

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

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

Кафедра метеорологии и климатологии

**Пространственно – временная изменчивость характеристик тропопаузы в
Арктике по данным радиозондирования**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студента (ки) 4 курса 411 группы

направления (специальности) 05.03.05 Прикладная гидрометеорология
код и наименование направления (специальности)

географического факультета

наименование факультета, института, колледжа

Шарковой Светланы Алексеевны

фамилия, имя, отчество

Научный руководитель

доцент, к.г.н.

должность, уч. степень, уч. звание

М.Ю. Червяков

подпись, дата

М.Ю. Червяков

инициалы, фамилия

И.о. зав. кафедрой

доцент, к.г.н.

должность, уч. степень, уч. звание

М.Ю. Червяков

подпись, дата

М.Ю. Червяков

инициалы, фамилия

Саратов 2019

Введение. В последние десятилетия во многих странах изменение климата стало одной из главных тем для исследования. Весомой причиной для этого послужил глобальный характер изменений и их последствий для экономической и социальной жизни человека. Климатические изменения проявляются не только в приземном слое, но и на высоте тропопаузы, разделяющей тропосферу и стратосферу.

Изменение характеристик тропопаузы косвенно зависит от потоков тепла в тропосфере и нижней стратосфере, а также от условий динамических и радиационных связей между ними [1-4].

Информация об изменении структуры тропопаузы имеет большое значение в условиях меняющегося климата, в особенности для арктического региона. Динамика высоты тропопаузы и колебания температуры на ее уровне могут служить критериями изменчивости земной климатической системы [5]. Полярные зоны являются самыми явными показателями таких изменений.

Наибольший объем информации о поведении климата может быть получен в ходе анализа долговременных рядов данных аэрологических измерений. Радиозондирование является основным средством для получения информации о состоянии тропосферы.

В связи с этим становится актуальным получение информации о пространственно-временной структуре тропопаузы, которая имеет большое значение для целого ряда исследовательских и прикладных задач, особенно в условиях меняющегося климата арктического региона.

Целью настоящей работы заключается в анализе характеристик тропопаузы в арктическом регионе в летний сезон за период с 2012 по 2017 гг., а также расчета и проведения анализа изменчивости высоты нижней границы тропопаузы и температуры на этом уровне. Для этих целей использованы данные трех арктических станций радиозондирования, которые расположены в различных физико-географических условиях.

В задачи исследования входило:

1) при помощи научной литературы рассмотреть методы мониторинга за изменением климата в арктической зоне;

2) построить графики временного хода метеорологических величин и оценить изменение высоты арктической тропопаузы на фоне меняющегося климата;

3) выявить изменчивость температурного режима на высоте тропопаузы для станции Greenland Environmental Observatory at Summit (GEOSummit), «Черский» и «Нарьян-Мар»;

4) найти зависимость температуры на высоте тропопаузы и взаимосвязь с ее высотой.

Основой для исследования выступают научные труды, посвященные теме изменения климата и исследования арктического региона, данные радиозондирования архива Университета Вайоминга [6]. В процессе работы были использованы такие приемы научного исследования, как системный анализ и статистические методы обработки информации.

Основное содержание работы. Используя базу данных, 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». Всего в ходе работы проанализировано 2860 подъемов радиозондов, оценивались вертикальные профили температуры в ночное (срок 00) и дневное (срок 12) время.

Проведенный анализ позволил увидеть, что высота тропопаузы испытывает большие колебания в зависимости от расположения станции, конкретного года и дня месяца (в соответствии с таблицей 1 и рисунками 1-3).

Таблица 1 – Высота тропопаузы в летний период 2012-2017 гг. (составлено автором)

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

Для станции «GEOSummit», 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 с температурой $-66,5^{\circ}\text{C}$. 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 с температурой $-42,7^{\circ}\text{C}$. В среднем, за рассматриваемый период высота тропопаузы колебалась от года к году в пределах 9,8-10,3 км.

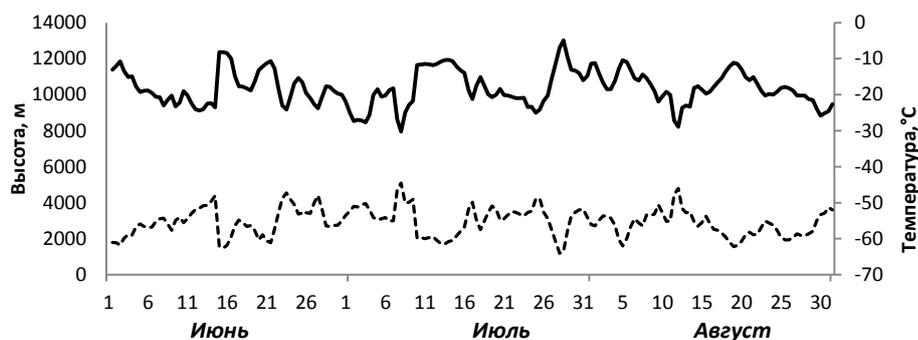


Рисунок 1 – Временная изменчивость высоты тропопаузы (сплошная линия) и температуры (пунктирная линия) на ее уровне в летний период 2012 года для станции «GEOSummit» (составлено автором)

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 с температурой $-53,5^{\circ}\text{C}$. Минимальные высоты тропопауз для данной станции варьировали в пределах 6,7-8,4 км, а самая низкая тропопауза была зафиксирована в июне 2017 года на высоте 6655 м с температурой $-41,3^{\circ}\text{C}$. В среднем, за рассматриваемый период высота тропопаузы колебалась от года к году в пределах 10-10,8 км.

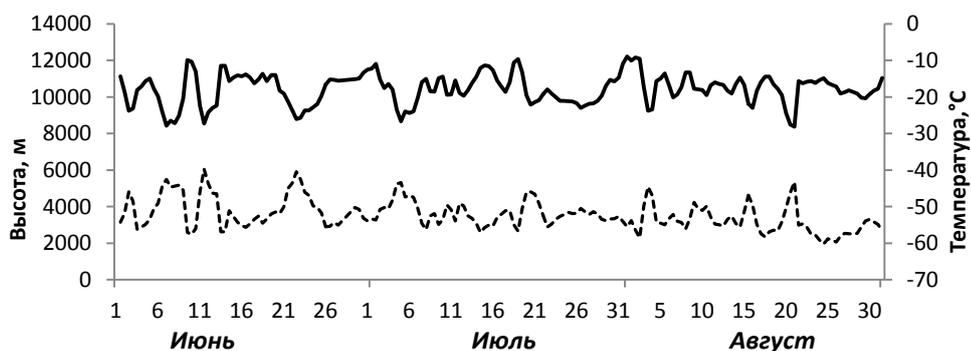


Рисунок 2 – Временная изменчивость высоты тропопаузы (сплошная линия) и температуры (пунктирная линия) на ее уровне в летний период 2012 года для станции «Нарьян-Мар» (составлено автором)

Для станции «Черский», максимальные высоты варьировали в пределах 11,9-15,7 км, что существенно выше, чем в Гренландии. Наибольшая высота тропопаузы наблюдалась в июле 2016 года и составила 15666 м с температурой

-51,9°C. Минимальные высоты тропопауз для данной станции варьировали в пределах 5,6-7,5 км, а самая низкая тропопауза была зафиксирована в июне 2014 года на высоте 5573 м, с температурой -36,5°C. В среднем, за исследуемый период высота тропопаузы колебалась от года к году в пределах 10-11,2 км.

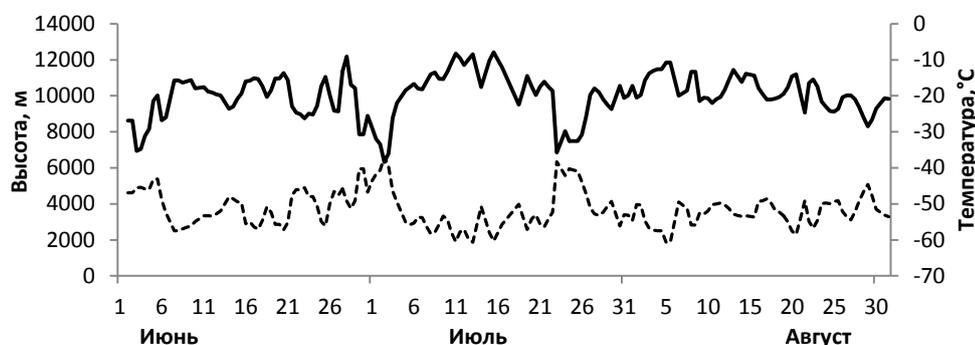


Рисунок 3 – Временная изменчивость высоты тропопаузы (сплошная линия) и температуры (пунктирная линия) на ее уровне в летний период 2012 года для станции «Черский» (составлено автором)

Таким образом, можно заметить, что высота тропопаузы, ее максимальные и минимальные значения в летний период существенно зависят от географического положения аэрологической станции и рассматриваемого периода времени. В летний период времени амплитуда колебаний высоты тропопаузы может достигать 7 и более км. Увеличение или уменьшение толщины тропосферы и высота 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. При оценке изменения высоты тропопаузы необходимо учитывать и другие факторы. В частности, повышение тропопаузы может быть вызвано похолоданием в нижней стратосфере.

Исходя из анализа таблицы 2 стоит отметить, что изменчивость температуры в течение летнего периода существенно зависит не только от физико-географических условий станции, но и от высоты нижнего уровня тропопаузы.

Таблица 2 – Температура на уровне тропопаузы в летний период 2012-2017 гг. (составлено автором)

Температура, °С		Годы					
		2012	2013	2014	2015	2016	2017
GEOSummit	максимальная	-39,5	-42,7	-36,7	-43,1	-46,5	-41,9
	минимальная	-66,5	-60,1	-61,7	-60,9	-62,3	-63,7
	средняя	-55,4	-53,7	-54,2	-54,2	-54,9	-55,5
Черский	максимальная	-35,7	-34,3	-36,3	-42,5	-40,7	-38,3
	минимальная	-60,7	-60,6	-63,1	-61,7	-66,1	-67,7
	средняя	-51,6	-52,7	-53,1	-53,0	-56,0	-54,5
Нарьян-Мар	максимальная	-38,3	-42,3	-41,5	-37,9	-38,8	-41,3
	минимальная	-60,9	-61,5	-64,3	-62,3	-62,7	-67,7
	средняя	-52,7	-53,1	-54,2	-50,9	-54,3	-56,7

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

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

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

Анализ температуры на нижней границе тропопаузы для рассматриваемых станций показал существенные временные вариации температуры, амплитуда которых может за сезон достигать 30 и более градусов. Очевидно, что между температурой на нижней границе тропопаузы и ее высотой существует связь, причем она будет стремиться быть линейной при неизменности вертикального градиента температуры в тропосфере и

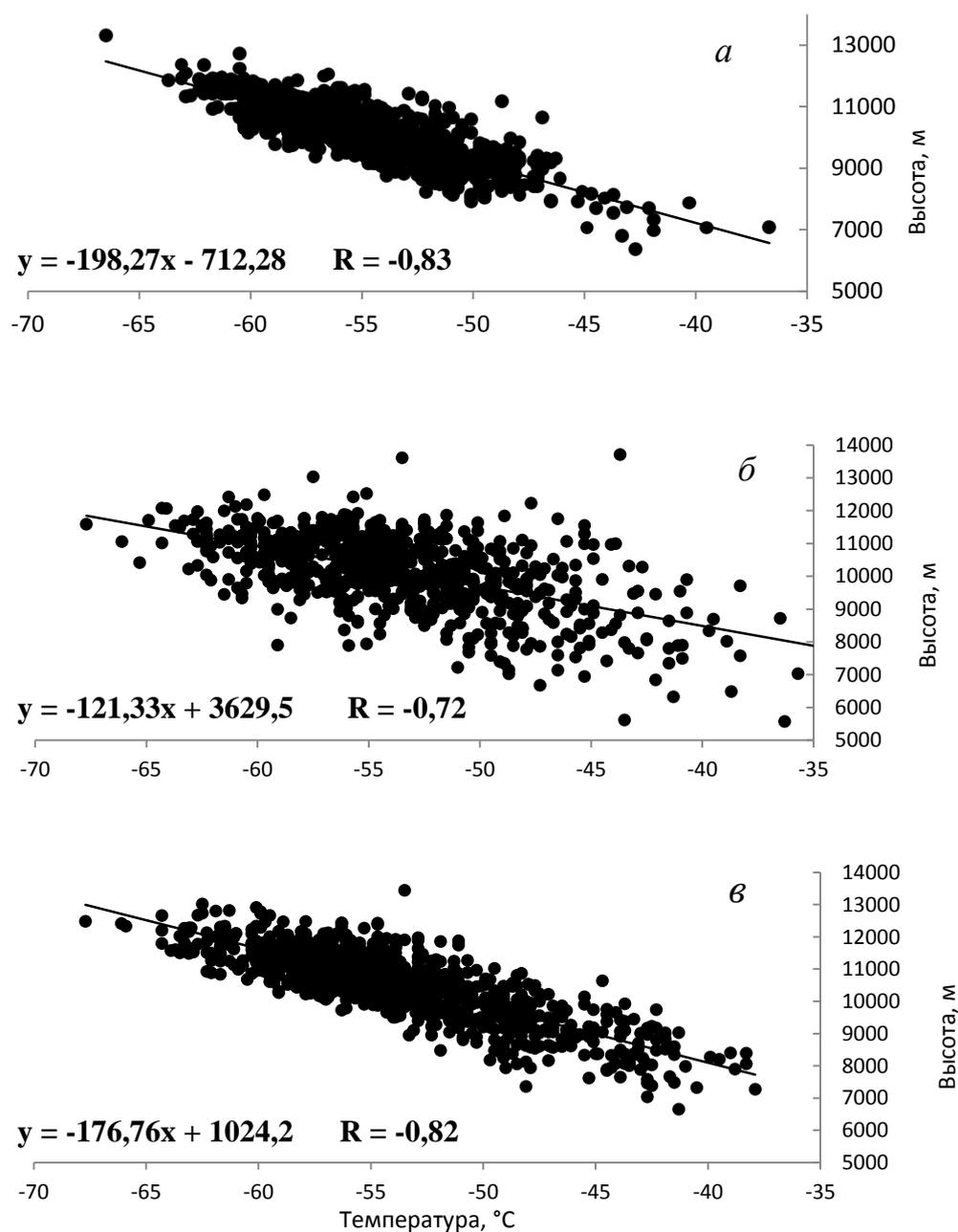
отсутствии инверсионных и изотермических слоев. Тем не менее, эта взаимосвязь будет зависеть также и от других факторов: времени года, условий распределения температуры с высотой, температуры у поверхности земли, адвективных потоков у поверхности земли и на высоте.

Для сопоставления температуры воздуха на уровне тропопаузы и ее высоты в летний период были использованы все имеющиеся попарные (высота-температура) данные для всех тропопауз.

На основе сопоставления характеристик тропопаузы для каждой станции были построены корреляционные диаграммы взаимосвязи температуры и высоты тропопаузы (в соответствии с рисунком 4). По оси абсцисс отложены значения температур, а по оси ординат – высоты нижних границ тропопауз. Рассеяние точек на корреляционных диаграммах довольно велико, особенно для станции Черский. Тем не менее, коэффициенты линейной корреляции взаимосвязи температуры и высоты тропопаузы достаточно высоки для всех трех станций.

Для более детального анализа была рассмотрена изменчивость метеовеличин тропопаузы на станции «GEOSummit». Для этой цели проведен разбор дневных и ночных подъемов радиозондов в период 2012 – 2017 гг. Всего было рассмотрено 1013 сроков.

На рисунке 5 - 6 приведен летний ход высоты нижней границы тропопаузы и значений температуры на этих высотах. В целом, изменение высоты тропопаузы летом над территорией Гренландии имеет сложный характер, так как высота зависит от месяца года, синоптических условий, а так же от затока теплых или холодных воздушных масс. Как видно из рисунка 6, средняя высота тропопаузы равна 10 км.



a – «GEOSummit»; *б* – «Черский»; *в* – «Нарьян-Мар»,

Рисунок 4 - Связь высоты тропопаузы и температуры на ее уровне, 2012-2017 г (июнь-август) (составлено автором)

В ходе анализа данных можно выявить обратную зависимость высоты тропопаузы и значения температуры на этом уровне, зависимость практически линейна. И для каждого года выведена эмпирическая формула $t = -679 - H/200$, в

среднем она соответствует каждому году, т.е. изменения в период 2012 – 2016 г незначительны.

Температурная характеристика каждой тропопаузы представлена на рисунке 6. Анализ данных показал, что амплитуда температуры в течение лета составляет примерно 21°C . Средняя температура слоя тропопаузы колеблется в пределах от $-53,7^{\circ}$ до $-55,5^{\circ}\text{C}$. Сезонный ход температуры тропопаузы согласуется с сезонными изменениями высоты тропопаузы (в соответствии с рисунком 6) и приведенные данные показывают, что чем выше расположена тропопауза, тем ниже значения температуры на ней.

Анализ данных позволяет сделать вывод, что изменение высоты тропопаузы зависит от месяца года, синоптических условий и времени запуска радиозонда, а сезонный ход температуры нижней границы тропопаузы согласуется с сезонными изменениями высоты тропопаузы.

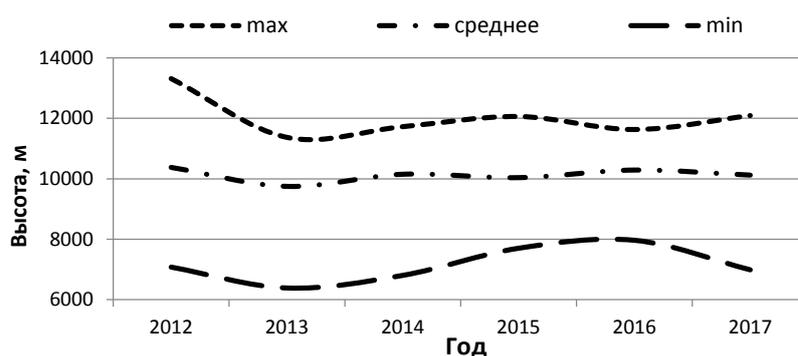


Рисунок 5 – Ход высоты нижней границы тропопаузы на станции «GEOSummit» в течение летнего периода (составлено автором)

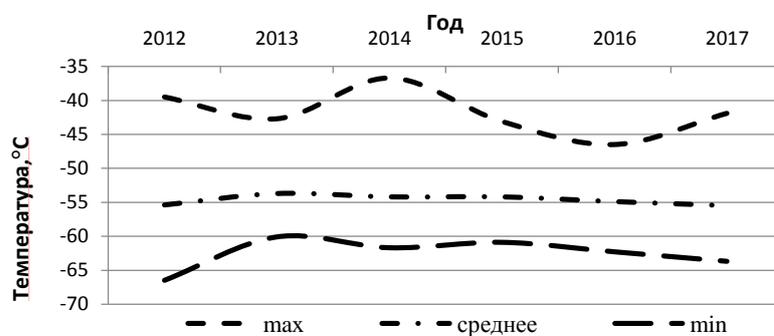


Рисунок - 6 - Ход температуры на уровне тропопаузы на станции «GEOSummit» в течение летнего периода (составлено автором)

Заключение. В процессе исследования было выяснено, что в зависимости от особенностей распределения температуры в тропосфере, вертикального градиента температуры и значений высоты нижней границы тропопаузы температура на ее уровне может сильно варьировать. Чем выше располагается тропопауза, тем ниже значения температуры на ее уровне [7 – 10].

Было отмечено, что изменение высоты тропопаузы зависит от месяца года, синоптических условий и времени запуска радиозонда. Сезонный ход температуры нижней границы тропопаузы согласуется с сезонными изменениями высоты тропопаузы.

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 границе тропопаузы, °С, h – высота нижней границы тропопаузы, м.

Так же в рассматриваемый период для станции «GEOSummit» была отмечена максимальная высота тропопаузы 13,3 км в июле 2012 года, минимальная высота тропопаузы 6,3 км в августе 2013 года. В среднем высота тропопаузы равна 10,1 км. и колебалась в пределах 9-11 км.

Наиболее характерная температура на нижней границе тропопаузы для станции «GEOSummit» за рассматриваемый период находилась в пределах от -53° до -59° С. Температура на нижней границе тропопаузы изменяется от -35° до -68° С.