

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ, ГИДРОСФЕРЫ  
И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

УДК 551.510.534

**Возмущение стратосферы над Томском зимой  
2017/2018 гг. по данным лидарных и спутниковых  
(Aura MLS/OMI) наблюдений****О.Е. Баженов, А.А. Невзоров, А.В. Невзоров,  
С.И. Долгий, А.П. Макеев\****Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

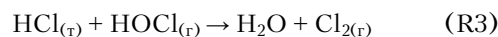
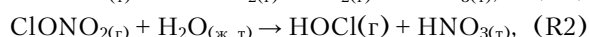
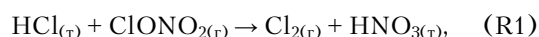
Поступила в редакцию 27.02.2020 г.

Лидарные измерения на Сибирской лидарной станции (СЛС) Института оптики атмосферы СО РАН в Томске (56,5° с.ш.; 85,0° в.д.) показали наличие стратосферных аэрозольных слоев, оседание воздушных масс и дефицита ОСО над городом зимой 2017–2018 гг. Данные Aura OMI/MLS указывали на то, что в декабре 2017 г. – январе 2018 г. общее содержание озона (ОСО) и содержание NO<sub>2</sub> в стратосфере над севером Евразии, а также температура в стратосфере были значительно ниже нормы. Анализ обратных траекторий и интегрального (по профилю) ОСО показал, что динамическое возмущение арктической стратосферы в декабре 2017 г. привело к вытеснению холодных воздушных масс с избыточным содержанием агрессивного хлора (ввиду дефицита NO<sub>2</sub>) за пределы полярного круга и их вторжению в стратосферу Томска. По всей видимости, в стратосфере Томска они подверглись воздействию солнечного излучения и, оставаясь пространственно изолированными, перешли в химически возмущенное состояние, сходное с состоянием весенней стратосферы Арктики, в которой озон интенсивно разрушается вплоть до финального потепления.

*Ключевые слова:* лидар, спутник Aura, стратосферный аэрозольный слой, озон, внезапное стратосферное потепление, солнечное освещение, возмущение; lidar, Aura satellite, stratospheric aerosol layer, ozone, sudden stratospheric warming, solar illumination, disturbance.

**Введение**

Циркуляция зимней полярной стратосферы может рассматриваться как вихрь. При отсутствии солнечного освещения в высоких широтах в зимний период: 1) атмосфера над полюсами охлаждается и возникает значительный температурный градиент вблизи полярного терминатора; 2) формируется струйное течение, ведущее к изоляции полярных воздушных масс. В пределах вихря на поверхности частиц полярных стратосферных облаков (ПСО) происходят гетерогенные реакции и активация хлора, под которой понимается перевод резервуарных соединений хлора в агрессивные формы (главным образом радикалы хлора). Основные резервуарные соединения хлора – HCl, ClONO<sub>2</sub> и HOCl. Молекула ClONO<sub>2</sub>, именуемая в научной литературе нитратом хлора, образуется в результате тройной реакции ClO, NO<sub>2</sub> и любой третьей молекулы. Типичные гетерогенные реакции активации хлора –

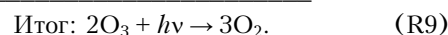
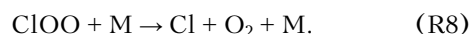
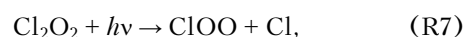
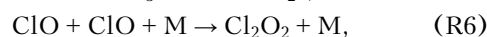
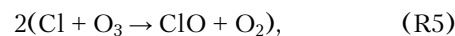


или



где (т, г, ж) – твердая, газовая и жидкая фазы.

Продукты гетерогенных реакций фотодиссоциируют с образованием атомарного хлора, участвующего в каталитическом разрушении озона, при наличии солнечного освещения в основном в ходе димерного цикла ClO:



Таким образом, интенсивность разрушения озона в стратосфере в значительной степени определяется степенью ее денитрификации, т.е. количеством присутствующего в ней NO<sub>2</sub>.

В ходе каталитического цикла (R5)–(R8) разрушается до 75% озона в озоновой дыре [1, 2]. Однако в настоящее время считается, что для продолжительного и интенсивного разрушения озона не требуется постоянного присутствия ПСО, а активация хлора может продолжаться на жидком аэрозоле

\* Олег Елисеич Баженов (boe@iao.ru); Алексей Алексеевич Невзоров (naa@iao.ru); Алексей Викторович Невзоров (nevzorov@iao.ru); Сергей Иванович Долгий (dolgii@iao.ru); Андрей Павлович Макеев (map@iao.ru).

в стратосфере при наличии солнечного освещения вне зависимости от степени ее денитрификации [1, 3].

Относительно интенсивная активация хлора и фотохимическое разрушение озона могут наблюдаться в середине зимы в Южном полушарии вследствие того, что антарктический полярный вихрь имеет большие размеры и не вписывается в область полярной ночи. Связанное с этим химическое разрушение озона в освещенных частях вихря вследствие фотохимии хлора может объяснять уменьшение среднего по вихрю общего содержания озона в конце августа [4].

Кроме этого, некоторое разрушение озона в течение полярной зимы может быть инициировано атмосферными волнами, перемещающими на короткое время полярный воздух за пределы зоны полярной ночи [1] и запускающими в нем фотохимические реакции. Наблюдения содержания  $\text{NO}_2$  и  $\text{NO}_3$  в зимнем антарктическом вихре в 1991 г. показали, что воздушные массы часто совершали значительные широтные перемещения. Повышенное содержание  $\text{OClO}$  с конца июня по конец сентября указывает на то, что перенос воздуха из области полярного вихря в средние широты мог привести к разрушению озона [5]. Для анализа влияния потока от  $78^\circ$  ю.ш. в средние широты была рассчитана скорость разрушения озона на  $72^\circ$  и  $65^\circ$  ю.ш.; показано, что скорость разрушения озона может увеличиться на 45% из-за подобных перемещений [6]. Химическое возмущение было существенным для разрушения озона зимой 2003/2004 гг. и в декабре 2012 г. — январе 2013 г. [7, 8].

Значительное возмущение озоносферы происходит во время внезапных стратосферных потеплений (ВСП). Они часто совпадают по времени с восточной фазой квазидвухлетних колебаний, когда западный зональный ветер в полярном вихре ослаблен [9]. По интенсивности и времени проявления ВСП обычно делятся на минорные, мажорные (со смещением или расщеплением вихря) и финальные [10, 11].

Вследствие динамических процессов в декабре 2002 г. и январе 2003 г. вихрь часто приобретал вытянутую форму и оказывался освещенным в средних широтах. Пониженные температуры и продолжительное воздействие солнечного излучения привели к значительному разрушению озона уже в конце декабря. Однако мажорное потепление в январе и последующее сильное минорное потепление уменьшили суммарное разрушение озона. Химическому разрушению озона, начавшемуся в конце декабря, благоприятствовали динамическое возмущение вихря и повышенное солнечное освещение в декабре-январе [7].

Сильное возмущение стратосферы Северного полушария в январе и феврале 2008 г. было вызвано двумя минорными и одним мажорным ВСП. Спутник CALIPSO наблюдал ПСО над Скандинавией и Англией (вплоть до широты  $49^\circ$  с.ш.). По наземным наблюдениям с помощью микроволнового радиометра GROMOS обнаружено уменьшение отношения смеси  $\text{O}_3$  в интервале высот 20–50 км над Берном [12].

Исключительно интенсивное химическое разрушение озона произошло в начале зимы 2012/2013 гг. в Арктике благодаря уникальному сочетанию метеорологических условий, связанных с ВСП в начале января 2013 г.: необычайно низкой температуре в декабре, существенной изоляции воздуха в осколках вихря в течение приблизительно одного месяца после его расщепления и повышенной освещенности вихря в декабре и январе. Разрушение озона постепенно усиливалось к середине декабря, а степень разрушения указывала на то, что вихрь в декабре был освещен солнцем на 60–80% и характеризовался высокими значениями  $\text{ClO}$ . Содержание оксида хлора было рекордным вплоть до середины января [13].

Зимой 2015/2016 гг. вихрь имел значительные размеры и обширные освещенные области с января по середину марта 2016 г. В результате концентрации  $\text{ClO}$  превысили уровень 2011 г. [14].

Мажорное ВСП произошло в феврале 2018 г. после его четырехлетнего отсутствия с зимы 2013–2014 гг. ([https://gmao.gsfc.nasa.gov/research/science\\_snapshots/anim/fp\\_analysis\\_201801.mp4](https://gmao.gsfc.nasa.gov/research/science_snapshots/anim/fp_analysis_201801.mp4)). Согласно данным реанализа полярное струйное течение перешло из интенсивной фазы в умеренную 12–19 января, а умеренные западные ветра развернулись в восточном направлении 5–15 февраля. Произошло расщепление вихря благодаря планетарной волне с волновым числом 2, распространившейся в стратосферу. Началом потепления 2017–2018 гг. считается 11 февраля, когда западные ветры на  $60^\circ$  с.ш. и 10 гПа развернулись в восточном направлении. Восточные ветры достигли максимальной скорости  $\sim 20$  м/с к 15 февраля. Постепенное возвращение к западной циркуляции произошло после 28 февраля [11].

В настоящей работе с использованием лидарных и спутниковых (Aura OMI/MLS) данных исследуется период пониженного содержания озона над Томском в декабре 2017 — январе 2018 гг. Цель работы — показать, что динамические процессы, предшествующие ВСП в феврале 2018 г., привели к химическому возмущению озоносферы и повышенному разрушению озона в декабре-январе.

## 1. Данные

На Сибирской лидарной станции (СЛС) Института оптики атмосферы (ИОА) СО РАН в г. Томске ( $56,5^\circ$  с.ш.;  $85,0^\circ$  в.д.) развивается комплексный подход к исследованиям стратосферы; проводятся лидарные и спектрофотометрические измерения характеристик стратосферного аэрозольного слоя (с 1986 г.), озоносферы (с 1989 г.) и температуры средней атмосферы (с 1995 г.) [15]. В качестве источника излучения на установках СЛС для зондирования аэрозоля и температуры применяют Nd:YAG-лазер (модель LS-2132T-LBO фирмы LOTIS TII), работающий на длинах волн 532 и 355 нм. Для измерений стратосферного озона используются основная частота и первая стоксовая компонента (353 нм) преобразования в водороде излучения эксимерного XeCl-лазера LPX-120i фирмы

Lambda Physik на длине волны 308 нм. Для измерений озона в верхней тропосфере – нижней стратосфере – первая и вторая стоксовая компоненты (299, 341 нм) преобразования в водороде излучения Nd:YAG-лазера (модель LS-2134UT фирмы LOTIS TII) на длине волны 266 нм.

В настоящей работе используются лидарные данные по аэрозолю и озону, а для исследования крупномасштабных полей температуры, влажности и озона – данные Aura MLS/OMI (<http://avdc.gsfc.nasa.gov>).

## 2. Обсуждение результатов

В декабре 2017 г. на СЛС были зафиксированы аэрозольные слои на высотах от 19 до 24 км с отношением рассеяния  $R \sim 1,66$  на длине волны зондиро-

вания 532 нм, а в январе 2018 г. – на высотах от 16 до 19 км с отношением рассеяния, достигавшим 1,6. На рис. 1 приведены лидарные профили аэрозоля и спутниковые (Aura MLS) профили температуры.

Наличие аэрозольных слоев при аномально низких температурах и значительных понижениях ОСО можно рассматривать в качестве критерия наличия ПСО. Анализ аэрозольных профилей зимой 2017/2018 гг. указывает на аномальное высотное распределение аэрозоля. Об аномальности поведения ОСО можно судить по представленным на рис. 2 вертикальным профилям счетной концентрации озона, восстановленным из лидарных измерений на СЛС. Видно, что в январе максимум озона переместился на более низкие высоты, а в декабре он также был меньше модельного значения. В декабре ОСО было явно пониженным.

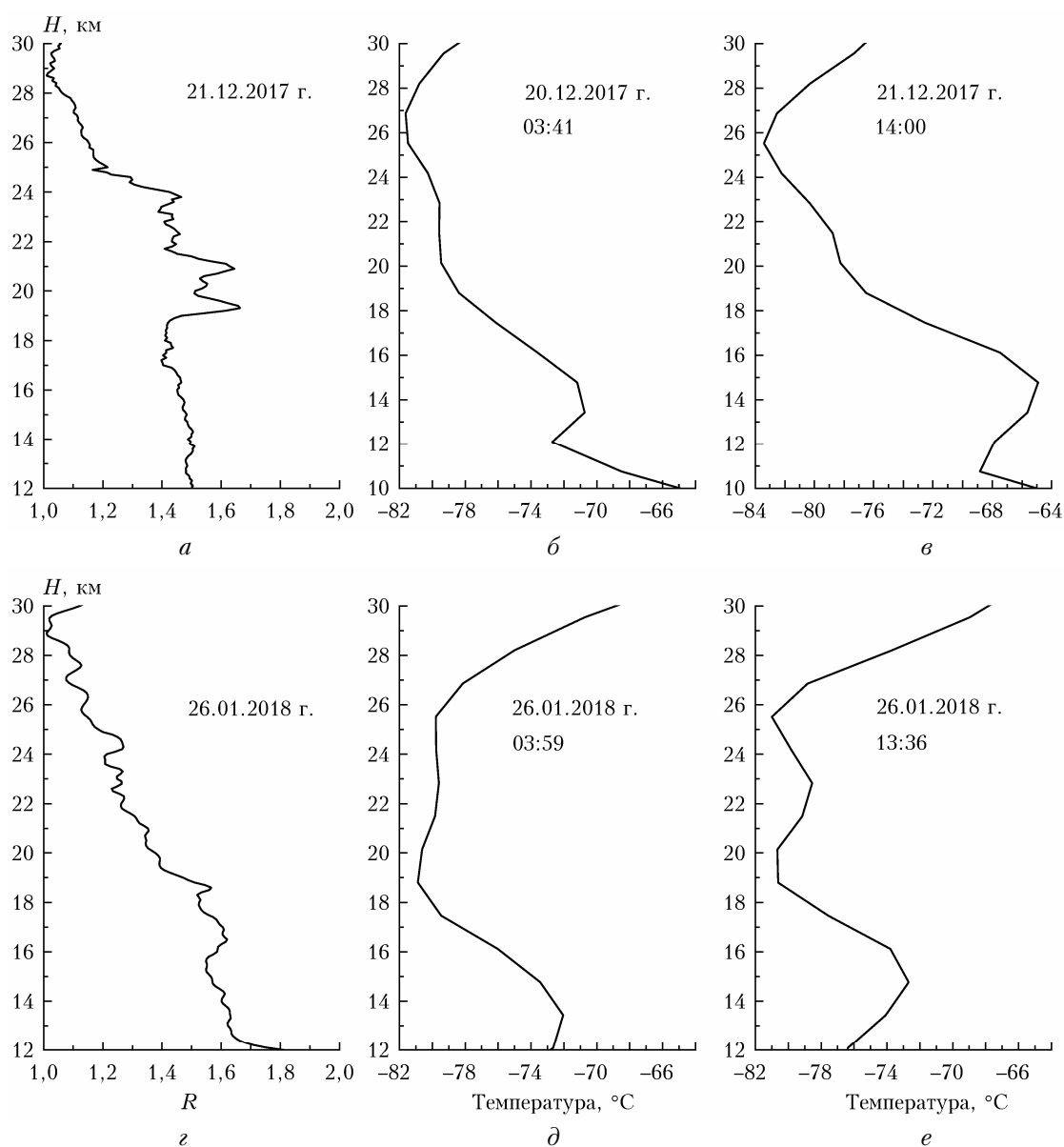


Рис. 1. Вертикальные профили:  $a, г$  – отношения рассеяния на длине волны 532 нм, полученные 21 декабря 2017 г. и 26 января 2018 г. с помощью лидара;  $б, в, д, е$  – температуры, восстановленные из данных спутника AURA

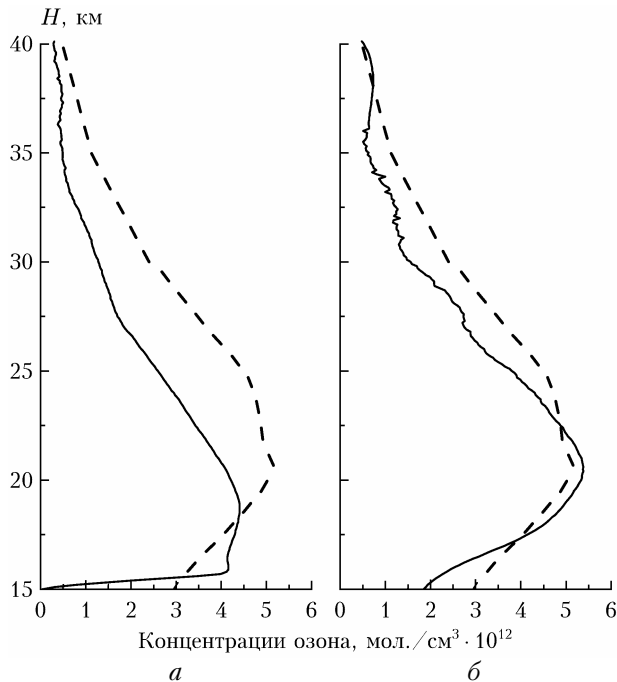


Рис. 2. Вертикальные профили счетной концентрации озона (сплошная кривая), полученные 19 декабря 2017 г. (а) и 19 января 2018 г. (б) на СЛС ИОА СО РАН (Томск: 56,48° с.ш., 85,05° в.д.), и профили озона на основе модели Крюгера (пунктирная кривая)

По данным Aura OMI, в декабре 2017 г. – январе 2018 г. дефицит ОСО над северными районами России достигал ~30% (в Якутске 2 января ОСО составило 289 е.Д. при норме 426 е.Д.). Аналогичная оценка для Томска была получена на СЛС, где измерения ОСО ведутся озонометром М-124 с 1993 г. – она составила 19% (298 е.Д. 27 января 2018 г. при норме 368 е.Д.). На рис. 3 приведены характеристики ОСО и NO<sub>2</sub>, рассчитанные из спутниковых данных Aura OMI. На средней и нижней панелях показан годовой ход отклонения (Δ) ОСО от многолетнего (2005–2016 гг.) среднего для 11 пунктов: Плесецк (62,9° с.ш., 40,4° в.д.), Якутск (62,1° с.ш., 129,8° в.д.), Йокиойнен (60,8° с.ш., 23,5° в.д.), Харестуа (60,2° с.ш., 10,8° в.д.), Санкт-Петербург (60,0° с.ш., 30,3° в.д.), Витим (59,5° с.ш., 112,6° в.д.), Томск (56,5° с.ш., 85,0° в.д.), Красноярск (56,0° с.ш., 92,9° в.д.), Москва (55,8° с.ш., 37,8° в.д.), Звенигород (55,7° с.ш., 36,8° в.д.) и Иркутск (52,3° с.ш., 104,4° в.д.). Отклонение рассчитывалось как разность между значением за 2017–2018 гг. и многолетним (2005–2016 гг.) средним ОСО. На верхней панели – ΔNO<sub>2</sub> в стратосфере.

Из рис. 3 видно, что содержание О<sub>3</sub> и NO<sub>2</sub> в декабре 2017 г. – январе 2018 г. было значительно ниже нормы на всей территории севера Евразии. Величина отклонения обычно растет с широтой. Также большими отрицательными значениями характеризуется Томск. Отметим, что низкое содержание NO<sub>2</sub> в декабре и январе (особенно заметное над Томском) указывает на арктическое происхождение воздушных масс и их изолированность.

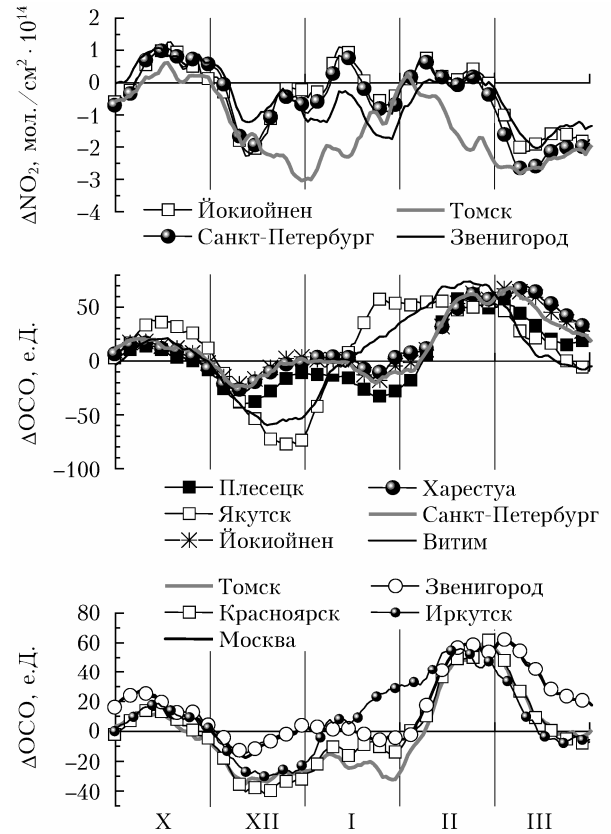


Рис. 3. Сезонный ход в ноябре 2017 г. – марте 2018 г. отклонения ОСО от многолетнего (2005–2016 гг.) среднего для 11 пунктов (средняя и нижняя панели); на верхней панели – сезонный ход ΔNO<sub>2</sub> в стратосфере; при построении применялось сглаживание скользящим средним по 30 точкам

Для исследования крупномасштабных полей температуры, влажности и озона использовались данные Aura MLS для следующих точек: Эврика, Канада (80,0° с.ш.; 86,2° з.д.; EUR); Нью-Олесунн, Норвегия (78,9° с.ш.; 11,9° в.д.; NAD); Туле, Гренландия (76,5° с.ш.; 68,7° з.д.; THU); Соданкюла, Финляндия (67,4° с.ш.; 26,6° в.д.; SDA); Санкт-Петербург (60,0° с.ш.; 30,3° в.д.; SPB); Томск, Россия (56,48° с.ш.; 85,05° в.д.; TSK). В настоящей работе ежедневные измерения Aura MLS усредняются до получения средних дневных профилей, которые затем использовались для расчета многолетнего (2007–2016 гг.) среднего профиля. Чтобы избавиться от температурной зависимости, отношения смеси преобразованы в счетные концентрации ([http://wdc.dlr.de/data\\_products/SERVICES/PROMOTE\\_O3/vmr.html](http://wdc.dlr.de/data_products/SERVICES/PROMOTE_O3/vmr.html)).

На рис. 4, а показаны высота, на которой фиксируется максимальное отклонение температуры от многолетнего среднего, и величина максимального отклонения; на рис. 4, б – разность  $T_{\min} - T_{\text{NAT}}$  ( $T_{\min}$  – минимальная температура в заданном высотном диапазоне в конкретный день наблюдений;  $T_{\text{NAT}} = 195$  К) и высота, на которой наблюдается  $T_{\min}$ ; на рис. 4, в сравнивается высота озонового максимума сезона 2017/2018 гг. с многолетней средней

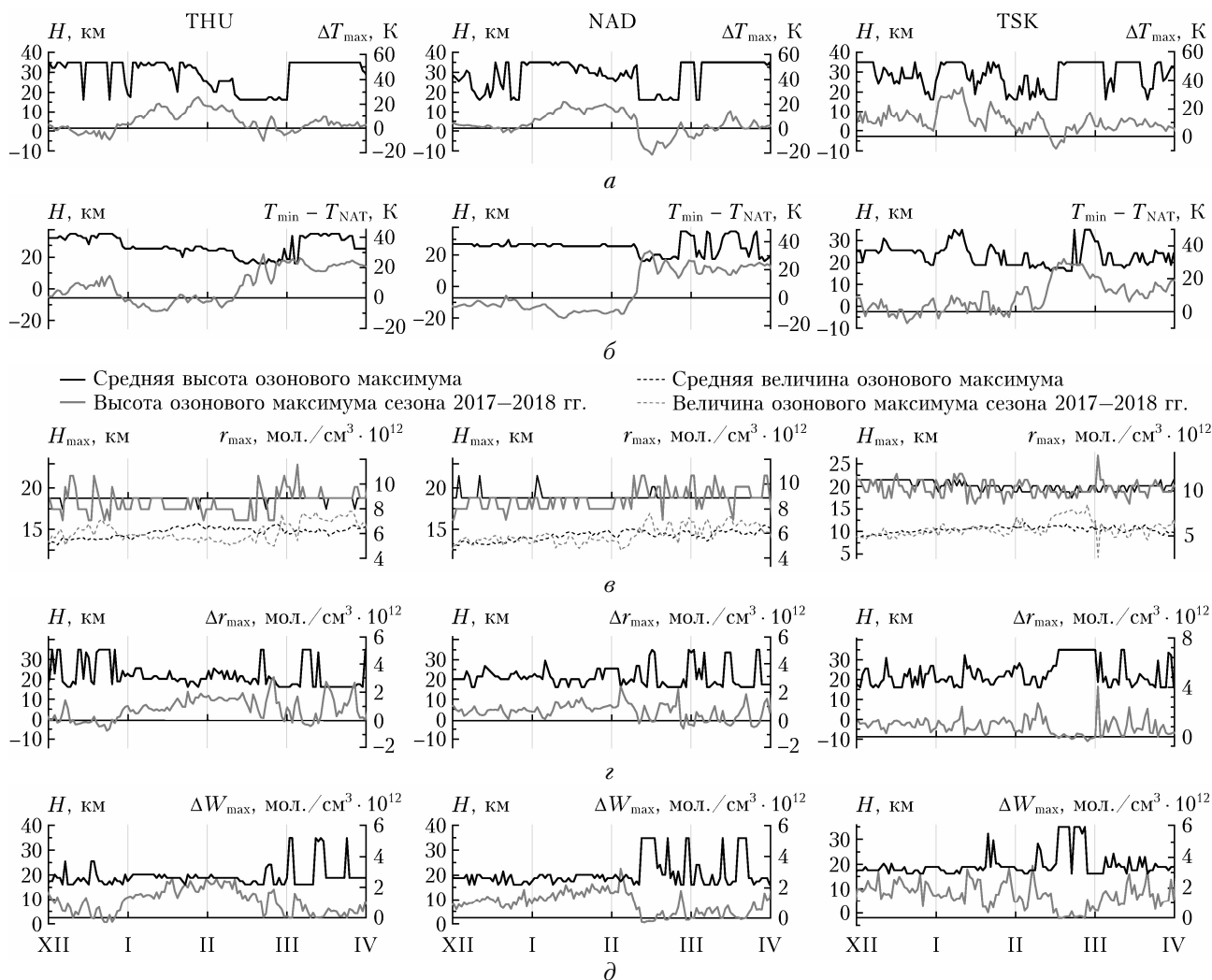


Рис. 4. Временной ход в декабре 2017 г. – марте 2018 г. статистических характеристик (серые кривые; *a, б, г, д*) и высоты их локализации  $H$  (черные кривые; *a, б, г, д*): *a* – максимальных отклонений температуры от многолетнего (2005–2016 гг.) среднего; *б* – разности между  $T_{\min}$  и  $T_{\text{NAT}}$ ; *в* – высоты (сплошные кривые) и величины (пунктирные кривые) озонового максимума сезона 2017/2018 гг. (серые кривые) в сравнении с многолетними средними значениями (черные кривые); *г* – максимальных отклонений счетной концентрации озона  $\Delta r_{\max}$ ; *д* – водяного пара  $\Delta W_{\max}$  от многолетнего среднего для пунктов THU, NAD и TSK

высотой максимума  $H_{\max}$ , а также величина озонового максимума этого сезона с многолетним средним значением максимума  $r_{\max}$ ; на рис. 4, *г, д* приведены высота, на которой фиксируется максимальное отклонение от многолетнего среднего, и значения максимального отклонения счетной концентрации озона  $\Delta r_{\max}$  и влажности  $\Delta W_{\max}$  соответственно. Отклонение рассчитывалось как разность между средним значением в 2005–2016 гг. и значением в декабре 2017 г. – марте 2018 г. для озона (и наоборот – для влажности).

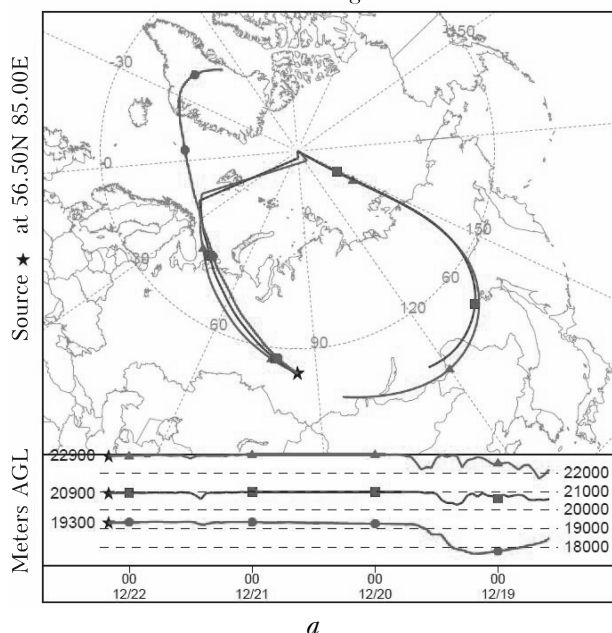
Из рисунка следует, что в декабре 2017 г. и январе 2018 г. в атмосфере над Томском и Арктикой температура была значительно ниже нормы (рис. 4, *a*) и в отдельные дни опускалась ниже порога образования ПСО  $T_{\text{NAT}}$  (рис. 4, *б*), причем пониженные температуры в стратосфере отмечались в Восточном полушарии в январе и декабре, а в Западном полушарии – только в январе; высота локализации

и величина озонового максимума были ниже нормы (рис. 4, *в*); пункт наблюдения был под влиянием арктических воздушных масс из Восточного полушария с пониженным содержанием озона и повышенным содержанием водяного пара (рис. 4, *г, д*). Хорошо проявляется ВСП 11 февраля 2018 г., а также его высотная локализация (рис. 4, *б*).

Для определения источника транспортировки воздушных масс с аномальными характеристиками с помощью интернет-ресурса <https://www.ready.noaa.gov/hypub-bin/trajasc.pl> были построены обратные траектории переноса воздушных масс в атмосфере по моделям NOAA HYSPLIT (рис. 5). Из анализа обратных траекторий следует, что 22 декабря 2017 г. и 27 января 2018 г. осуществлялся занос в район Томска арктических воздушных масс через Скандинавию.

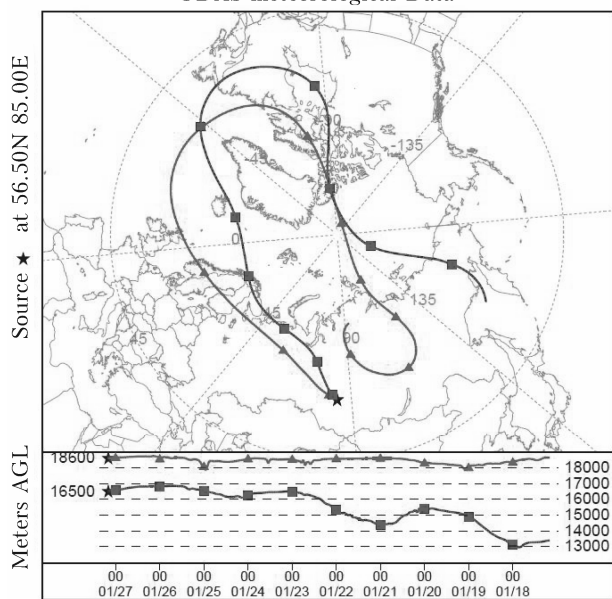
Спутниковые измерения ОСО проводятся при солнечном освещении и прерываются в условиях

NOAA HYSPLIT MODEL  
Backward trajectories ending at 04:00 UTC 22 Dec 17  
GDAS meteorological Data



a

NOAA HYSPLIT MODEL  
Backward trajectories ending at 04:00 UTC 22 Jan 18  
GDAS meteorological Data



b

Рис. 5. Обратные траектории движения воздушных масс от Томска: а – 22 декабря 2017 г.; б – 27 января 2018 г.

полярной ночи. Однако ОСО можно рассчитать из спутниковых профилей озона, полученных в микроволновом диапазоне. Для этого отношение смеси озона необходимо перевести в счетную концентрацию ([http://wdc.dlr.de/data\\_products/SERVICES/PROMOTE\\_O3/vmr.html](http://wdc.dlr.de/data_products/SERVICES/PROMOTE_O3/vmr.html)), проинтегрировать профиль последней по высоте до получения ОСО в мол./см<sup>2</sup> и преобразовать его в единицы Добсона: 1 е.Д. =  $2,69 \cdot 10^{20}$  мол./см<sup>2</sup>. Из полученных таким

способом временных рядов ОСО были определены многолетнее (2007–2016 гг.) среднее и процентное отклонение значений ОСО зимой 2017/2018 гг. от среднего (рис. 6).

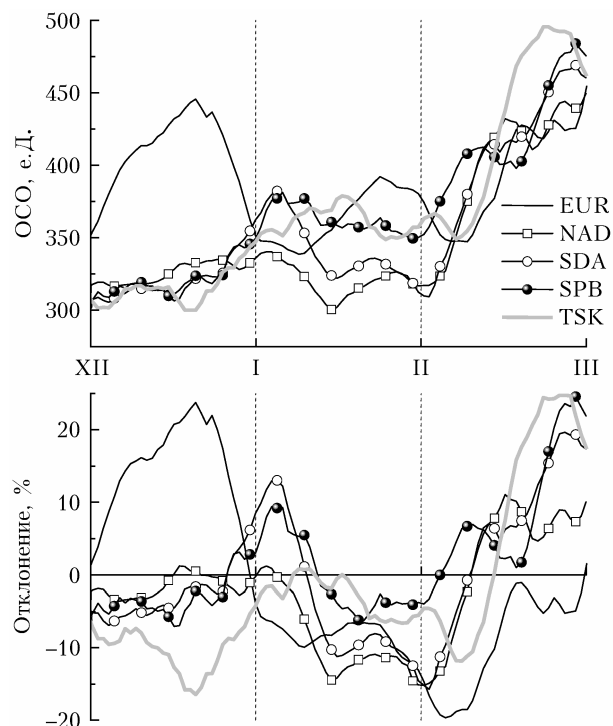


Рис. 6. Интегральное (по профилю) ОСО в 2017–2018 гг. и его отклонение от многолетней (2007–2016 гг.) нормы для арктических пунктов и точек на севере Евразии по данным Ауга MLS; при построении применялось сглаживание скользящим средним по 10 точкам

Анализ рисунка позволяет выделить три озоновые аномалии: в декабре, январе и феврале. Дефицит озона в декабре над TSK достигал 25%. Наоборот, в арктическом пункте EUR (Западное полушарие) наблюдались высокие значения ОСО и его значительные положительные отклонения. Понижение ОСО на арктических широтах Восточного полушария (пункты NAD и SDA) и на севере Европы (пункт SPB) не было столь значительным. Таким образом, аномалию ОСО в декабре над TSK нельзя объяснить лишь заносом арктических воздушных масс. Это позволяет предположить, что имело место *химическое возмущение* воздушных масс, вытесненных за пределы полярного круга, в условиях интенсивного солнечного освещения и существенного содержания агрессивного хлора (ввиду дефицита NO<sub>2</sub>).

В конце января отклонение ОСО над TSK было отрицательным и находилось в коридоре значений для SPB и NAD/SDA, позволяя предположить, что такая аномалия ОСО в основном была вызвана заносом арктических воздушных масс. В конце февраля пункты SPB, SDA и TSK оказались под влиянием богатых озоном воздушных масс из Восточной Сибири, сместившихся на запад после мажорного ВСП 11 февраля (<https://exp-studies.tor.ec.gc.ca/cgi-bin/selectMap>).

## Заключение

Анализ лидарных измерений и данных Aura MLS/OMI позволяет утверждать, что события, предшествующие мажорному ВСП в Арктике в феврале 2018 г., имели следующие последствия для стратосферы севера Евразии и Томска.

1. Лидарные измерения показали наличие стратосферных аэрозольных слоев над Томском зимой 2017/2018 гг.

2. Лидарные профили озона показали признаки оседания воздушных масс и дефицита ОСО.

3. По данным Aura OMI, в декабре 2017 г. – январе 2018 г. ОСО и содержание NO<sub>2</sub> в стратосфере над севером Евразии были значительно ниже нормы.

4. Данные Aura MLS указывают на то, что в декабре 2017 г. – январе 2018 г. в стратосфере Восточного полушария температура была значительно ниже нормы и иногда опускалась ниже порога образования ПСО.

5. Анализ обратных траекторий и интегрального (по профилю) ОСО показал, что динамическое возмущение арктической стратосферы в декабре 2017 г. привело к вытеснению холодных воздушных масс с избыточным содержанием агрессивного хлора (ввиду дефицита NO<sub>2</sub>) за пределы полярного круга и их вторжению в стратосферу над Томском. Попав под влияние солнечного излучения и оставаясь пространственно изолированными, воздушные массы перешли в химически возбужденное состояние, сходное по скорости разрушения озона с состоянием весенней стратосферы Арктики.

1. 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.
2. Von Clarmann T. Chlorine in the stratosphere // *Atmosfera.* 2013. V. 26, N 3. P. 415–458.
3. 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.
4. Jiang Y., Yung Y.L., Zurek R.W. Decadal evolution of the Antarctic ozone hole // *J. Geophys. Res. D.* 1996. V. 101, N 4. P. 8985–8999. DOI: 10.1029/96JD00063.
5. Sanders R.V., Solomon S., Smith J.P., Perliski L., Miller H.L., Mount G.H., Keys J.G., Schmeltekopff A.L. Visible and near-ultraviolet spectroscopy at McMurdo

- Station, Antarctica: 9. Observations of OClO from April to October 1991 // *J. Geophys. Res. D.* 1993. V. 98, N 4. P. 7219–7228. DOI: 10.1029/93JD00042.
6. Solomon S., Sanders R.W., Miller H.L., Jr. Visible and near-ultraviolet spectroscopy at McMurdo Station, Antarctica 7. OClO diurnal photochemistry and implications for ozone destruction // *J. Geophys. Res. D.* 1990. V. 95, N 9. P. 13,807–13,817. DOI: 10.1029/JD095iD09p13807.
7. Singleton C.S., Randall C.E., Chipperfield M.P., Davies S., Feng W., Bevilacqua R.M., Hoppel K.W., Fromm M.D., Manney G.L., Harvey V.L. 2002–2003 Arctic ozone loss deduced from POAM III satellite observations and the SLIMCAT chemical transport model // *Atmos. Chem. Phys.* 2005. V. 5. P. 597–609. DOI: 10.5194/acp-5-597-2005.
8. Manney G.L., Lawrence Z.D., Santee M.L., Read W.G., Livesey N.J., Lambert A., Froidevaux L., Pumphrey H.C., Schwartz M.J. A minor sudden stratospheric warming with a major impact: Transport and polar processing in the 2014/2015 Arctic winter // *Geophys. Res. Lett.* 2015. V. 42. P. 7808–7816. DOI: 10.1002/2015GL065864.
9. Bazhenov O.E. Quasi-biennial oscillation of the total ozone and ozone concentrations at separate altitude levels over Arctic and Tomsk according to TOMS, OMI, and MLS observations // *Int. J. Remote Sens.* 2015. V. 36, N 12. P. 3033–3040. DOI: 10.1080/01431161.2015.1055609.
10. Charlton A.J., Polvani L.M. A new look at stratospheric sudden warmings. Part I. Climatology and modeling benchmarks // *J. Clim.* 2007. V. 20, N 3. P. 449–471. DOI: 10.1175/JCLI3996.1.
11. Rao J., Ren R., Chen H., Yu Y., Zhou Y. The stratospheric sudden warming event in February 2018 and its prediction by a climate system model // *J. Geophys. Res.* 2018. V. 23, iss. 123. DOI: 10.1029/2018JD028908.
12. Flury T., Hocke K., Haefele A., Kämpfer N., Lehmann R. Ozone depletion, water vapor increase, and PSC generation at midlatitudes by the 2008 major stratospheric warming // *J. Geophys. Res. D.* 2009. V. 114, N 18302. DOI: 10.1029/2009JD011940.
13. Manney G.L., Lawrence Z.D., Santee M.L., Livesey N.J., Lambert A., Pitts M.C. Polar processing in a split vortex: Arctic ozone loss in early winter 2012/2013 // *Atmos. Chem. Phys.* 2015. V. 15. P. 5381–5403. DOI: 10.5194/acp-15-5381-2015.
14. Manney G.L., Lawrence Z.D. The major stratospheric final warming in 2016: Dispersal of vortex air and termination of Arctic chemical ozone loss // *Atmos. Chem. Phys.* 2016. V. 16. P. 15371–15396. DOI: 10.5194/acp-16-15371-2016.
15. Бурлаков В.Д., Долгий С.И., Невзоров А.В. Модернизация измерительного комплекса Сибирской лидарной станции // *Оптика атмосф. и океана.* 2004. Т. 17, № 10. С. 857–864.

### *O.E. Bazhenov, A.A. Nevzorov, A.V. Nevzorov, S.I. Dolgii, A.P. Makeev. Disturbance of the stratosphere over Tomsk in winter 2017/2018 using lidar and Aura MLS/OMI observations.*

Lidar observations at Siberian Lidar Station (SLS) of Institute of Atmospheric Optics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences in Tomsk (56.5°N; 85.0°E) showed the presence of stratospheric aerosol layers over Tomsk during winter 2017–2018, signs of descending air masses, and deficit of ozone. Aura OMI/MLS observations indicated that in December–January 2017/2018 the total ozone (TO) content and NO<sub>2</sub> content in the stratosphere over the Northern Eurasia, as well as the temperature in the stratosphere, were significantly lower than normal. Analysis of back trajectories and integrated (over profile) TO showed that the dynamic disturbance of the Arctic stratosphere in December 2017 led to extrusion of cold air masses with excessive reactive chlorine (in view of NO<sub>2</sub> deficit) beyond the Arctic circle and their intrusion into the stratosphere of Tomsk. Seemingly, in the Tomsk stratosphere they were exposed to solar radiation and, staying chemically isolated, evolved into chemically disturbed state, similar to the state of springtime Arctic stratosphere, where ozone is intensely destroyed until the final warming.