

УДК 551.510.534

Озоновые аномалии в стратосфере Арктики и Северной Евразии: сравнение явлений 2011 и 2020 гг. по данным TEMIS и Aura MLS

О.Е. Баженов✉*

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

Поступила в редакцию 16.02.2022 г.;
после доработки 29.03.2022 г.;
принята к печати 1.04.2022 г.

Зимой-весной 2010/2011 и 2019/2020 гг. наблюдались сильнейшие аномалии озонового слоя в стратосфере Арктики за всю историю спутниковых наблюдений. Они были вызваны чрезвычайно сильным и продолжительным стратосферным полярным вихрем, повлекшим беспрецедентное химическое разрушение озона. Анализ данных TEMIS показывает, что относительное отклонение общего содержания озона (ОСО) от многолетнего (2003–2019 гг. за исключением 2011 г.) среднего составило 37–44% в 2011 г. и 45–55% в 2020 г. на станциях наблюдения, расположенных в арктических широтах, и 27–36% в 2011 г. и 27–32% в 2020 г. – в субарктических. По данным Aura MLS, минимальные температуры над Арктикой были на 8–12% ниже нормы в 2011 г. и на 8–13% ниже нормы в 2020 г. Концентрация озона для ст. Алерт падала до 23% от многолетнего среднего на высоте 20 км 22 марта 2011 г. и до 6% на высоте ~19 км 15 апреля 2020 г. Детальный корреляционный анализ показал, что отклонения концентраций водяного пара и озона, водяного пара и температуры, озона и температуры от многолетних средних значений сильнее коррелируют в 2020, чем в 2011 г. Корреляции убывают к периферии вихря вследствие обмена воздушными массами между арктическими и средними широтами, а за пределами Северного полярного круга становятся малозначимыми.

Ключевые слова: общее содержание озона, концентрация озона, озоновая аномалия, данные прибора MLS на спутнике Aura, наблюдения TEMIS; total ozone content, ozone concentration, ozone anomaly, Aura MLS data, TEMIS observations.

Введение

Несмотря на спорность [1], представление о том, что потепление климата ведет к охлаждению стратосферы [2, 3] и, в частности, к усилению полярного стратосферного вихря (далее по тексту – вихрь) по динамическим причинам [4], является достаточно распространенным в наши дни. Данные наблюдений прибора MLS на борту спутника Aura свидетельствуют о, по крайней мере, трех подобных эпизодах низких температур в стратосфере. В 2010/2011 гг. пониженные минимальные температуры в стратосфере не были рекордно низкими, но исключительно продолжительный (до апреля включительно) сезон полярных стратосферных облаков (ПСО) привел к беспрецедентному химическому разрушению озона в стратосфере Арктики. Во время второго эпизода в декабре-январе 2015/2016 гг. температуры в стратосфере Арктики опускались до рекордных за последние 68 лет значений. В арктической стратосфере регистрировались значительные уровни дегидратации и дегидратации, приведшие к более

резкому сокращению озона, чем в 2010/2011 гг. Потери озона не достигли уровня 2011 г. главным образом благодаря внезапному мажорному потеплению в начале марта 2016 г., следствием которого стали прекращение химического разрушения и экспорт арктического воздуха за пределы арктического круга. Наконец, зимой-весной 2019/2020 гг. температуры в стратосфере установились ниже порога образования ПСО ($T_{\text{NAT}} = 195 \text{ K}$) раньше, чем в любой другой год временного ряда наблюдений MLS, и оставались низкими так же долго, как и в 2011 г. [5].

Зима 2015/2016 гг. отличалась большими значениями V_{PSC} (объем воздуха с температурой ниже порога образования ПСО) и, следовательно, более низкими температурами до февраля, которые тем не менее не привели к значительному разрушению озона благодаря рано начавшемуся внезапному стратосферному потеплению. Пониженные температуры в конце марта 2011 г. сохранялись на несколько дней дольше, чем в 2020 г., но их эффект превзошло влияние больших значений $V_{\text{PSC}}/V_{\text{vortex}}$ (объем вихря) в начале зимы (декабрь-январь) 2019/2020 гг. [6].

Несмотря на то, что зима 2010/2011 гг. мало отличалась от зимы 2019/2020 гг. по характеру эволюции ПСО 1-го и 2-го типов, в 2011 г. объем ПСО

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

был меньше, и они начали формироваться позже (конец ноября). Уменьшение объема ПСО в 2011 и 2020 гг. происходило приблизительно синхронно: локальные минимумы наблюдались в середине января, а резкие кратковременные сокращения имели место в начале февраля и, вероятно, были связаны с минорными стратосферными потеплениями. Как в 2011, так и в 2020 г. объем ПСО (и, в частности, объем (ледяных) ПСО 2-го типа) был максимален в конце января [5].

В очень холодные зимы активация хлора фиксируется в январе и феврале на высотах, соответствующих уровням потенциальной температуры 400–500 К. В 2011 г. содержание активного хлора увеличилось до $1,6 \text{ млрд}^{-1}$ в конце февраля в основном на уровне 400–500 К. Но в 2020 г. стабильная активация хлора продолжалась с декабря по начало апреля, за исключением периодов минорных потеплений в середине декабря и начале февраля [7]. Среднее по вихрю (на эквивалентных широтах $\geq 65^\circ$) содержание ClO на указанных высотах составило $\sim 1,5\text{--}2,0 \text{ млрд}^{-1}$. Столь высокие показатели содержания ClO и разрушения озона обеспечивались лишь благодаря смещению вихря в субарктические широты [7, 8]. Отметим, что вихрь в начале декабря 2019 г. и в конце февраля 2020 г. находился в области $55\text{--}60^\circ$ с.ш.

Относительное уменьшение озона, как правило, было выше в 2019/2020 гг.: максимальный дефицит составил 73% на уровне 450 К в сравнении с 63% на уровне 470 К в 2010/2011 гг. [6]. Внезапные финальные потепления в стратосфере зафиксированы 5 апреля 2011 г. и 29 апреля 2020 г. [9].

В настоящей работе исследуются различия в величине аномалий озонового слоя в стратосфере Арктики/субарктики зимой-весной 2010/2011 и 2019/2020 гг. Используются данные по общему содержанию озона (OCO), предоставляемые сервисом Tropospheric Emission Monitoring Internet Service (TEMIS), и высотные профили отношений смеси озона и водяного пара, а также профили температуры по измерениям прибором MLS на спутнике Aura. Анализ охватывает территорию Арктики и Северной Евразии.

1. Данные

TEMIS – подразделение Data User Element (DUE) Европейского космического агентства (ESA), которое представляет собой операционный центр обработки и хранения данных для целевых пользовательских групп. Данные включают глобальные концентрации тропосферных NO_2 и HCHO , вулканического SO_2 , BrO , озона, аэрозоля, характеристики УФ-радиации, информацию об облачности и климатологию альbedo подстилающей поверхности. Результаты в УФ-диапазоне получены из надирных спутниковых наблюдений в ультрафиолетовом и видимом диапазонах приборами GOME, SCIAMACHY и OMI. Данные TEMIS доступны через несколько часов после наблюдений. Они ши-

роко применяются для мониторинга озоновых дыр, прогноза уровня УФ-излучения, слежения за уровнем загрязнения воздуха, изучения изменений климата, авиационного контроля [10]. В настоящей работе используются данные по OCO за 2003–2020 гг. (<https://www.temis.nl>).

Датчик MLS на спутнике Aura обеспечивает измерения малых газовых составляющих, участвующих в химических реакциях озона, таких как ClO, N_2O и HNO_3 . Они используются для анализа разрушений полярного озона и, соответственно, для оценки активации хлора, оседания воздуха в вихре и денитрификации [11]. В настоящей работе применяются данные версии 5, полученные датчиком MLS на спутнике Aura (<http://avdc.gsfc.nasa.gov>) в виде профилей температуры, а также профилей отношений смеси водяного пара и озона для 2005–2020 гг. Программа обработки данных MLS v5.0x содержит ряд доработок и изменений, включая частичную коррекцию дрейфа измерений на частоте 190 ГГц (H_2O , N_2O , HCN); коррекцию систематической ошибки вследствие занижения влажности воздуха при определении концентрации H_2O в верхней тропосфере; расширение области определения концентрации N_2O до атмосферного уровня 100 гПа; увеличение высотного диапазона для некоторых соединений [12].

2. Обсуждение результатов

Максимальное относительное отклонение OCO от многолетнего (2006–2019 гг. за исключением аномального 2011 г.) среднего составило: 28% (25%) 16 апреля 2011 г. (29 апреля 2020 г.) по измерениям озонометром M-124 на Сибирской лидарной станции Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН [13]; 30% (21%) 22 апреля 2011 г. (29 апреля 2020 г.) по измерениям озонометром M-124 в Лаборатории физики климатических систем в Институте мониторинга климатических и экологических систем СО РАН; 33% (33%) 22 апреля 2011 г. (29 апреля 2020 г.) по данным наблюдений Aura OMI.

На рис. 1 представлены величины OCO и их относительные отклонения от многолетнего (2003–2019 гг., за исключением 2011 г.) среднего для шести станций с сервиса TEMIS: Эврика, Канада ($80,05^\circ$ с.ш., $86,43^\circ$ з.д.; EUR); Барроу, США ($71,32^\circ$ с.ш., $156,60^\circ$ з.д.; BRW); Тромсе, Норвегия ($69,66^\circ$ с.ш., $18,93^\circ$ в.д.; TRM); Соданкюля, Финляндия ($67,37^\circ$ с.ш., $26,63^\circ$ в.д.; SDA); Йокиойнен, Финляндия ($60,81^\circ$ с.ш., $23,50^\circ$ в.д.; JOK); Москва, Россия ($55,70^\circ$ с.ш., $37,50^\circ$ в.д.; MSC). Отклонения OCO рассчитывались как разность между значением для 2011 г. (2020 г.) и многолетним (2003–2019 гг. за исключением 2011 г.) средним.

В [14] указано, что 63% озона было разрушено на уровне 450 К в 2011 г. и 73% – в 2020 г. Из рис. 1, б следует, что относительное отклонение составило: 44% 14 марта 2011 г. и 55% 19 марта 2020 г. на ст. EUR; 29% 13 марта 2011 г. и 53% 12 марта 2020 г. на BRW; 38% 31 марта 2011 г. и 43%

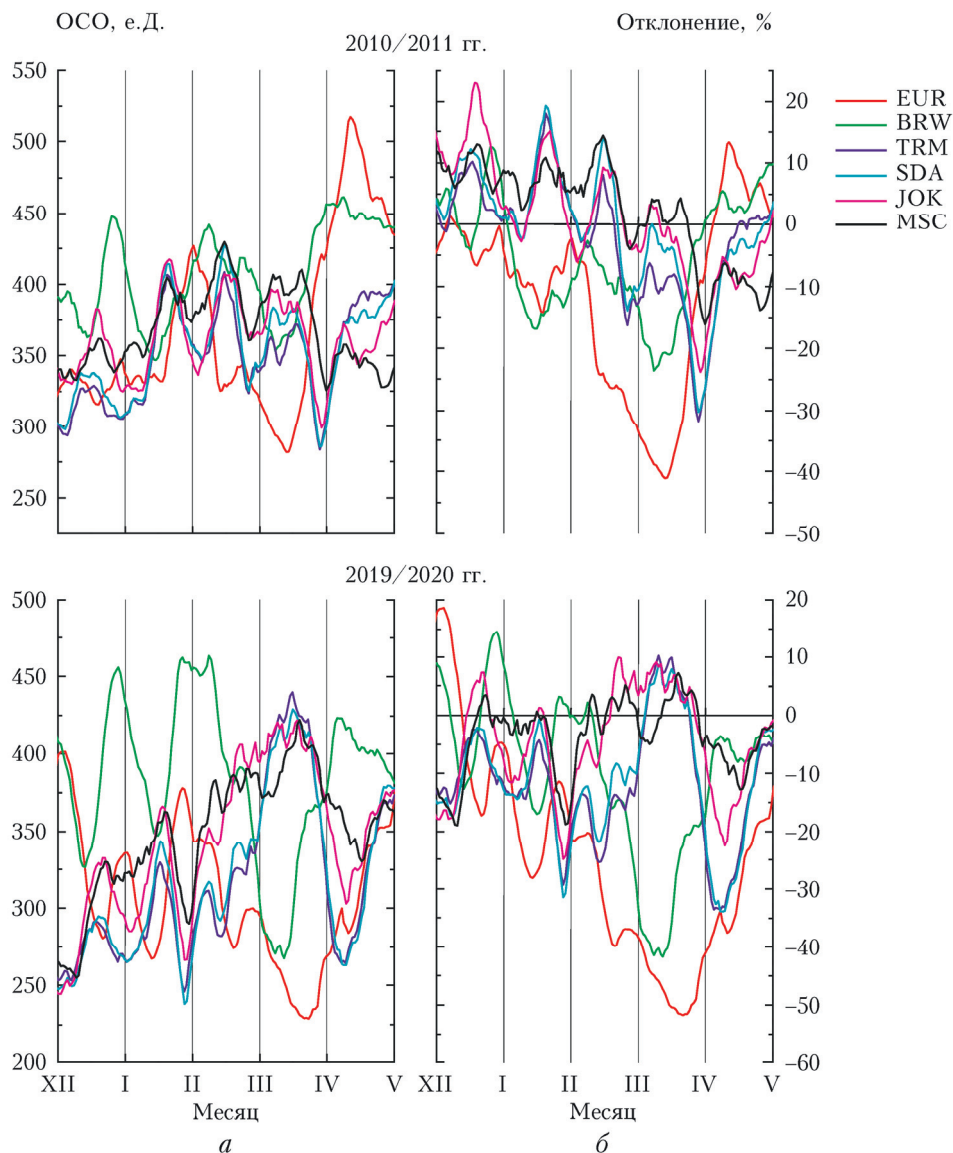


Рис. 1. OCO (а) и его относительное отклонение (б) от многолетнего среднего для шести станций с сервиса TEMIS зимой-весной. При построении применялось сглаживание скользящим средним по 10-ти точкам (цв. рисунок см. <http://iao.ru/content/vol.35-2022/iss.05>)

6 апреля 2020 г. на ст. TRM; 37% 31 марта 2011 г. и 45% 6 апреля 2020 г. на SDA; 36% 31 марта 2011 г. и 32% 6 апреля 2020 г. на JOK; 27% 3 апреля 2011 г. и 27% 15 апреля 2020 г. на MSC. Также отчетливо проявляется резкое сокращение OCO на TRM, SDA, JOK и MSC в конце января 2020 г., по-видимому, вызванное смещением вихря в средние широты перед минорным потеплением в конце февраля [8].

Крупномасштабные поля аномалий температуры, водяного пара и озона в 2020 г. сравнивались со значениями в 2011 г. с использованием данных MLS v5.0x за 2005–2020 гг. для станций, расположенных в пределах Северного полярного круга: Алерт, Канада (82,5° с.ш., 62,4° з.д.; ALT); Эврика, Канада; Туле, Гренландия (76,5° с.ш., 68,7° з.д.; THU); Резольют, Канада (74,7° с.ш., 95° з.д.; RES); Саммит,

Гренландия (72,6° с.ш., 38,5° з.д.; SUM); Скорсби-сунн, Гренландия (70,5° с.ш., 22° з.д.; SCO); Сондрестром, Гренландия (67° с.ш., 50,6° з.д.; SDM); Нью-Олесунн, Норвегия (78,9° с.ш., 11,9° в.д.; NAD); Аломар, Норвегия (69,3° с.ш., 16° в.д.; ALO); Кируна, Швеция (67,8° с.ш., 20,4° в.д.; KIR); Соданкюля, Финляндия. Станции выбирались, исходя из тех же критериев, что и в [15]. На рис. 2 представлен временной ход характеристик для станций ALT и ALO. Влияние Арктических озоновых аномалий 2020/2011 гг. на средние широты проанализировано на примере Томска, Россия (56,5° с.ш., 85,0° в.д.; TSK). Отклонения на рис. 2 рассчитывались как разности между значениями для декабря–марта 2010/2011 гг. и декабря–апреля 2019/2020 гг. и средним значением для декабря–апреля 2005–2019 гг. за исключением 2011 г.

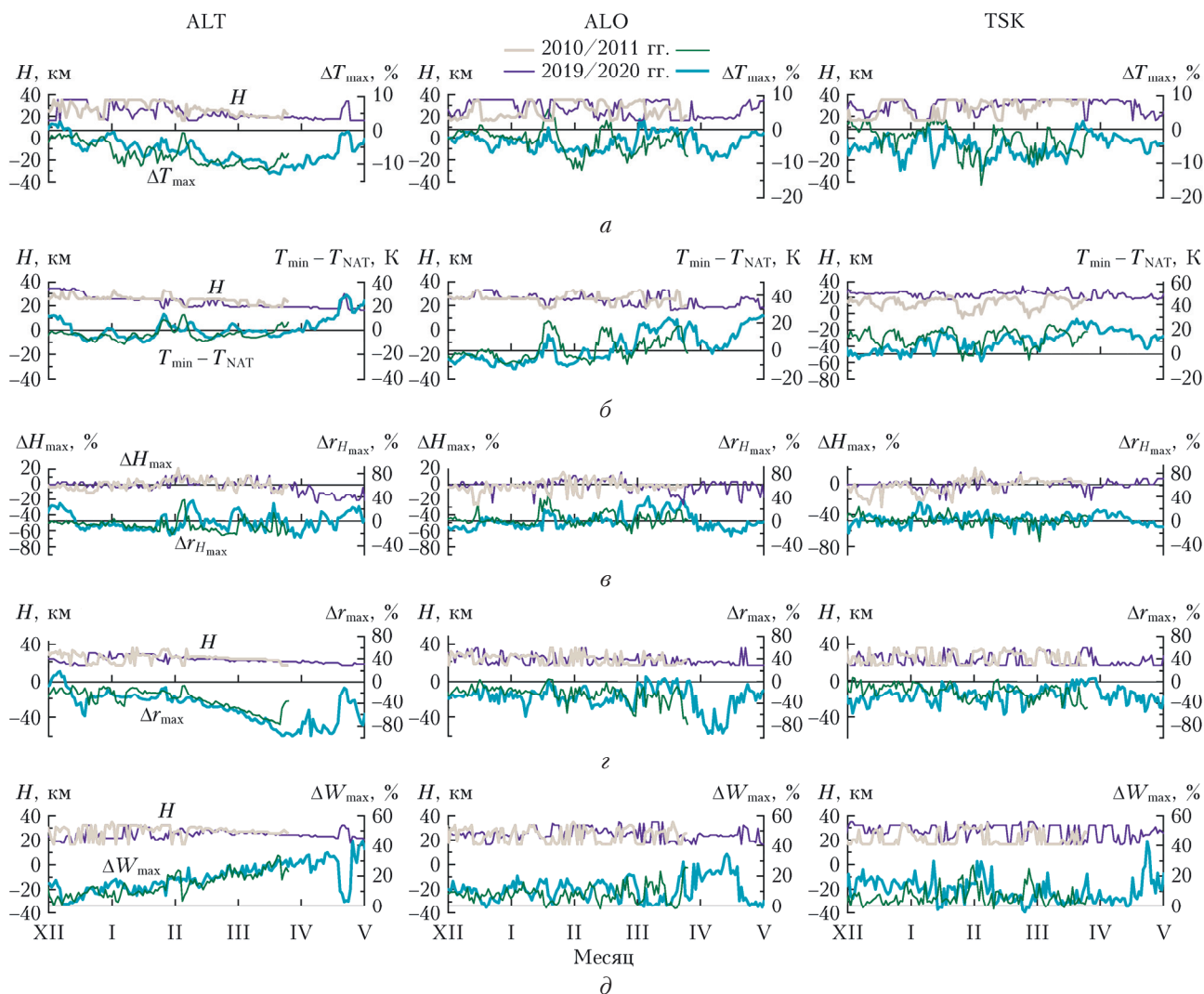


Рис. 2. Временной ход в декабре–марте 2010/2011 гг. и в декабре–апреле 2019/2020 гг. статистических характеристик и высоты их регистрации для станций ALT, ALO и TSK: максимальных относительных отклонений температуры от многолетнего (2005–2019 гг. за исключением 2011 г.) среднего (а); разность $T_{\min} - T_{\text{NAT}}$ (T_{\min} – минимальная температура в заданном высотном диапазоне в день наблюдений) (б); максимальных относительных отклонений высоты ΔH_{\max} и величины озонового максимума $\Delta r_{H_{\max}}$ от многолетних средних (в); максимального относительного отклонения отношений смеси озона Δr_{\max} (г) и водяного пара ΔW_{\max} от многолетних средних (цв. рисунок см. <http://iao.ru/ru/content/vol.35-2022/iss.05>)

Из анализа данных MLS следует, что минимальные температуры были ниже нормы с декабря 2010 г. по март 2011 г. и с декабря 2019 г. по апрель 2020 г. в стратосфере Арктики и Северной Евразии. В 2020 г. отклонение достигало 12% на ст. ALT на высотах ~ 19 км (рис. 2, а), а разность между T_{\min} и T_{NAT} достигала 10° на ст. ALT и ALO на высотах ~ 25 км (рис. 2, б). В 2010/2011 гг. температура в стратосфере начала расти в середине марта на всех станциях арктических широт, но затем вновь понизилась на всех станциях, за исключением ALT, EUR, THU и RES; озон начал увеличиваться почти одновременно с ростом температуры. В 2019/2020 гг. температура арктической стратосферы начала расти в конце марта – начале апреля, а восстановление озона началось несколько позже, в согласии с выводами [15] о том, что присутствие ПСО обяза-

тельно для продолжительного разрушения озона.

Концентрация озона для ALT падала до 23% от многолетнего среднего на высоте 20 км 22 марта 2011 г. и до 6% на высоте ~ 19 км 15 апреля 2020 г. Отношение смеси водяного пара росло в течение всего сезона ПСО 2011/2020 гг. на всех станциях в Арктике в соответствии с предположением [16] о том, что повышенная влажность в стратосфере может рассматриваться как дополнительный фактор разрушения озона в стратосфере Арктики (рис. 2, д). Величина озонового максимума и высота его локализации были ниже нормы до апреля как в 2011, так и в 2020 г., но в 2020 г. величина озонового максимума увеличивалась, а его высота уменьшалась, пока шло восстановление озона в апреле (рис. 2, в). В средних широтах (TSK) в 2011/2020 гг. температуры были пониженными, но редко опускались

ниже $T_{\text{НАТ}}$. Влияние арктических воздушных масс на ОСО над Северной Евразией зарегистрировано в конце марта 2011 г. и в конце апреля 2020 г. (<https://exp-studies.tor.ec.gc.ca/cgi-bin/selectMap>). Необходимо отметить, что отсутствие измерений MLS не позволяет судить о масштабах дальнейшего возможного разрушения озона в конце марта 2011 г.; однако предшествующие наблюдения указывают на то, что площадь разрушения O_3 в 2011 г. была меньше, чем в 2020 г. [11].

В таблице представлены коэффициенты корреляции между максимальными отклонениями концентраций водяного пара и озона ($\Delta W; \Delta r$), концентрации водяного пара и температуры (К) ($\Delta W; \Delta T$) и концентрации озона и температуры ($\Delta r; \Delta T$) для ст. ALT, EUR, THU, RES, SUM, SCO, SDM, NAD, ALO, KIR, SDA, JOK, SPB и TSK. Отклонения

рассчитывались как разность между значением для 2011 г. (2020 г.) и многолетним (2005–2019 гг. за исключением 2011 г.) средним. Отношения смеси преобразовывались в счетные концентрации с помощью формулы, представленной на сайте http://wdc.dlr.de/data_products/SERVICES/PROMOTE_O3/vmr.html. В целом более тесные корреляции наблюдаются в 2020 г. Корреляционные связи ослабевают в направлении периметра вихря и становятся слабо значимыми за пределами Северного полярного круга. В последнем столбце приведены максимальное относительное отклонение отношения смеси озона от многолетней нормы Δr_{ppm} . В 2011 г. даты регистрации практически не меняются; а в 2020 г. максимальное отклонение регистрируется позже при переходе из Западного полушария в Восточное и ниже в средние широты.

Коэффициенты корреляции между параметрами, регистрируемыми на станциях в Арктике и Северной Евразии в ноябре 2010 г. – марте 2011 г./ноябре 2019 г. – марте 2020 г.

Станция	$\frac{(\Delta W_{\text{ppm}}; \Delta r_{\text{ppm}})(p^*)}{(\Delta W_{\text{abs}}; \Delta r_{\text{abs}})(p)}$	$\frac{(\Delta W_{\text{ppm}}; \Delta T)(p)}{(\Delta W_{\text{abs}}; \Delta T)(p)}$	$\frac{(\Delta r_{\text{ppm}}; \Delta T)(p)}{(\Delta r_{\text{abs}}; \Delta T)(p)}$	Δr_{ppm} , % (день; высота регистрации (км)) в 2011 г. (2020 г.)
ALT (82,5° с.ш., 62,4° з.д.)	$\frac{-0,70/-0,84}{-0,75/-0,77}$	$\frac{-0,73/-0,78}{-0,88/-0,91}$	$\frac{0,87/0,75}{0,83/0,68}$	$\frac{-77 (22.03; 20)}{-97 (22.03; 20)}$
EUR (80° с.ш., 86,2° з.д.)	$\frac{-0,77/-0,83}{-0,81/-0,78}$	$\frac{-0,77/-0,76}{-0,90/-0,89}$	$\frac{0,87/0,79}{0,83/0,73}$	$\frac{-75 (20.03; 21)}{-96 (27.03; 20)}$
THU (76,5° с.ш., 68,7° з.д.)	$\frac{-0,77/-0,85}{-0,83/-0,80}$	$\frac{-0,74/-0,75}{-0,89/-0,89}$	$\frac{0,88/0,74}{0,85/0,68}$	$\frac{-74 (21.03; 21)}{-97 (27.03; 20)}$
RES (74,7° с.ш., 95° з.д.)	$\frac{-0,83/-0,75}{-0,85/-0,72}$	$\frac{-0,78/-0,69}{-0,90/-0,84}$	$\frac{0,88/0,75}{0,85/0,69}$	$\frac{-70 (19.03; 20)}{-95 (26.03; 20)}$
SUM (72,6° с.ш., 38,5° з.д.)	$\frac{-0,79/-0,79}{-0,82/-0,68}$	$\frac{-0,66/-0,67}{-0,79/-0,82}$	$\frac{0,86/0,62}{0,83/0,54}$	$\frac{-73 (23.03; 21)}{-99 (5.04; 20)}$
SCO (70,5° с.ш., 22° з.д.)	$\frac{-0,81/-0,63}{-0,80/-0,54}$	$\frac{-0,55/-0,65}{-0,68/-0,81}$	$\frac{0,76/0,57}{0,73/0,48}$	$\frac{-74 (23.03; 20)}{-94 (5.04; 20)}$
SDM (67° с.ш., 50,6° з.д.)	$\frac{-0,82/-0,64}{-0,81/-0,54}$	$\frac{-0,67/-0,60}{-0,79/-0,79}$	$\frac{0,79/0,55}{0,76/0,48}$	$\frac{-65 (22.03; 20)}{-98 (23.03; 20)}$
NAD (78,9° с.ш., 11,9° в.д.)	$\frac{-0,80/-0,87}{-0,68/-0,78}$	$\frac{-0,50/-0,78}{-0,72/-0,91}$	$\frac{0,63/0,71}{0,57/0,64}$	$\frac{-76 (24.03; 20)}{-93 (12.04; 19)}$
ALO (69,3° с.ш., 16° в.д.)	$\frac{-0,54/-0,51}{-0,58/-0,54}$	$\frac{-0,39/-0,44}{-0,65/-0,78}$	$\frac{0,62/0,60}{0,57/0,53}$	$\frac{-67 (24.03; 20)}{-93 (4.04; 19)}$
KIR (67,8° с.ш., 20,4° в.д.)	$\frac{-0,45/-0,47}{-0,46/-0,51}$	$\frac{-0,36/-0,38}{-0,64/-0,76}$	$\frac{0,54/0,57}{0,48/0,52}$	$\frac{-76 (24.03; 20)}{-93 (6.04; 19)}$
SDA (67,3° с.ш., 26,6° в.д.)	$\frac{-0,47/-0,26 (0,001)}{-0,50/-0,32}$	$\frac{-0,28 (5,95 \cdot 10^{-4})/-0,35}{-0,60/-0,75}$	$\frac{0,47/0,49}{0,44/0,43}$	$\frac{-92 (12.04; 19)}{-80 (26.03; 20)}$
JOK (60,8° с.ш., 23,5° в.д.)	$\frac{-0,34/-0,10 (0,021)}{-0,46/-0,25 (0,003)}$	$\frac{-0,19 (0,019)/-0,14 (0,1)}{-0,56/-0,45}$	$\frac{0,53/0,63}{0,51/0,58}$	$\frac{-45 (23.03; 16)}{-64 (13.04; 20)}$
SPB (60° с.ш., 30,3° в.д.)	$\frac{-0,47/-0,04 (0,650)}{-0,54/-0,20 (0,018)}$	$\frac{-0,16 (0,054)/-0,05 (0,55)}{-0,52/-0,44}$	$\frac{0,47/0,58}{0,45/0,50}$	$\frac{-52 (26.03; 21)}{-75 (14.04; 21)}$
TSK (56,5° с.ш., 85,0° в.д.)	$\frac{-0,21 (0,008)/-0,32}{-0,33/-0,39}$	$\frac{-0,15 (0,06)/-0,44}{-0,58/-0,73}$	$\frac{0,51/0,54}{0,46/0,40}$	$\frac{-51 (25.03; 16)}{-49 (31.04; 16)}$

* p – плотность вероятности; если не указано особо, $p < 0,0001$.

Дополнительным объяснением наблюдаемых низких значений отношений смеси может быть то обстоятельство, что меридиональный перенос озона зимой 2019/2020 гг. был ослаблен. Это следует из пониженного уровня пассивного трассера озона (элемент глобальной модели Lagrangian ATLAS Chemistry and Transport Model) по сравнению с 2010/2011 гг. и замедленной остаточной циркуляции, характерной для холодных зим в стратосфере Арктики. Более слабая остаточная циркуляция влечет замедленное оседание воздушных масс в нисходящей ветви циркуляции Брюера–Добсона и замедленный перенос обогащенного озоном воздуха из вышележащих слоев. Необходимо отметить, что измерения MLS указывают на пониженные (повышенные) значения N_2O (H_2O) по сравнению с другими годами, что на первый взгляд должно свидетельствовать как раз о более интенсивном нисходящем движении в области вихря. Однако оказывается, что они обусловлены главным образом оседанием воздушных масс с аномально низкой концентрацией N_2O (и аномально высокой концентрацией H_2O) в более изолированном вихре [6].

Хотя название (озоновая дыра [7] либо просто разрушение озона (остальные авторы)) данного явления в Арктике остается предметом дискуссий ([https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/toc/10.1002/\(ISSN\)1944-8007.ARCTICSPV](https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/toc/10.1002/(ISSN)1944-8007.ARCTICSPV)), нельзя отрицать, что изменения климата вносят существенный вклад в охлаждение стратосферы, в которой холодные зимы повторяются приблизительно раз в пять лет [6]. Аномалия озонового слоя в Арктике также отмечалась в работах российских ученых [17–19]. Возможность будущего усиления стратосферного полярного вихря в Арктике обсуждается в работах [20, 21].

Заключение

Анализ изменений ОСО, концентраций озона/ H_2O и температуры в стратосфере при помощи данных TEMIS и Aura MLS для эпизодов озоновых аномалий в декабре–марте 2010/2011 гг. и в декабре–апреле 2019/2020 гг. позволяет сделать следующие выводы.

1. По данным TEMIS, отклонения ТОС от многолетней (2003–2019 гг. за исключением 2011 г.) нормы составили 44% 14 марта 2011 г. и 55% 19 марта 2020 г. на ст. EUR; 29% 13 марта 2011 г. и 53% 12 марта 2020 г. на BRW; 38% 31 марта 2011 г. и 43% 6 апреля 2020 г. на ст. TRM; 37% 31 марта 2011 г. и 45% 6 апреля 2020 г. на SDA; 36% 31 марта 2011 г. и 32% 6 апреля 2020 г. на JOK; 27% 3 апреля 2011 г. и 27% 15 апреля 2020 г. на MSC.

2. По данным Aura MLS, в 2020 г. отклонение температуры достигало 12% на ст. ALT на высотах ~ 19 км, а разность между T_{min} и T_{NAT} достигала 10° на арктических ст. ALT и ALO на высотах ~ 25 км. В 2010/2011 гг. температура в стратосфере начала расти в середине марта на всех арктических пунктах, но вернулась на низкий уровень немного позже, за исключением ALT, EUR, THU и RES.

3. Концентрация озона на ст. ALT падала до 23% от многолетнего среднего на высоте 20 км 22 марта 2011 г. и до 6% на высоте ~ 19 км 15 апреля 2020 г.

4. Величина озонового максимума и высота его локализации были ниже нормы до апреля как в 2011, так и в 2020 г.; но в 2020 г. озоновый максимум увеличился, а его высота уменьшилась в период восстановления озона в апреле.

5. Влажность была повышена в течение всего сезона ПСО на всех рассмотренных станциях в арктических широтах как в 2020 г., так и в 2011 г., что, вероятно, увеличило время жизни ПСО.

6. Коэффициенты корреляции между концентрациями водяного пара/озона, концентрацией водяного пара/температурой и концентрацией озона/температурой в 2020 г. выше, чем в 2011 г. Корреляции убывают в направлении периферии вихря вследствие обмена воздушными массами между арктическими и средними широтами и становятся мало значимыми за пределами Арктического круга.

Благодарности. Данные измерений ОСО, выполняемых в геофизической обсерватории Института мониторинга климатологических и экологических систем СО РАН, которые были использованы в работе для расчета отклонений ОСО в 2019/2020 гг. и 2010/2011 гг. от многолетнего среднего, любезно предоставлены с.н.с. лаборатории физики климатических систем С.В. Смирновым.

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания ИОА СО РАН. Результаты получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Атмосфера» при частичной финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение № 075-15-2021-661).

Список литературы

1. Rieder H.E., Polvani L.M. Are recent Arctic ozone losses caused by increasing greenhouse gases? // *Geophys. Res. Lett.* 2013. V. 40. P. 4437–4441. DOI: 10.1002/grl.50835.
2. Rex M., Salawitch R.J., von der Gathen P., Harris N.R.P., Chipperfield M.P., Naujokat B. Arctic ozone loss and climate change // *Geophys. Res. Lett.* 2004. V. 31. P. L04116. DOI: 10.1029/2003GL018844.
3. Rex M., Salawitch R.J., Deckelmann H., von der Gathen P., Harris N.R.P., Chipperfield M.P., Naujokat B., Reimer E., Allaart M., Andersen S.B., Bevilacqua R., Braathen G.O., Claude H., Davies J., De Backer H., Dier H., Dorokhov V., Fast H., Gerding M., Godin-Beekmann S., Hoppel K., Johnson B., Kyrö E., Litynska Z., Moore D., Nakane H., Parrondo M.C., Risleley Jr. A.D., Skrivankova P., Stubi R., Viatte P., Yushkov V., Zerefos C. Arctic winter 2005: Implications for stratospheric ozone loss and climate change // *Geophys. Res. Lett.* 2006. V. 33. P. L23808. DOI: 10.1029/2006GL026731.
4. Hu D., Guan Z., Tian W., Ren R. Recent strengthening of the stratospheric Arctic vortex response to warming in the central North Pacific // *Nat. Commun.* 2018. N 9. P. 1697. DOI: 10.1038/s41467-018-04138-3.

5. Weber M., Arosio C., Feng W., Dhomse S.S., Chipperfield M.P., Meier A., Burrows J.P., Eichmann K., Richter A., Rozanov A. The unusual stratospheric Arctic winter 2019/20: Chemical ozone loss from satellite observations and TOMCAT Chemical Transport Model // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2021. V. 126. P. e2020JD034386. DOI: 10.1029/2020JD034386.
6. Wohltmann I., von der Gathen P., Lehmann R., Maturrilli M., Deckelmann H., Manney G.L., Davies J., Tarasick D., Jepsen N., Kivi R., Lyall N., Re M. Near-complete local reduction of Arctic stratospheric ozone by severe chemical loss in spring 2020 // *Geophys. Res. Lett.* 2020. V. 47. P. e2020GL089547. DOI: 10.1029/2020GL089547.
7. Kuttippurath J., Feng W., Мьller 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.
8. 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.
9. Rao J., Garfinkel C.I. Arctic ozone loss in March 2020 and its seasonal prediction in CFSv2: A comparative study with the 1997 and 2011 cases // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2020. V. 125. P. e2020JD033524. DOI: 10.1029/2020JD033524.
10. Van der A.R. Tropospheric emission monitoring Internet service, EGU General Assembly 2010. 2–7 May, 2010. Vienna, Austria.
11. Manney G.L., Livesey N.J., Santee M.L., Froidevaux L., Lambert A., Lawrence Z.D., Millan 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. DOI: 10.1029/2020GL089063.
12. Livesey N., Read W., Froidevaux L., Lambert A., Santee M., Schwartz M., Millan 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. Озоновая аномалия зимой-весной 2019–2020 гг. в Арктике и над севером Евразии по данным спутниковых (Aura MLS/OMI) наблюдений // *Оптика атмосф. и океана.* 2021. Т. 34, № 7. С. 524–529; Bazhenov O.E. Ozone anomaly during winter-spring 2019–2020 in the Arctic and over the north of Eurasia using satellite (Aura MLS/OMI) observations // *Atmos. Ocean. Opt.* 2021. V. 4, N 6. P. 653–658. DOI: 10.1134/S102485602106004X.
14. Inness A., Chabrillat S., Flemming J., Huijnen V., Langenrock B., Nicolas J., Polichtchouk I., Razinger M. Exceptionally low Arctic stratospheric ozone in spring 2020 as seen in the CAMS reanalysis // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2020. V. 125, N 23. P. e2020JD033563. DOI: 10.1029/2020JD033563.
15. 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.
16. Bazhenov O.E. Increased humidity in the stratosphere as a possible factor of ozone destruction in the Arctic during the spring 2011 using Aura MLS observations // *Int. J. Remote Sens.* 2019. V. 40, N 9. P. 3448–3460. DOI: 10.1080/01431161.2018.1547449.
17. Smyshlyaev S.P., Vargin P.N., Motsakov M.A. Numerical modeling of ozone loss in the exceptional Arctic stratosphere winter-spring of 2020 // *Atmos.* 2021. V. 12, N 11. P. 1470.
18. Лукьянов А.Н., Варгин П.Н., Юшков В.А. Лагранжевые исследования аномально устойчивого арктического стратосферного полярного вихря зимой 2019–2020 г. // *Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана.* 2021. Т. 57, № 3. С. 278–285.
19. 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 2019–2020 гг. // *Метеорол. и гидрол.* 2021. № 9. С. 70–83.
20. Gathen P., Kivi R., Wohltmann I., Salawitch R., Rex M. Climate change favours large seasonal loss of Arctic ozone // *Nat. Commun.* 2021. N 12. P. 3886. DOI: 10.1038/s41467-021-24089-6.
21. Vargin P.N., Kostyrykin S.V., Volodin E.M., Pogoreltsev A.I., Wei K. Arctic stratosphere circulation changes in the 21st century in simulations of INM CM5 // *Atmos.* 2022. V. 13, N 1. P. 25. DOI: 10.3390/atmos13010025.

O.E. Bazhenov. Ozone anomalies in the stratosphere of the Arctic and northern Eurasia: Comparison of 2011 and 2020 events using TEMIS and Aura MLS data.

In winters-springs 2010/2011 and 2019/2020, there were the strongest anomalies of ozone layer in the Arctic stratosphere in the total satellite era. They were due to extraordinarily strong and long-lived stratospheric polar vortices, entailing unprecedented chemical ozone destruction. The analysis of the TEMIS data indicates that the total ozone content (TOC) deviations from the multiyear (2003–2019 except 2011) average were from 37 to 44% in 2011 and from 45 to 55% in 2020 at Arctic observation stations; and from 27 to 36% in 2011 and from 27 to 32% in 2020 in the subarctic latitudes. Based on the Aura MLS data, the minimal temperatures were 8–12% below normal over the Arctic in 2011 and 8–13% below normal in 2020. The ozone concentration dropped to 23% of the multiyear average at an altitude of 20 km on March 22, 2011, and to 6% at an altitude of 19 km on April 15, 2020, for Alert. A detailed correlation analysis showed that the deviations in the concentrations of water vapor and ozone, water vapor and temperature, and ozone and temperature correlate stronger in 2020 than in 2011. The correlations decrease toward the vortex periphery owing to the exchange of air masses between the Arctic and middle latitudes, becoming weakly significant outside the Arctic circle.