

Оксид хлора как индикатор разрушения озона в зимне-весенней стратосфере Арктики по данным спутниковых (Aura MLS) наблюдений

О.Е. Баженов^{✉*}

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

Поступила в редакцию 14.02.2023 г.;
после доработки 31.07.2023 г.;
принята к печати 22.08.2023 г.

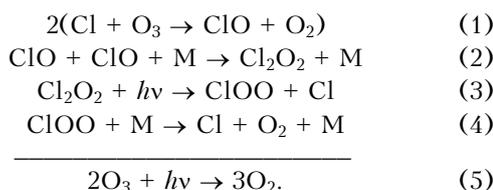
В настоящее время все большее беспокойство вызывает поведение озона в Арктике, аномалии которого происходят в среднем раз в пять лет. Последнее, рекордное понижение уровня озона в стратосфере Арктики зафиксировано в марте–апреле 2020 г. В феврале 2022 г. разрушение озона развивалось по сценарию, близкому к озоновой аномалии 2020 г. Как и в 2020 г., в 2022 г. после возвращения солнечного освещения в Арктику значительно выросло отношение смеси ClO, которое можно рассматривать в качестве надежного показателя разрушения озона. Однако дальнейшее разрушение было остановлено в результате внезапного мажорного стратосферного потепления 20 марта. В работе используются данные измерений общего содержания озона (OCO) за 2003–2022 гг. из сервиса TEMIS, а также профили температуры воздуха и отношений смеси озона за 2005–2022 гг. и оксида хлора за 2020–2022 гг. из измерений Aura MLS. Рассмотрены следующие пункты: Эврика (Канада), Нью-Олесунн (Норвегия), Резольют (Канада), Туле (Гренландия). Выявлена зависимость между содержанием озона и оксида хлора. Высокая корреляция колебаний рассматриваемых параметров на приблизительно одинаковых высотах регистрации, а также значений общего содержания O₃ и ClO говорит об их тесной взаимосвязи. Результаты позволяют использовать концентрацию и общее содержание ClO в качестве индикаторов разрушения озона в стратосфере Арктики.

Ключевые слова: озон, внезапное стратосферное потепление, солнечная засветка, оксид хлора, температура, наблюдения Aura MLS и TEMIS; ozone, sudden stratospheric warming, solar exposure, chlorine oxide, temperature, Aura MLS and TEMIS observations.

Введение

Степень разрушения озона в зимней стратосфере Арктики определяется продолжительностью сезона полярных стратосферных облаков (ПСО) [1]. На поверхности частиц ПСО из молекул-резервуаров – хлороводорода HCl и нитрата хлора ClONO₂ – образуются молекулы хлора Cl₂ [2]. При возвращении солнечного освещения в арктические широты на высотах стратосферы молекула Cl₂ фотодиссоциирует, образуя атомы хлора.

Атомарный хлор участвует в каталитическом разрушении озона при наличии солнечного освещения в основном в ходе димерного цикла ClO [3]:



В ходе каталитического цикла (1)–(5) разрушается до 75% озона в озоновой дыре [4]. Находясь в стратосфере, один атом хлора способен разрушить тысячи молекул озона [5].

Однако планомерное разрушение озона в арктической стратосфере может быть прервано или остановлено в результате внезапного стратосферного потепления (ВСП). Существует несколько классификаций ВСП: 1) мажорные ВСП, сопровождающиеся разворотом западных среднесуточных среднезональных зональных ветров в восточном направлении, и минорные ВСП, характеризующиеся лишь ростом температуры; 2) ВСП со смещением полярного вихря от полюса либо с его расщеплением; 3) ВСП, которым предшествовала планетарная волна с зональным волновым числом 1 (ПВ1) или 2 (ПВ2). В то время как смещение вихря чаще всего ассоциируется с ПВ1, расщепление может быть вызвано либо ПВ1, либо ПВ2, и зачастую за усилением ПВ1 следует рост ПВ2 [6].

Озоновой аномалии весной 2020 г. предшествовало минорное потепление с конца января по начало февраля 2020 г. На полюсе температура выросла на 20 К [7]; однако вскоре после потепления

* Олег Елисеевич Баженов (boe@iao.ru).

температура вновь упала, что возобновило активацию хлора в начале марта на атмосферном уровне 400–550 К и привело к беспрецедентному разрушению озона, продлившемуся вплоть до начала апреля [8].

В середине декабря 2020 г. стратосферный полярный вихрь приобрел вытянутую форму. В конце декабря произошло восстановление вихря, и он вновь занял положение в пределах арктического полярного круга. Однако в самом начале января 2021 г. стратосферный полярный вихрь распался на две части вследствие усиления волны 2 из тропосферы. Затем последовало слияние двух центров, но результатом ВСП стало ослабление вихря [9].

Зима 2021/2022 г. отличалась сильным стратосферным полярным вихрем в декабре 2021 г., двумя минорными ВСП в конце февраля и начале марта и мажорным ВСП 20 марта, которое прекратило дальнейшее значительное разрушение озона. Первое минорное ВСП было локализовано в верхней полярной стратосфере и не повлияло на направление ветров на атмосферном уровне 10 гПа и ниже. Результатом второго минорного ВСП в начале марта стало ослабление среднего зонального ветра в верхней и средней стратосфере практически до уровня климатической нормы. В соответствии с определением мажорного ВСП 20 марта изменилось направление среднезонального ветра в средней стратосфере на уровне 10 гПа на 60° с.ш. Следует отметить, что мажорное ВСП во второй половине марта сопровождалось ростом амплитуды волны 1 в нижней и средней стратосфере и смещением стратосферного полярного вихря от полюса в сторону Западной Сибири [10].

Цель настоящей работы – выявить зависимость между содержанием озона и оксида хлора при аномальном понижении температуры и уровня озона в зимней полярной стратосфере.

Материалы и методы исследования

В работе используются три набора данных.

1. Данные по общему содержанию озона (ОСО) за 2003–2022 гг. из Tropospheric Emission Monitoring Internet Service (TEMIS). TEMIS является подразделением Data User Element (DUE) Европейского космического агентства (ESA) и представляет собой операционный центр обработки и хранения данных для целевых пользовательских групп (<https://www.temis.nl>). Кроме информации об ОСО, TEMIS содержит данные о глобальных концентрациях тропосферных NO₂ и HCHO, вулканического SO₂, BrO, озона, аэрозоля, а так же об облачности. Результаты измерений в УФ-диапазоне получены из надирных спутниковых наблюдений в УФ- и видимом диапазонах приборами GOME, SCIAMACHY и OMI. Данные TEMIS доступны уже через несколько часов после наблюдений. Они широко используются для прогноза уровня УФ-излучения, мониторинга озоновых дыр, загрязнения воздуха, изменения климата [11]. Преимущество TEMIS – наличие значений ОСО в полярных точках во время полярной ночи.

2. Профили температуры и отношения смеси озона за 2005–2022 гг. по измерениям радиометра MLS на спутнике Aura. MLS обеспечивает измерения малых газовых составляющих, участвующих в химических реакциях озона, таких как ClO, N₂O и HNO₃, которые наиболее часто используются для анализа разрушений полярного озона и оценки активации хлора, оседания воздуха в вихре и денитрификации соответственно [1]. В настоящей работе используются данные **версии 5**. Они получены с помощью программ обработки данных MLS **v5.0x**, содержащей ряд дополнений и изменений, включая: частичную коррекцию дрейфа измерений на частоте 190 ГГц (H₂O, N₂O, HCN); коррекцию систематической ошибки вследствие занижения влажности при определении H₂O в верхней тропосфере; расширение области определения N₂O до атмосферного уровня 100 гПа; увеличение высотного диапазона для некоторых соединений [12]. Профили Aura MLS получены из лимбовых измерений, возможных даже в период полярной ночи. Они уже приведены к некоторым арктическим точкам. В настоящей работе рассмотрены наиболее северные точки, далекие от периферии вихря, для которых минимально влияние средних широт. Рассчитывается среднее за 2005–2019 гг., которое затем отнимается от значений за 2020, 2021 и 2022 гг.

3. Профили отношения смеси ClO из HDF-архивов (Hierarchical Data Format) измерений MLS. Профили извлекаются из архивов с помощью программы HDFView – графического редактора для просмотра и редактирования файлов HDF4 и HDF5 (<https://portal.hdfgroup.org/display/HDFVIEW/HDFView+3.x+User%27s+Guide>). Файлы HDF содержат массивы данных и геокационную информацию, в частности широту и долготу измеренного профиля. В сущности, файлы содержат профили концентрации ClO для отдельных географических точек траектории спутника, облетаемых за день. Поэтому требуется дополнительная сортировка профилей и выборка по широте и долготе для того, чтобы привести их в соответствие с профилями температуры и отношения смеси озона. В этом состоит отличие от подхода, используемого в работе [1], где отношения смеси ClO из HDF-архива представлены как средние по вихрю (на эквивалентных широтах ≥ 65°) на атмосферных уровнях 16 и 18 км. Выборка данных лишь за 2020, 2021, и 2022 гг. объясняется трудоемкостью.

Результаты и обсуждение

На рис. 1 представлены величины ОСО за 2020–2022 гг. и многолетнее (2003–2019 гг., за исключением 2011 г.) среднее для трех станций Канады с сервиса TEMIS [13]: Алерт (ALT), Эврика (EUR) и Резольют (RES).

Из рис. 1 следует, что пониженное (относительно многолетнего среднего) ОСО характерно для 2020–2022 гг. В 2022 г. ОСО следовало сценарию озоновой аномалии 2020 г. практически до середины марта, но после ВСП 20 марта быстро вернулось к уровню многолетнего среднего.

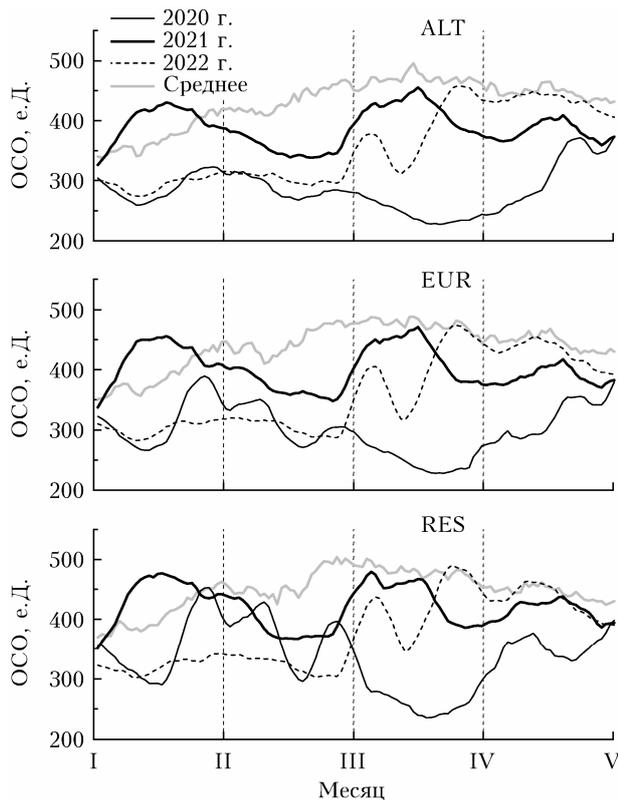


Рис. 1. Общее содержание озона и многолетнее среднее для трех станций в январе – апреле с сервиса TEMIS. При построении применялось сглаживание скользящим средним по девяти точкам

Для исследования крупномасштабных полей температуры и озона использовались данные Aura MLS для четырех арктических точек: Алерт, Канада ($82,47^\circ$ с.ш., $62,35^\circ$ з.д.; ALT); Эврика, Канада ($80,05^\circ$ с.ш., $86,43^\circ$ з.д.; EUR); Туле, Гренландия ($76,5^\circ$ с.ш., $68,7^\circ$ з.д.; THU); Резольют, Канада ($74,69^\circ$ с.ш., $95,01^\circ$ з.д.; RES). В результате инспекции файлов спутниковых данных для указанных точек установлены пороговые широтные и долготные интервалы для включения в анализ профилей С1О из этих интервалов; они заключены в квадратные скобки вместе с датами окончания полярной ночи (<https://geobar.ru/tablicy-po-geografii/prodolzhitelnost-dnja-i-nochi-tablica/>): EUR – [$75,49$ – $81,64^\circ$ с.ш. (второе значение – крайняя широта, охватываемая спутниковыми наблюдениями), $79,78$ – $92,71^\circ$ з.д.; 21 февраля], NAD – [$74,23$ – $81,78^\circ$ с.ш., $4,24$ – $18,85^\circ$ в.д.; 15 февраля], THU – [$72,94$ – $81,25^\circ$ с.ш., $61,86$ – $76,62^\circ$ з.д.; 8 февраля]; RES – [$70,27$ – $78,89^\circ$ с.ш., $88,19$ – $102,92^\circ$ з.д.; 2 февраля]). Результаты ежедневных измерений температуры и отношения смеси озона усреднялись до получения средних дневных профилей, которые затем использовались для расчета многолетнего (2005–2019 г.) среднего профиля. Также рассчитаны значения интегрального (по профилю) содержания O_3 и С1О.

На рис. 2 для пунктов EUR, NAD, THU и RES показаны разность $T_{\min} - T_{\text{NAT}}$ (T_{\min} – минимальная

температура в заданном высотном диапазоне в день наблюдений; $T_{\text{NAT}} = 195$ К) и высота, на которой наблюдается T_{\min} (рис. 2, а); максимальное значение С1О за три года и высота его регистрации (рис. 2, б); максимальное отклонение отношения смеси озона Δr_{\max} от многолетнего среднего и высота его регистрации (рис. 2, в); значения интегрального (по профилю) содержания O_3 и С1О (рис. 2, з). Относительное отклонение для озона рассчитывалось как разность между средним значением за 2005–2019 гг. и значением для февраля-марта 2020–2022 гг.

На рис. 2, а ясно видны ВСП в январе-феврале 2020 г. и в конце февраля – начале марта и в конце марта 2022 г. К концу января 2020 г. температура падала до 187 К. ВСП в январе 2021 г. ослабило полярный вихрь, поэтому арктическая стратосфера в феврале и марте 2021 г. может рассматриваться как фоновая.

Полярная ночь в рассматриваемых пунктах наблюдения длится до 2–21 февраля. Видно, что отношение смеси С1О в конце января 2020 и 2022 гг. было выше фонового благодаря солнечной засветке (освещения периферии вихря вследствие его деформации) [1, 8]. Отношение смеси С1О резко превысило фоновый уровень к началу возвращения солнечного освещения в феврале 2020 и 2022 гг. (рис. 2, б). В феврале 2022 г. оно достигло максимума, а затем понизилось вследствие формирования ВСП в середине марта 2022 г. и прекращения образования С1О. В 2020 г. отношение смеси С1О продолжало расти приблизительно до третьей декады марта; оно достигло $1,5$ – $2,0$ млрд $^{-1}$ на высоте ~ 20 км [8] ($1,2$ млрд $^{-1}$ в начале марта [4]). В пункте EUR на высоте 21 км отношение смеси С1О составляло $1,1$ млрд $^{-1}$ 18 февраля 2022 г. и $1,2$ млрд $^{-1}$ 16 марта 2020 г. Описание наблюдений приводится в таблице.

На рис. 3 показаны взаимные корреляционные функции (ВКФ) между экстремальными отношениями смеси (ВКФ $_{ppb}$) и интегральным содержанием (ВКФ $_{DU}$) O_3 и С1О, т.е. между кривыми, представленными на рис. 2. Согласно этим данным, корреляционные функции для 2020 и 2022 гг. кардинально отличаются. В 2022 г. ВКФ имеют выраженный минимум при нулевом временном сдвиге для всех исследуемых пунктов Западного полушария, в то время как в 2020 г. отчетливый максимум наблюдается при небольших отрицательных сдвигах и выраженный минимум – при сдвиге ~ 10 дней. Поведение ВКФ в 2021 г. ближе по характеру к 2022 г. Причина указанного расхождения требует специального анализа на основе более обширного статистического материала.

Из таблицы видно, что корреляции были самыми сильными в марте 2022 г. Это свидетельствует о том, что вихрь был изолирован до ВСП. Совпадение высот регистрации экстремальных значений параметров и приблизительное повторение зависимостей 2020 г. указывают на то, что в феврале-марте 2022 г. также формировалась озоновая аномалия, но ее развитие было прервано ВСП 20 марта.

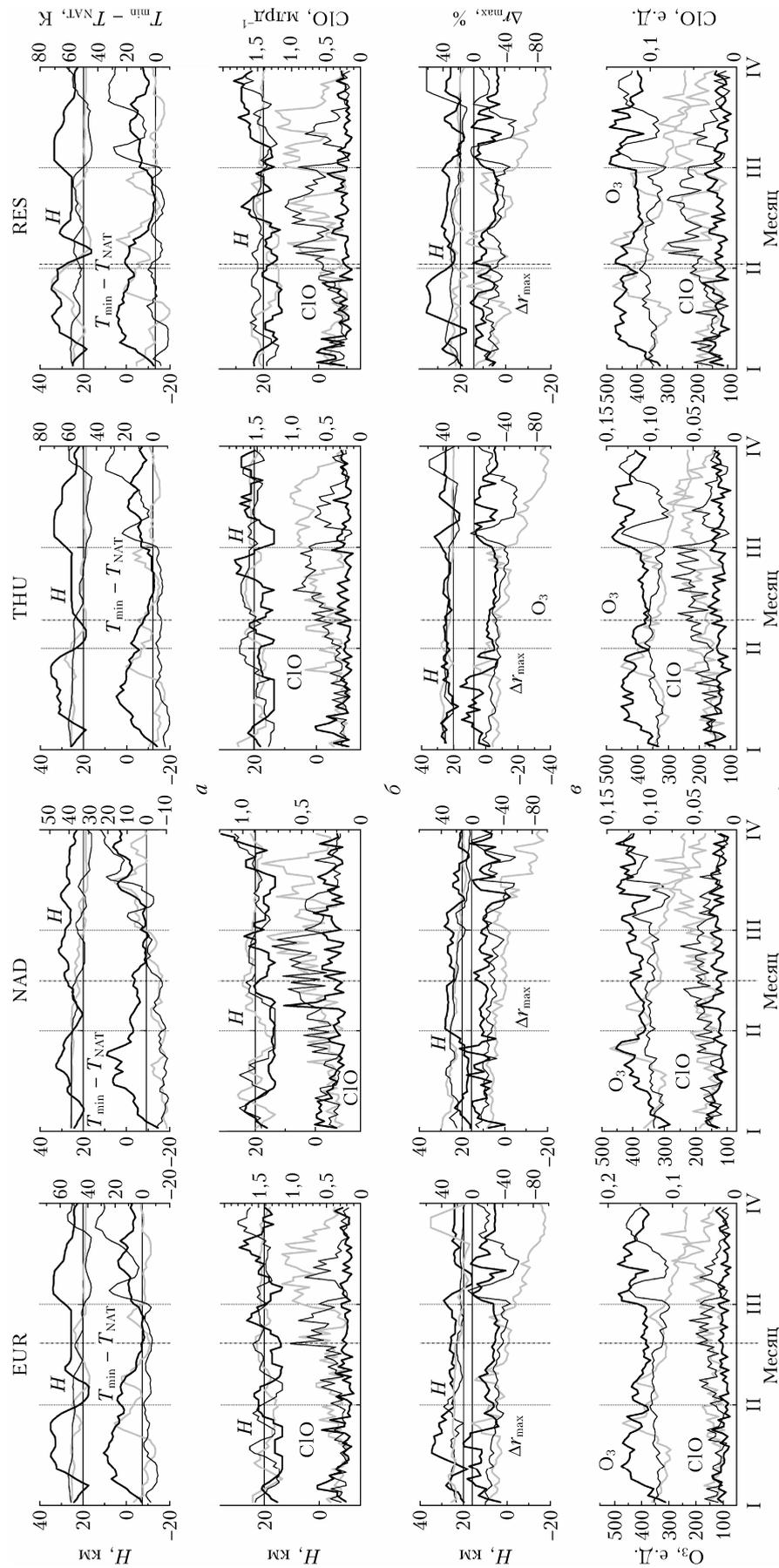


Рис. 2. Временной ход в январе – марте 2020–2022 гг. статистических характеристик и высоты их локализации: разность $T_{\min} - T_{\text{NAT}}$ (а); максимальное значение отношения смеси ClO (б); максимальное относительное отклонение смеси O_3 , $\Delta \text{O}_{3\max}$ от многолетнего среднего (по профилю) и интегрального (по профилю) содержания O_3 и ClO (в) для пунктов EUR, NAD, THU и RES. При построении кривых для высоты регистрации параметров применялось сглаживание средним по 5 точкам. Пунктир указывает дату окончания полярной ночи

Коэффициенты корреляции между максимальными относительными отклонениями концентраций озона от многолетнего среднего и максимальными концентрациями ClO (Δr ; ClO), максимальными относительными отклонениями концентрации озона и разностью $T_{\min} - T_{\text{NAT}}$ (Δr ; ΔT), концентрациями оксида хлора и разностью $T_{\min} - T_{\text{NAT}}$ (ClO; ΔT) для различных пунктов в Арктике для марта 2020, 2021 и 2022 гг.

Пункт (координаты)	Коэффициенты корреляции для марта 2020/2021/2022 гг.			Значение (день; высота регистрации, км) в 2020/2021/2022 гг.		
	(Δr ; ClO)(p)	(Δr ; ΔT)(p)	(ClO; ΔT)(p)	Δr , %	ClO, млрд ⁻¹	ΔT , К
ALT	0,22(0,2396) / 0,04(0,847) / -0,69	0,43(0,0145) / 0,51(0,004) / 0,68	-0,55(0,0017) / -0,12(0,5) / -0,82	-97 (22 марта; 20) / -35 (10 марта; 16) / -56 (12 марта; 20)	1,1 (16 марта; 21) / 0,4 (24 марта; 13) / 0,7 (26 февраля; 19)	-5,5 (17 марта; 19) / 10 (8 марта; 34) / 1,2 (12 марта; 19)
EUR	0,64(1,24 · 10 ⁻⁴) / -0,2(0,292) / -0,79	0,02(0,89) / 0,5(0,004) / 0,78	-0,51(0,003) / -0,35(0,053) / -0,76	-96 (27 марта; 20) / -44 (11 марта; 16) / -61 (14 марта; 20)	1,2 (16 марта; 21) / 0,4 (29 марта; 21) / 1,1 (18 февраля; 21)	-6,4 (16 марта; 19) / 5 (27 марта; 24) / 2 (12 марта; 19)
THU	0,35(0,054) / 0,06(0,77) / -0,7	0,73 / 0,35(0,054) / 0,68	-0,28(0,127) / -0,4(0,026) / -0,81	-97 (27 марта; 20) / -30 (12 марта; 16) / -57 (19 марта; 19)	1,0 (17 марта; 21) / 0,4 (15 марта; 13) / 0,9 (21 февраля; 24)	-5 (18 марта; 19) / 8 (9 марта; 34) / 3 (13 марта; 19)
RES	0,49(0,005) / -0,05(0,784) / -0,74	0,38(0,037) / 0,42(0,019) / 0,8	-0,37(0,039) / -0,39(0,03) / -0,8	-95 (26 марта; 20) / -31 (24 марта; 24) / -55 (15 марта; 20)	1,2 (18 марта; 21) / 0,3(27 марта; 32) / 1,1 (18 февраля; 24)	-6 (17 марта; 19) / -4,6 (25 марта; 24) / 6 (12 марта; 17)
NAD	-0,17(0,365) / 0,42(0,019) / -0,26(0,16)	0,36(0,48) / 0,19(0,295) / 0,56(0,001)	-0,22(0,236) / -0,036(0,847) / -0,78	-95 (28 марта; 19) / -51 (12 марта; 16) / -56 (16 марта; 16)	0,8 (22 марта; 19) / 0,4 (7 марта; 13) / 0,8 (26 февраля; 21)	0 (20 марта; 30) / 0 (4 марта; 26) / -4 (11 марта; 19)

Примечание. Отклонения концентраций озона рассчитывались как разности между значениями для марта 2020–2022 гг. и многолетним (2005–2019 гг., за исключением 2011 г.) средним; p – плотность вероятности, если не указана, то $p < 0,0001$; в последних трех колонках приведены минимальное отрицательное значение Δr , максимальное положительное значение ClO, минимальное отрицательное либо максимальное положительное значение ΔT .

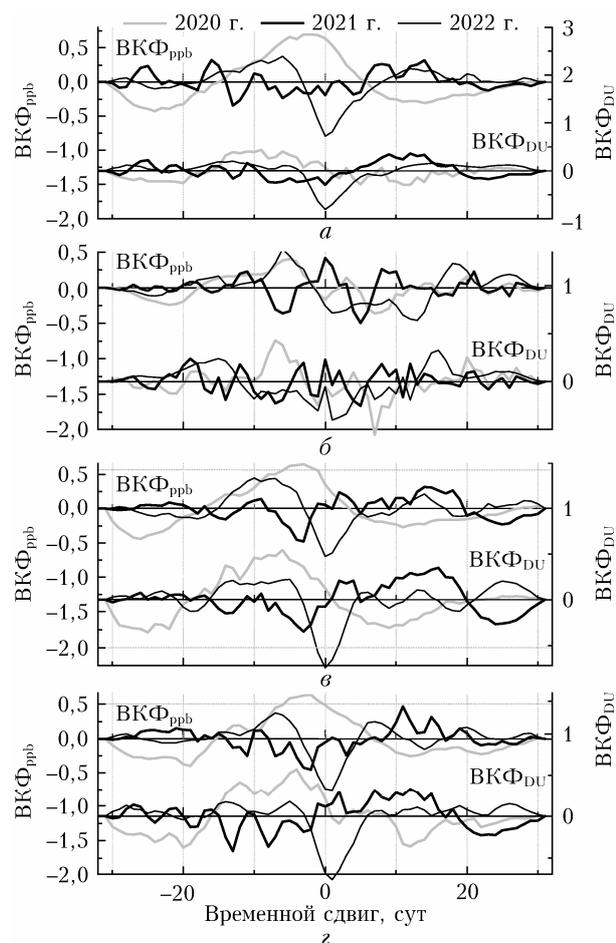


Рис. 3. Взаимные корреляционные функции экстремальных отношений смеси и общего содержания O₃ и ClO для марта 2020–2022 гг. в пунктах EUR (а), NAD (б), THU (в), RES (г)

Заклучение

Из анализа данных TEMIS и Aura MLS можно сделать следующие выводы.

1. Поведение ОСО в 2022 г. следовало сценарию озоновой аномалии 2020 г. практически до середины марта, но после ВСП 20 марта быстро вернулось к уровню многолетнего среднего.

2. ВСП в январе 2021 г. ослабило полярный вихрь и нарушило взаимосвязь между отношениями смеси озона и оксида хлора, а также температурой в стратосфере.

3. Повышенный уровень ClO во всех рассмотренных пунктах в январе 2020 и 2022 гг. относительно 2021 г. обусловлен солнечной засветкой областей вихря с высоким содержанием Cl₂.

4. Отношение смеси ClO было максимальным в феврале 2022 г., а затем понизилось в середине марта 2022 г. вследствие формирования ВСП и прекращения образования ClO; в 2020 г. ClO продолжало расти приблизительно до третьей декады марта.

5. Прерванный ВСП сезон ПСО в 2022 г. привел к незначительному разрушению озона в стратосфере Арктики.

6. Корреляции между максимальными относительными отклонениями концентраций озона Δr от многолетних средних и максимальными концентрациями ClO (Δr ; ClO), максимальными относительными отклонениями концентрации озона и разностью $T_{\min} - T_{\text{NAT}}$ (Δr ; ΔT) и концентрациями оксида хлора и разностью $T_{\min} - T_{\text{NAT}}$ (ClO; ΔT) были самыми сильными в марте 2022 г. вследствие устойчивой изоляции вихря до возникновения ВСП. Корреляционные функции между максимальными относительными отклонениями концентраций озона от многолетних средних значений и максимальными

концентрациями ClO для 2020 и 2022 гг. кардинально различаются.

Таким образом, существует сильная взаимосвязь между содержанием озона и оксида хлора при аномальном понижении уровня озона в зимней полярной стратосфере. Следовательно, ClO может быть использован в качестве индикатора весеннего разрушения озона.

Список литературы

1. *Manney G.L., Livesey N.J., Santee M.L., Froidevaux L., Lambert A., Lawrence Z.D., Millán L.F., Neu J.L., Read W.G., Schwartz M.J., Fuller R.A.* Record low Arctic stratospheric ozone in 2020: MLS observations of chemical processes and comparisons with previous extreme winters // *Geophys. Res. Lett.* 2020. V. 47. P. e2020GL089063. DOI: 10.1029/2020GL089063.
2. *Bazhenov O.E., Nevzorov A.A., Nevzorov A.V., Dolgii S.I., Makeev A.P.* Disturbance of the stratosphere over Tomsk prior to the 2018 major sudden stratospheric warming: Effect of ClO dimer cycle // *Opt. Mem. Neural Networks.* 2021. V. 30, N 2. P. 146–156. DOI: 10.3103/S1060992X21020065.
3. *Von Clarmann T.* Chlorine in the stratosphere // *Atmosfera.* 2013. V. 26, N 3. P. 415–458.
4. *Solomon S.* Stratospheric ozone depletion: A review of concepts and history // *Rev. Geophys.* 1999. V. 37, N 3. P. 275–316. DOI: 10.1029/1999RG900008.
5. *Hemond H.F., Fechner E.J.* Chemical fate and transport in the environment. Academic Press, 2022. 520 p.
6. *Baldwin M.P., Ayraragüena B., Birner T., Butchart N., Butler A.H., Charlton-Perez A.J., Butler A.H., Domeisen D.I.V., Garfinkel C.I., Garny H., Gerber E.P., Hegglin M.I., Langematz U., Pedatella N.* Sudden stratospheric warmings // *Rev. Geophys.* 2021. V. 59. P. e2020RG000708. DOI: 10.1029/2020RG000708.
7. *Roy R., Kuttippurath J.* The dynamical evolution of sudden stratospheric warmings of the Arctic winters in the past decade 2011–2021 // *SN Appl. Sci.* 2022. V. 4. P. 105. DOI: 10.1007/s42452-022-04983-4.
8. *Kuttippurath J., Feng W., Müller R., Kumar P., Raj S., Gopikrishnan G.P., Roy R.* Exceptional loss in ozone in the Arctic winter/spring of 2019/2020 // *Atmos. Chem. Phys.* 2021. V. 21. P. 14019–14037. DOI: 10.5194/acp-21-14019-2021.
9. *Rao J., Garfinkel C.I., Wu T., Lu Y., Lu Q., Liang Z.* The January 2021 sudden stratospheric warming and its prediction in subseasonal to seasonal models // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2021. V. 126. P. e2021JD035057. DOI: 10.1029/2021JD035057.
10. *Vargin P.N., Koval A.V., Guryanov V.V.* Arctic stratosphere dynamical processes in the winter 2021–2022 // *Atmosphere.* 2022. V. 13. P. 1550. DOI: 10.3390/atmos13101550.
11. *Van der A.R., Temis team.* Tropospheric Emission Monitoring Internet Service // *Geophysical Research Abstracts.* 2010. V. 12, EGU2010-9953 (2010).
12. *Livesey N., Read W., Froidevaux L., Lambert A., Santee M., Schwartz M., Millán L., Jarnot R., Wagner P., Hurst D., Walker K., Sheese P., Nedoluha G.* Investigation and amelioration of long-term instrumental drifts in water vapor and nitrous oxide measurements from the Aura Microwave Limb Sounder MLS and their implications for studies of variability and trends // *Atmos. Chem. Phys.* 2021. V. 21. P. 15409–15430. DOI: 10.5194/acp-21-15409-2021.
13. *Баженов О.Е.* Озоновые аномалии в стратосфере Арктики и Северной Евразии: сравнение явлений 2011 и 2020 гг. по данным TEMIS и Aura MLS // *Оптика атмосф. и океана.* 2022. Т. 35, № 5. С. 390–396; *Bazhenov O.E.* Ozone anomalies in the stratosphere of the Arctic and North Eurasia: Comparison of the 2011 and 2020 events using TEMIS and Aura MLS data // *Atmos. Ocean. Opt.* 2022. V. 35, N 5. P. 517–523.

O.E. Bazhenov. Chlorine oxide as an indicator of ozone destruction in the winter-spring Arctic stratosphere based on Aura MLS observations.

Behavior of ozone in the Arctic is of major concern. Ozone anomalies occur every five years on the average. The last, record strong decrease of the ozone level in the stratosphere of the Arctic took place in March–April 2020. In February 2022, ozone destruction developed by the scenario very similar to the anomaly of 2020. Like in 2020, the ClO mixing ratio, which can be considered a reliable indicator of ozone destruction, strongly increased after the end of the polar night in Arctic latitudes in 2022, but the subsequent ozone depletion process was halted by a sudden major stratospheric warming on March 20, 2022. In this work, we analyze ozone destruction in 2020–2022 based on measurements of the total ozone content over 2003–2022 from the TEMIS service, profiles of the air temperature and ozone mixing ratio for 2005–2022 and of ClO mixing ratio for 2020–2022 from Aura MLS observations. The following sites are considered: Eureka, Canada; Ny-Elesund, Norway; Thule, Greenland; and Resolute, Canada. A relationship is revealed between ozone and chlorine oxide contents. High coefficients of correlations between oscillations of the above parameters at close altitudes of their recording, as well as between the total O₃ and ClO contents calculated from their profiles, indicates their close interrelation. Hence, the ClO concentration and total content can be used as indicators of ozone destruction in the Arctic stratosphere.