

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра метеорологии и климатологии

**Изменчивость метеорологических параметров на уровне тропопаузы в
Арктике**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

студентки 2 курса 215 группы

направления 05.04.05 Прикладная гидрометеорология

географического факультета

Магеррамовой Светланы Алексеевны

Научный руководитель

зав.кафедрой, к.г.н., доцент

М.Ю. Червяков

Зав. кафедрой

доцент, к.г.н.

М.Ю. Червяков

Саратов 2021

ВВЕДЕНИЕ

Изучение тропопаузы является актуальным во многих отношениях, информация о динамической, химической и радиационной связи между стратосферой и тропосферой представляют огромную важность, так как даже слабые изменения составляющих могут привести к существенным изменениям в глобальном климате [1-4]. Такой обмен влияет на содержание стратосферного озона, тропосферное загрязнение и глобальное потепление.

В настоящее время также актуально исследование тропосферного озона. Озон играет ключевую роль в химических и фотохимических процессах в тропосфере, и истощение озонового слоя вызывает существенные изменения в радиационном балансе земной атмосферы. Исследование взаимосвязи динамики тропопаузы и ОСО может служить критерием изменчивости регионального климата.

Целью магистерской работы является исследование метеорологических параметров тропопаузы и их связь с пространственно-временной изменчивостью тропосферного озона.

Для достижения этой цели были поставлены и решены следующие задачи:

- 1) построить графики временного хода метеорологических величин и оценить изменение высоты арктической тропопаузы на фоне меняющегося климата;
- 2) выявить изменчивость температурного режима на высоте тропопаузы для станции Greenland Environmental Observatory at Summit (GEOSummit), «Черский» и «Нарьян-Мар»
- 3) изучить процессы деформации тропопаузы в связи с изменениями общего содержания озона;
- 4) рассчитать параметры долговременных изменений отношения смеси озона в тропосфере, и рассмотреть их связи с и изменениями других метеорологических параметров.

Основное содержание работы

Используя базу данных Университета Вайоминга[5], было проведено исследование изменчивости высоты нижней границы тропопаузы и температуры воздуха на этом уровне для трех станций арктического региона: «Greenland Environmental Observatory at Summit (GEOSummit)», аэрологических станций «Черский» и «Нарьян-Мар».

В ходе работы было проанализировано 3785 подъемов радиозондов, оценивались вертикальные профили температуры в ночное (срок 00) и дневное (срок 12) время в летние месяцы 2012-2018 гг.

Исходя из таблицы 1, для станции «GEOSummit», которая располагается в Гренландии, максимальные высоты отмечались в разные месяцы и колебались в пределах 11,3-13,3 км. Наиболее высокая тропопауза наблюдалась в июле 2012 года и составила 13317 м ($-66,5^{\circ}\text{C}$). Минимальные высоты тропопауз для данной станции варьировали в пределах 6,3-7,9 км, а самая низкая тропопауза была зафиксирована в августе 2013 года на высоте 6385 м ($-42,7^{\circ}\text{C}$).

Для станции «Черский», за рассматриваемый период высота тропопаузы колебалась в пределах 10-11,2 км. Наибольшая высота тропопаузы наблюдалась в июле 2016 года и составила 15666 м ($-51,9^{\circ}\text{C}$). Самая низкая тропопауза была зафиксирована в июне 2014 года на высоте 5573 м, ($-36,5^{\circ}\text{C}$).

Для станции «Нарьян-Мар» максимальные высоты варьировали в пределах 12,4-13,5 км. Наибольшая высота тропопаузы наблюдалась в июле 2014 года и составила 13447 м ($-53,5^{\circ}\text{C}$). Самая низкая тропопауза была зафиксирована в июне 2017 года на высоте 6655 м ($-41,3^{\circ}\text{C}$).

Увеличение или уменьшение толщины тропосферы и высоты тропопаузы летом в Арктике, возможно, зависит от интенсивного вертикального обмена, который в свою очередь зависит от притока солнечной радиации к земной поверхности, увеличивая турбулентный обмен до больших высот. Также повышение тропопаузы может быть вызвано похолоданием в нижней стратосфере.

Таблица 1 – Высота тропопаузы в летний период 2012-2018 гг.
(составлено автором)

Высота, м		Годы						
		2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
GEOSummit	максимальная	13317	11370	11725	12062	11630	12093	11817
	минимальная	7076	6385	6803	7701	7964	6987	6514
	средняя	10382	9747	10153	10040	10294	10125	9821
Черский	максимальная	13612	11882	13710	11865	15666	12146	12489
	минимальная	5618	7537	5573	6676	7419	6486	6311
	средняя	10025	10757	11197	10399	10430	9951	10437
Нарьян-Мар	максимальная	12430	12429	13447	12390	12915	12821	12498
	минимальная	8061	7039	8349	7274	7361	6655	6918
	средняя	10415	10619	10597	9968	10687	10768	10654

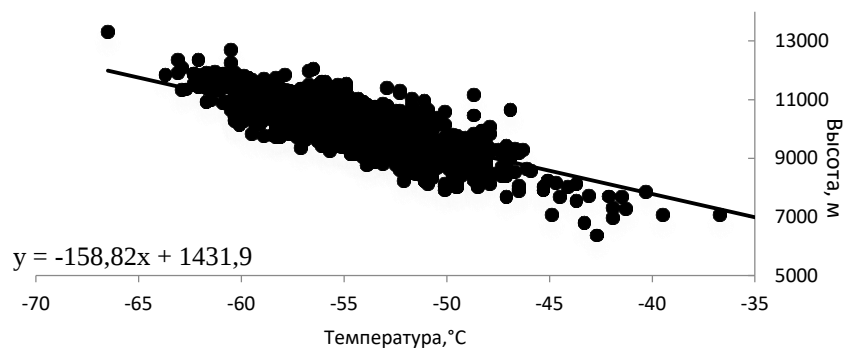
Изменчивость температуры в течение летнего периода зависит не только от физико-географических условий станции, но и от высоты нижнего уровня тропопаузы.

Для тропопауз, наблюдаемых на станции «GEOSummit», максимальные значения температуры варьировали в пределах от -46,5 до -36,7. Минимальные – от -66,5 до -60,1°C. Изменение средних значений температур колебалось от -55,5 до -53,7°C.

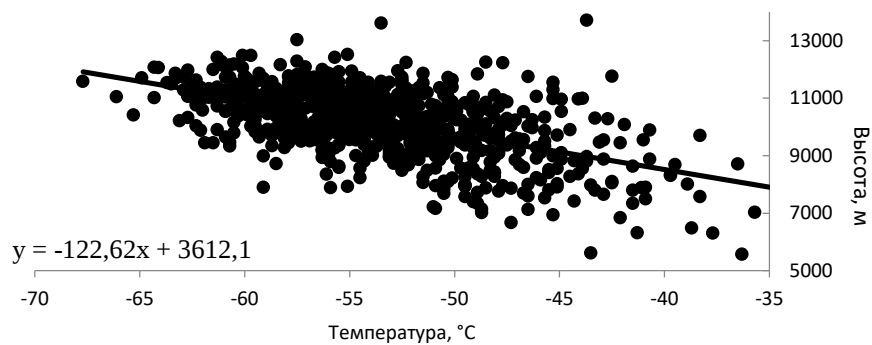
Для аэрологической станции «Черский» максимальные значения температуры варьировали в пределах от -42,5 до -34,3°C. Минимальные – от -67,7 до -60,6°C. Средние значения температур изменялись от -56,0 до -51,6°C.

На станции «Нарьян-Мар» максимальные значения температуры варьировали в пределах от -37,9 до -42,3°C. Минимальные – от -67,7 до -60,9°C. Изменение средних значений температур колебалось от -56,7 до -50,9°C.

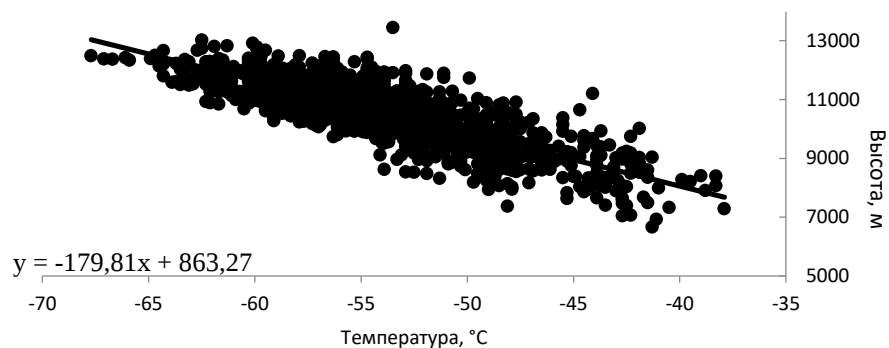
Коэффициенты взаимосвязи температуры и высоты тропопаузы достаточно высоки. Для станции «Нарьян-Мар» коэффициент линейной корреляции он равен – 1,0 , для «GEOSummit»: -0,83 и для «Черский»: -0,70. Знак минус перед коэффициентом корреляции указывает на то, что с ростом высоты температура тропопаузы понижается в соответствии с рисунком 1.



«GEOSummit»



«Черский»



«Нарьян-Мар»

Рисунок 1 – Связь высоты тропопаузы и температуры на ее уровне для станций в 2012–2018 г (июнь-август) (составлено автором)

Для оценки годовой изменчивости характеристик тропопаузы на станциях Черский и GEOSummit было обработано 3552 радиозондовых сообщения за период с января 2012 г. по декабрь 2014 г. Данные представлены в таблице 2 и 3.

Таблица 2 - Характеристика метеовеличин на нижней границе тропопаузы для станции Черский, 2012-2014 гг. (составлено автором)

<i>Высота, км</i>	4,0 -	6,0 -	8,0 -	10,0 -	12,0 -	> 14,0	<i>Всего</i>
	5,9	7,9	9,9	11,9	13,9		
Число случаев	4	190	978	546	17		1735
%	0,2	11,0	56,4	31,5	1,0		100
Среднее, м	5507	7531	9115	10695	12658		9465
<i>Температура, °С</i>	<-70	-70...-60	-60...-50	-50...-40	-40...-30	-30...-20	<i>Всего</i>
Число случаев	12	551	977	185	10		1735
%	0,7	31,8	56,3	10,7	0,6		100
Среднее, °С	-72,1	-63,2	-55,6	-47,1	-37,6		-57,1
<i>Скорость ветра, м/с</i>	<10	11 - 20	21 - 30	31 - 40	41 - 50	>50	<i>Всего</i>
Число случаев	182	537	605	238	51	114	1728
%	10,5	31,1	35,0	13,8	3,0	6,6	100
Среднее, м/с	7	16	25	34	45	72	25

Таблица 3 - Характеристика метеовеличин на нижней границе тропопаузы для станции о. Гренландия, 2012-2014 гг. (составлено автором)

<i>Высота, км</i>	4,0 -	6,0 -	8,0 -	10,0 -	12,0 -	> 14,0	<i>Всего</i>
	5,9	7,9	9,9	11,9	13,9		
Число случаев	7	160	1050	582	17	1	1817
%	0,4	8,8	57,8	32,0	0,9	0,1	100
Среднее, м	5328	7400	9135	10691	12679	14911	9503
<i>Температура, °С</i>	<-70	-70...-60	-60...-50	-50...-40	-40...-30	-30...-20	<i>Всего</i>
Число случаев	102	475	1113	125	2	0	1817
%	5,6	26,1	61,3	6,9	0,1	0,0	100
Среднее, °С	-73	-63,9	-55,2	-47,9	-38,1	0	-57,9
<i>Скорость ветра, м/с</i>	<10	11 - 20	21 - 30	31 - 40	41 - 50	>50	<i>Всего</i>
Число случаев	102	220	269	207	148	234	1180
%	8,6	18,6	22,8	17,5	12,5	19,8	100
Среднее, м/с	7	16	25	35	45	67	35

Для станции Черский также чаще всего (88 % за период) отмечается тропопауза на высоте 8-11 км. Высота не превышала 13 710 м (30 июня 2014 г.), а 30 января 2014 г. тропопауза опустилась до 5 170 м. Средняя высота за рассмотренный период 9 465 м.

В 57 % всех случаев температура находилась в пределе $-50..-60^{\circ}\text{C}$ и средняя температура равна $-57,1^{\circ}\text{C}$. Самая теплая тропопауза $-34,3^{\circ}\text{C}$ наблюдается 12 июля 2014 г. (высота 7 802 м), холодная – 18 января 2012 г. ($-75,3^{\circ}\text{C}$ на высоте 12 020 м.)

В среднем за год скорость ветра составила 25 м/с, максимум (95 м/с) был отмечен 23 августа 2013 г на высоте 8 677 м. в 12 ч ВСВ.

Обнаружено, что в среднем за исследуемый период на станции Гренландия тропопауза наблюдалась на высоте 8 – 11 км практически в 90 % случаев. В годовом ходе максимальная высокая повторяемость низкой тропопаузы пришлась на март и ноябрь. Самая высокая тропопауза (выше 11 км) наблюдалась чаще всего в июле-августе.

Наиболее часто (61,3 % случаев) значения температуры находятся в пределе от -50 до -60°C . Самая высокая температура ($-36,7^{\circ}\text{C}$) отмечалась 9 июня 2014 г. на высоте 7 085 м, а самая минимальная температура $-77,7^{\circ}\text{C}$ отмечена 31 января 2014 г. в 00 ч на высоте 11 205 м.

За весь период в среднем скорость ветра составляла 35 м/с максимум в мае (46 м/с) и минимум в июне и сентябре (31 м/с). Такие изменения говорят, скорее всего, об изменении циркуляции и миграции струйных течений, связанных с активностью планетарной высотной фронтальной зоной.

Для получения информации об ОСО использовались данные измерения прибора OMI спутника AURA с сервера, принадлежащего Национальному управлению по воздухоплаванию и исследованию космического пространства США (NASA) [6].

При сравнении данных 2012 – 2014 гг. станций заметно, что ход озона в Гренландии и на станции Черский практически одинаков. Максимум наблюдается в середине марта – начале апреля, а минимум в августе. На станции о. Гренландия второй минимум наблюдается в октябре (согласно рисункам 2 и 3).

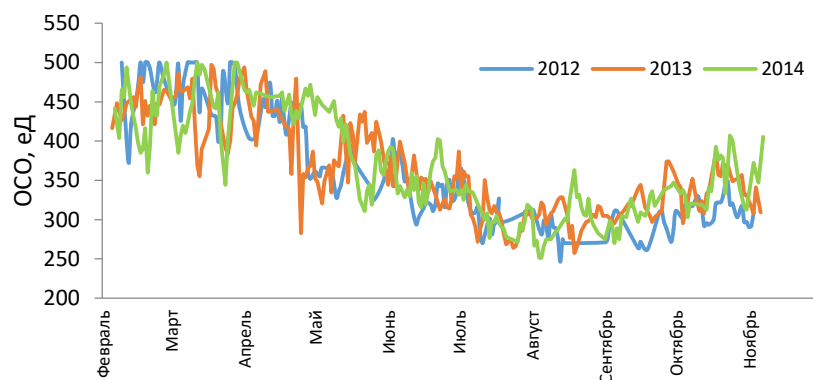


Рисунок 2 – Динамика ОСО на станции Черский 2012-2014 гг. (составлено автором)

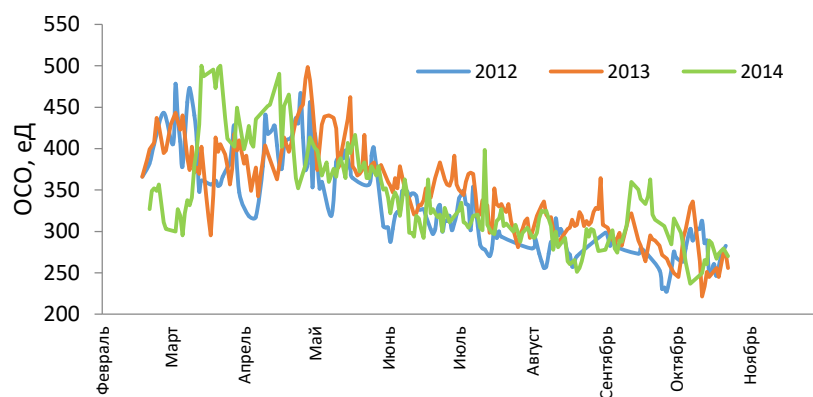


Рисунок 3 - Динамика ОСО на станции Гренландия 2012-2014 гг. (составлено автором)

Оценка связи высоты тропопаузы и содержания озона показала их отрицательную связь (в соответствии с таблицей 9). Весной коэффициенты корреляции высоки ($-0,77$ на GEOSummit, 2012 г. и $-0,73$ в Черском, 2013 г.), а осенью коэффициенты совсем малы – до $-0,01$ (Гренландия, 2014 г.) и в среднем равны $-0,33$.

Отрицательные коэффициенты корреляции между ОСО и высотой тропопаузы отражают эффект смены воздушных масс и подтверждает доводы о накоплении озона в циклонах и разрушении его в антициклонах [7].

Анализ взаимосвязи высоты тропопаузы и ОСО в летний период времени (июнь-август) на станциях GEOSummit, Черский, Нарьян-Мар проводился с использованием данных за период 2012-2018 гг.

На рисунках 4-6 можно увидеть, что на станции Нарьян-Мар значения ОСО варьировали в пределах от 396 до 214 еД. В 2012-2018 гг. на станции Черский значения ОСО изменяются от 246,5 до 410,2 еД, в Гренландии ОСО регистрировалось в пределе 242-398 еД.

Средний годовой корреляционный коэффициент в Гренландии составил – 0,49. В Нарьян-Маре средний коэффициент равен -0,63. На станции Черский в период 2012-2018 гг коэффициент равен -0,56.

Замечено, что при отмеченных в рассмотренный период максимальных значениях ОСО высота нижней границы тропопаузы увеличивалась относительно средних значений. В целом, изменение высоты тропопаузы летом соответствует годовому ходу ОСО.

В верхней тропосфере высота тропопаузы и отношение смеси озона в течение года относительно стабильны. Изменения ОСО связаны с изменениями в нижней стратосфере и могут вызываться динамическими факторами. Динамика атмосферы влияет, главным образом, на положение тропопаузы: при повышении высоты тропопаузы также уменьшается и ОСО.

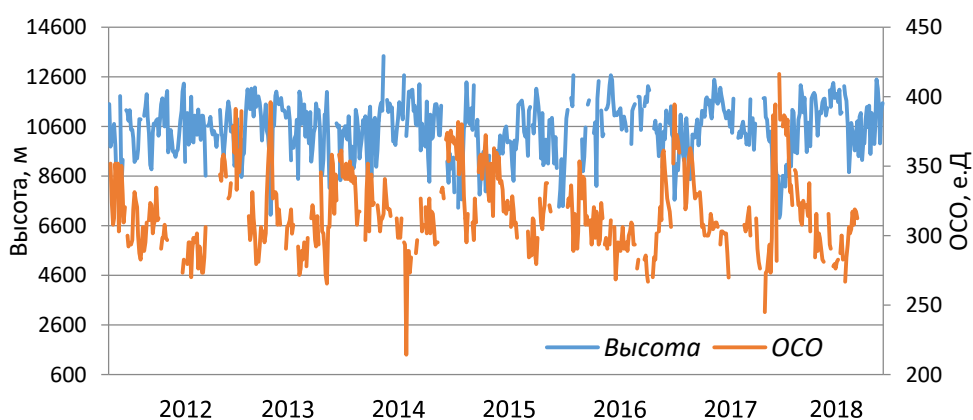


Рисунок 4 - Ход высоты нижней границы тропопаузы и ОСО на станции «Нарьян-Мар» (составлено автором)

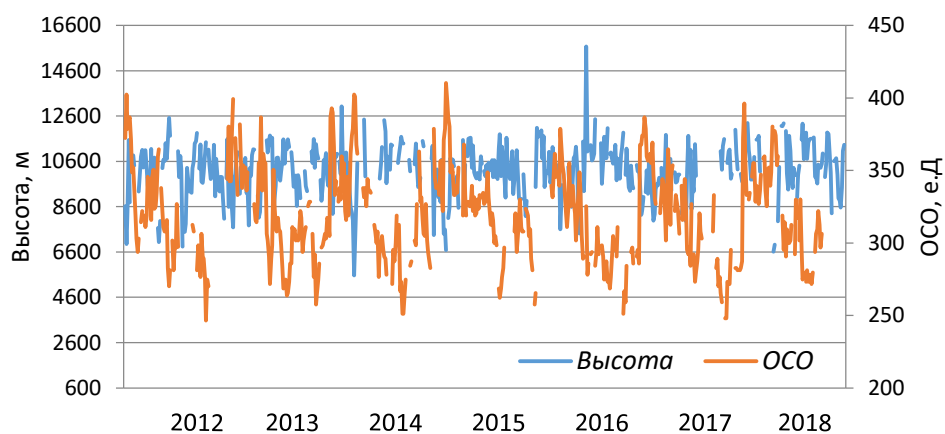


Рисунок 5 - Ход высоты нижней границы тропопаузы и ОСО на станции «Черский» (составлено автором)

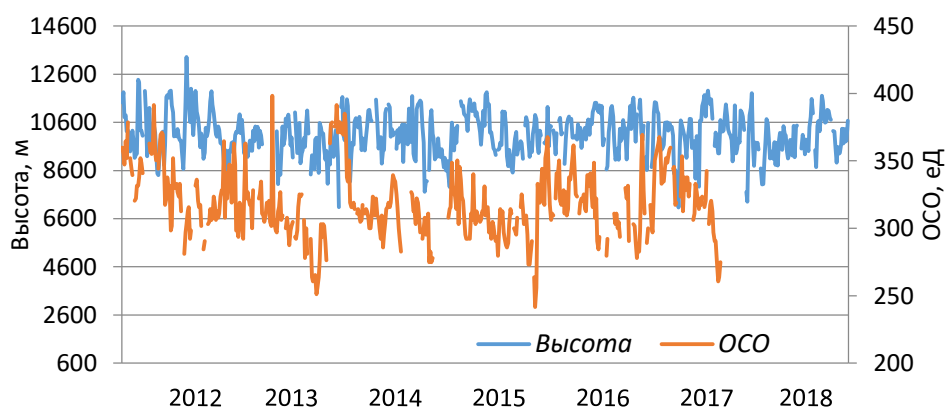


Рисунок 6 - Ход высоты нижней границы тропопаузы и ОСО на станции «GEOSummit» (составлено автором)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обобщая полученные результаты исследований на станциях GEOSummit, Черский, Нарьян-Мар в 2012–2018 гг., выяснено, что сезонный ход температуры нижней границы тропопаузы согласуется с сезонными изменениями высоты тропопаузы. Чем выше располагается тропопауза, тем ниже значения температуры на ее уровне [8-14].

В летний период времени высота тропопаузы увеличивается на 50-200 м и амплитуда колебаний высоты достигает 7 и более км. Анализируя температуры на нижней границе тропопаузы, выделяются её существенные временные вариации, амплитуда которых может за сезон достигать 30 и более градусов и общее её снижение на 2-5 градусов.

В верхней тропосфере высота тропопаузы и отношение смеси озона в течение года относительно стабильны, при повышении высоты тропопаузы также уменьшается и ОСО.

Высота тропопаузы и скорость ветра взаимосвязаны. При увеличении высоты тропопаузы происходит увеличение скорости ветра. Максимальные скорости, достигающие 60-100 м/с и выше располагаются на высотах 9-10 км.

Дополнительно в ходе анализа данных радиозондирования для рассматриваемых арктических станций найдены эмпирические уравнения взаимосвязи, средние для летнего сезона 2012–2017 гг., которые имеют вид: $t = -0,005h - 3,6$ для обсерватории «GEOSummit», $t = -0,0082h + 29,9$ для станции «Черский», $t = -0,0056h + 5,8$ для станции «Нарьян-Мар». Здесь t – температура воздуха на уровне нижней границы тропопаузы, °C, h – высота нижней границы тропопаузы, м.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Иванова, А.Р. Динамика арктической тропопаузы и её связь с фронтогенезом /А.Р. Иванова, Н.И. Богаевская. С-Пб.: Гидрометеиздат, 2005. -20 с
- 2 Угрожающее потепление / Под ред. д-ра физ-мат наук. В.В. Лыццов. Л., 1987. -151с.
- 3 ACIA, Impacts of Warming Arctic: Arctic Climate Impact Assessment. CambridgeUniversityPress, 2004 [Электронный ресурс]: [сайт]. URL: <http://www.acia.uaf.edu> (дата обращения: 15.04.2021). -Загл. с экрана. -Яз. англ.
- 4 The Arctic [Электронный ресурс]: [сайт]. URL: <https://arctic.ru/climate/> (дата обращения: 15.04.2021). -Загл. с экрана. -Яз. англ.
- 5 University of Wyoming College of Engineering [Электронный ресурс]: [сайт]. URL: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html> (дата обращения: 15.04.2018). -Загл. с экрана. -Яз. англ.
- 6 NASA/Goddard Space Flight Center's Database [Электронный ресурс]: [сайт]. URL: <ftp://toms.gsfc.nasa.gov> (дата обращения 20.12.2020) -Загл. с экрана. -Яз. англ.
- 7 The total ozone field separated into meteorological regimes. Part I: defining the regimes / R. D. Hudson [et al.]. // Journal of the Atmospheric Sciences. – 2003. – Vol. 60. – P. 1669–1677.
- 8 Червяков, М. Ю. Изменчивость характеристик тропопаузы в Арктике по данным дистанционного радиозондирования атмосферы / М. Ю. Червяков, С. А. Шаркова // Сборник тезисов докладов Семнадцатой Всероссийской Открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М. : ИКИ РАН, 2019. – С. 252.
- 9 Червяков, М. Ю. Изменчивость характеристик тропопаузы в Арктике по данным радиозондирования атмосферы / М. Ю. Червяков, С. А. Шаркова //

- Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Науки о Земле. – 2019. – Т. 19, вып. 1. – С. 42–48.
- 10 Шаркова, С. А. Динамика тропопаузы над территорией северных широт по радиозондовым данным / С. А. Шаркова, М. Ю. Червяков // Материалы Восемнадцатой Всероссийской Открытой конференции с международным участием «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 16–20 ноября. 2020. М. : ИКИ РАН, 2020. – С. 191.
 - 11 Шаркова, С. А. Исследование изменчивости характеристик тропопаузы в арктической зоне по данным радиозондирования / С. А. Шаркова, М. Ю. Червяков // Молодежь. Наука. Инновации: сборник докладов 66–й международной молодежной научно–технической конференции, 26–28 ноября 2018 г. Том II. Владивосток : Мор. гос. ун–т, 2018. – С. 87–92.
 - 12 Шаркова, С.А. Исследование изменчивости характеристик тропопаузы в арктической зоне по данным радиозондирования / С. А. Шаркова, М. Ю. Червяков // Труды 61–й Всероссийской научной конференции МФТИ. 19–25 ноября 2018 года. Фундаментальная и прикладная физика. М. : МФТИ, 2018. – С. 21–22.
 - 13 Шаркова, С.А. Исследование изменчивости характеристик тропопаузы в арктической зоне по данным радиозондирования / С. А. Шаркова, М. Ю. Червяков // Труды Кубанского государственного аграрного университета. – 2018. – С. 21.
 - 14 Шаркова, С.А. Оценка многолетней изменчивости параметров тропопаузы северных широт / С. А. Шаркова, М. Ю. Червяков // Системы контроля окружающей среды – 2020 : Тезисы докладов Международной научно–технической конференции. Севастополь, 09 – 12 ноября 2020 г. – Севастополь: ИП Куликов А. С., 2020. – 47с.