линия) и дневных (полупрозрачная сплошная линия) пролетах спутника над Апатитами. Наземные измерения O_3 с временным разрешением 15 мин показали значительное и продолжительное влияние внезапных стратосферных потеплений на мезосферный озон. Возможным следствием стратосферных потеплений являются кратковременные, продолжительностью несколько дней, всплески O_3 на высоте 60 км. Термин «всплески» мы употребляем для обозначения приращения концентрации озона относительно невозмущенного уровня O_3 во время полярной ночи (декабрь месяц). Особенно они хорошо заметны для зим 2017–2018 и 2018–2019 гг. Концентрация O_3 в январе 2019 г. превышала в три раза аналогичную величину для декабря 2018 г. Эти возмущения, по-видимому, характерны для полярных широт [32].

Зима 2019–2020 гг. значительно отличалась от предыдущих сезонов. Возникший этой зимой полярный вихрь обеспечил надолго (около двух месяцев – декабрь–январь) очень низкие температуры в области высот 20–30 км, а стратосферное потепление в середине января 2020 г. было очень слабым и непродолжительным. Таким образом, были созданы условия (устойчиво низкие температуры в стратосфере) для появления весеннего дефицита содержания озона над Кольским п-овом. Тем не менее, согласно рис. 1 (правая панель), начиная с декабря 2019 г. до конца марта 2020 г. озона было много в интервале высот от 20 до 40 км. Дефицит содержания озона образовался в нижней стратосфере (12–20 км) над Северным Ледовитым океаном Западного полушария в марте 2020 г. [6, 7, 33]. Общее содержание 12 марта 2020 г. составило всего 205 е.Д. Причиной уменьшения содержания озона, по мнению авторов, являются химические потери, которые связаны с радикалами хлора. Подобные понижения общего содержания озона в Западном полушарии являются, по-видимому, достаточно редкими. Подтверждением могут быть данные ст. Summit (73° N, 38° W) [<http://gml.noaa.gov/dv/iadv/graph.php?code=SUM&program=ozmw&type=vp>], на которой измеряются вертикальные профили О₃ методом баллонного зондирования. Помимо приведенных результатов, на рис. 1 представлены данные контактных измерений, которые были выполнены на ст. Sodankylä с помощью озонозондов типа ЕСС-4 в зимне-весенние периоды 2017–2018 и 2019–2020 гг. Данные озонозондов обозначены на рис. 1 полыми ромбами. Расстояние между наземными станциями Sodankylä и Апатиты не превышает 500 км. Сравнение плотностей О₃ на уровне 25 км, которые были получены из прямых и дистанционных измерений, указывает на хорошее согласие временных вариаций озона. В настоящее время такое сравнение пока нельзя осуществить для мезосферных высот вертикального профиля озона по причине отсутствия контактных измерений. Контактные измерения в мезосфере осуществляются с помощью ракет, запуски которых очень редки и дороги.

Поведение мезосферного озона (60 км)

В настоящем параграфе обсуждаются результаты наблюдений мезосферного озона во время различных геофизических событий, которые свойственны авроральной зоне полярных широт. Кроме того, приводятся в качестве дополнения данные одновременного микроволнового мониторинга содержания О₃ в средней атмосфере в Апатитах и Петергофе (60°N, 30°E) в течение зимы 2021 – 2022 гг. [34]. Измерительная станция Петергоф расположена на расстоянии порядка 1000 км к югу от Апатит, а по отношению к полярному вихрю – на его краю или вне вихря. Такое расположение позволяет более качественно оценить степень воздействия на озон средней атмосферы динамических процессов в полярных широтах. Средняя атмосфера над Апатитами находится в так называемой авроральной зоне, заряженные частицы проникают в неё до более низких высот (ниже 100 км) и могут оказать влияние на озон в мезосфере. Таким образом, при оценке влияния заряженного компонента на содержание О₃ в мезосфере станция Петергоф может быть фоновой с точки зрения изменчивости содержания озона. Для измерения содержания озона были использованы идентичные мобильные микроволновые озонометры с рабочей частотой 110.8 ГГц. Методики наблюдений и оценки вертикальных профилей озона в интервале высот 22 – 60 км для данных приборов были одинаковые.

На рис. 2 показаны вариации концентрации мезосферного озона (60 км) над Апатитами во время полярной ночи 27 декабря 2017 года и 27 декабря 2021 года.

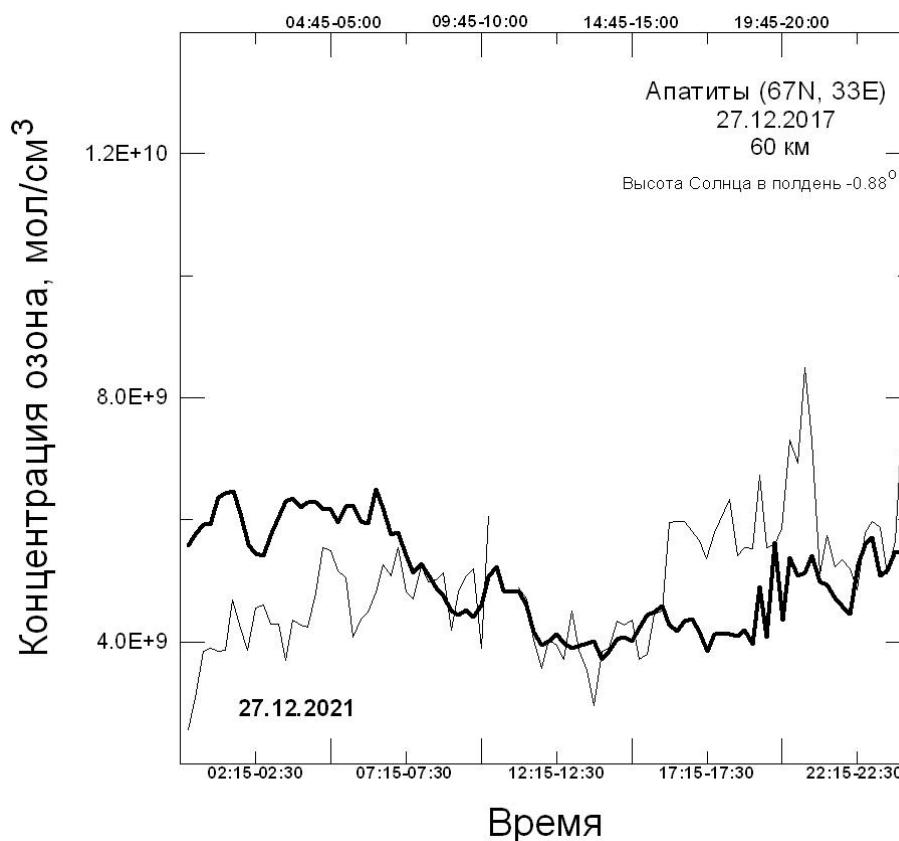


Рис. 2. Суточный ход концентрации озона в мезосфере (на высоте 60 км) над Апатитами во время полярной ночи 27 декабря 2017 г. и 27 декабря 2021 г. Здесь и на других рисунках на оси абсцисс указано московское время, ч:мин

Суточные вариации сопоставлены с целью показать воздействие полярного вихря на озон средней атмосферы 27 декабря 2017 года (тонкая линия). Высота Солнца над горизонтом в полдень составила величину -0.88° . Обе кривые вблизи полдня имеют минимальное значение концентрации $4 \cdot 10^9$ мол/см³ и в течение продолжительного времени около 5 часов совпадают друг с другом. Каким образом выделить амплитуду суточного хода озона, который определяется фотохимическими процессами? Мы предлагаем брать средние концентрации O_3 для временных интервалов 10:00 – 14:00 (полдень) и 22:00 – 02:00 (полночь) и величину отношения их считать амплитудой суточного хода. Таким образом, суточный ход для 27.12.2017 года составляет величину около 19%, а для 27.12.2021 года порядка 28%. На Рис. 2 наблюдается сильная изменчивость озона в течение суток для 27.12.2017. Так рост концентрации O_3 , которая была усреднена за 2 часа от 00:00 до 02:00, к концу 27.12.2017 от 22:00 до 24:00 составил 56%, что существенно превышает амплитуду суточного хода. В этот день была спокойная геомагнитная обстановка. Зимой 2017-2018 внезапное стратосферное потепление (ВСП) в Апатитах началось в середине февраля. Надо отметить, что в декабре 2017 года средняя атмосфера над Кольским полуостровом находилась внутри глубокого полярного вихря, возможно, такое поведение озона на высоте 60 км связано именно с этим. Мы мало знаем о вертикальных движениях воздушных масс во время полярного вихря на высотах средней атмосферы.

На рис. 3 приведены суточные вариации концентрации озона (60 км) над Апатитами во время полярной ночи 28 декабря 2017 г. (жирная линия). Эти изменения O_3 сопоставлены с суточным ходом озона 26 декабря 2019 г. (тонкая линия). Высота Солнца над горизонтом в полдень в эти дни была -0.83° и -0.94° соответственно.

Состояние атмосферы над Апатитами вблизи зимнего солнцестояния называется полярной ночью.

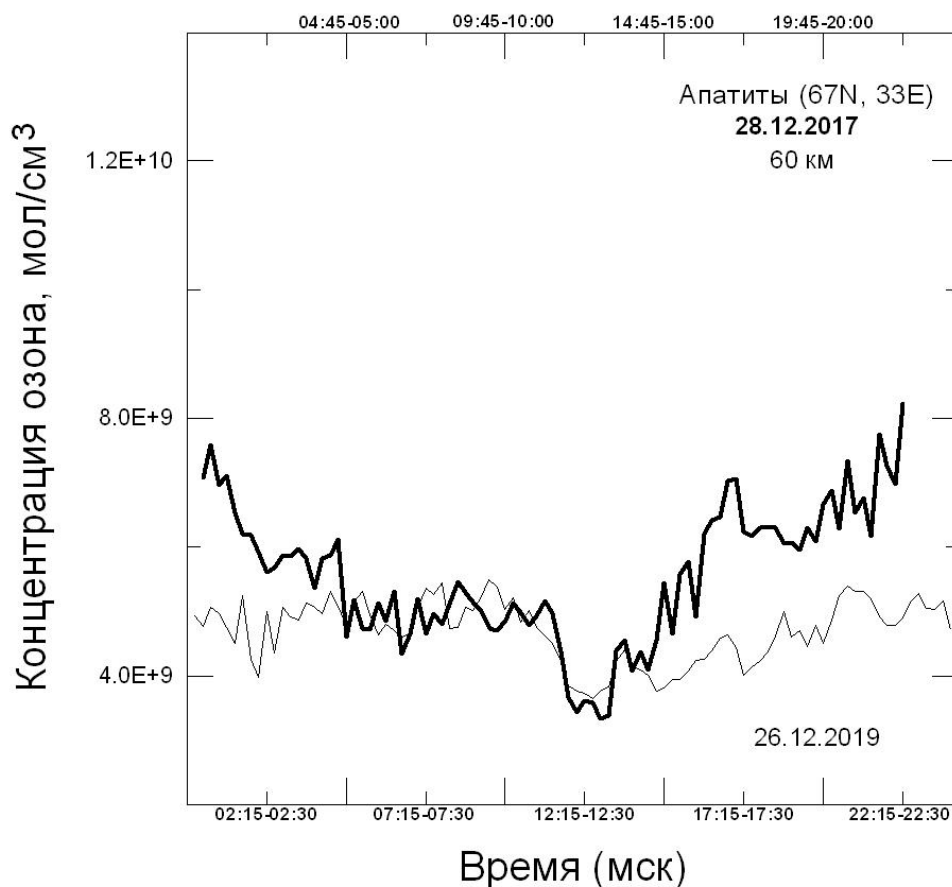


Рис. 3. Суточный ход мезосферного озона над Апатитами – 28.12.2017 г. (сплошная жирная линия) и 26.12.2019 г. (сплошная тонкая линия).

Следует отметить, что полярной ночью вблизи полдня в течение нескольких часов средняя атмосфера освещена Солнцем и имеет место реакции образования и разрушения озона (цикл Чепмена). Поэтому хорошо заметно понижение концентрации O_3 вблизи местного полдня для двух зимних сезонов в декабре. Амплитуда суточного хода для 28.12.2017 г. составляет величину около 62%, а для 26.12.2019 г. – только 15%. Наблюдается сильная изменчивость озона в течение суток 28.12.2017 г. Так, рост концентрации O_3 от полдня к ночи составил почти 100%, что существенно превышает амплитуду суточного хода. Концентрация O_3 в минимуме при усреднении от 11:48 до 13:32 мск составила $(3.63 \pm 0.12) \cdot 10^9$ мол/см³, а в максимуме от 21:00 до 22:27 мск составила $(7.19 \pm 0.27) \cdot 10^9$ мол/см³. В этот день была спокойная геомагнитная обстановка.

Далее рассмотрим изменения полярного мезосферного озона, которые были получены из наблюдений во время ВСП для зим 2018–2019 и 2019–2020 гг. На Рис. 4 приводятся суточные вариации O_3 , которые были получены из серии непрерывных микроволновых измерений 24–25.01.2019 и 31.01.2020 с временным разрешением 15 мин. Высота Солнца над горизонтом в полдень в эти дни была от $+3.21^\circ$ до $+4.93^\circ$ соответственно. Зимой 2018–2019 гг. ВСП началось 24 декабря и закончилось 1 февраля, и было продолжительностью почти 40 дней.

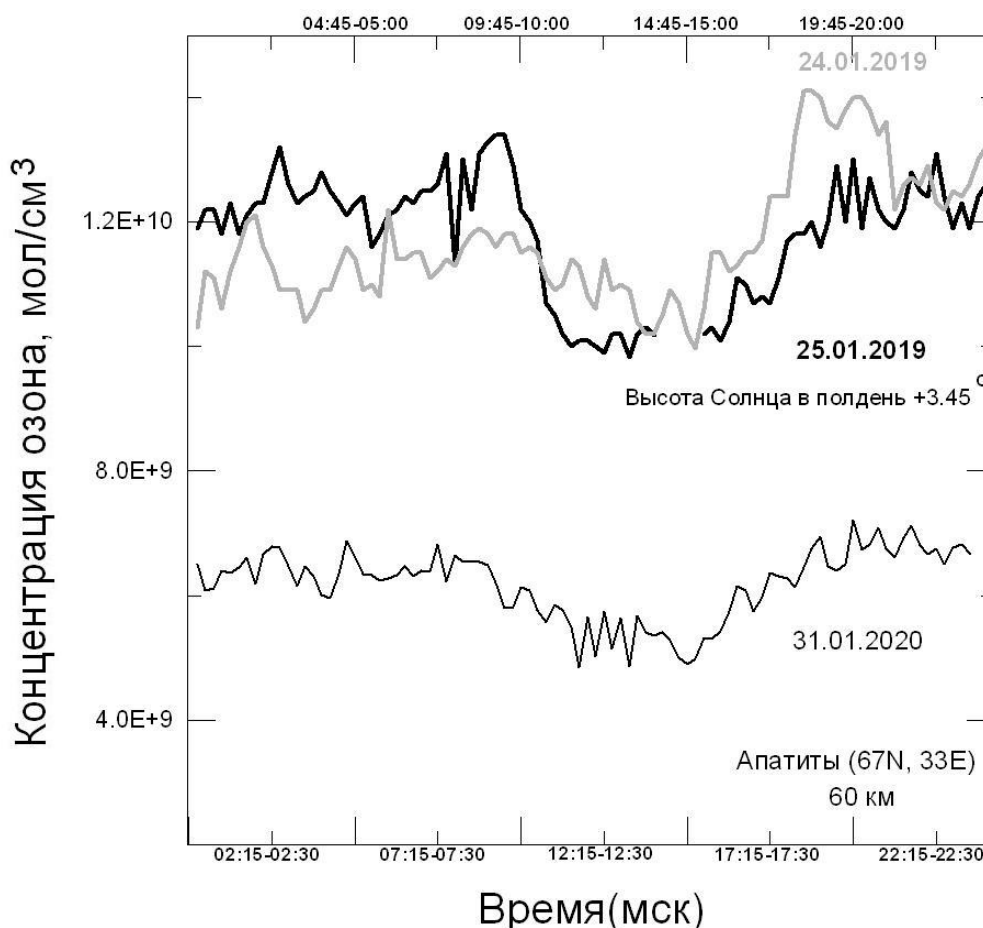


Рис. 4. Суточный ход мезосферного озона над Апатитами – 24.01.2019 г. (полупрозрачная линия), 25.01.2019 г. (сплошная жирная линия) и 31.01.2020 г. (сплошная тонкая линия).

Хорошо заметно непостоянство амплитуды суточного хода озона для 24.01.2019 г. (полупрозрачная линия на рисунке). Величина концентрации O_3 при усреднении от 23:58 до 01:24 LT (начало суток) составляет $(1.09 \pm 0.02) \cdot 10^{10}$ мол/см³ и в полдень при усреднении от 11:45 до 13:26 LT имеет такую же величину, т.е. суточный ход практически незаметен. Величина концентрации O_3 при усреднении от 22:21 до 23:47 LT (конец суток) составляет $(1.25 \pm 0.02) \cdot 10^{10}$ мол/см³. Амплитуда суточного хода имеет величину около 15%. А 25.01.2019 г. (жирная линия на рисунке) суточные колебания O_3 , которые вызваны заходом и восходом Солнца, имеют величину около 20%. Приведенные на рис. 4 примеры, по-видимому, свидетельствуют о существенном воздействии атмосферной циркуляции на озон на высотах мезосферы во время ВСП. Зимой 2019–2020 гг. ВСП началось в середине января – 17.01.2020 г. Это потепление было кратковременным (около недели) и уступало по масштабам возмущений в средней атмосфере потеплению зимы 2018–2019 гг. Амплитуда суточного хода для концентрации O_3 31.01.2020 г. составила 17%. Обращает на себя внимание различие почти в два раза средней за сутки концентрации озона на высоте 60 км для зим 2018–2019 гг. и 2019–2020 гг. Это различие указывает на важную роль ВСП в заполнении озоном средней атмосферы после разрушения полярного вихря. По-видимому, это происходит из-за переноса озона в воздушных массах из более низких широт вплоть до высот мезосферы. Таким образом, слабые ВСП (зима 2019–2020 гг.) не обеспечивают

заполнение озоном средней атмосферы в полярных широтах. Все сказанное указывает на необходимость учета влияния динамических процессов на поведение озона средней атмосферы, и, самое главное, на поведение мезосферного озона. В наземных измерениях в течение трех зим над Апатитами обнаружена значительная изменчивость мезосферного озона во время ВСП. Это становится важным при оценке воздействия заряженной компоненты на мезосферный озон в авроральной зоне.

Выводы

Одним из важных результатов настоящей работы является успешное использование для диагностики озона средней атмосферы радиофизического метода – наземной радиометрии в миллиметровом диапазоне длин волн.

Основным результатом микроволновых наблюдений в Апатитах в период низкой солнечной активности является необходимость учета влияния динамических процессов на поведение озона средней атмосферы, и, самое главное, на поведение мезосферного озона. Это становится важным при оценке воздействия заряженной компоненты на мезосферный озон в авроральной зоне.

Из результатов наших исследований следует, что вариации мезосферного озона (на высоте 60 км) в зимний сезон периода низкой солнечной активности были в основном связаны с изменениями циркуляции атмосферы. Изменчивость концентрации мезосферного озона (60 км), которая происходит из-за фотохимических процессов, может значительно уступать вариациям O_3 , которые вызваны динамическими процессами, а именно полярным вихрем и (или) внезапными стратосферными потеплениями.

Наземные измерения озона с временным разрешением 15 мин показали значительное и продолжительное влияние внезапных стратосферных потеплений на озон средней атмосферы. Возможным следствием стратосферных потеплений являются кратковременные, продолжительностью несколько дней, «всплески» мезосферного озона на высоте 60 км. Термин всплески мы употребляем как приращение концентрации озона относительно невозмущенного уровня.

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИПФ РАН (проект FFUF-2021-0008).

Литература

1. Красильников А.А., Куликов Ю.Ю., Рыскин В.Г. Особенности поведения озона верхней атмосферы зимой 1999/2000 гг. по результатам одновременных микроволновых наблюдений в Нижнем Новгороде (56°N, 44°E) и Апатитах (67°N, 35°E) // Геомагнетизм и аэрономия. 2002. Т. 42. № 2. С. 265–273.
2. Куликов Ю.Ю., Красильников А.А., Рыскин В.Г. Результаты микроволновых исследований структуры озонового слоя полярных широт во время зимних аномальных потеплений стратосферы // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2002. Т. 38. № 2. С. 182–191.
3. 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. 2005. Т. 48. № 2. С. 134–141.
4. Kulikov Yu. Yu., Ryskin V.G., Krasilnikov A.A. Microwave sounding measurements of the ozone layer in the polar and mid-latitude stratosphere in the winter seasons of 1998–2001 // Izv. Atm. Oc. Phys. 2003. V. 39. Suppl. P. S56–S61.

5. Варгин П.Н., Кирюшов Б.М. Внезапное стратосферное потепление в Арктике в феврале 2018 г. и его влияние на тропосферу, мезосферу и озоновый слой // Метеорология и гидрология. 2019. № 2. С. 41–56.
6. Цветкова Н.Д., Варгин П.Н., Лукьянов А.Н., Кирюшов Б.М., Юшков В.А., Хаттатов В.У. Исследование химического разрушения озона и динамических процессов в стратосфере Арктики зимой 2019/20 г. // Метеорология и гидрология. 2021. № 9. С. 70–83.
7. Smyshlyaev S.P., Vargin P.N., Motsakov M.A. Numerical modeling of ozone loss in the exceptional arctic stratosphere winter-spring of 2020 // Atmosphere. 2021. V. 12. N 11. ID 1470. <https://doi.org/10.3390/atmos12111470>
8. Schoeberl M.R. Stratospheric warming: Observations and theory // Rev. Geophys. 1978. V. 16. N 4. P. 521–538. <https://doi.org/10.1029/RG016i004p00521>
9. Manney G.L., Schwartz M.J., Krüger K. et al. Aura Microwave Limb Sounder observations of dynamics and transport during the record-breaking 2009 Arctic stratospheric warming // Geophys. Res. Lett. 2009. V. 36. N 12. ID L12815. <https://doi.org/10.1029/2009GL038586>
10. 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. 2006. V. 44. N 5. P. 1075–1092. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2006.873771>
11. 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. 2016. Т. 59. № 4. С. 299–307.
12. Seppälä A., Clilverd M.A. Energetic particle forcing of the Northern Hemisphere winter stratosphere: Comparison to solar irradiance forcing // Frontier in Physics. V. 2. 2014. <https://doi.org/10.3389/fphy.2014.00025>
13. Matthes K., Funke B., Andersson M.E. et al. Solar forcing for CMIP6 (v3.2) // Geosci. Model Dev. 2017. V. 10. N 6. P. 2247–2302. <https://doi.org/10.5194/gmd-10-2247-2017>
14. Lee J-H., Jee G., Kwak Y-S., Hwang H., Seppälä A., Song I-S., Turunen E., Lee D-Y. Polar middle atmospheric responses to medium energy electron (MME) precipitation using numerical model simulations // Atmosphere. 2021. V. 12. N 2. ID 133. <https://doi.org/10.3390/atmos12020133>
15. Соломонов С.В., Кропоткина Е.П., Розанов С.Б., Игнатьев А.Н., Лукин А.Н. Влияние сильных внезапных стратосферных потеплений на озон в средней стратосфере по наблюдениям на миллиметровых волнах // Геомагнетизм и аэрономия. 2017. Т. 57. № 3. С. 392–400.
16. Palm M., Hoffmann C.G., Golchert S.H.W., Notholt J. The ground-based MW radiometer OZORAM on Spitsbergen – description and status of stratospheric and mesospheric O₃ measurements // Atmos. Meas. Tech. 2010. V. 3. N 6. P. 1533–1545. <https://doi.org/10.5194/amt-3-1533-2010>
17. Schranz F., Fernandez S., Kämpfer N., Palm M. Diurnal variation in middle-atmospheric ozone observed by ground-based microwave radiometry at Ny-Ålesund over 1 year // Atmos. Chem. Phys. 2018. V. 18. N 6. P. 4113–4130. <https://doi.org/10.5194/acp-18-4113-2018>
18. Schranz F., Tschanz B., Rüfenacht R., Hocke K., Palm M., Kämpfer N. Investigation of Arctic middle-atmospheric dynamics using 3 years of H₂O and O₃ measurements from microwave radiometers at Ny-Alesund // Atmos. Chem. Phys. 2019. V. 19. N 15. P. 9927–9947. <https://doi.org/10.5194/acp-19-9927-9947>
19. Красильников А.А., Куликов Ю.Ю., Рыскин В.Г., Щитов А.М. Микроволновые приемники для диагностики малых газовых составляющих земной атмосферы // Изв. РАН. Сер. физическая. 2003. Т. 67. № 12. С. 1791–1795.

20. Красильников А.А., Куликов Ю.Ю., Рыскин В.Г., Демкин В.М., Кукин Л.М., Михайловский В.Л., Шанин В.Н., Шейнер М.З., Шумилов В.А., Щитов А.М. Новый малогабаритный микроволновый спектрометрический радиометр – озонметр // Приборы и техника эксперимента. 2011. № 1. С. 127–133.
21. Kulikov Y.Y., Krasilnikov A.A., Shchitov A.M. New mobile ground-based 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. Kharkov, Ukraine. June 25–30, 2007. V. 1. P. 62–66.
22. Красильников А.А., Куликов Ю.Ю., Мазур А.Б., Рыскин В.Г., Серов Н.В., Федосеев Л.И., Швецов А.А. Обнаружение «озоновых облаков» в верхней стратосфере Земли методом миллиметровой радиометрии // Геомагнетизм и аэрономия. 1997. Т. 37. № 3. 174–183.
23. Kulikov Yu.Yu., Kuznetsov I.V., Andrianov A.F. et al. Stratospheric ozone variability in high latitudes from microwave observations // J. Geophys. Res. – Atmos. 1994. V. 99. N 10. P. 21109–21116. <https://doi.org/10.1029/94JD01102>
24. Kulikov Yu.Yu., Ryskin V.G. Relation between ozone and temperature in the Arctic stratosphere // Int. J. Geomagn. Aeronomy. 1999. V. 1. N 3. P. 253–257.
25. Красильников А.А., Куликов Ю.Ю., Рыскин В.Г., Федосеев Л.И. Микроволновое радиометрическое зондирование верхней атмосферы над Нижним Новгородом // Изв. вузов. Радиофизика. 1998. Т. 41. № 11. С. 1405–1423.
26. Rao J., Ren R., Chen H., Yu J., Zhou J. The stratospheric sudden warming event in February 2018 and its prediction by a climate system model // J. Geophys. Res. – Atmos. 2018. V. 123. N 23. P. 13332–13345. <https://doi.org/10.1029/2018JD028908>
27. Barnett J.J., Corney M. Middle atmosphere reference model derived from satellite data / ICSU Middle Atmosphere Program. Handbook for MAP. 1985. V. 16. P. 47–85.
28. Okui H., Sato K., Koshin D., Watanabe S. Formation of a mesospheric inversion layer and the subsequent stratopause associated with the major stratospheric sudden warming in the 2018/19 // J. Geophys. Res. – Atmos. 2021. V. 126. N 18. ID e2021JD034681.
29. Manney G.L., Millan L.F., Santee M.L., Wargan K., Lambert A. et al. Signatures of anomalous transport in the 2019/2020 Arctic stratospheric polar vortex // J. Geophys. Res. – Atmos. 2022. V. 127. No. 20. ID e2022JD037407. <https://doi.org/10.1029/2022JD037407>
30. Белоглазов М.И., Демкин В.М., Красильников А.А., Кукин Л.М., Куликов Ю.Ю., Рыскин В.Г., Шанин В.Н. Микроволновые измерения содержания озона в зимней стратосфере Арктики // Геомагнетизм и аэрономия. 2010. Т. 50. № 2. С. 265–272.
31. Keating G.M., Pitts M.C., Young D.F. Ozone reference model for the middle atmosphere (New CIRA) / ICSU Middle Atmosphere Program. Handbook for MAP. 1989. V. 31. P. 1–36.
32. Куликов Ю.Ю., Поберовский А.В., Рыскин В.Г., Юшков В.А. Обнаружение больших флуктуаций в содержании озона средней атмосферы во время внезапных стратосферных потеплений в приполярных широтах Арктики // Геомагнетизм и аэрономия. 2020. Т. 60. № 2. С. 261–269. <https://doi.org/10.1134/S0016793220020097>
33. Manney G.L., Livesey N. J., Santee M.L. et al. Record-low Arctic stratospheric ozone in 2020: MLS observations of chemical processes and comparisons with previous extreme winters // Geophys. Res. Lett. V. 47. N 16. ID e2020GL089063. 2020.
34. Куликов Ю.Ю., Кириллов А.С., Поберовский А.В., Имхасин Х.Х. Микроволновый мониторинг содержания озона в средней атмосфере в Апатитах и Петергофе зимой 2021/22 г. // Метеорология и гидрология. 2022. № 12. С. 99–107.