«Оптика атмосферы и океана», **34**, № 11 (2021)
DOI: 10.15372/AOO20211107

ОПТИКА КЛАСТЕРОВ, АЭРОЗОЛЕЙ И ГИДРОЗОЛЕЙ

УДК 551.510.42

Изменение состава воздуха при переходе из тропосферы в стратосферу

П.Н. Антохин[1], В.Г. Аршинова[1], М.Ю. Аршинов[1], Б.Д. Белан[1], С.Б. Белан[1], Л.П. Голобокова[2], Д.К. Давыдов[1], Г.А. Ивлев[1], А.В. Козлов[1], А.С. Козлов[3], В.И. Отмахов[4], Т.М. Рассказчикова[1], Д.В. Симоненков[1], Г.Н. Толмачев[1], А.В. Фофонов[1]*

[1]Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1
[2]Лимнологический институт СО РАН
664033, г. Иркутск, ул. Улан-баторская, 3
[3]Институт химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского СО РАН
630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, 3
[4]Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

Поступила в редакцию 4.08.2021 г.

По данным самолетного зондирования исследуется изменение состава воздуха при переходе из тропосферы в стратосферу. Анализируется распределение семи газов, дисперсного и химического состава аэрозоля. Показано, что при пересечении тропопаузы содержание H_2O, CO и CH_4 резко уменьшается, а O_3, NO_2 и счетная концентрация аэрозоля, наоборот, увеличиваются. В элементном составе над тропопаузой доминирует Si, в ионном — SO_4^{2-}. В тропосфере же преобладают терригенные элементы Al, Cu, Fe, а среди ионов набор из нескольких соединений, изменяющийся по регионам. Выявлены также заметные различия в дисперсном составе частиц.

Ключевые слова: атмосфера, аэрозоль, воздух, вертикальное распределение, газы, состав, стратосфера, тропосфера; atmosphere, aerosol, air, vertical distribution, gases, composition, stratosphere, troposphere.

Введение

Стратосфера и тропосфера — основные слои, которые определяют значительную часть атмосферных процессов на нашей планете. Между ними находится тропопауза — слой, имеющий устойчивую стратификацию и затрудняющий обмен воздухом между слоями [1]. Как следствие, состав воздуха в стратосфере и тропосфере несколько различается [2–4]. Однако тропопауза не является непроницаемой, и поэтому между обоими слоями происходит обмен примесями. Подробнейший обзор таких процессов приведен в [5]. Обмен усиливается в зоне крупномасштабных синоптических объектов [6–8], особенно в высотных фронтальных зонах — так называемых складках тропопаузы [9–11]. В районах, не охваченных динамическими возмущениями, его интенсивность минимальна.

В условиях меняющегося климата заметно изменился состав воздуха в тропосфере. Как показано в [12], это отразилось на характеристиках тропосферы и стратосферы. С 1980 по 2018 г. тропопауза в среднем по земному шару повысилась на 150 м, а стратопауза понизилась на 400 м. Прогнозируется, что к 2080 г. стратопауза опустится на 1,3 км. Следовательно, должны измениться и процессы обмена между обеими сферами. Например, высота тропопаузы хорошо коррелирует с высотой озонопаузы [13], которая определяет перенос озона из стратосферы в тропосферу [14]. Обмен субстанциями будет влиять на состав воздуха как в тропосфере, так и в стратосфере и, следовательно, на их радиационный режим. Как отмечено в [15], для ретроспективного анализа нет способа, аналогичного использованию палеоклиматических данных. Поэтому необходимо исследовать процессы обмена воздухом между тропосферой и стратосферой в условиях потепления климата, особенно если учесть, что один

* Павел Николаевич Антохин (apn@iao.ru); Виктория Геннадьевна Аршинова (arvi@iao.ru); Михаил Юрьевич Аршинов (michael@iao.ru); Борис Денисович Белан (bbd@iao.ru); Сергей Борисович Белан (bsb@iao.ru); Людмила Петровна Голобокова (lg@lin.irk.ru); Денис Константинович Давыдов (denis@iao.ru); Георгий Алексеевич Ивлев (ivlev@iao.ru); Артем Владимирович Козлов (artem@iao.ru); Александр Сергеевич Козлов (kozlov@kinetics.nsc.ru); Владимир Ильич Отмахов (otmahov2004@mail.ru); Татьяна Михайловна Рассказчикова (rtm@iao.ru); Денис Валентинович Симоненков (simon@iao.ru); Геннадий Николаевич Толмачев (tgn@iao.ru); Александр Владиславович Фофонов (alenfo@iao.ru).

© Антохин П.Н., Аршинова В.Г., Аршинов М.Ю. и др., 2021

из геоинженерных методов воздействия на климатообразующие факторы предполагает внесение в стратосферу дополнительного количества аэрозолей [16].

Исследований перераспределения газовых и аэрозольных примесей между тропосферой и стратосферой относительно немного. Авторы [17, 18] обращают внимание на важность переноса водяного пара через тропопаузу в стратосферу. Повышение уровня водяного пара может усилить разрушение озона, вызванное выделяемыми человеком озоноразрушающими веществами, и тем самым спровоцировать рост уровня ультрафиолетового излучения на поверхности Земли. Данные измерений и моделирования показывают [19, 21], что при переходе из тропосферы в стратосферу концентрация водяного пара уменьшается до 2–4 млн$^{-1}$. Поскольку озон в большом количестве образуется в стратосфере, то при пересечении тропопаузы его концентрация начинает быстро увеличиваться, достигая максимума на высотах 20–25 км в зависимости от географической широты [22–24]. Помимо водяного пара и озона в [21] измерялась еще и концентрация метана, которая уменьшалась с высотой выше тропопаузы, в [25, 26] – концентрация оксида углерода, которая также снижалась.

Для восполнения данных об изменении состава воздуха при переходе из тропосферы в стратосферу в настоящей работе рассматривается вертикальное распределение семи газов и аэрозоля на уровне тропопаузы и в прилегающих к ней слоях по результатам самолетного зондирования.

Методы и районы исследования

Для исследования использовались данные, полученные самолетом-лабораторией Ту-134 «Оптик» [27]. Поскольку состав оборудования заметно обновился, в табл. 1 приведены характеристики приборов, которые применялись в экспериментах.

Кроме перечисленных приборов использовались аспирационные установки, с помощью которых на фильтры отбирались пробы для определения химического состава аэрозоля. Для исследования неорганической компоненты отбор аэрозоля производился на фильтры АФА-ХА-20. Элементный состав определялся атомно-эмиссионным спектральным анализом [28, 29], ионный состав – ионной хроматографией [30, 31].

В анализ для настоящей работы были отобраны полеты, в ходе которых самолет-лаборатория пересекал тропопаузу. Тропопауза определялась по градиенту температуры (до 2 град/км) (такую тропопаузу еще называют термической [32]). Таких полетов набралось 14. Три из них, когда измерялись все газы и аэрозоль, были проведены в сентябре 2020 г., а одиннадцать, с неполным набором контролируемых примесей, – в октябре 2014 г. Все они выполнялись над арктическими морями или прибрежными территориями. Это неудивительно, так как в северных широтах тропопауза значительно ниже, чем в умеренных [33].

Пересечения тропопаузы происходили при горизонтальных полетах через высотные фронтальные зоны (рис. 1, *а* и *б*), а также при вертикальном зондировании в центрах глубоких циклонов (рис. 1, *в*) или обширных ложбин (рис. 1, *г*). В первом случае имеется наклон тропопаузы [34], во втором случае она «втягивается» вниз в центре циклона [35].

Результаты и обсуждение

Проведенный анализ показал, что по характеру изменения концентраций при переходе через тропопаузу все измеренные примеси можно разделить на три группы. К первой группе относятся H_2O, CO и CH_4 (табл. 2). Их концентрация во всех случаях резко уменьшалась в стратосфере. Содержание O_3, NO_2 и счетной концентрации аэрозоля (N) при пересечении тропопаузы, наоборот, увеличивалось. Концентрации NO и CO_2 могли уменьшаться или увеличиваться, а иногда имели нейтральный ход.

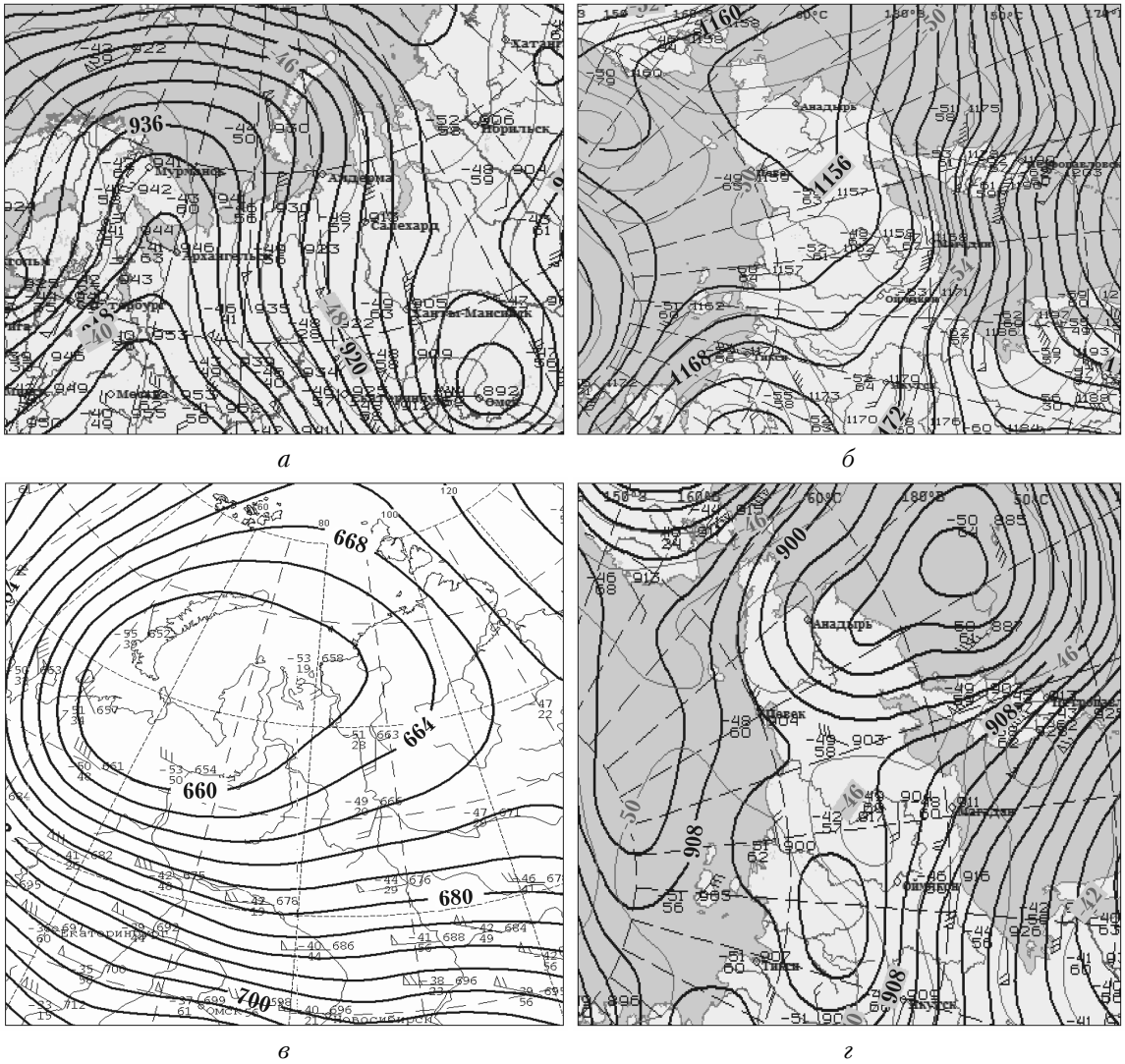
Тенденции изменения концентрации атмосферных примесей при пересечении тропопаузы можно увидеть на рис. 2–4.

Таблица 1

Приборы, установленные на самолете-лаборатории и их технические характеристики

Блок	Прибор/датчик	Измеряемый параметр	Диапазон	Погрешность
Газоаналитический	G2301-m	CO_2, млн$^{-1}$	0…1000	<0,2 млн$^{-1}$
		CH_4, млн$^{-1}$	0…20	<0,0015 млн$^{-1}$
		H_2O, млн$^{-1}$	0…70000	<150 млн$^{-1}$
	TEI Model 49C	O_3, млн$^{-1}$	0…200	0,001 млн$^{-1}$
	TEI Model 48C	CO, млн$^{-1}$	0…1000	±1%
	TEI Model 42*i*	NO/NO_2, мкг/м^3	0…10/500	±1%
Аэрозольный	GRIMM #1.109	D_p, мкм (31 канал)	0,25…32	–
		N, см$^{-3}$	0…2000	±3%
	Диффузионный спектрометр аэрозоля	D_p, нм (20 каналов)	3…200	–
		N, см$^{-3}$	0…500000	±10%

Примечание. D_p – диаметр частиц.



а *б*

в *г*

Рис. 1. Карты барической топографии для районов, в которых пересекалась тропопауза (00:00 ВСВ): *а* — АТ-300, 04.09.2020; *б* — АТ-200, 17.09.2020; *в* — АТ-400, 15.10.2014; *г* — АТ-300, 15.09.2020

Таблица 2

Тенденция изменения концентрации примесей воздуха при пересечении тропопаузы

Тенденция изменения	H_2O	O_3	CO	CH_4	CO_2	NO_2	NO	N (d > 0,25 мкм)
Увеличение	–	14	–	–	6	3	3	11
Уменьшение	14	–	14	14	6	–	–	1
Нейтральный ход	–	–	–	–	2	–	–	2

Из рис. 2, *а* видно, что удельная влажность падает с высотой до уровня тропопаузы. Затем фиксируется даже небольшой рост. Такой характер ее изменения вполне закономерен, если обратиться к физическим свойствам влагосодержания в атмосфере [36], поскольку максимальная концентрация водяного пара в воздухе экспоненциально уменьшается с уменьшением температуры. По абсолютным значениям удельная влажность значительно выше, чем было зафиксировано в [19–21]. Здесь возможно два объяснения. Первое: низкие значения удельной влажности близки к порогу и погрешности регистрации используемым газоанализатором. Второе: измерения проведены в самой нижней части стратосферы, где еще имеется подпитка водяным паром из тропосферы.

Резкое падение содержания при переходе из тропосферы в стратосферу наблюдается также для CO и CH_4 (рис. 2, *б* и *в*). Подобное зафиксировано и другими научными группами и ими получены значения, близкие к данным рис. 2, *а* и *б* [21, 37–39]. Возможной причиной быстрого уменьшения содержания CO и CH_4 в стратосфере считается их окисление озоном и гидроксилом, концентрация которых здесь значительно выше, чем в тропосфере [40, 41].

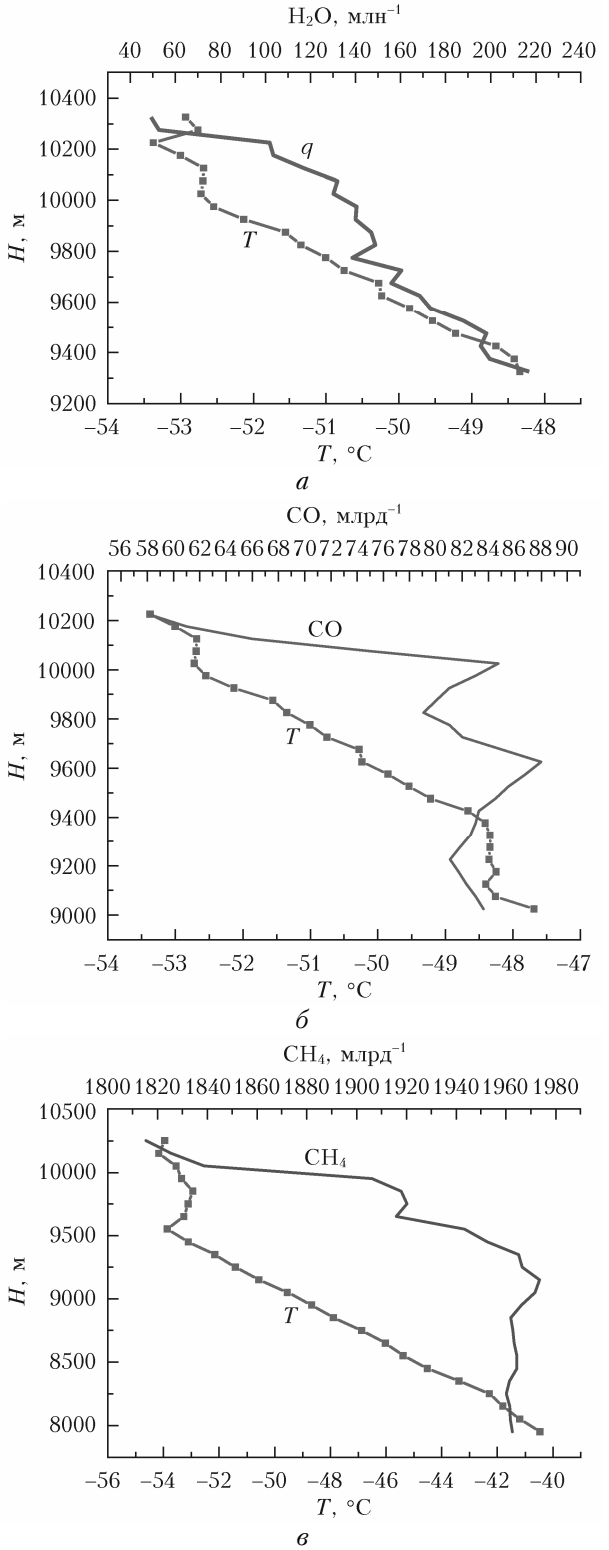


Рис. 2. Вертикальное распределение удельной влажности (*а*), концентраций CO (*б*) и CH_4 (*в*) в слое тропопаузы

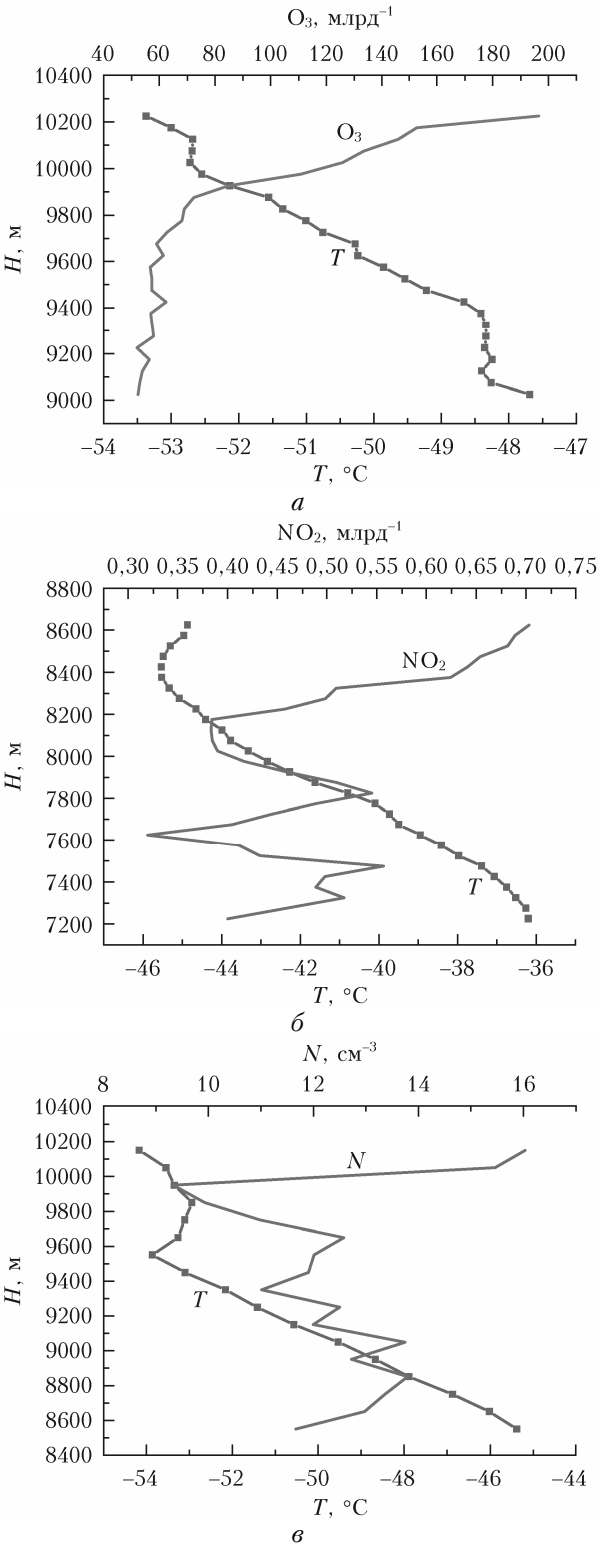


Рис. 3. То же, что на рис. 2, для O_3 (*а*), NO_2 (*б*) и счетной концентрации аэрозоля ($d > 0{,}25$ мкм) (*в*)

На рис. 3 видно, что концентрация O_3 и NO_2, а также N при переходе в стратосферу увеличиваются. И если рост содержания O_3 и NO_2 понятен (они образуются в стратосфере в ходе фотохимических циклов [42, 43]), то причина увеличения количества частиц пока не ясна. Вернемся к этому вопросу чуть позже.

Остановимся на вопросе о переменном характере изменения концентрации CO_2 в слое тропопаузы (табл. 2, рис. 4).

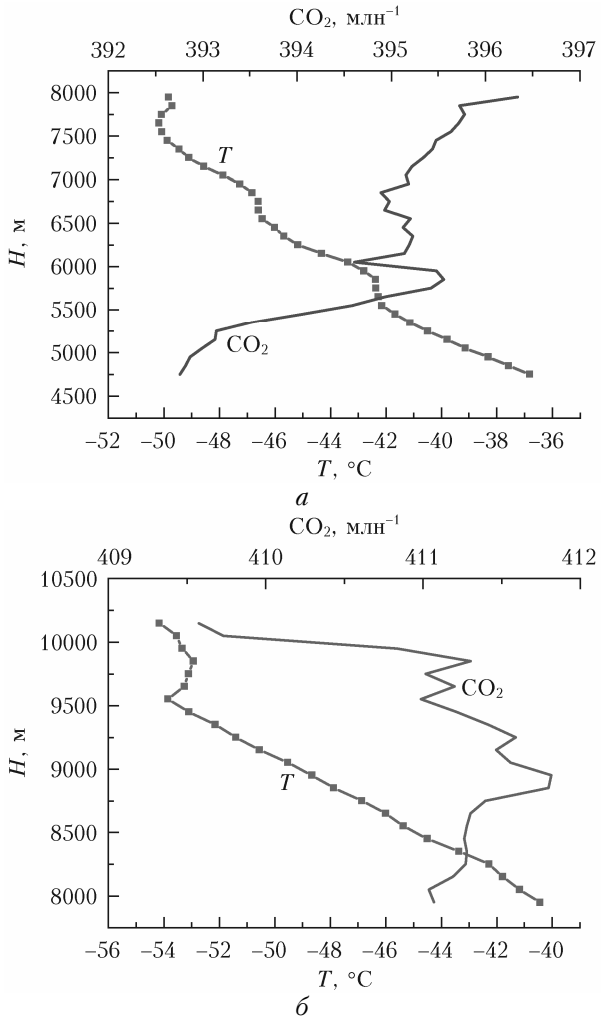


Рис. 4. То же, что на рис. 2, для CO_2: *а* — Карское море, 15.10.2014 г.; *б* — Архангельск, 4.09.2020

На рис. 4, *а* показано, что концентрация диоксида углерода начала повышаться в тропосфере и продолжила расти в стратосфере. На рис. 4, *б* наблюдается обратная картина: содержание CO_2 варьируется в тропосфере и уменьшается в стратосфере. Правда, амплитуды изменений невелики (2–3 млн$^{-1}$). Причем данные табл. 2 показывают, что изменения в обе стороны равновероятны. Авторы [38] также зафиксировали подобный факт. Они объясняют различия в характере изменения концентрации CO и CO_2 тем, в каком месте проведено самолетное зондирование: между полярным куполом и средними широтами возникает барьер, а при зондировании южнее купола должен регистрироваться рост концентрации, так как туда поступают обогащенные воздушные массы с материка. Профиль внутри купола покажет снижение, потому что здесь содержание примесей ниже. Наша попытка проверки этих выводов не увенчалась успехом. Возможно, граница полярного купола в период наших экспериментов была значительно севернее.

В трех случаях нам удалось отобрать пробы аэрозоля в стратосфере. Результаты сопоставления элементного состава для стратосферы и тропосферы представлены на рис. 5 (цв. вкладка), ионного состава — на рис. 6 (цв. вкладка). Тропосферные пробы были отобраны на 1 км ниже тропопаузы.

Из рис. 5 видно, что элементный состав аэрозоля значительно различается в тропосфере и стратосфере. Кроме обозначенных на рис. 5 элементов в составе частиц еще определялись Ca, Mg и Ti. Но их содержание оказалось на уровне холостых проб, что не позволило сделать их достоверную количественную оценку в составе аэрозоля. Детальный разбор рис. 5 вряд ли возможен. Можно выделить характерную особенность: в стратосфере в составе частиц доминирует Si, а в тропосфере Fe или Al. Наиболее вероятная причина таких различий — продолжительное время нахождения в стратосфере продуктов вулканических извержений, в составе частиц которых преобладают силикаты [44], а из тропосферы они выводятся быстрее. Обращает на себя внимание также низкая концентрация Be в стратосфере, по анализу которого судят о происхождении воздушных масс [45]. Здесь, возможно, сказывается период измерений: они проводились осенью, когда содержание Be в атмосфере минимально [46].

Стратосферный и тропосферный аэрозоль различается по ионному составу (рис. 6). В стратосфере доминирует сульфатный аэрозоль, в основе которого лежит ион SO_4^{2-}. В тропосфере преобладают ионы терригенного происхождения. Это неплохо согласуется с ранее полученными данными [44]. Часть ионов, приведенных на рис. 6, также была обнаружена в стратосфере в ходе специальных экспериментов [47, 48].

Такие различия в химическом составе аэрозоля не могут не сказаться на распределении частиц по размерам. Полные спектры таких распределений показаны на рис. 7 (в логарифмическом масштабе). Поскольку комплекс, предназначенный для измерения дисперсного состава, состоит из двух приборов с разным темпом регистрации, а время нахождения самолета-лаборатории на горизонтальной площадке — несколько минут, трудно подобрать периоды, когда отсчеты проведены синхронно. Поэтому данных с полным распределением частиц по спектру размеров оказывается немного. Два из них получены вблизи Архангельска и Анадыря. Контрольной по отношению к стратосфере была взята высота вблизи 9 км, т.е. под тропопаузой.

На рис. 7 видно, что максимальные концентрации частиц и в тропосфере, и в стратосфере приходятся на моду Айткена (0,02–0,05 мкм). Заметны также различия в распределении частиц по размерам для стратосферы и тропосферы. Можно отметить, что спектры распределений на обоих графиках в стратосфере несколько сдвинуты вправо, в область более крупных частиц. В стратосфере также больше присутствует частиц из грубодисперсной фракции ($d > 1$ мкм).

Вместе с тем в стратосфере в обоих случаях имеются частицы нуклеационной моды (0,003–0,02 мкм). Это свидетельствует о том, что несмотря на низкую влажность и очень маленькое содержание здесь аммиака в стратосфере происходит обра-

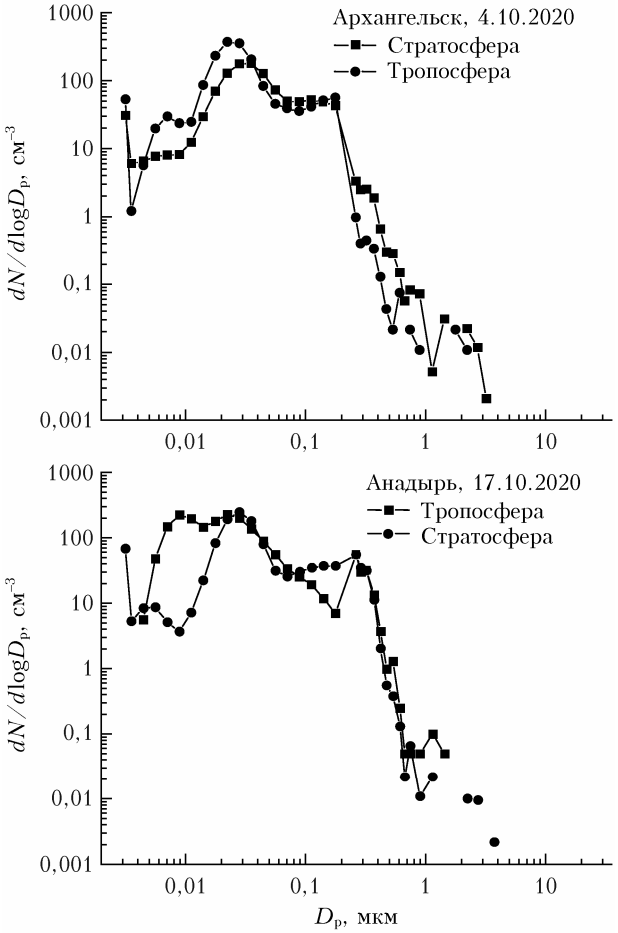


Рис. 7. Распределение частиц аэрозоля по размерам в стратосфере и тропосфере

зование новых частиц. Судя по доминированию в ионном составе SO_4^{2-} (рис. 6) генерация осуществляется по сернокислотному механизму. Возможно, этим объясняется рост счетной концентрации выше тропопаузы, показанный на рис. 3.

Конечно, эти результаты, полученные путем анализа небольшого количества случаев, нужно считать предварительными.

Заключение

При переходе из тропосферы в стратосферу происходят значительные изменения в составе воздуха. У таких газов, как H_2O, CO и CH_4, резко уменьшается концентрация выше тропопаузы. Для содержания O_3 и NO_2 и N, наоборот, характерно увеличение выше этого слоя. Концентрация CO_2 равновероятно может увеличиваться или уменьшаться. Для NO ввиду его низкого содержания на этих высотах однозначной тенденции изменения установить не удалось.

В химическом составе аэрозоля также выявляются существенные различия в стратосфере и тропосфере. В элементном составе над тропопаузой доминирует Si, в ионном — SO_4^{2-}, в то время как в тропосфере преобладают терригенные элементы Al, Cu, Fe, а среди ионов набор из нескольких соединений, изменяющийся по регионам.

Заметны также различия в дисперсном составе аэрозоля. В стратосфере кривая распределения в целом сдвинута вправо, что отражает более продолжительный возраст частиц, находящихся здесь.

Самолетное зондирование выполнено на УНУ самолет-лаборатория Ту-134 «Оптик», входящего в ЦКП «Атмосфера», поддержанный грантом Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2021-934).

1. *Маховер З.М.* Климатология тропопаузы. Л.: Гидрометеоиздат, 1983. 254 с.
2. *Trickl T., Vogelmann H., Giehl H., Scheel H.-E., Sprenger M., Stohl A.* How stratospheric are deep stratospheric intrusions? // Atmos. Chem. Phys. 2014. V. 14, N 18. P. 9941–9961.
3. *Trickl T., Bartsch-Ritter N., Eisele H., Furger M., Mucke R., Sprenger M., Stohl A.* High-ozone layers in the middle and upper troposphere above Central Europe: Potential import from the stratosphere along the subtropical jet stream // Atmos. Chem. Phys. 2011. V. 11, N 17. P. 9343–9366.
4. *Куколева А.А.* Оценки потоков озона через тропопаузу в планетарных высотных фронтальных зонах северного полушария // Изв. РАН. Физика атмосф. и океана. 2002. Т. 38, № 3. С. 376–387.
5. *Иванова А.Р.* Стратосферно-тропосферный обмен и его некоторые особенности во внетропических широтах // Метеорол. и гидрол. 2016. № 3. С. 22–45.
6. *Криволуцкий А.А., Куколева А.А.* Результаты Российских исследований средней атмосферы (2011–2014 гг.) // Изв. РАН. Физика атмосф. и океана. 2016. Т. 52, № 5. С. 561–570.
7. *Boothe A.C., Homeyer C.R.* Global large-scale stratosphere–troposphere exchange in modern reanalyses // Atmos. Chem. Phys. 2017. V. 17, N 9. P. 5537–5559.
8. *Runde T., Dameris M., Garny H., Kinnison D.E.* Classification of stratospheric extreme events according to their downward propagation to the troposphere // Geophys. Res. Lett. 2016. V. 43, N 12. P. 6665–6672.
9. *Mihalikova M., Kirkwood S., Arnault J., Mikhaylova D.* Observation of a tropopause fold by MARA VHF wind-profiler radar and ozonesonde at Wasa, Antarctica: Comparison with ECMWF analysis and a WRF model simulation // Ann. Geophys. 2012. V. 30, N 9. P. 1411–1421.
10. *Mihalikova M., Kirkwood S.* Tropopause fold occurrence rates over the Antarctic station Troll (75 S, 2.5 E) // Ann. Geophys. 2013. V. 31, N 4. P. 591–598.
11. *Weigel K., Hoffmann L., Gunther G., Khosrawi F., Olschewski F., Preusse P., Spang R., Stroh F., Riese M.* A stratospheric intrusion at the subtropical jet over the Mediterranean Sea: Air-borne remote sensing observations and model results // Atmos. Chem. Phys. 2012. V. 12, N 8. P. 8423–8438.
12. *Pisoft P., Sacha P., Polvani L.M., Acel J.A., de la Torre L., Eichinger R., Foelsche U., Huszar P., Jacobi C., Karlicky J., Kuchar A., Miksovsky J., Zak M., Rieder H.E.* Stratospheric contraction caused by increasing greenhouse gases // Environ. Res. Lett. 2021. V. 16, N 6. P. 064038.
13. *Follette-Cook M.B., Hudson R.D., Nedoluha G.E.* Classification of Northern Hemisphere stratospheric ozone and water vapor profiles by meteorological regime // Atmos. Chem. Phys. 2009. V. 9, N 16. P. 5989–6003.
14. *Collins W.J., Derwent R.G., Garnier B., Johnson C.E., Sanderson M.G., Stevenson D.S.* Effect of stratosphere–

troposphere exchange on the future tropospheric ozone trend // J. Geophys. Res. 2003. V. 108, N D12. P. 8528.
15. *Geng L., Murray L.T., Mickley L.J., Lin P., Fu Q., Schauer A.J., Alexander B.* Isotopic evidence of multiple controls on atmospheric oxidants over climate transitions // Nature. 2017. V. 546, N 7656. P. 133–137.
16. *Crutzen P.J. Albedo* enhancement by stratospheric sulfur injections: A contribution to resolve a policy dilemma? // Clim. Change. 2006. V. 77. P. 211–219.
17. *Ravishankara A.R.* Water vapor in the lower stratosphere // Science. 2012. V. 337, N 6096. P. 809–810.
18. *Anderson J.G., Wilmouth D.M., Smith J.B., Sayres D.S.* UV Dosage levels in summer: Increased risk of ozone loss from convectively injected water vapor // Science. 2012. V. 337, N 6096. P. 835–839.
19. *Ueyama R., Jensen E.J., Pfister L., Diskin G.S., Bui T.P., Dean-Day J.M.* Dehydration in the tropical tropopause layer: A case study for model evaluation using aircraft observations // J. Geophys. Res.: Atmos. 2014. V. 119, N 9. P. 5299–5316.
20. *Schoeberl M.R., Selkirk H.B., Vųmel H., Douglass A.R.* Sources of seasonal variability in tropical upper troposphere and lower stratosphere water vapor and ozone: Inferences from the Ticosonde data set at Costa Rica // J. Geophys. Res.: Atmos. 2015. V. 120, N 18. P. 9684–9701.
21. *Rolf C., Afchine A., Bozem H., Buchholz B., Ebert V., Guggenmoser T., Hoor P., Konopka P., Kretschmer E., Müller S., Schlager H., Spelten N., Suminska-Ebersoldt O., Ungermann J., Zahn A., Krämer M.* Transport of Antarctic stratospheric strongly dehydrated air into the troposphere observed during the HALO-ESMVal campaign 2012 // Atmos. Chem. Phys. 2015. V. 15, N 16. P. 9143–9158.
22. *Sofieva V.F., Tamminen J., Kyrölä E., Mielonen T., Veefkind P., Hassler B., Bodeker G.E.* A novel tropopause-related climatology of ozone profiles // Atmos. Chem. Phys. 2014. V. 14, N 1. P. 283–299.
23. *Petropavlovskikh I., Ray E., Davis S.M., Rosenlof K., Manney G., Shetter R., Hall S.R., Ullmann K., Pfister L., Hair J., Fenn M., Avery M., Thompson A.M.* Low ozone bubbles observed in the tropical tropopause layer during the TC4 campaign in 2007 // J. Geophys. Res. 2010. V. 115. P. D00J16. DOI: 10.1029/2009JD012804.
24. *Konopka P., Pan L.L.* On the mixing-driven formation of the Extratropical Transition Layer (ExTL) // J. Geophys. Res. 2012. V. 117. P. D18301. DOI: 10.1029/2012JD017876.
25. *Berchet B., Paris J.-D., Ancellet G., Law K.S., Stohl A., Nedelec Ph., Arshinov M.Yu., Belan B., Ciais Ph.* Tropospheric ozone over Siberia in spring 2010: Remote influences and stratospheric intrusion // Tellus B. 2013. V. 65. P. 19688.
26. *Homeyer C.R., Bowman K.P., Pan L.L., Atlas E.L., Gao R.-S., Campos T.L.* Dynamical and chemical characteristics of tropospheric intrusions observed during START08 // J. Geophys. Res. 2011. V. 116. P. D06111. DOI: 10.1029/2010JD015098.
27. *Анохин Г.Г., Антохин П.Н., Аршинов М.Ю., Барсук В.Е., Белан Б.Д., Белан С.Б., Давыдов Д.К., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Козлов В.С., Морозов М.В., Панченко М.В., Пеннер И.Э., Пестунов Д.А., Сиков Г.П., Симоненков Д.В., Синицын Д.С., Толмачев Г.Н., Филиппов Д.В., Фофонов А.В., Чернов Д.Г., Шаманаев В.С., Шмаргунов В.П.* Самолет-лаборатория Ту-134 «Оптик» // Оптика атмосф. и океана. 2011. Т. 24, № 9. С. 805–816.
28. *Отмахов В.И., Петрова Е.В., Отмахова З.И., Лапова Т.В.* Химико-атомно-эмиссионный спектральный анализ атмосферных и промышленных аэрозолей на содержание тяжелых металлов // Оптика атмосф. и океана. 1999. Т. 12, № 4. С. 341–344.
29. *Belan B.D., Ivlev G.A., Kozlov A.V., Rasskazchikova T.M., Simonenkov D.V., Tolmachev G.N.* Typisation of the chemical composition of the tropospheric aerosol of the south of Western Siberia by the air mass // Proc. SPIE. 2018. V. 10833. DOI: 10.1117/12.2504604.
30. *Голобокова Л.П., Ходжер Т.В., Изосимова О.Н., Зенкова П.Н., Почуфаров А.О., Хуриганова О.И., Онищук Н.А., Маринайте И.И., Полькин В.В., Радионов В.Ф., Сакерин С.М., Лисицын А.П., Шевченко В.П.* Химический состав атмосферного аэрозоля в арктическом районе по маршрутам морских экспедиций 2018–2019 гг. // Оптика атмосф. и океана. 2020. Т. 33, № 6. С. 421–429; *Golobokova L.P., Khodzher T.V., Izosimova O.N., Zenkova P.N., Pochyufarov A.O., Khuriganowa O.I., Onishyuk N.A., Marinayte I.I., Polkin V.V., Radionov V.F., Sakerin S.M., Lisitzin A.P. and Shevchenko V.P.* Chemical composition of atmospheric aerosol in the Arctic region and adjoining seas along the routes of marine expeditions in 2018–2019 // Atmos. Ocean. Opt. 2020. V. 33, N 5. P. 480–489. DOI: 10.15372/AOO20200601.
31. *Golobokova L.P., Khodzher T.V., Khuriganova O.I., Marinayte I.I., Onishchuk N.A., Rusanova P., Potemkin V.L.* Variability of chemical properties of the atmospheric aerosol above lake Baikal during large wildfires in Siberia // Atmosphere. 2020. V. 11, N 11. P. 1230. DOI: 10.3390/atmos11111230.
32. *Иванова А.Р.* Тропопауза-многообразие определений и современные подходы к идентификации // Метеорол. и гидрол. 2013. № 12. С. 23–36.
33. *Prather M.J., Zhu X., Tang Q., Hsu J., Neu J.L.* An atmospheric chemist in search of the tropopause // J. Geophys. Res. 2011. V. 116. P. D04306. DOI: 10.1029/2010JD014939.
34. *Иванова А.Р.* Наклон тропопаузы как характеристика ее деформации // Метеорол. и гидрол. 2011. № 2. С. 17–29.
35. *Хромов С.П.* Основы синоптической метеорологии. Л.: Гидрометеоиздат, 1948. 700 с.
36. *Матвеев Л.Т.* Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. СПб.: Гидрометеоиздат, 2000. 777 с.
37. *Remsberg E.E.* Methane as a diagnostic tracer of changes in the Brewer–Dobson circulation of the stratosphere // Atmos. Chem. Phys. 2015. V. 15, N 7. P. 3739–3754.
38. *Bozem H., Hoor P., Kunkel D., Köllner F., Schneider J., Herber A., Schulz H., Leaitch W.R., Aliabadi A.A., Willis M.D., Burkart J., Abbatt J.P.D.* Characterization of transport regimes and the polar dome during Arctic spring and summer using in situ aircraft measurements // Atmos. Chem. Phys. 2019. V. 19, N 23. P. 15049–15071.
39. *Oelhaf H., Sinnhuber B.-M., Woiwode W., Bönisch H., Bozem H., Engel A., Fix A., Friedl-Vallon F., Grooß J.-U., Hoor P., Johansson S., Jurkat-Witschas T., Kaufmann S., Krämer M., Krause J., Kretschmer E., Lörks D., Marsing A., Orphal J., Pfeilsticker K., Pitts M., Poole L., Preusse P., Rapp M., Riese M., Rolf Ch., Ungermann J., Voigt Ch., Volk C.M., Wirth M., Zahn A., Ziereis H.* POLSTRACC // Bull. Am. Meteorol. Soc. 2019. V. 100, N 12. P. 2634–2664.
40. *Volz A., Enhalt D.H., Derwent R.G.* Seasonal and latitudinal variations of ^{14}CO and the tropospheric concentration of OH radicals // J. Geophys. Res. 1981. V. 86, N 5. P. 5163–5171.
41. *Enhalt D.H.* The atmospheric cycle of methan // Tellus. 1974. V. 26, N 1. P. 58–70.

42. *Liang Q., Rodriguez J.M., Douglass A.R., Crawford J.H., Olson J.R., Apel E., Bian H., Blake D.R., Brune W., Chin M., Colarco P.R., da Silva A., Diskin G.S., Duncan B.N., Huey L.G., Knapp D.J., Montzka D.D., Nielsen J.E., Pawson S., Riemer D.D., Weinheimer A.J., Wisthaler A.* Reactive nitrogen, ozone and ozone production in the Arctic troposphere and the impact of stratosphere-troposphere exchange // Atmos. Chem. Phys. 2011. V. 11, N 24. P. 13181–13199.
43. *Varotsos C., Christodoulakis J., Tzanis C., Cracknell A.P.* Signature of tropospheric ozone and nitrogen dioxide from space: A case study for Athens, Greece // Atmos. Environ. 2014. V. 89. P. 721–730.
44. *Ивлев Л.С.* Химический состав и структура атмосферных аэрозолей. Л.: Изд-во ЛГУ, 1982. 366 с.
45. *Шакина Н.П., Кузнецова И.Н., Иванова А.Р.* Анализ случаев стратосферных вторжений, сопровождаемых повышением радиоактивности в приземном воздухе // Метеорол. и гидрол. 2000. № 2. С. 53–60.
46. *Cho H.-M., Hong Y.-L., Kim G.* Atmospheric depositional fluxes of cosmogenic 35S and 7Be: Implications for the turnover rate of sulfur through the biosphere // Atmos. Environ. 2011. V. 45, N 25. P. 4230–4234.
47. *Jurkat T., Kaufmann S., Voigt Ch., Schäuble D., Jeßberger Ph., Ziereis H.* The airborne mass spectrometer AIMS – Part 2: Measurements of trace gases with stratospheric or tropospheric origin in the UTLS // Atmos. Meas. Tech. 2016. V. 9, N 4. P. 1907–1923.
48. *Schneider J., Weigel R., Klimach T., Dragoneas A., Appel O., Hünig A., Molleker S., Köllner F., Clemen H.-Ch., Eppers O., Hoppe P., Hoor P., Mahnke Ch., Krämer M., Rolf Ch., Grooß J.-U., Zahn A., Obersteiner F., Ravegnani F., Ulanovsky A., Schlager H., Scheibe M., Diskin G.S., DiGangi J.P., Nowak J.B., Zöger M., Borrmann S.* Aircraft-based observation of meteoric material in lower-stratospheric aerosol particles between 15 and 68N // Atmos. Chem. Phys. 2021. V. 21, N 2. P. 989–1013.

P.N. Antokhin, V.G. Arshinova, M.Yu. Arshinov, B.D. Belan, S.B. Belan, L.P. Golobokova, D.K. Davydov, G.A. Ivlev, A.V. Kozlov, A.S. Kozlov, V.I. Otmahov, T.M. Rasskazchikova, D.V. Simonenkov, G.N. Tolmachev, A.V. Fofonov. **Differences in air composition between troposphere and stratosphere near tropopause.**

A change in the air composition during the transition from the troposphere to the stratosphere is investigated on the basis of aircraft sounding data. Distribution of eight gases, dispersion and chemical composition of aerosol is analyzed. It is shown that at the intersection of the tropopause, the concentrations of N_2O, CO, and CH_4 sharply decrease, while of O_3 and NO_2 and the counting concentration of aerosol, on the contrary, increase. In the elemental composition, Si dominates the tropopause; in the ion, SO_4^{2-}. Terrigenous elements Al, Cu, and Fe are dominated in the troposphere; and among ions, a set of several compounds varies with region. Noticeably different particle dispersions are also identified.