

Динамические явления в стратосферном и мезосферном озоне полярной атмосферы в феврале – марте 2023 г.

Ю.Ю. Куликов¹✉, В.И. Демин², В.М. Демкин³, А.С. Кириллов²,
А.В. Лосев², В.Г. Рыскин^{1*}

¹Институт прикладной физики РАН
603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46

²Полярный геофизический институт
184209, Мурманская обл., г. Апатиты, ул. Академгородок, 26а

³Высшая школа экономики
603000, г. Нижний Новгород, ул. Большая Печерская, 25

Поступила в редакцию 08.11.2024;
после доработки 10.12.2024;
принята к печати 11.12.2024

Приводятся результаты микроволновых наблюдений содержания озона средней атмосферы над Апатитами (67° с.ш., 33° в.д.) в зимний сезон 2022/23 г., который пришелся на период высокой активности Солнца в 25-м цикле. В измерениях был использован мобильный озонометр с рабочей частотой 110,8 ГГц. Прибор имел однополосную шумовую температуру 2500 К, что позволило отслеживать вариации содержания озона с 15-минутным временным разрешением на высотах средней атмосферы. Получены оценки вертикального профиля содержания озона на высотах 22–60 км. Результаты сопоставлены с бортовыми данными MLS/Aura о высотных профилях содержания озона и температуры. Вариации содержания озона проходили на фоне внезапного стратосферного потепления, которое случилось в середине февраля и сопровождалось экстраординарным ростом общего содержания озона от 240 до 500 е.д. Приведены пределы изменений содержания озона на высотных уровнях 25, 40 и 60 км. Обсуждается влияние интенсивного геомагнитного возмущения (шторма) 23–24 марта на суточный ход содержания озона на высоте 60 км. Результаты исследования вносят вклад в понимание влияния солнечной активности на климат Земли.

Ключевые слова: озон средней атмосферы, динамические изменения, микроволновая радиометрия, полярные широты, активность Солнца; ozone of middle atmosphere, dynamic change, microwave radiometry, polar latitudes, solar activity.

Введение

На полярный озон средней атмосферы воздействуют как динамические процессы, связанные с развитием внезапных стратосферных потеплений (ВСП) или активизацией полярного вихря [1], так и результаты солнечной активности – протонные события, высыпание авроральных электронов [2–4]. Напомним, что средней атмосферой является область с условными границами 20–100 км.

Солнечные протоны вызывают ионизацию средней атмосферы. В работах [5–8] приводятся данные об уменьшении содержания озона в высокоширотной стратосфере в результате воздействия потоков солнечных протонов достаточной интенсивности на об-

разование молекул NO_x, которые входят в соответствующие реакции, ведущие к разрушению O₃. Около 50 лет назад на основе ракетных измерений впервые было показано разрушение мезосферного озона во время протонного события 2.11.1969 г. [5]. Ракеты запускались на станции Churchill, Manitoba (58° с.ш., 49° з.д.), в их головной части были установлены ультрафиолетовые фотометры (рабочая длина волны 240 нм). По данным измерений концентрация O₃ во время протонного события уменьшилась в два раза на высоте 54 км, в три раза – на 60 км и в четыре – на 67 км. Позднее [6] это уменьшение было подтверждено и на основании данных измерений со спутника Nimbus-4 зарегистрировано сильное снижение содержания озона в стратосфере выше уровня 4 гПа (соответствует высоте ~ 33 км) во время интенсивных протонных событий 4.08.1972 г. На основе модельных расчетов [7] и в эксперименте [6] показано, что образование молекул NO_x за счет солнечных протонов достаточно эффективно и этим можно объяснить наблюдаемое разрушение стратосферного озона.

* Юрий Юрьевич Куликов (yuyukul@ipfran.ru); Валерий Иванович Демин (demin@pgia.ru); Валерий Матвеевич Демкин (valerdem@mail.ru); Андрей Серафимович Кириллов (kirillov@pgia.ru); Александр Вячеславович Лосев (alosev@pgia.ru); Виталий Геннадьевич Рыскин (rys@ipfran.ru).

Следует отметить такое явление, как высыпание энергичных электронов и связанные с ними потоки рентгеновских лучей [8]. Оно может играть важную роль в процессах разрушения озона посредством образования тех же окислов азота NO_x . В дальнейшем было выполнено множество работ, в которых были измерены и оценены вариации озона на высоте 30 км. Величина ожидаемой реакции озона в средней атмосфере на солнечную активность в настоящее время существенно снизилась. Из проведенных модельных расчетов последнего времени следует, что 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 [9–11]. В работе [12] сообщается о первых спутниковых наблюдениях, указывающих на то, что суббурия приводит к снижению мезосферного содержания озона (~76 км) до 21%.

На сегодняшний день до конца не ясно влияние солнечной активности на образование и разрушение мезосферного озона в полярных широтах.

Цель настоящей работы – оценка изменений содержания озона средней атмосферы при воздействии ВСП в авроральной зоне в период повышенной солнечной активности.

Материалы и методы

Наземная микроволновая радиометрия основана на измерении и анализе спектра теплового излучения атмосферы в окрестности линий вращательных переходов озона в диапазоне миллиметровых и субмиллиметровых волн. Эти измерения слабо зависят от погодных условий (особенно зимой) и присутствия в атмосфере аэрозолей, что является их преимуществом по сравнению с наблюдениями в оптическом и инфракрасном диапазонах длин волн. Важным является то, что микроволновые наблюдения озона могут проводиться круглосуточно. В последнее время удалось продвинуться по пути создания мобильного микроволнового озонометра [13], что позволило эффективно выполнять наблюдения в экспедиционных условиях.

Микроволновый озонометр состоит из гетеродинного неохлаждаемого приемника, настроенного на фиксированную резонансную частоту озона 110,8 ГГц (длина волны $\lambda = 2,7$ мм). На входе приемника находится модуль, который включает в себя антенну (скалярный рупор) и коммутатор для калибровки принимаемого атмосферного излучения в линии озона. Ширина диаграммы направленности рупорной антенны по уровню 3 дБ составляет 5,4°. Шумовая температура приемника 2500 К, режим приема в одной полосе обеспечивается запредельным 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 порядка 2%. Измерения спектров теплового излучения атмосферы выполняются методом калибровки по двум «чернотельным» эталонам, ко-

торые находятся при температурах кипения жидкого азота и 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 [14]. Критерием правильности решения обратной задачи являлось наилучшее соответствие спектральной линии озона, рассчитанной по восстановленному профилю концентрации O_3 , исходному экспериментальному спектру. Погрешность определения ВРО по спектрам O_3 , измеренным микроволновым озонометром в невозмущенной динамическими процессами средней атмосфере при реальном вертикальном профиле температуры, не превышает 10%.

Результаты и обсуждение

В настоящей статье обсуждаются микроволновые наблюдения над Апатитами (67° с.ш., 33° в.д.) во время роста солнечной активности (25-й цикл) в феврале–марте 2023 г. Микроволновые измерения зимой 2022/23 г. были выполнены в рамках исследований изменчивости концентрации озона средней атмосферы в авроральных широтах во время ВСП и полярных вихрей. Кроме того было уделено внимание влиянию солнечного ветра на мезосферный озон. Результаты наземных микроволновых наблюдений озона средней атмосферы в Апатитах в течение трех зим 2017/18, 2018/19 2019/20 гг. приведены в работе [1]. Данные были получены в период минимальной солнечной активности – между 24-м и 25-м циклами. Для лучшего понимания природы вариаций содержания озона необходимо иметь представление об изменениях температуры на высотах средней атмосферы. Эти изменения могут указывать на влияние полярного вихря и ВСП на структуру средней атмосферы. Для диагностики температурных возмущений обычно выбирается высотный уровень 10 гПа, на котором могут быть сопоставлены данные дистанционных спутниковых и наземных наблюдений с результатами контактных измерений.

На рис. 1 приведены данные измерений спутниковым прибором MLS/Aura температуры на уровне 10 гПа над Апатитами, что соответствует высоте ~30 км, для двух зимних сезонов – 2017/18 г. [15] и 2022/23 г. Изменения температуры в эти сезоны практически не отличаются друг от друга. Продолжительное время (с 26.11.2017 г. по 20.01.2018 г.) над Апатитами на уровне 10 гПа наблюдались очень низкие температуры; средняя температура за этот период $193,4 \pm 0,3$ К. Для зимы 2022/23 г. средняя температура составила $191,8 \pm 0,8$ К; усреднение выполнено за период с 7.12.2022 г. по 20.01.2023 г.

В середине февраля 2018 г. в полярной стратосфере произошло ВСП мажорного типа [16]. Полярный вихрь разделился на две части, и теплый

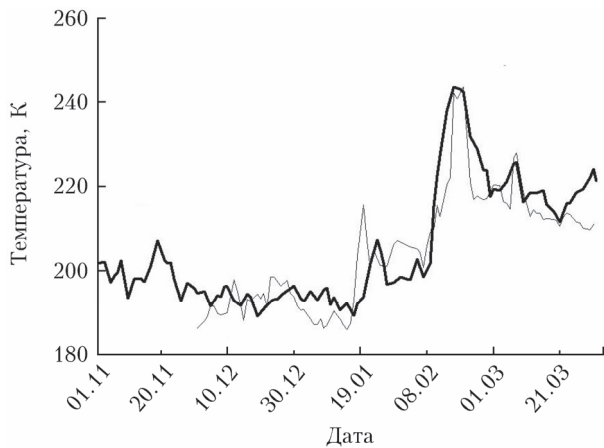


Рис. 1. Временной ход температуры на уровне 10 гПа над Апатитами по данным MLS/Aura для двух зимних сезонов: 2017/18 г. (ноябрь – март) (полужирная кривая) и 2022/23 г. (декабрь – март) (тонкая кривая)

воздух попал в полярную шапку (<https://gmao.gsfc.nasa.gov>). Аналогичные процессы наблюдались и зимой 2022/23 г. Разница была лишь в продолжительности ВСП. Зимой 2017/18 г. потепление продолжалось около двух недель. Температура в максимуме в эти зимы была примерно одинакова – 243 К. В начале марта 2018 г. температура снизилась и вышла на уровень 220 К, что соответствует зональной модели на широте Апатит, т.е. возмущения в стратосфере закончились [17]. Похожая ситуация наблюдалась и зимой 2022/23 г. Таким образом, температурные изменения в течение этих двух зим были очень схожими, но, как мы увидим ниже, озон средней атмосферы вел себя по-разному.

На рис. 2, а, б по данным наземных микроволновых наблюдений представлены концентрации O_3 на высотах 25 и 40 км соответственно. Для сравнения там же показаны сплошными линиями изменения содержания O_3 по данным спутниковых наблюдений MLS/Aura. Следует отметить удовлетворительное согласие изменений содержания озона в спутниковых и наземных измерениях на этих высотах. На рис. 2, в показаны изменения суммарного озона в течение февраля–марта 2023 г. по наземным измерениям в Sodankylä (67° с.ш., 27° в.д.) и Мурманске (69° с.ш., 33° в.д.), а также временной ход содержания озона в средней атмосфере X_{O_3} ($z \geq 22$ км).

Расстояние от ст. Sodankylä до места наших микроволновых наблюдений составляет ~ 500 км на запад, а от Мурманска – 200 км на север. Общее содержание озона (ОСО) увеличилось до 500 е.Д. после 19.02.2023 г. Для сравнения ОСО, которое было измерено до начала ВСП, имело среднюю величину 240 е.Д. в течение недели. Таким образом, рост ОСО почти в два раза произошел примерно за 30 дней, с 10.02 по 10.03.2023 г. Содержание озона в средней атмосфере X_{O_3} ($z \geq 22$ км) с 13.02 по 16.02.2023 г. составило $(101,6 \pm 2,0)$ е.Д. по наземным микроволновым наблюдениям. После ВСП, за период с 20.03 по 24.03.2023 г., среднее

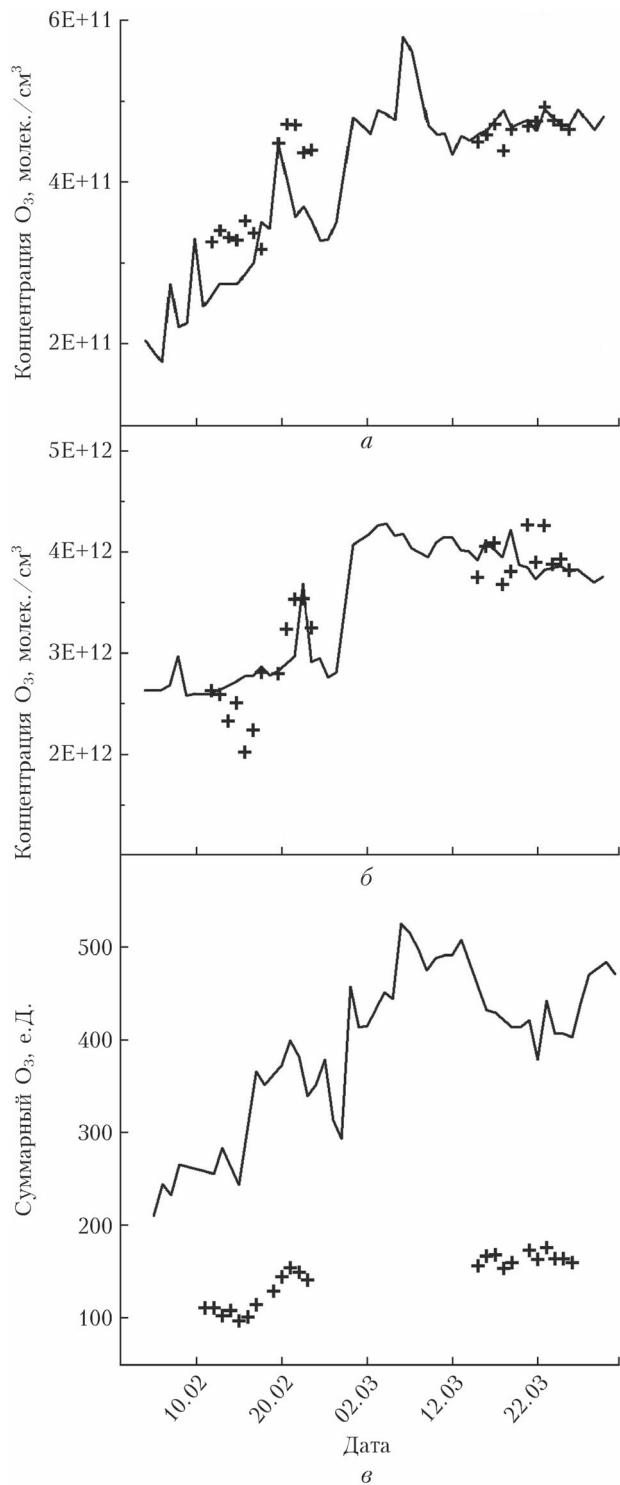


Рис. 2. Изменения концентрации O_3 на высотах 40 (а) и 25 км (б) по данным MLS/Aura (сплошная кривая) и по наземным микроволновым измерениям (кресты); изменения ОСО по данным станций Sodankylä и Мурманск (сплошная кривая) и содержания O_3 в средней атмосфере (кресты) (в). Апатиты, февраль–март 2023 г.

содержание озона выше 22 км составило $(168 \pm \pm 2,7)$ е.Д., т.е. увеличилось в ~ 1,7 раза. Изменения концентрации озона в феврале–марте на высотах 25 и 40 км отличались друг от друга в ~ 1,5 и ~ 1,3 раза соответственно. Вариации концентрации O_3

на высоте 60 км до и после ВСП в середине февраля 2023 г. над Апатитами приведены в табл. 1.

Таблица 1
Суточные вариации концентрации мезосферного озона (60 км)

Время	Концентрация, см ⁻³	
	с 8.02 по 17.02.2023 г. (до ВСП)	с 18.02 по 23.02.2023 г. (после ВСП)
10:00–14:00	$(6,05 \pm 0,11) \cdot 10^9$	$(7,88 \pm 0,17) \cdot 10^9$
22:00–02:00	$(7,17 \pm 0,08) \cdot 10^9$	$(9,24 \pm 0,23) \cdot 10^9$

В табл. 1 представлены средние дневные концентрации O₃ с 10:00 до 14:00 и средние ночные с 22:00 до 02:00. Амплитуда суточного хода содержания озона (отношение ночь/день) составила ~20%, а влияние ВСП увеличило дневную и ночную концентрацию O₃ на 30%. Для сравнения зимой 2017/18 г. после ВСП в середине февраля рост содержания озона на высотах 25, 40 и 60 км в средней атмосфере был значительно больше (~100%).

Теперь рассмотрим карту ОСО над Северным полушарием, которая была получена 15.02.2023 г. (<http://exp=studies.tor.ec.gc.ca>) (рис. 3, цв. вкладка). Понижение ОСО (~240 е.Д.) произошло на значительной площади, включая Скандинавию и Кольский полуостров. Над Западным полушарием за полярным кругом в это же время был зарегистрирован избыток суммарного озона: 500–600 е.Д. В дальнейшем (28.02.2023 г.) величина ОСО по наземным измерениям на станции Sodankylä составила 457 е.Д., что является, по-видимому, очень редким для данного места наблюдений.

Значительные величины и колебания ОСО при ВСП также наблюдались во время комплексного эксперимента в Арктике зимой 1988/89 г. Целями исследования были изучение структуры и динамики озонового слоя в полярных широтах Северного полушария [18, 19]. Местом проведения данного эксперимента была обсерватория им. Кренкеля на о. Хейса, Земля Франца-Иосифа (80° с.ш., 58° в.д.). В середине февраля во время разрушения полярного вихря произошел нагрев стратосферы, в результате которого вблизи уровня 25 км температура увеличилась более чем на 60 К с 1.02 по 20.02.1989 г. По данным измерений наземным спектрофотометром Брюера ОСО возросло с 300 е.Д. в начале января до почти 600 е.Д. 19–20.02.1989 г. [20]. Общим для этих зимних сезонов является то, что наибольшая изменчивость озона имело место в нижней стратосфере.

Вариации содержания мезосферного озона на высоте 60 км во время значительной геомагнитной бури 23–24.03.2023 г.

В марте 2023 г. (23–24) геомагнитные обсерватории Земли зафиксировали наиболее крупную за последние несколько лет магнитную бурю плане-

тарного масштаба. Главная фаза бури началась в 17:30 UT 23.03.2023 г. Максимальная интенсивность бури (балл события 7,7) была в 21:30 UT. Она имела магнитную возмущенность до 1500 нТл и наблюдалась преимущественно в авроральных широтах [21, 22]. Предположительно буря была вызвана попаданием Земли в поток быстрого солнечного ветра. Такие потоки формируются на Солнце в так называемых корональных дырах – темных областях короны с открытыми линиями магнитного поля, вдоль которых происходит истечение вещества в межпланетное пространство.

На рис. 4 показаны суточные вариации концентрации O₃ (60 км) согласно непрерывным наземным микроволновым наблюдениям с 21 по 26.03, т.е. до и после магнитной бури. Существенной разницы в суточных изменениях озона не наблюдается.

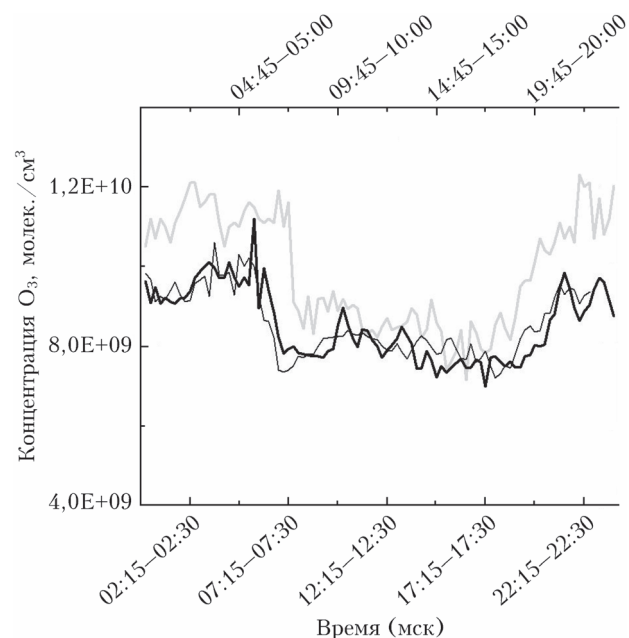


Рис. 4. Вариации мезосферного озона (60 км) во время суббури 23–24.03.2023 г.: суточные вариации O₃ в период бури 24.03.2024 г. (полужирная кривая) и после бури 25.03.2023 г. (тонкая кривая); суточный цикл мезосферного озона 14.03.2018 г. после влияния ВСП на среднюю атмосферу (серая кривая)

Следует иметь в виду, что изменения озона на рис. 4 выполнены с 15-минутным разрешением. Вариации мезосферного O₃ (60 км), связанные с восходом и заходом Солнца, доминировали над вариациями, вызванными влиянием солнечного ветра. Также на рис. 4 показан суточный ход озона (серая кривая) 14.03.2023 г., который сформировался после мажорного ВСП в середине февраля 2018 г. Хорошо видна разница воздействия ВСП на содержание O₃ в мезосфере в 2022/23 г. и 2017/18 г.

В табл. 2 приведены средние ночные и дневные концентрации озона за период до и после геомагнитной бури 23–24.03.2023 г. Изменчивость дневных и ночных концентраций O₃ за все время измерений

Суточные вариации концентрации ($\times 10 \text{ см}^{-3}$) мезосферного озона (60 км) по данным непрерывных наблюдений в марте 2023 г.

Время	Дата					
	21.03	22.03	23.03	24.03	25.03	26.03
00:00–02:00	(9,27 ± 0,13)	(9,22 ± 0,11)	–	(9,33 ± 0,13)	(9,37 ± 0,15)	(9,53 ± 0,13)
10:00–14:00	(7,95 ± 0,11)	(8,20 ± 0,08)	(8,63 ± 0,09)	(8,12 ± 0,12)	(8,10 ± 0,05)	(8,32 ± 0,09)
22:00–24:00	(8,81 ± 0,12)	–	(9,37 ± 0,11)	(9,28 ± 0,18)	(9,20 ± 0,15)	(9,82 ± 0,10)

не превышала 10%. Амплитуда суточного хода содержания озона за этот цикл находилась в пределах 10–20%. Приведенный на рис. 4 суточный ход содержания озона 14.03.2018 г., который сформировался под действием ВСП в середине февраля 2018 г., имел амплитуду ~30%.

Таким образом, никаких следов воздействия сильной геомагнитной бури на мезосферный озон (60 км) мы не обнаружили.

Заключение

Результаты диагностики поведения озона средней атмосферы с помощью наземной радиометрии в миллиметровом диапазоне длин волн показали следующее. Особенностью зимнего сезона 2022/23 г., по сравнению с прошлыми, явилось значительное возрастание содержания озона в нижней стратосфере по отношению к средней после внезапного стратосферного потепления в середине февраля 2023 г. Планетарная геомагнитная буря 23–24.03.2023 г. не оказала заметного влияния на мезосферный озон над Апатитами. Этот результат вступает в противоречие с рядом работ, посвященных влиянию энергичных электронов на изменчивость озона средней атмосферы. Поэтому требуется продолжение исследований для подтверждения зарегистрированного нами явления.

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания ИПФ РАН (FFUF-2024-0034).

Список литературы

- Куликов Ю.Ю., Андриянов А.Ф., Демин В.И., Демкин В.М., Кириллов А.С., Рыскин В.Г., Шишаев В.А. Длительные микроволновые наблюдения озона средней атмосферы в Апатитах в течение трех зим // Геомагнетизм и аэронавигация. 2023. Т. 63, № 5. С. 644–656.
- Jackman C.H., Fleming E.L., Vitt F.M., Considine D.V. The influence of solar proton events on the ozone layer // Adv. Space Res. 1999. V. 24, N 5. P. 625–630.
- Jackman C.H., Marsh D.R., Vitt F.M., Garcia R.R., Randall C.E., Fleming E.L., Frith S.M. Long-term middle atmosphere influence of very large solar proton events // J. Geophys. Res. 2009. V. 114, N D11. DOI: 10.1029/2008jD011415.
- Andersson V.E., Verronen P.T., Rodger C.J., Clilverd M.A., Seppälä A. Missing driver in the Sun–Earth connection from energetic precipitation impacts mesospheric ozone // Nat. Commun. 2014. DOI: 10.1038/ncomms6197.
- Weeks L.H., CuiKay R.S., Corbin J.R. Ozone measurements in the mesosphere during the solar proton

- event of 2 November 1969 // J. Atmos. Sci. 1972. V. 29. P. 1138–1142. DOI: 10.1175/1520-0469(1972)029<1138:OMITMD>2.0.CO;2.
- Heath D.F., Krueger A.J., Crutzen P.J. Solar proton event: Influence on stratospheric ozone // Science. 1977. V. 197. P. 886–888. DOI: 10.1126/science.197.4306.886.
- Crutzen P.J., Isaksen I.S.A., Reid C.R. Solar proton events: Stratospheric sources of nitric oxide // Science. 1975. V. 189. P. 457–459. DOI: 10.1126/science.4201.457.
- Thorne R.M. Energetic radiation belt electron precipitation: A natural depletion mechanism for stratospheric ozone // Science. 1977. V. 195. P. 287–289. DOI: 10.1126/science.195.4275.287.
- Seppälä A., Clilverd M.A. Energetic particle forcing of the Northern Hemisphere winter stratosphere // Front. Phys. 2014. V. 2. DOI: 10.3389/fphy.2014.00025.
- Matthes K., Funke B., Andersson M.E., Barnard L., Beer J., Charbonneau P., Clilverd M.A., Dudok de Wit T., Haberleiter M., Hendry A., Jackman C.H., Kretzschmar M., Kruschke T., Kunze M., Langematz U., Marsh D.R., Maycock A.C., Misios S., Rodger C.J., Scaife A.A., Seppälä A., Shangguan M., Sinnhuber M., Tourpali K., Usoskin I., van de Kamp M., Verronen P.T., Versick S. Solar forcing for CMIP6 (v3.2) // Geosci. Model Dev. 2017. V. 10, N 6. P. 2247–2302. DOI: 10.5194/gmd-10-2247-2017.
- 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 (MEE) precipitation using numerical simulations // Atmosphere. 2021. V. 12, N 2. ID 133. DOI: 10.3390/atmos12020133.
- Chapman-Smith K., Seppälä A., Rodger C.J., Hendy A., Forsyth C. Observed loss of polar mesospheric ozone following substorm-driven electron precipitation // Geophys. Res. Lett. 2023. V. 50, N 17. DOI: 10.1029/2023GL104860.
- Kulikov Y.Y., Krasilnikov A.A., Shchitov A.M. New mobile ground-based instrument for research of stratospheric ozone (some results of observation) // Proc. of the Sixth International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW'07). V. 1 (2007), p. 62–66.
- 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 аэронавигация. 1997. Т. 37, № 3. С. 174–183.
- Куликов Ю.Ю., Андриянов А.Ф., Демин В.И., Демкин В.М., Кириллов А.С., Козелов Б.В., Рыскин В.Г., Шишаев В.А. Результаты микроволновых наблюдений озона средней атмосферы за Полярным кругом зимой 2017–2018 // Тезисы докладов XI Всероссийского семинара по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн, 25–28 февраля 2019 г. С. 106–107.
- Rao J., Ren R., Chen H., 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. DOI: 10.1029/2018JD028908.

17. Barnett J.J., Corney M. A middle atmosphere reference model derived from satellite data // Handbook for MAP. 1985. V. 16. P. 47–85. DOI: 10.1016/0273-1177(85)90369-2.
18. Rosen J.M., Kjome N.T., Khattatov V.U., Rudakov V.V., Yushkov V.A. Observation of ozone and polar stratospheric clouds at Heiss Island during winter 1988–1989 // J. Geophys. Res. 1992. V. 97, N D8. P. 8099–8104.
19. 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. Физ. атмосф. и океана. 2002. Т. 38, № 2. С. 182–191.
20. Дорохов В.М. Наблюдения ОСО в Арктике (о. Хейса) зимой 1989 г. // Оптика атмосферы. 1990. Т. 3, № 1. С. 132–136.
21. Громова Л.И., Клейменова Н.Г., Громов С.В., Кананиди К.Х., Петров В.Г. Магнитная буря 23–24 марта 2023 г.: особенности геомагнитных возмущений во время главной фазы. Проблемы космофизики: тез. докл. Дубна, 10–13 июля 2023 г.
22. Rancheva D., Mukhtarov P., Vojilova R. Response to geomagnetic storm on 23–24 March 2023 long-lasting longitudinal variations of the global ionospheric TEC // Adv. Space Res. 2024. V. 73, N 12. P. 6006–6028. DOI: 10.1016/j.asr.2024.03.023.

Yu.Yu. Kulikov, V.I. Demin, V.M. Demkin, A.S. Kirillov, A.V. Losev, V.G. Ryskin. **Dynamic phenomena in stratospheric and mesospheric ozone of the polar atmosphere in February–March 2023.**

The results of microwave observations of ozone in the middle atmosphere at Apatity (67° N, 33° E) in winter 2022/2023, during a period of high solar activity in the 25th cycle, are presented. A mobile ozonemeter with an operating frequency of 110.8 GHz was used in the measurements. The device had a single-sideband noise temperature of 2500 K, which made it possible to track variations in O₃ with a 15-min resolution in the middle atmosphere. Estimates of the ozone vertical profile at altitudes of 22–60 km have been made. These results were compared with satellite MLS/Aura data on the altitude profiles of ozone and temperature. This report discusses the behavior of ozone in February–March 2023. Ozone variations took place during the sudden stratospheric warming (SSW) which occurred in mid-February and was accompanied by an extraordinary increase in the total ozone content (TOC) from 240 to 500 DU. The limits of ozone changes at altitudes of 25, 40, and 60 km are given. The influence of the intense geomagnetic disturbance (storm) on March 23–24 on the daily variation in ozone at an altitude of 60 km is discussed.

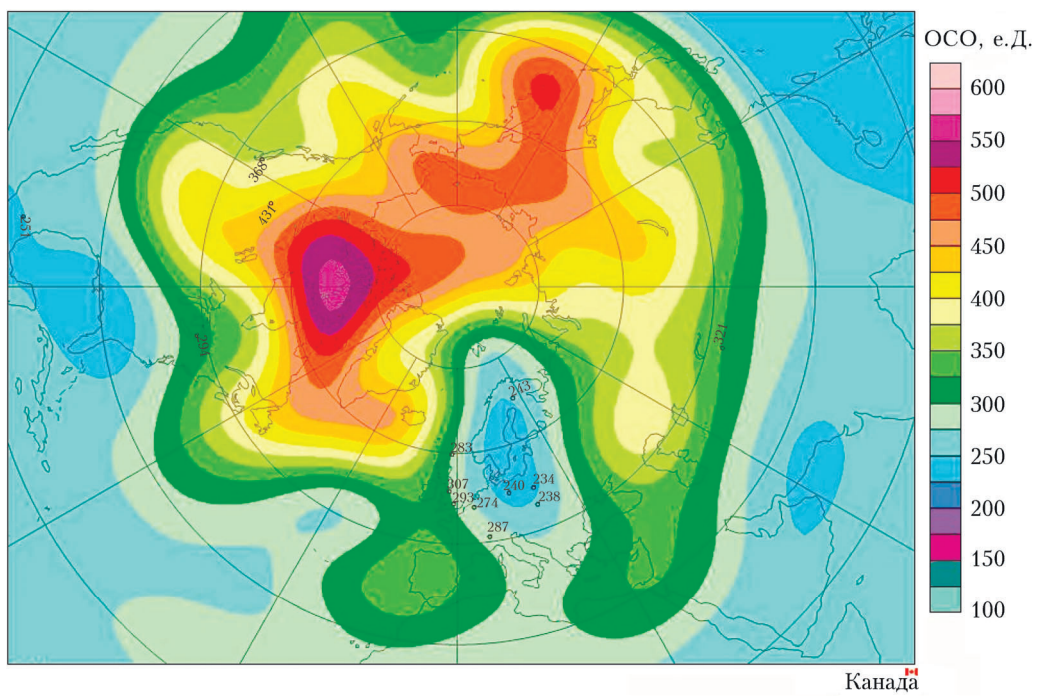


Рис. 3. Карта ОСО для Северного полушария на 15.02.2023 г. (<http://exp-studies.tor.ec.gc.ca>)