



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

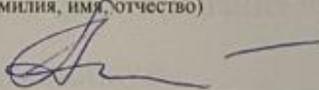
Кафедра метеорологических прогнозов

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(магистерская диссертация)

На тему: ««Исследование характеристик тропопаузы в полярной зоне РФ»»

Исполнитель Удалова Полина Геннадьевна
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат географических наук
(ученая степень, ученое звание)
Волобуева Ольга Васильевна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
заведующий кафедрой 
(подпись)

кандидат физико-математических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)

Анискина Ольга Георгиевна
(фамилия, имя, отчество)

« 05 » июня 2023 г.

Санкт-Петербург
2023

СОДЕРЖАНИЕ

СОКРАЩЕНИЯ	3
ВВЕДЕНИЕ	4
1. ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРОПОПАУЗЫ	7
1.1 Факторы, влияющие на изменение высоты тропопаузы	9
1.2 Влияние струйных течений на тропопаузу	10
1.3 Множественная тропопауза	11
1.4 Связь фронтогенеза и тропопаузы	12
2. РОЛЬ ТРОПОПАУЗЫ В АВИАЦИИ	15
2.1 Прогноз характеристик тропопаузы для обеспечения авиации	16
2.2 Условия погоды и опасные явления в зоне тропопаузы	20
2.3 Условия полета в зоне тропопаузы	21
3. АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ТРОПОПАУЗЫ В ПОЛЯРНОЙ ЗОНЕ РФ	24
3.1 Аэрологические станции для формирования архива данных	26
3.2 Анализ высоты полярной тропопаузы	29
3.3 Множественная тропопауза	37
3.4 Зависимость температуры от высоты полярной тропопаузы	50
3.5 Анализ высоты тропопаузы и ветра на ее уровне	57
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	67
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	69

СОКРАЩЕНИЯ

- ВС - Воздушное судно
ВМО - Всемирная метеорологическая организация
ВФЗ - Высотная фронтальная зона
ПВФЗ - Планетарная высотная фронтальная зона
АМСГ - Авиационная метеорологическая станция гражданская

ВВЕДЕНИЕ

Атмосфера в своем вертикальном протяжении не является однородной, а делится на ряд крупных слоев, называемых сферами. Для полетов современной авиации первостепенное значение имеют два нижних слоя — тропосфера и стратосфера.

Основной характеристикой тропосферы является то, что температура снижается с высотой и обусловлено это лучистым и турбулентным теплообменом атмосферы с земной поверхностью. В результате все метеорологические явления (облака, осадки, ухудшение видимости, грозы), которые создают то или иное состояние погоды, наблюдаются именно в тропосфере.

Стратосфера, простирающаяся до высоты порядка 40 км, представляет собой достаточно однородный слой атмосферы, физические свойства которого существенно отличаются от тропосферы. Температура в этом слое почти не меняется с высотой, слабый турбулентный обмен, а воздух настолько сух, что облака здесь обычно не образуются. Переходный слой между тропосферой и стратосферой называется тропопаузой[4].

Тропопауза – один из ключевых объектов земной атмосферы. Она отделяет тропосферу от стратосферы - двух основных погодообразующих слоев с очень разными химическими, динамическими и радиационными режимами.

Исследование тропопаузы является *актуальным* по многим причинам. Знание пространственно-временной структуры тропопаузы, играющей ключевую роль в обмене между тропосферой и стратосферой, имеет также большое значение для решения целого ряда исследовательских и прикладных задач. Процессы и явления, происходящие вблизи её поверхности, оказывают существенное воздействие на метеорологическое и геофизическое состояние атмосферы в целом. Изменение характеристик тропопаузы косвенно зависит

от потоков тепла в тропосфере и нижней стратосфере. Информация об изменении структуры тропопаузы имеет большое значение в условиях меняющегося климата, в особенности для арктического региона. Отметим также, о востребованности прогнозов высоты тропопаузы и температуры на этом уровне, что является составной частью краткосрочного прогноза, необходимого для метеорологического обеспечения авиации, совершающих авиарейсы над северным полярным кругом.

В связи с этим в данной работе изучается изменчивость тропопаузы за 5 лет для трех пунктов с различными климатическими условиями арктического региона находящихся на территории РФ.

В качестве исходных данных были использованы ряды аэрологических сводок с сайта университета Вайоминга (<http://weather.uwyo.edu>).

В процессе обработки также осуществлялась проверка соответствия данных на уровне тропопаузы критерию ВМО, согласно которому тропопауза и ее характер определяются по значениям и изменению вертикального градиента температуры [7]. Кроме того, выявлялось наличие (отсутствие) множественной тропопаузы. Анализ материалов радиозондирования в данной работе позволил получить информацию о характеристиках атмосферы в полярной зоне на уровне тропопаузы в северных широтах РФ.

Целью исследования является рассмотрение характеристик тропопаузы в полярной зоне РФ.

В данном исследовании ставились следующие задачи:

1. Сформировать базу данных характеристик тропопаузы за период с 2017 по 2021 гг. за 00 и 12 часов по UTC, полученных со станций о. Диксон, мыс Челюскин, о. Хейса всего 44 847 профилей.

2. Провести анализ высоты тропопаузы и ее характеристик в разное время год и местоположения станций за период с 2017 по 2021 гг;

3. На основе данных зондирования оценить изменчивость метеовеличин, таких как высота тропопаузы, температура, скорость и направление ветра на уровне тропопаузы.

4. Выявить наличие (отсутствие) множественной тропопаузы и провести анализ полученных данных.

5. Исследовать преобладающее направление ветра на высоте тропопаузы, а также годовой ход скорости ветра за пять лет на рассматриваемых станциях.

1. ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРОПОПАУЗЫ

Тропопауза представляет собой переходный слой между атмосферными слоями, границы которого часто не видны отчетливо. Поэтому тропопаузой обычно называют не переходный слой, а верхнюю границу тропосферы, которая согласно критерию Всемирной метеорологической организации (ВМО), определяется как уровень, на котором вертикальный градиент температуры убывает до $0,2 \text{ C}^\circ/100 \text{ м}$ или ниже и остается столь же низким по крайней мере в вышележащем слое толщиной 2 километра. Определяемая таким образом тропопауза по указанному критерию ВМО, называется термической тропопаузой. Довольно часто радиозондирование обнаруживает несколько уровней, удовлетворяющих данному критерию, в таких случаях говорят о множественности тропопауз [5].

Чаще всего тропопауза является переходным слоем толщиной от нескольких сот метров до нескольких километров со сложной термической структурой. В зависимости от вида кривой стратификации выделяется несколько типов тропопаузы. Самые распространенные из них показаны на рис. 1.1.

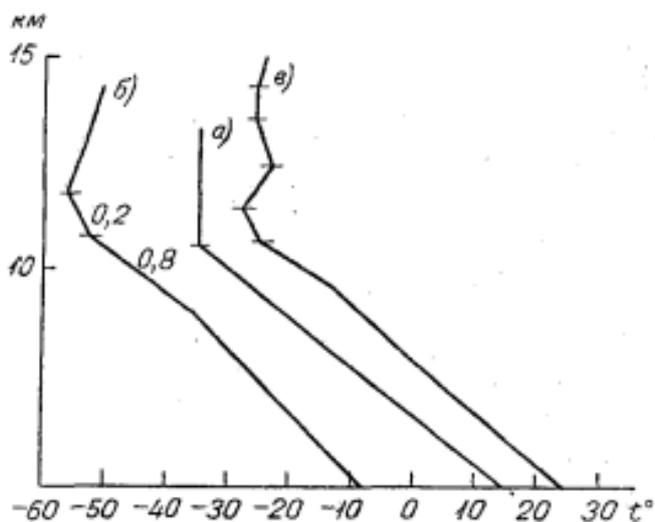


Рисунок 1.1 - Типы тропопаузы

I тип (рис. 1 а) — при переходе из тропосферы в стратосферу не наблюдается промежуточного слоя: падение температуры характерное для тропосферы, сменяется на изотермию;

II тип (рис. 1 б) — значительное падение температуры в тропосфере сменяется уменьшением температурного градиента и переходом в хорошо выраженную инверсию. Слой атмосферы от 11 до 12,5 км, в котором кривая, показывающая распределение температуры с высотой, характеризуется резким изменением температурного градиента, можно принять за слой тропопаузы. В данном случае слой тропопаузы как бы делится поверхностью минимальных температур на два слоя: нижний слой, называемый часто, по определению И. А. Клемина, верхней возмущенной тропосферой, и верхний слой, называемый субстратосферой. За нижнюю границу тропопаузы в рассматриваемом примере нужно принимать нижнюю границу возмущенной тропосферы, поскольку вертикальный градиент температуры здесь равен $0,2 \text{ } ^\circ\text{C}/100 \text{ м}$.

III тип (рис. 1 в) — тропопауза имеет большую вертикальную мощность (иногда несколько километров) с весьма неравномерным изменением температуры с высотой.

Нередко наблюдаются еще более сложные типы тропопаузы, когда можно говорить не об одной, а о двух или трех тропопаузах. Первые два типа встречаются чаще всего в умеренных широтах в холодное полугодие.

Положение тропопаузы может быть определено разными способами, все они в некотором роде эмпирические. Считается, что до сих пор нет полного и адекватного описания фундаментальной природы тропопаузы, которое может обеспечить ее физически обоснованную идентификацию. На сегодняшний день в литературе представлены следующие определения тропопаузы: классическая (термическая), динамическая, радиационная тропопауза в ясном небе, озоновая, химическая, тропопауза как изобарическая поверхность [13].

1.1 Факторы, влияющие на изменение высоты тропопаузы

Известно, что тропопауза является мощным задерживающим слоем, препятствующим вертикальному переносу аэрозолей и водяного пара. С момента открытия тропопаузы тщательно изучалась ее роль в процессе вертикального переноса. В работе [9] получены выводы о связи наблюдаемых долговременных изменений парциального давления озона с изменениями высоты тропопаузы. Подъем тропопаузы сопровождался уменьшением в нижней стратосфере содержания озона. По полученным значениям проведенного исследования был зафиксирован подъем тропопаузы в несколько сотен метров на средне и высокоширотных озонзондовых станциях Европы и Северной Америки [9].

Следует упомянуть работу двух зарубежных ученых Д. Сейдел и У. Рэндэла об изменчивости и трендах глобальной тропопаузы на основе радиозондовых данных [6]. Исследования показали, что внетропическая тропопауза более чувствительна к изменениям температуры, чем тропическая. Ежемесячные аномалии высоты тропопаузы более уязвимы к изменениям температуры в стратосфере, чем к изменениям температуры тропосферы. Большинство проанализированных учеными станций, тренды высоты тропопаузы являются положительными.

Работа Б. Д. Сантер [6] определяет значительную роль антропогенных воздействий на высоту тропопаузы, учитывая между тем и естественные факторы, вызывающие изменения ее высоты. Кроме того были получены выводы о том, что за последние 20 лет средняя глобальная высота тропопаузы увеличилась приблизительно на 200 метров. Ученые предполагают, что по изменениям высоты тропопаузы можно судить о состоянии климата.

Немаловажны исследования испанских ученых, ведущих активное изучение различных характеристик слоя тропопаузы. А. Хуан, Л. Гимено и др. останавливают свое внимание на изменениях высоты тропопаузы в

регионе Евразия [10], поскольку по результатам их исследований именно во внетропических широтах происходит наибольшее увеличение высоты тропопаузы. Помимо этого, ученые проводят исследования феномена множественной тропопаузы и глобальной структуры таких случаев. Согласно статье [11], число двойных и тройных тропопауз максимально вблизи субтропических струйных течений для обоих полушарий и рядом с областью полярного струйного течения для Южного полушария.

За последние двадцать лет различные научные исследования свидетельствуют об изменении климата тропопаузы, но в то же время происходит усовершенствование методов получения и обработки климатологических данных. Состояние параметров тропопаузы требует более детального рассмотрения и постоянного наблюдения, особенно на территории России, где качественный анализ климатологии тропопаузы не осуществляется или проводится в малых масштабах.

1.2. Влияние струйных течений на тропопаузу

Важной особенностью циркуляции в тропосфере и стратосфере являются струйные течения. Согласно определению ВМО, струйное течение – это сильный узкий поток с почти горизонтальной осью в верхней тропосфере или в стратосфере, характеризующийся большими вертикальными и горизонтальными сдвигами ветра и одним или более максимумами скорости.

Струйные течения арктических фронтов, обладают большой подвижностью и изменчивостью интенсивности, находятся на высотах 6-8 км, максимальные скорости ветра могут достигать 50-60 м/с. Струйные течения умеренных широт (струйные течения фронтов умеренных широт: полярного и арктического) отличаются также большой изменчивостью положения и интенсивности, располагаются на высотах 8-11 км, в широтной зоне 45-65° с.ш., максимальные скорости ветра нередко достигают зимой 80-

100 м/с, а иногда 120-130 м/с. Летом максимальные скорости ветра меньше, чем зимой, но нередко превышают 60-70 м/с [7].

Линию потока, где скорость ветра максимальна, называют осью струйного течения, а зону наиболее сильных ветров, на границе которой скорость ветра уменьшается примерно на одну треть – сердцевина.

Тропопауза в области струйного течения может иметь или сильный наклон (что типично на высоких широтах для струйных течений), или разрыв (что характерно в субтропических широтах для струйных течений). В умеренных широтах также встречается либо большой наклон тропопаузы, либо ее разрыв. Чем значительнее струйное течение, тем больше вероятность разрыва тропопаузы. Ось струйного течения, как правило, находится ниже холодной и высокой тропопаузы антициклонической стороны струйного течения и выше низкой и теплой тропопаузы на циклонической стороне.

Струйное течение обычно связано с планетарной высотной фронтальной зоной, разделяющей основные воздушные массы с различными термодинамическими свойствами. Струйные течения и планетарные фронтальные зоны обычно имеют направление с запада на восток. В умеренных широтах, однако, течение часто поворачивает меридиональном направлении. Нередко из-за слияния полярного и арктического фронтов зоны образуется пояс струйного потока, где наблюдаются особенно сильные ветры.

1.3 Множественная тропопауза

Классическое определение тропопаузы, приведенное в начале предыдущего раздела, не позволяет идентифицировать ее однозначно. В реальности часто обнаруживаются несколько слоев, соответствующих данному определению. Первая тропопауза определяется как самый низкий уровень, на котором скорость спада уменьшается до $2^{\circ}\text{C}/\text{км}$ или менее, при условии, что средняя скорость спада между этим уровнем и всеми более

высокими уровнями в пределах 2 км не превышает $2^{\circ}\text{C}/\text{км}$. Выше лежащая вторичная тропопауза должна удовлетворять следующему критерию $0,3^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$. Повторяемость множественных тропопауз приходится на широтную полосу $50^{\circ}-80^{\circ}$. Это связано в основном с сезонной миграцией струйных течений, на холодной (обращенной к полюсу) стороне которых наблюдается сильная деформация тропопаузы, а также из-за наличия большого количества инверсий, все эти случаи позволяют идентифицировать две или даже три тропопаузы, соответствующие определению ВМО в полярных широтах.

Отмечено, что процессы фронтогенеза и фронтолиза обуславливают развитие поперечных к бароклинным зонам вертикальных циркуляций, проявлением которых являются процессы деформации тропопаузы - формирование ее складок и воронок на холодной стороне струйных течений и куполов высокой тропопаузы на теплой стороне. Наибольшую деформацию поверхность тропопаузы испытывает в зонах атмосферных фронтов умеренных широт, образуя при опускании «складку» на холодной стороне фронтальной зоны и поднимаясь в виде купола на теплой [4].

1.4 Связь фронтогенеза и тропопаузы

Высота тропопаузы изменяется при прохождении систем низкого и высокого давления. Над развивающейся системой высокого давления граница тропопаузы повышается, а температура на этой высоте понижается. Другими словами, над антициклоном граница тропопаузы находится выше, чем над циклоном. Следовательно, по мере развития и углубления циклона высота субстратосферы над ним постепенно уменьшается. Следственно, по мере развития и усиления высокого давления тропопауза постепенно повышается, поднимаясь до максимальной высоты к той стадии антициклона, когда он становится высоким образованием и начинает разрушаться.

Вершины наиболее развитых кучево-дождевых облаков могут достигать тропопаузы, а в отдельных случаях проникать в нижнюю стратосферу. Чем выше и холоднее тропопауза, тем обычно больше вертикальная протяженность облачности верхнего яруса. Значительное снижение субстратосферы над глубоким малоподвижным циклоном – это воронка тропопаузы (рис. 1.2): тропопауза прогнута вниз в виде воронки, наиболее низкое ее положение совпадает с центром циклона на уровне тропопаузы. При этом может происходить образование новой тропопаузы на более низком уровне и размывание прежней тропопаузы



Рисунок 1.2 - Образование воронки тропопаузы над циклоном

Известно, что струйные течения сопутствуют высотным фронтальным зонам (ВФЗ), в области которых тропопауза испытывает сильную деформацию в процессах фронтогенеза. Тропопауза на теплой стороне ВФЗ поднимается, образуя купол. В холодном воздухе и в самой зоне раздела развивается более узкая и быстрая нисходящая ветвь, при этом тропопауза прогибается до характерных тропосферных высот. Процесс формирования и разрушения тропопаузы является достаточно сложным. Очень часто одновременно наблюдаются две тропопаузы: одна из них (более низкая) связана с воздухом умеренных широт, другая (более высокая) – с тропическим воздухом. Двойные и более сложные тропопаузы характерны для зон струйных течений.

Низкая и относительно теплая тропопауза отмечается на левой (циклонической) стороне струйного течения, высокая и холодная – на правой (антициклональной) стороне. Переход от низкой тропопаузы к высокой

может сопровождаться разрывом или плавным переходом. Разрыв тропопаузы, характерный для сильных струйных течений и интенсивных планетарных высотных фронтальных зон (ПВФЗ), наблюдается в умеренных и субтропических широтах, а плавный переход – в высоких широтах [14].

2. РОЛЬ ТРОПОПАУЗЫ В АВИАЦИИ

Знание синоптиками местоположения тропопаузы ее временной и пространственной эволюции, имеет большое значение для прогнозирования условий полета в верхних слоях тропосферы и в нижней стратосфере. В связи с тем, что тропопауза является задерживающим слоем, который как правило, четко определяет расположение верхней границы облаков, часто образуется густая дымка из-за накопления водяного пара, ухудшающая видимость.

Рассеяние голубой части солнечного спектра водяным паром приводит к тому, что слой дымки ниже тропопаузы становится ярким и беловатым, а небо над тропопаузой – темно-синим или почти черным. Вот почему граница между тропосферой и стратосферой может быть четко определена при визуальном наблюдении с самолета на соответствующих высотах. Ветер ниже тропопаузы, обычно имеет более высокую скорость, чем над ней. Разница в скорости и направлении ветра в слое тропопаузы иногда становится слишком большой, что вызывает турбулентность, соответственно болтанку самолета. Поэтому метеорологам и пилотам очень важно знать расположение тропопаузы, чтобы судить об условиях полета на больших высотах.

Особые погодные условия в Арктике создают отчасти открытые и отчасти покрытые льдом крупные водяные бассейны, близость теплого Гольфстрима и холодного северного течения. Неустойчивая погода выражается в частых сменах высоты и характера облачности, резких сменах скорости и направления ветра, тумане, быстро перемещающемся с моря на побережье. Резкое изменение свойств тропопаузы приводит к изменению условий полета вблизи этого слоя. Поэтому особенно важно исследовать условия, при которых наблюдается тропопауза с экстремальными характеристиками.

На сегодняшний день для определения характеристик свободной атмосферы используются ракетные и спутниковые методы зондирования. Аэрологическое радиозондирование является удобным и систематическим методом получения метеорологической информации о свободной атмосфере. Существует сеть станций радиозондирования по всему миру, где в 00:00 и 12:00 по Гринвичу проводят измерения, в результате которых получают информацию о влажности, вертикальном распределении температуры и др. характеристиках. На территории России для получения данных используются радиозонды типа МРЗ.

Для целей метеорологического авиационного обеспечения требуется качественный краткосрочный прогноз характеристик субстратосферы, а для этого важны точные прогнозы переходного слоя. Из данных радиозондирования мы получаем необходимые сведения о тропопаузе. Если маршрут полета должен проходить над ограниченной территорией, в районе одного пункта, то для оценки тропопаузы можно удовлетвориться анализом данных радиозондирования всего одного-двух пунктов в районе полета. Для обеспечения полетов по определенному маршруту достаточно будет использовать данные радиозондирования расположенных по трассе нескольких пунктов. Однако для многомаршрутных и дальних полетов уже следует использовать специальные карты тропопаузы.

2.1 Прогноз характеристик тропопаузы для обеспечения авиации

При метеорологическом обеспечении полетов самолетов на АМСГ, в дополнение к имеющимся материалам необходимо составлять карты АТ₃₀₀ и в некоторых случаях карты более высоких уровней, а также карты тропопаузы (рис.2.1). Составная часть карт особых явлений считается информация о высоте и температуре тропопаузы на верхних и средних уровнях. Топография тропопаузы называется картой, показывающей распределение высоты тропопаузы (ее нижней границы) и температуры на

этом уровне. На эту карту наносят значения температуры воздуха и дефицита точки росы, давления в гектопаскалях, направления и скорости ветра на уровне тропопаузы.

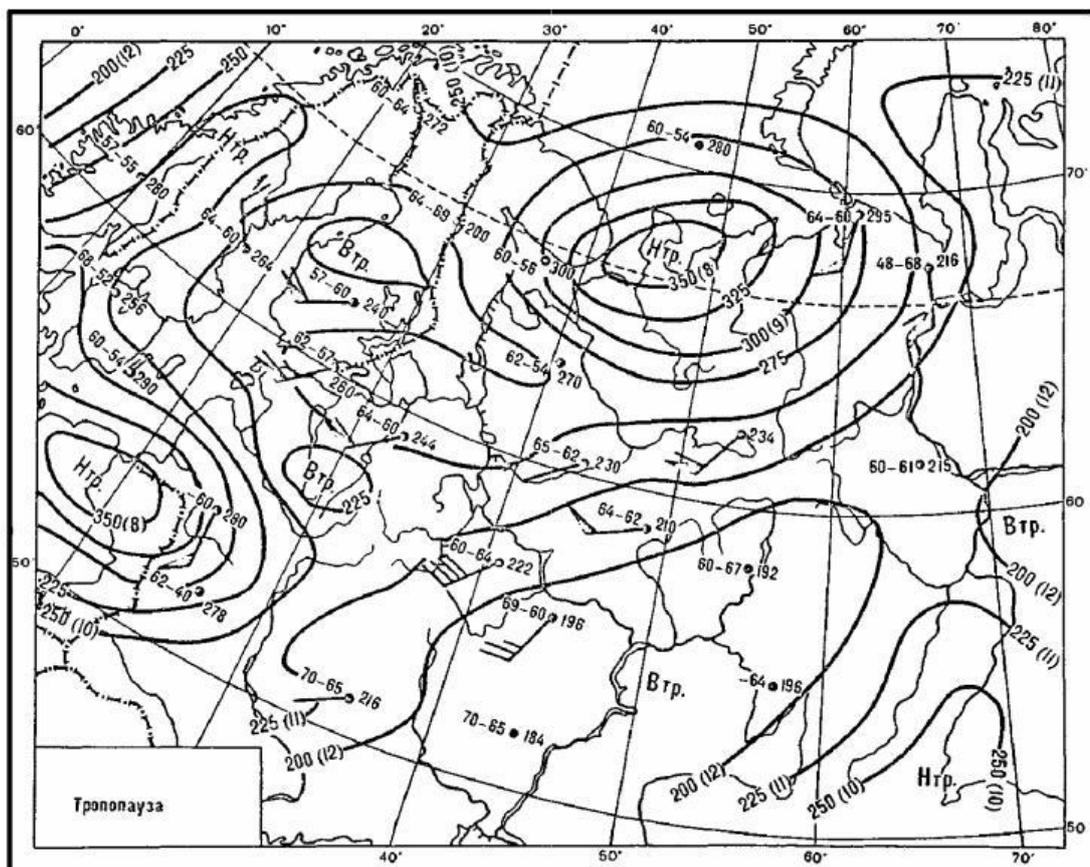


Рисунок 2.1 - Карта тропопаузы

В случае многослойной тропопаузы указывается еще давление на второй вышележащей тропопаузе. На карте тропопаузы проводят изобары через 50 гПа до уровня 250 гПа, далее через 25 гПа. Если имеется две тропопаузы, то вторую обрабатывают штриховыми линиями аналогично первой. На картах проводят изотермы через 5°C красными сплошными линиями, выделяя области тепла красным цветом и холода – синим цветом.

Прогноз высоты тропопаузы должен основываться, прежде всего, на тех общих положениях, которые вытекают из рассмотрения термических свойств воздушных масс, эволюции барических систем и прохождения

различных фронтальных разделов. Эти положения можно сформулировать в следующем виде:

а) области наименьших значений высот тропопаузы совпадают с очагами холода на картах OT^{500}_{1000} , области наибольших значений — с очагами тепла;

б) в период от стадии возникновения циклона до стадии его заполнения тропопауза над центральной частью циклона непрерывно понижается; в период заполнения циклона тропопауза над ним медленно и постепенно повышается;

в) в период от момента образования антициклона до момента его разрушения тропопауза над центральной частью антициклона непрерывно повышается; в период разрушения антициклона тропопауза над ним медленно понижается;

г) при приближении теплого фронта тропопауза над пунктом повышается; наиболее заметное повышение тропопаузы происходит после прохождения теплого фронта у поверхности земли;

д) при приближении холодного фронта тропопауза понижается; наиболее резкое уменьшение высоты тропопаузы наступает после прохождения холодного фронта у поверхности земли.

В отдельных случаях часто наблюдаются значительные отклонения от описанных общих положений. Эти отклонения обусловлены тем, что в изменении высоты тропопаузы играет важную роль не только адвекция тепла или холода, но и радиационные факторы, а также вертикальные движения.

Вследствие изменения высот тропопаузы происходит горизонтальное изменение температуры на больших высотах. Колебания высоты и температуры тропопаузы позволяют сделать следующие выводы:

а) годовой ход температуры на уровне тропопаузы параллелен годовому ходу температуры в приземном слое, т. е. зимой температура на уровне тропопаузы имеет более низкие значения, чем летом. В умеренных

широтах зимой температура на уровне тропопаузы чаще всего имеет значения -55 , -60°C , летом -50 , -55°C ;

б) колебания высоты и температуры тропопаузы, связанные с прохождением циклонов и антициклонов, имеют такую связь - температура понижается с повышением тропопаузы и повышается с понижением тропопаузы, т.е. при пересечении волны тропопаузы на какой-либо одной высоте полета могут наблюдаться значительные изменения температуры.

Прогнозы высотного ветра в основном основываются на барических топографических картах, с обязательным использованием последних наблюдений из пунктов вдоль воздушной трассы. Общие особенности характерные для режима ветра на высотах:

а) в тропосфере обычно наблюдается увеличение скорости ветра с высотой, причем зимой это увеличение более сильное, чем летом. Максимальная скорость ветра бывает, как правило (в 80-90% случаев), под тропопаузой, примерно на 1 км ниже тропопаузы;

б) средние скорости ветра на всех высотах в тропосфере и стратосфере в летние месяцы значительно меньше, нежели в месяцы холодного полугодия;

г) геострофический ветер на любой высоте является вектором суммы градиентного ветра, вычисляемого по распределению давления у поверхности земли, и термического ветра, определяемого по карте изотерм в слое от поверхности земли до соответствующей высоты [13].

При тщательном анализе карт барической топографии за два срока в сутки и регулярных четырехразовых наблюдений радиозондами и радиопилотами вдоль трассы прогнозы, ветра имеют вполне удовлетворительную оправдываемость, по крайней мере, по сравнению с надежностью других прогнозов метеоэлементов.

2.2 Условия погоды и опасные явления в зоне тропопаузы

Ниже тропопаузы снижение температуры с высотой замедляется, а в самом слое тропопаузы сменяется изотермией, инверсией или незначительным снижением температуры с высотой. Такие слои являются тормозящими, поскольку они препятствуют развитию вертикальных токов, ослабляют турбулентность, задерживают поступление пыли и водяного пара, а также облачных элементов в верхние слои атмосферы. В результате этого под ней происходит возникновение дымки и ухудшается видимость.

В периоды высокой атмосферной активности высота тропопаузы над территорией России может изменяться в некоторых случаях на 4-5км в сутки. Неравномерность тропосферной границы раздела приводит к тому, что воздушный поток наклоняется в некоторых областях и меняет направление там, где есть разница температур, что вызывает болтанку самолета.

Для самолетов, летающих на больших скоростях, болтанка имеет первостепенное значение по сравнению с другими погодными явлениями. Связано это с тем, что она вызывает крайне неприятные физиологические ощущения у экипажа и у пассажиров, усложняет управление самолетом, что приводит к более быстрому утомлению летчика и является небезопасной, поскольку самолет может разрушиться в воздухе.

Тропопауза препятствует росту вертикально развивающихся облаков, поэтому вершины кучево-дождевых облаков наблюдаются ниже тропопаузы. Также под тропопаузой расположены облака верхнего яруса. Около 80 % облаков верхнего яруса связаны с атмосферными фронтами, и чаще всего они образуются на теплых фронтах. Метеорологические условия полетов в облаках верхнего яруса зависят от их формы: в перисто-слоистых облаках полет происходит более спокойно, чем в перисто-кучевых. Видимость меняется от десятков метров до нескольких километров.

Длительный полет в облаках верхнего яруса может вызывать статическую электризацию самолета (между кристаллами льда и

поверхностью самолета происходит трение, что способствует получению отрицательного заряда, в дальнейшем создавая помехи радиосвязи и радиокомпыаса).

Сложные условия для полетов возникают там, где вершины кучево-дождевых облаков наблюдаются ниже тропопаузы. Данные облака имеют плотную, неоднородную структуру, значительную водность, высокое содержание ледяных кристаллов и переохлажденных капель. В этих условиях невозможно избежать интенсивного обледенения, сильной болтанки, электризации самолета, в некоторых случаях – выпадение осадков (крупя, мелкий град), и электрических разрядов. Опасность полетов в этих облаках повышена из-за того, что они часто закрыты облаками верхнего яруса, и попасть в них можно неожиданно.

2.3 Условия полета в зоне тропопаузы

При оценке условий полета на больших высотах и в стратосфере необходимо знать и учитывать высоту и температуру тропопаузы, направление и скорость струйного течения, зоны болтанки самолетов, распределение температуры и ветра с высотой. При оценке метеорологических условий на больших высотах и в стратосфере важно иметь четкое представление о положении тропопаузы.

При высоте полета на уровне 10-11 км, чаще всего именно в умеренных широтах полет совершаются над облаками при ясном небе. На этом уровне облака встречаются в среднем только в 25% случаев, при этом зимой несколько реже, чем летом. Из этого следует, что погодные условия в отношении облачности в верхней тропосфере и нижней стратосфере гораздо благоприятнее, чем в нижних слоях тропосферы.

Прогнозирование очень важно, когда речь идет об облаках, которые могут вызвать обледенение и болтанку, таким образом, значительно усложняя полет. Когда летчики сталкиваются с такой облачностью, они не

пытаются пролететь через них, а наоборот, поднимаются выше облачности и пролетают над ними. Такая тенденция летать над облачностью объясняется тем, что в облаках значительно ухудшаются условия полета, снижается видимость и появляется болтанка.

Во время полета пилот может определить струйное течение по изменениям облачности и температуры воздуха. Если полет проходит ниже тропопаузы, на уровне около 500 мб, следует обратить на следующие правила: при полете точно по ветру в нижней части струйного течения температура почти не меняется; при полете в холодной стороне струи скорость ветра уменьшается на 4 м/сек на каждый градус понижения температуры, которое наблюдается при удалении самолета от оси струи в направлении холодной массы; при полете в теплой стороне струи скорость ветра уменьшается на 8 м/сек на каждый градус повышения температуры, которое наблюдается при удалении самолета от оси струи в сторону теплой массы.

При полете в струйном течении против ветра резко уменьшается путевая скорость, а при полете по ветру, наоборот, возрастает. Чтобы избежать сильного встречного ветра, часто встречающегося при полете с востока на запад, уместно изменить эшелон полета. Например, самолет может подняться в нижнюю стратосферу, где скорость ветра быстро уменьшается. Уменьшение скорости ветра происходит и ниже оси струйного течения, но несколько медленнее, чем в нижней стратосфере. При пересечении струйного течения под углом, близким к 90° , возникнет большой снос самолета. При ширине струйного течения 500-1000 км и недостаточно точном учете сноса самолет может значительно отклониться от маршрута. В струйных течениях наблюдается значительная турбулентность, вызывающая болтанку самолетов, которая может быть не только при полете в облаках, но и при ясном небе. Болтанка чаще всего наблюдается в слое, расположенном на 500-1000 м ниже тропопаузы, и на циклонической стороне

струйного течения, реже – на антициклональной. Слой болтанки имеет толщину в среднем 300-500 м, протяженность 80-100 км, а иногда и более.

При выполнении инженерно-штурманских расчетов, определении практического потолка, характеристик скороподъемности, маневренности самолетов особое внимание обращается на положительные отклонения температуры воздуха от стандартных значений. В практике учитываются только положительные отклонения температуры не менее 10° .

Во время полета с заданным скоростным режимом по прибору повышения температуры воздуха по сравнению со стандартными приводят к падению тяги двигателей. Это происходит вследствие уменьшения плотности воздуха и массы воздуха, проходящей через двигатель. Повышение температуры воздуха на 10° приводит к падению силы тяги. В этом случае для сохранения заданного режима полета необходимо увеличить обороты двигателя, что приводит к увеличению часового расхода топлива. Часовой и километровый расход топлива, как правило, с увеличением высоты полета до высот 11-13 км уменьшается. Эта особенность используется для правильного выбора профиля полета.

Если полет выполняется на высоте, близкой к потолку, то при положительном отклонении температуры от стандартной на 20° и более даже максимальных оборотов может не хватить для поддержания заданного режима полета. В этом случае необходимо уменьшить высоту полета во избежание опасного уменьшения скорости, что сопровождается увеличением часового и километрового расхода топлива [15].

20674 Ostrov Dikson Observations at 00Z 24 Mar 2020

PRES	HGHT	TEMP	DWPT	RELH	MIXR	DRCT	SKNT	THTA	THTE	THTV
hPa	m	C	C	%	g/kg	deg	knot	K	K	K
1000.0	-82									
983.0	47	-10.7	-11.7	92	1.60	250	14	263.7	268.1	264.0
968.0	166	-9.3	-10.3	92	1.81	285	23	266.3	271.3	266.6
959.0	240	-6.3	-7.5	91	2.28	286	23	270.1	276.4	270.4
941.0	389	-5.7	-7.0	91	2.41	288	23	272.1	278.9	272.5
925.0	524	-6.9	-9.1	84	2.09	290	23	272.2	278.1	272.6
897.0	762	-8.7	-11.4	81	1.79	297	25	272.8	277.9	273.1
869.0	1006	-9.2	-13.8	69	1.52	305	27	274.8	279.2	275.0
850.0	1176	-9.5	-15.5	62	1.35	300	31	276.2	280.2	276.4
844.0	1231	-9.7	-15.7	62	1.35	295	31	276.6	280.6	276.8
818.0	1473	-10.3	-16.3	61	1.32	294	32	278.4	282.3	278.6
807.0	1576	-13.3	-19.3	61	1.03	294	32	276.3	279.4	276.4
751.0	2120	-17.5	-24.5	54	0.70	292	34	277.4	279.6	277.6
700.0	2643	-22.1	-29.1	53	0.50	290	35	278.0	279.6	278.1
524.0	4680	-39.8	-46.0	52	0.12	280	33	280.6	281.1	280.7
504.0	4954	-42.2	-48.2	52	0.10	285	33	280.9	281.2	280.9
500.0	5010	-42.7	-48.7	52	0.09	285	31	280.9	281.2	280.9
479.0	5298	-45.5	-50.5	57	0.08	289	22	280.9	281.2	280.9
454.0	5651	-47.9	-52.9	56	0.06	295	12	282.3	282.5	282.3
432.0	5979	-50.1	-55.1	55	0.05	247	4	283.5	283.7	283.5
431.0	5994	-50.1	-55.2	55	0.05	245	4	283.6	283.8	283.6
406.0	6383	-51.2	-57.0	50	0.04	225	6	287.1	287.3	287.1
400.0	6480	-51.5	-57.5	49	0.04	230	6	288.0	288.1	288.0
376.0	6880	-52.7	-58.7	48	0.04	240	4	291.5	291.6	291.5
351.0	7325	-54.1	-60.1	48	0.03	275	12	295.4	295.6	295.4
331.0	7699	-57.1	-63.1	46	0.02	243	13	296.3	296.4	296.3
329.0	7738	-57.2	-63.2	46	0.02	240	14	296.7	296.8	296.7
305.0	8216	-58.6	-64.6	46	0.02	275	14	301.2	301.3	301.2
300.0	8320	-58.9	-64.9	46	0.02	280	14	302.2	302.3	302.2
284.0	8660	-60.7	-66.7	45	0.02	285	10	304.4	304.5	304.4
250.0	9450	-60.3	-66.3	45	0.02	290	21	316.3	316.4	316.3
200.0	10830	-63.5	-69.5	44	0.02	300	29	332.1	332.1	332.1
190.0	11144	-64.1	-70.1	44	0.02	305	29	336.0	336.1	336.0
153.0	12470	-66.5	-72.5	43	0.01	300	34	353.3	353.4	353.3
150.0	12590	-66.3	-72.3	43	0.01	300	35	355.7	355.8	355.7
103.0	14861	-66.7	-71.7	49	0.02	305	43	395.3	395.4	395.3
100.0	15040	-66.7	-71.7	49	0.02	305	41	398.6	398.7	398.6
91.0	15609	-66.5	-71.4	50	0.03	305	37	409.9	410.1	409.9
70.0	17190	-65.9	-70.6	52	0.04	295	39	443.1	443.3	443.1
61.7	17960	-65.3	-70.3	50	0.05	295	43	460.7	461.0	460.7
52.0	19015	-61.5	-66.5	51	0.10	295	49	492.6	493.2	492.6
50.0	19260	-59.1	-64.1	52	0.14	295	51	503.8	504.7	503.8
40.0	20708	-48.7	-53.6	56	0.65	290	56	563.1	567.7	563.3
36.1	21374	-43.9	-48.8	58	1.26	294	68	592.2	601.4	592.6
35.7	21450	-40.7	-45.4	60	1.86	295	69	602.4	616.1	603.0
31.3	22365	-33.6	-39.3	57	4.09	300	84	644.5	676.2	646.1
30.0	22660	-31.3	-37.3	55	5.23	305	82	658.6	699.9	660.7
29.0	22903	-29.1	-35.7	53	6.38	305	80	671.1	722.4	673.7
28.3	23078	-27.5	-34.5	51	7.36			680.2	740.1	683.3

Рисунок 3.2 – Данные температурно-ветрового зондирования (Лист 1)

```

STID =          STNM = 20674  TIME = 200316/0000
SLAT = 73.50    SLON = 80.40  SELV = 47.0
TTAA  0
PRES    TMPC    DWPC    DRCT    SPED    HGHT
994.00  -22.90   -24.70   315.00    1.00   -9999.00
1000.00 -9999.00  -9999.00 -9999.00 -9999.00    5.00
925.00  -23.50   -26.00   335.00    4.00    582.00
850.00  -27.50   -30.20   315.00    5.00   1189.00
700.00  -35.70   -38.10   300.00   10.00   2562.00
500.00  -46.50   -52.50   295.00   10.00   4860.00
400.00  -54.50   -61.50   295.00   13.00   6320.00
300.00  -55.50   -63.50   290.00   20.00   8160.00
250.00  -55.10   -64.10   280.00   20.00   9320.00
200.00  -55.10   -65.10   285.00   24.00  10750.00
150.00  -55.10   -67.10   285.00   30.00  12590.00
100.00  -50.50   -64.50   285.00   44.00  15200.00
TRPA  0
PRES    TMPC    DWPC    DRCT    SPED
403.00  -54.50   -61.50   295.00   13.00

```

Рисунок 3.3 - Данные температурно-ветрового зондирования (Лист 2)

В процессе обработки также выявлялось наличие (отсутствие) множественной тропопаузы, характерные струйные течения для выбранных станций. Анализ материалов радиозондирования в данной работе позволил получить информацию о характеристиках атмосферы в полярной зоне на уровне тропопаузы в северных широтах РФ.

3.1 Аэрологические станции для формирования архива данных

В работе рассматриваются три станции с различными физико-географическими и климатическими характеристиками, находящиеся на территории РФ за полярным кругом. В Таблице 3.1 представлены данные рассматриваемых станций, их географические координаты, международные индексы и высота станции над уровнем моря.

Таблица 3.1 – Перечень аэрологических станций

Индекс станции	Название станции	Широта, град	Долгота, град	Высота над ур., м.
20674	«Диксон», остров Диксон	73.32 с.ш.	80.17 в.д.	47
20292	«Обсерватория Федорова», мыс Челюскин	77.43 с.ш.	104.18 в.д.	15
20046	«Обсерватория имени Кренкеля», остров Хейса	80.62 с.ш.	58.05 в.д.	22

Обсерватория «о.Диксон» расположена в северо-восточной части Енисейского залива в Карском море на полуострове Таймыр, в 1,5 км от материка. Остров имеет скалистый рельеф, прорезанный оврагами, с абсолютными отметками высот 45-47 метров. Географическое положение муниципального образования определяет значение поселения в экономике региона, а именно: гидрометеорологическое и гидрографическое обслуживание трассы Северного морского пути, полярной авиации и сети полярных станций, недропользование. Гавань Диксон стоит на пересечении морских и речных путей и удобна для навигации. Особенности климата территории тесно связаны с феноменом полярной ночи, которая здесь длится 65 суток с десятых чисел марта по февраль, и полярного дня длительностью около 90 суток с начала мая по август.

Обсерватория «мыс Челюскин» находится в проливе Велькицкого на водоразделе Карского моря с запада и моря Лаптевых с востока, на побережье полуострова Таймыр и является самой крайней северной точкой материка Евразия. Полярный день длится 4 месяца с апрель по август, полярная ночь 3,5 месяца с конца октября по февраль. Навигационная полярная ночь (когда солнце в истинный полдень ниже горизонта) длится приблизительно с 15 ноября по 25 января.

Обсерватория «о.Хейса» располагается в центральной части архипелага Земля Франца-Иосифа в Северном ледовитом океане. Рельеф острова слегка всхолмленный, с обрывистыми местами пологими берегами. Начало полярной ночи с конца октября по февраль, полярный день с марта по сентябрь.



Рисунок 3.4 - Карта с расположением станций

В Российской Арктике выделяют 3 климатических района по распределению основных метеоэлементов и характеру циркуляции. Западный район включает станции: обсерватория им. Э.Т. Кренкеля («о.Хейса»), м. Желания, о. Визе, о.Уединения, о.Диксон («о.Диксон»). Холодный сезон характеризуется более высокой частотой циклонов, возникающих в Северной Атлантике, что приводит к более облачной погоде и аэрозольному загрязнению атмосферы, чем в других регионах. Сибирский (или Центральный) район охватывает станции: обсерватория им. Е.К.Федорова («мыс Челюскин»), о.Преображения, о.Котельный, о.Муостах, о.Четырехстолбовой. В холодное время года погодные условия определяются влиянием сибирского антициклона, отсюда следует температура воздуха ниже, малооблачно, осадков меньше и выпадают они

реже. Осадки связаны с проходящими через регион циклонами, являются преимущественно летними. Объясняется тем, что арктический фронт в северном полушарии зимой движется к югу, а летом – на север. Зимой на исследуемых территориях наблюдается самый продолжительный период снежного покрова – более 260 дней, что связано с приходом арктического фронта. В теплое время года Азиатский антициклон разрушается, давление в его пределах понижается, вместо него появляется область летней депрессии с низким давлением и усиленной циклонической деятельностью, с которой увеличивается количество летних осадков.

3.2 Анализ высоты полярной тропопаузы

В данном разделе была проведена сравнительная работа высоты тропопаузы на трех станциях за пять лет за каждый сезон. Были рассчитаны осредненные высоты за каждый сезон каждого года. Выявлена самая максимальная и минимальная высота субстратосферы. Изменения высоты нижней стратосфере колеблются как в годовом ходе, так и на ежедневной основе. Иногда за сутки высота переходного слоя может изменяться на 1-2 километра (табл. 3.2 – 3.6). В таблицах max – максимальная высота тропопаузы, м; min – минимальная высота тропопаузы, м; s – среднемесячная высота тропопаузы, м.

Таблица 3.2 - Высота полярной тропопаузы за 2017 г. по сезонам

Высота, м	2017	Зима	Весна	Лето	Осень
о.Диксон	min	7148	6096	7079	7367
	max	11562	11021	11575	11048
	s	9288	8447	9815	9690

Высота, м	2017	Зима	Весна	Лето	Осень
м. Челюскин	min	7242	5767	7320	6950
	max	11595	10748	12358	11986
	s	9014	8513	9506	9541
Высота, м	2017	Зима	Весна	Лето	Осень
о. Хейса	min	6805	6048	6037	6990
	max	11642	10745	12630	11903
	s	8996	8501	9445	9684

Таблица 3.3 - Высота полярной тропопаузы за 2018 г. по сезонам

Высота, м	2018	Зима	Весна	Лето	Осень
о. Диксон	min	5972	5739	6432	6715
	max	13219	10833	12201	10785
	s	9338	7933	9961	9183
м. Челюскин	min	5843	5467	6621	6055
	max	11574	11616	12807	11757
	s	8848	8221	10065	8917
о. Хейса	min	5847	5485	6369	7078
	max	12901	10182	12000	11049
	s	9081	8092	9411	8982

Таблица 3.4 - Высота полярной тропопаузы за 2019 г. по сезонам

Высота, м	2019	Зима	Весна	Лето	Осень
о. Диксон	min	5324	6103	6258	7090
	max	11683	13929	12988	13696
	s	9023	8587	9810	9120
м. Челюскин	min	5102	6112	6183	5846
	max	14036	10812	12572	13871
	s	8527	8451	10159	9279

Высота, м	2019	Зима	Весна	Лето	Осень
о. Хейса	min	5484	5902	5749	6750
	max	11080	14512	12019	12688
	s	8401	8517	9185	9319

Таблица 3.5 - Высота полярной тропопаузы за 2020 г. по сезонам

Высота, м	2020	Зима	Весна	Лето	Осень
о.Диксон	min	6740	5363	6082	7190
	max	11589	13013	13459	11696
	s	9391	9191	9296	9020
м. Челюскин	min	7131	6366	6177	5686
	max	14457	12539	12488	12652
	s	9727	9388	10199	9651
о. Хейса	min	6782	6909	5838	6868
	max	14429	12190	11712	11885
	s	9482	9192	9749	9414

Таблица 3.6 - Высота полярной тропопаузы за 2021 г. по сезонам

Высота, м	2021	Зима	Весна	Лето	Осень
о.Диксон	min	6460	7018	5720	6689
	max	11743	11945	12384	12256
	s	8937	8949	9730	9376
м. Челюскин	min	5034	6141	6219	7383
	max	11708	12081	12235	12445
	s	8921	8858	9718	9249
о. Хейса	min	7030	6459	6675	6869
	max	12134	11380	14830	11799
	s	9151	8649	9346	9149

В табл. 3.2 – 3.6, представлены минимальные, максимальные и средние значения высоты тропопаузы для всех сезонов с 2017 по 2021 год. Высота тропопаузы испытывает колебания в зависимости от расположения станции и времени года. Минимальная тропопауза на всех станциях за все года колеблется в пределах 5 – 6 км. В 2021 году наблюдалась самая низкая высота тропопаузы 5034 м, зимой на станции «мыс Челюскин». Так же можем заметить частую повторяемость нижней границы тропопаузы в зимние и весенние месяцы именно на станции «мыс Челюскин». Максимальная высота субстратосферы достигала 12 – 15 км и наблюдалась в летние, весенние месяцы. В 2021 году была зафиксирована самая максимальная высота 14830 м, за летний сезон на станции «о.Хейса». Анализируя средних значений высоты тропопаузы за все года, можно отметить ее постоянные колебания в пределах 8 – 10 км.

Далее произведя осреднение высоты тропопаузы за месяц, можно заметить как меняется в течение года ее высота: наиболее высокие значения наблюдаются летом, наиболее низкие – весной (рис. 3.4).

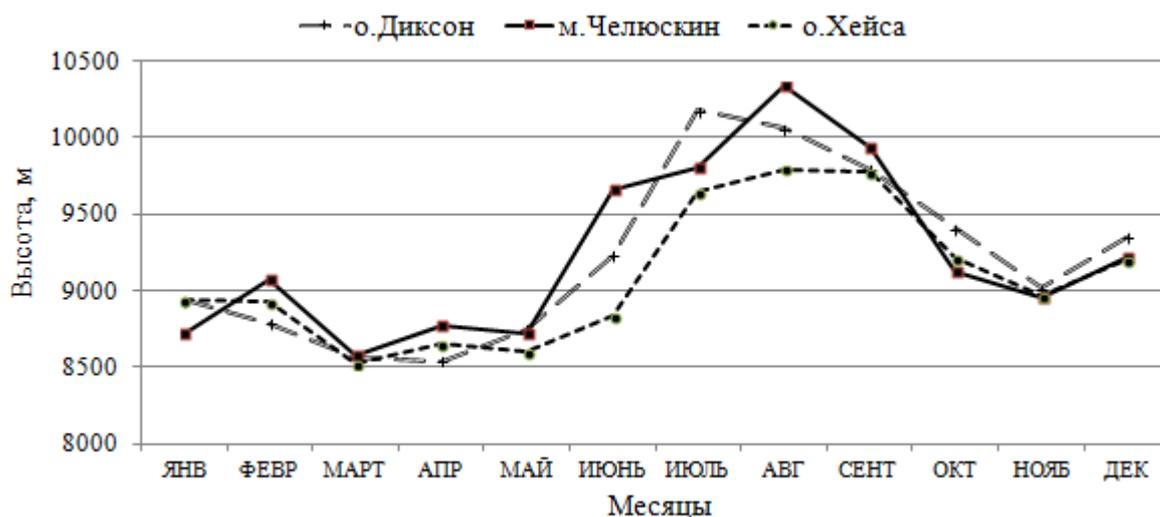


Рисунок 3.5 - Годовой ход высоты тропопаузы за период 2017-2021 гг.

На представленном графике (рис.3.5) хорошо заметен рост высоты переходного слоя с мая. Такое характерное повышение высоты объясняется наступлением полярного дня, связано это с притоком солнечной радиацией к

земной поверхности, что также способствует увеличению турбулентного обмена до больших высот. Более низкие значения у станции «о.Хейса» объясняются ее местонахождением, окруженной со всех сторон морями, равнинным рельефом, почти 87% покрытым ледниками, а также удаленностью от материка. Более низкая тропопауза наблюдается в весенние месяцы, влияние оказывает арктический фронт, который устанавливается зимой над Баренцевым и Карским морями

На рисунках 3.6-3.8 представлены повторяемости высот тропопаузы по сезонам на станциях «о.Диксон», «мыс Челюскин» и «о.Хейса»

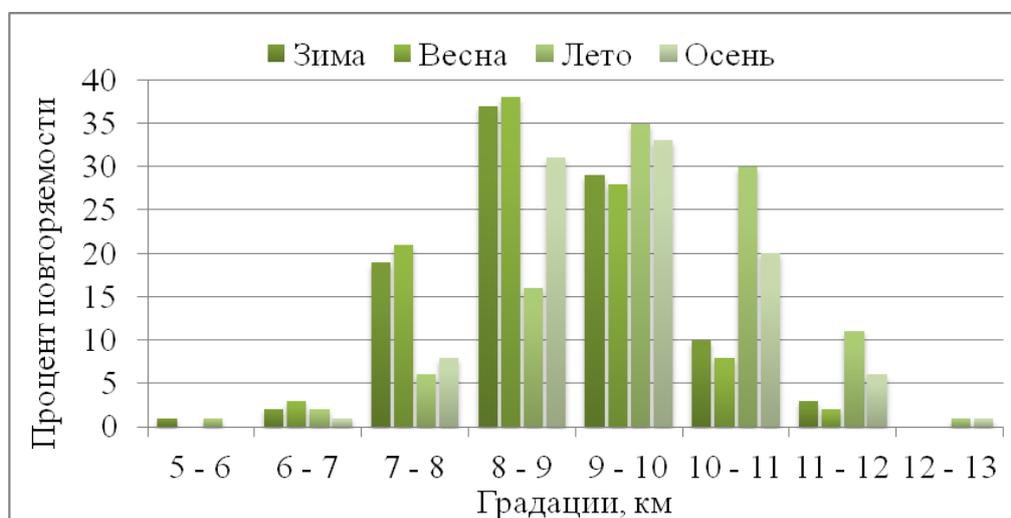


Рисунок 3.6 - Повторяемость высоты тропопаузы за период 2017-2021гг. на станции «о.Диксон»

На графике (рис.3.6) рассчитана повторяемость высоты тропопаузы на станции «о.Диксон» за весь рассматриваемый период за каждый сезон. Над данной обсерваторией были зафиксированы повторения самых низких высот тропопаузы с 5 до 6 тысяч километров (менее 2%). Самая частая повторяемость более 35% была отмечена в такие сезоны как зима и весна, градацией 8-9 км. В среднем высота над «о.Диксон» варьируется от 8 до 10 километров (более 30%). Самая высокая тропопаузы была летом и осенью в градациях 12-13 километров (менее 2%).

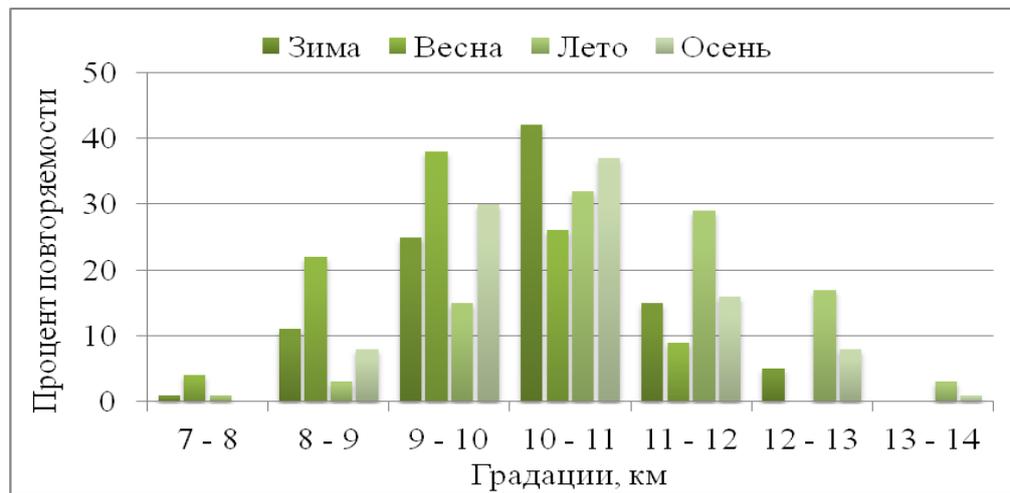


Рисунок 3.7 - Повторяемость высоты тропопаузы за период 2017-2021гг. на станции «мыс Челюскин»

Повторяемость высоты тропопаузы над станцией «мыс Челюскин» (рис.3.6) показала, что чаще всего наиболее высокая тропопауза наблюдалась зимой в районе 10-11 км (более 40%). Самая низкая высота тропопаузы фиксируется от 7 до 8 км (менее 4%), зимой и весной. Самая высокая тропопауза фиксируется от 13 до 14 км (менее 3%). В среднем повторяемость высоты полярной тропопаузы над обсерваторией «мыс Челюскин» составляет 10 – 11 км.

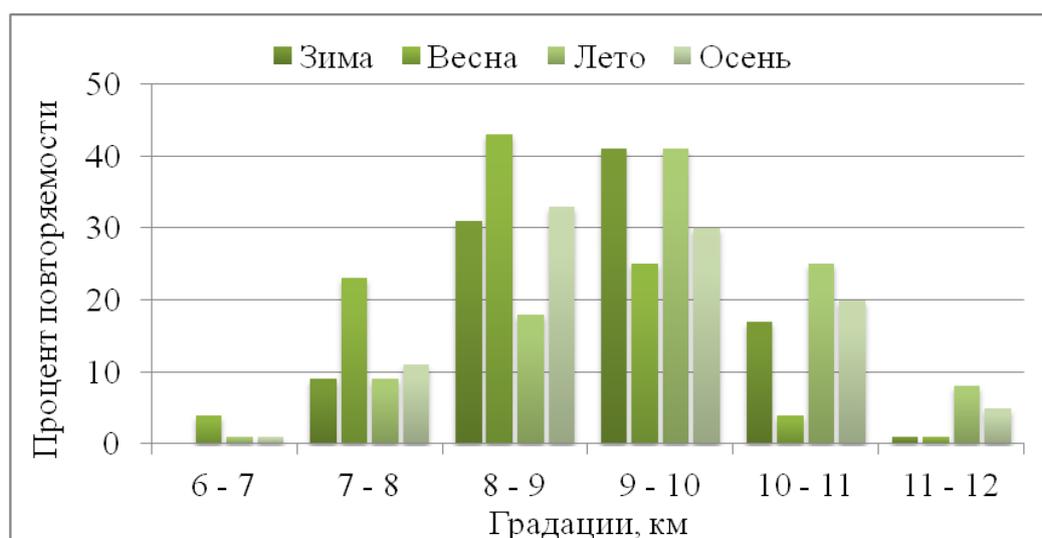


Рисунок 3.8 - Повторяемость высоты тропопаузы за период 2017-2021 гг. на станции «о.Хейса»

Над обсерваторией «о.Хейса» (рис.3.8) самая частая повторяемость высоты переходного слоя составляет более 40% в градациях от 8-10 километров в весенний и летний сезон. Самая низкая тропопаузы была на высоте 6-7 километров (менее 4%) за весенний период. Самая высокая тропопауза достигала 11-12 километров (менее 9%) и наблюдалась преимущественно в летний и осенний сезон.

Ниже представлены гистограммы осредненных данных высоты переходного слоя на каждой выбранной станции за пять лет.

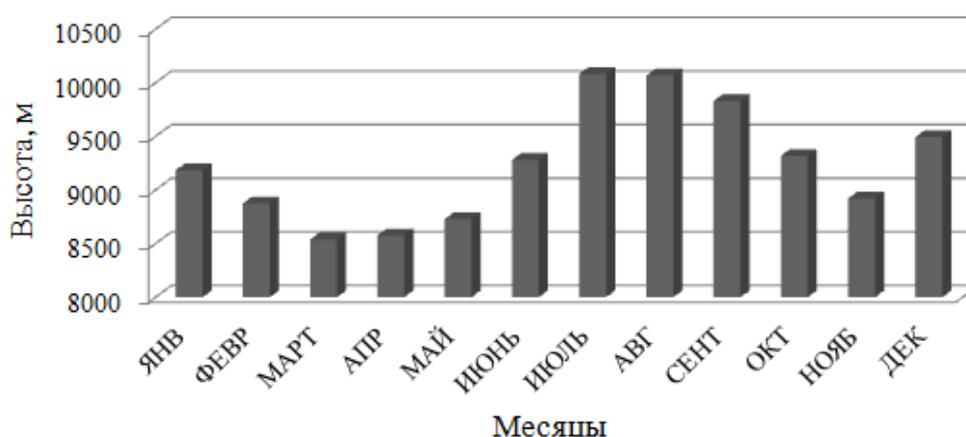


Рисунок 3.9 – Годовой ход высоты тропопаузы за период 2017-2021гг. на станции «о.Диксон»

На станции «о.Диксон» (рис.3.9) наблюдается довольно плавный ход высоты тропопаузы с заметным ростом значений в летний сезон и малыми значениями в весенне-осенний период.

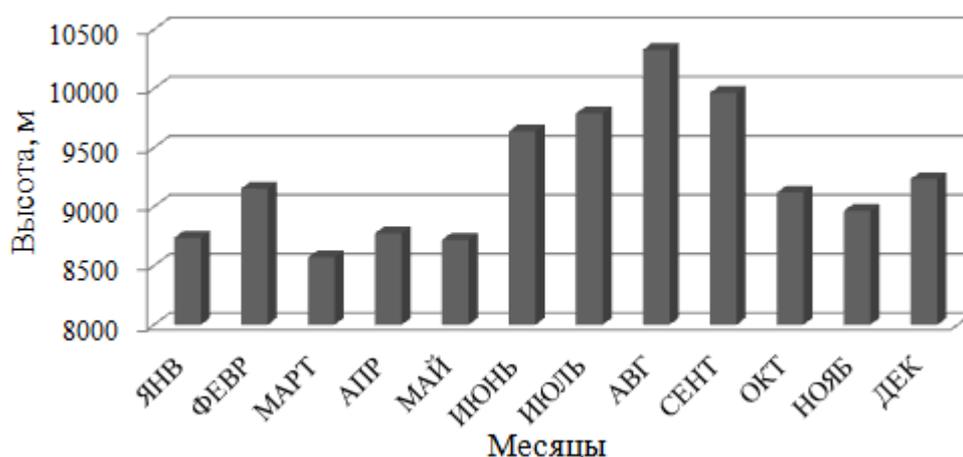


Рисунок 3.10 – Годовой ход высоты тропопаузы за период 2017-2021гг. на станции «мыс Челюскин»

На станции «мыс Челюскин» (рис.3.10) заметен более резкий перепад значений высоты тропопаузы, но также прослеживается характерный рост высоты к летнему сезону и спад к зимне-весеннему. В сравнение с другими станциями на «мыс Челюскин» в летний сезон фиксируются самые высокие значения высоты переходного слоя.

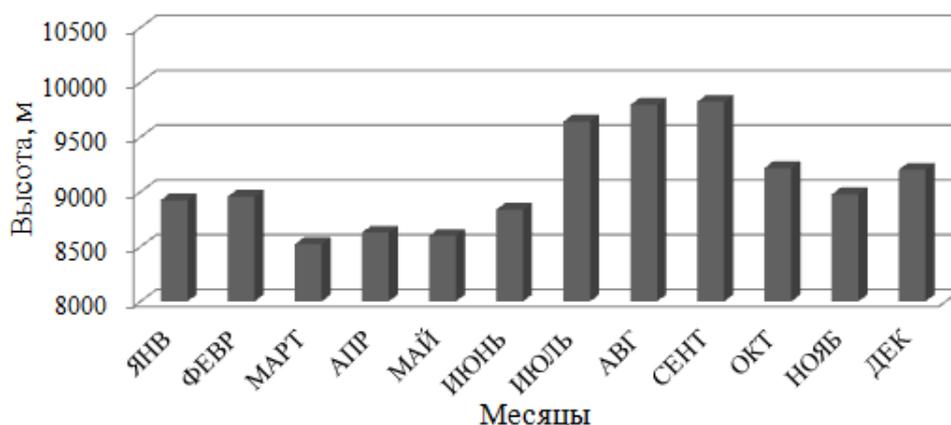


Рисунок 3.11 – Годовой ход высоты тропопаузы за период 2017-2021гг. на станции «о.Хейса»

Годовой ход высоты тропопаузы на станции «о.Хейса» (рис.3.11) имеет плавный и заметный переход высот тропопаузы от сезона к сезону. Данные высоты субстратосферы обсерватории «о.Хейса» в отличие от двух других станций имеют более низкие значения в рассматриваемые года.

3.3 Множественная тропопауза

При изучении переходного слоя в полярных широтах поднимается большая проблема неопределенности, поскольку тропосфера изрядно «слоистая», из-за наличия большого количества инверсий. Поэтому в полярных широтах можно идентифицировать две или даже три тропопаузы, отвечающие определению (ВМО).

Рассмотрим количество зафиксированных случаев двойной тропопаузы на каждой станции на протяжении пяти лет за каждый месяц (таб. 3.7 – 3.9).

Таблица 3.7 - Зафиксированное количество второй полярной тропопаузы на станции «о.Диксон» за каждый год

	Месяц	2017	2018	2019	2020	2021
	Год					
о.Диксон	Январь	3	2	-	9	1
	Февраль	6	4	1	1	2
	Март	10	9	3	2	3
	Апрель	2	3	-	3	4
	Май	-	-	-	-	1
	Июнь	1	2	2	-	2
	Июль	-	5	-	-	4
	Август	2	-	1	-	1
	Сентябрь	1	3	1	-	1
	Октябрь	1	-	3	-	2
	Ноябрь	3	-	4	-	5
	Декабрь	5	2	3	1	9

Таблица 3.8 - Зафиксированное количество второй полярной тропопаузы на станции «мыс Челюскин» за каждый год

	Месяц	2017	2018	2019	2020	2021
	Год					
мыс Челюскин	Январь	10	6	3	4	8
	Февраль	3	7	3	7	5
	Март	7	4	4	6	8
	Апрель	1	3	2	10	4
	Май	1	-	1	5	-
	Июнь	4	-	4	3	4
	Июль	2	3	5	3	7
	Август	1	1	1	2	1
	Сентябрь	-	2	1	2	1
	Октябрь	2	5	2	4	-
	Ноябрь	-	3	4	7	4
	Декабрь	7	5	1	11	3

Таблица 3.9 - Зафиксированное количество второй полярной тропопаузы на станции «о.Хейса» за каждый год

	Месяц	2017	2018	2019	2020	2021
	Год					
о.Хейса	Январь	11	11	7	9	12
	Февраль	5	3	10	7	7
	Март	2	6	7	12	10
	Апрель	-	2	8	8	8
	Май	-	2	3	1	6
	Июнь	5	6	8	7	10
	Июль	5	6	6	6	9
	Август	5	1	1	3	-
	Сентябрь	2	2	5	5	4
	Октябрь	6	3	6	10	5
	Ноябрь	3	10	7	16	12
	Декабрь	8	9	5	11	11

Анализируя полученные данные, можно зафиксировать большее количество наблюдаемой второй тропопаузы над станцией «о.Хейса». С октября месяца по март повторяемость двойной тропопаузы возрастает. В основном это связано с сезонными движениями струйного течения, которое

приводит к деформации тропопаузы на холодной (обращенной к полюсу) стороне течения. Происходит вытеснение стратосферного воздуха в тропосферу, вблизи верхней фронтальной зоны под полярными струйными течениями, вызывая тем самым турбулентность.

На представленных ниже графиках отмечены высоты первой и второй тропопауз. Для анализа были выбраны средние месяцы каждого сезона, т.к. именно в эти месяцы были обнаружены часто повторяющиеся двойные тропопаузы.



Рисунок 3.12 – Высота первой и второй тропопаузы за январь каждого года на станции «о.Хейса»

За рассматриваемые пять лет в январе на станции «о.Хейса» (рис.3.12) было отмечено 50 случаев второй тропопаузы, в некоторых случаях двойная тропопауза наблюдалась несколько суток. На рисунке 3.12 продолжительное существование второй тропопаузы отмечено пунктирной линией, максимальное ее существование длилось четверо суток. Чаще всего двойная тропопауза встречается в единичных случаях. В 2021 году было обнаружено максимальное количество зарегистрированных случаев двойной тропопаузы. Самая высокая вторая тропопауза достигала 15486 м, самая низкая – 9197 м.

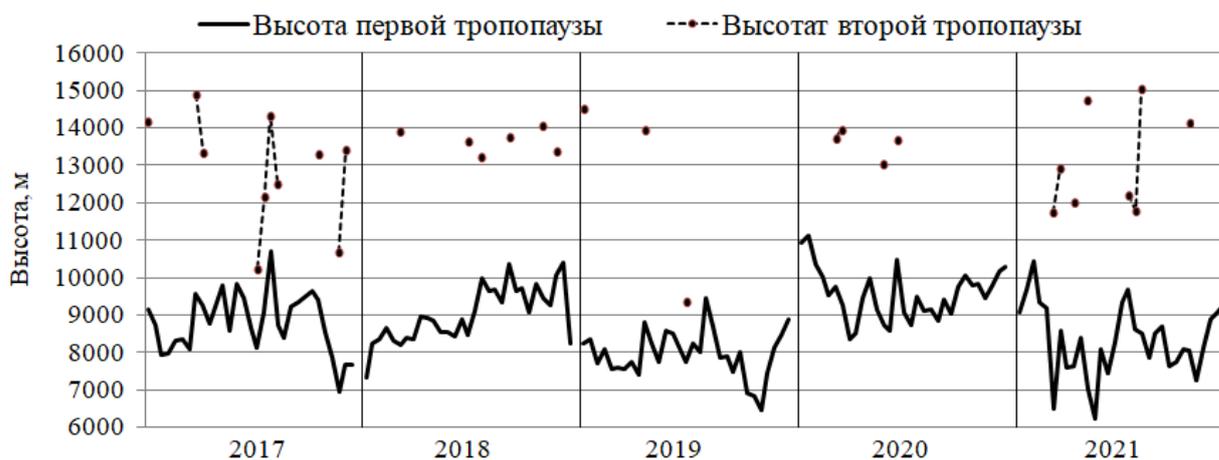


Рисунок 3.13 – Высота первой и второй тропопаузы за январь каждого года на станции «мыс Челюскин»

На станции «мыс Челюскин» (рис.3.13) было обнаружено 31 случай двойной тропопаузы. Продолжительное существование второй тропопаузы длилось четверо суток. В 2017 году было обнаружено максимальное количество зарегистрированных 10 случаев двойной тропопаузы. Самая высокая вторая тропопауза была на высоте 15006 м, самая низкая – 9231 м.

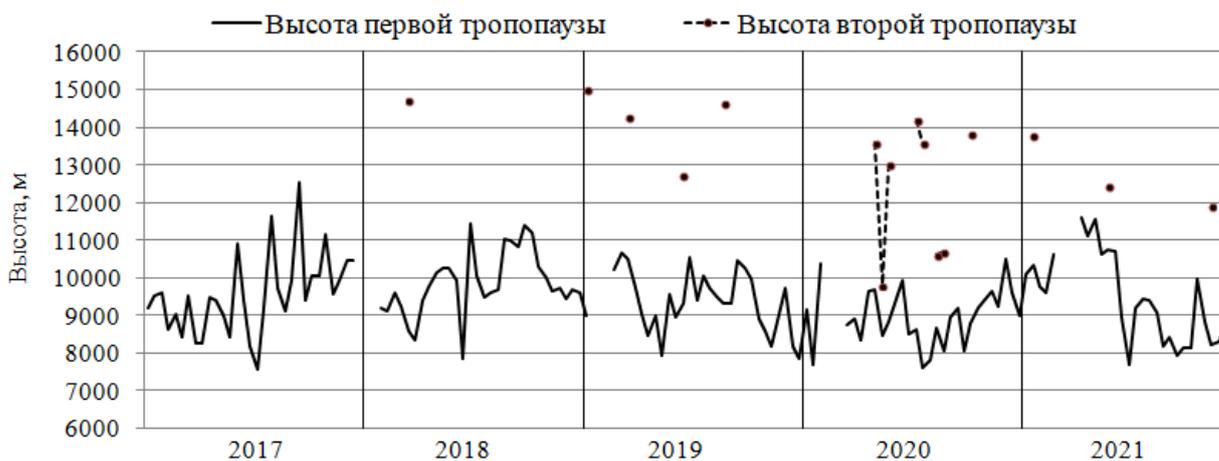


Рисунок 3.14 – Высота первой и второй тропопаузы за январь каждого года на станции «о.Диксон»

На станции «о.Диксон» (рис.3.14) было обнаружено 15 случаев двойной тропопаузы. Продолжительное существование второй тропопаузы на данной

станции длилось трое суток. В январе на данной станции в 2020 году двойная тропопауза встречалась максимальное количество раз – 9 случаев. В 2017 году ни одно случая двойной тропопаузы не было зафиксировано. Самая высокая вторая тропопауза была на высоте 14989 м, самая низкая – 9833 м.



Рисунок 3.15 – Высота первой и второй тропопауз за апрель каждого года на станции «о.Хейса»

На рисунке 3.15 представлен график высот двух тропопауз встречающихся в апреле на станции «о.Хейса». На станции было отмечено 26 случаев второй тропопаузы, в 2017 году второй тропопаузы не наблюдалось. Максимальное существование двойной тропопаузы длилось трое суток. Чаще всего двойная тропопауза встречается в единичных случаях. С 2019 по 2021 год зафиксировано одинаковое количество случаев второй тропопаузы. Самая высокая вторая тропопауза была на уровне 15536 м, самая низкая высота – 10397 м.



Рисунок 3.16 – Высота первой и второй тропопаузы за апрель каждого года на станции «мыс Челюскин»

На рисунке 3.16 представлен график высот двух тропопауз встречающихся в апреле на станции «мыс Челюскин». Было отмечено 20 случаев второй тропопаузы, в 2017 году вторая тропопауза была зафиксирована только один раз. Максимальное существование двойной тропопаузы длилось трое суток. Самая высокая вторая тропопауза достигала 15811 м, самая низкая – 9799 м.



Рисунок 3.17 – Высота первой и второй тропопаузы за апрель каждого года на станции «о.Диксон»

На станции «о.Диксон» (рис.3.17) было обнаружен 12 случаев двойной тропопаузы. Продолжительное существование второй тропопаузы длилось

двое суток. В 2019 году вторая тропопауза отсутствовала. Самая высокая вторая тропопауза была на высоте 15254 м, самая низкая – 9493 м.



Рисунок 3.18 – Высота первой и второй тропопаузы за июль каждого года на станции «о.Хейса»

На рисунке 3.18 представлен график высот двух тропопауз встречающихся в июле на станции «о.Хейса». Было замечено 32 случая второй тропопаузы. Максимальное существование двойной тропопаузы длилось четверо суток. С 2018 по 2020 год зафиксировано одинаковое количество случаев второй тропопаузы. В июле на данной станции в 2021 году двойная тропопауза встречалась максимальное количество раз – 9 случаев. Самая высокая вторая тропопауза была на уровне 15859 м, самая низкая высота – 10898 м.

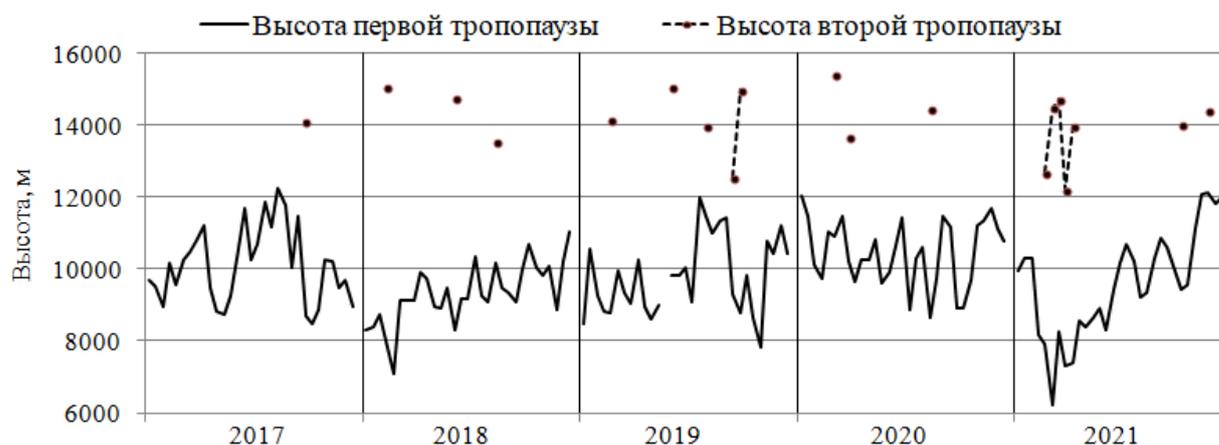


Рисунок 3.19 – Высота первой и второй тропопаузы за июль каждого года на станции «мыс Челюскин»

На станции «мыс Челюскин» (рис.3.19) за июль было отмечено 19 случаев второй тропопаузы, в 2017 году вторая тропопауза была зафиксирована только один раз. Максимальное существование двойной тропопаузы длилось трое суток. Наибольшее количество двойной тропопаузы 7 случаев было обнаружено в 2021 году. Самая высокая вторая тропопауза достигала 15771 м, самая низкая – 12032м.



Рисунок 3.20 – Высота первой и второй тропопаузы за июль каждого года на станции «о.Диксон»

На станции «о.Диксон» (рис.3.20) за июль было отмечено всего 9 случаев второй тропопаузы, в 2017, 2019 и 2020 году вторая тропопауза

отсутствовала. Наибольшее количество двойной тропопаузы 5 случаев было зафиксировано в 2018 году. Самая высокая вторая тропопауза достигала 15411 м, самая низкая – 12103м.

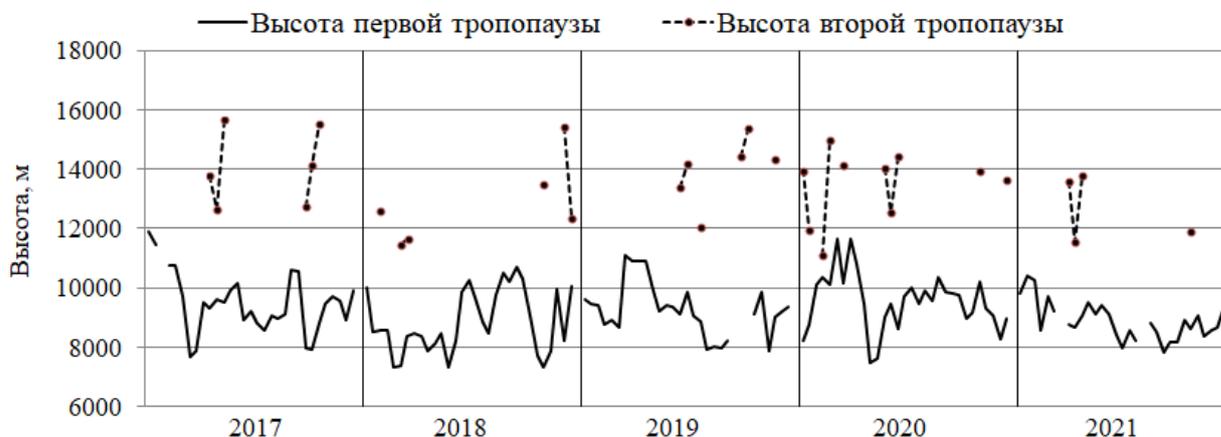


Рисунок 3.21 – Высота первой и второй тропопаузы за октябрь каждого года на станции «о.Хейса»

На рисунке 3.21 представлен график высот двух тропопауз встречающихся в октябре на станции «о.Хейса». На станции было отмечено 30 случаев второй тропопаузы. Максимальное существование двойной тропопаузы длилось трое суток. В 2017 и 2019 годах зафиксировано одинаковое количество случаев второй тропопаузы (6). Самая высокая вторая тропопауза была на уровне 15897 м, самая низкая высота – 11189 м.

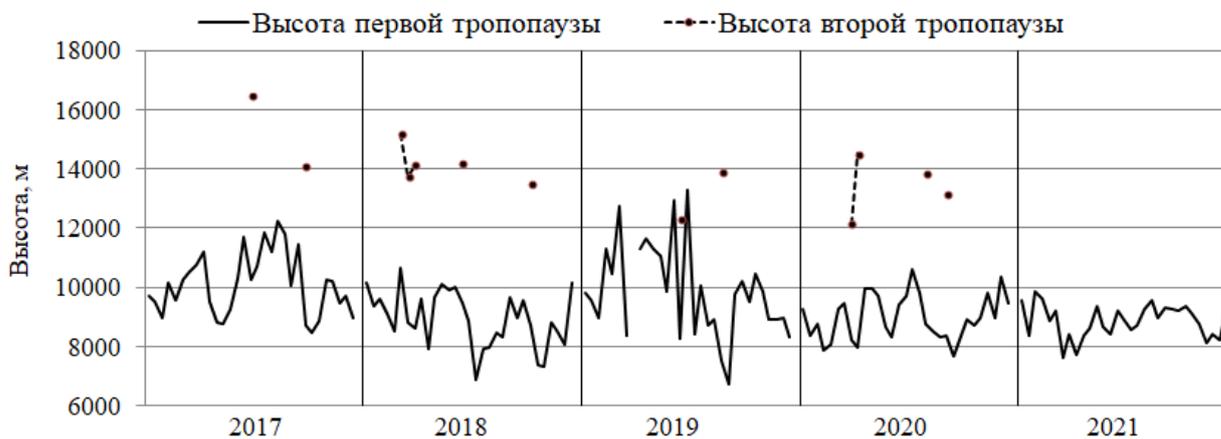


Рисунок 3.22 – Высота первой и второй тропопаузы за октябрь каждого года на станции «мыс Челюскин»

На станции «мыс Челюскин» (рис. 3.22) представлен график высот двух тропопауз встречающихся в октябре. Двойная тропопауза была зафиксирована в 16 случаях, в 2021 году вторая тропопауза отсутствовала. Максимальное существование двойной тропопаузы длилось двое суток. Самая высокая вторая тропопауза достигала 16201 м, самая низкая – 12167 м.



Рисунок 3.23 – Высота первой и второй тропопаузы за октябрь каждого года на станции «о.Диксон»

На станции «о.Диксон» (рис. 3.23) представлен график высот двух тропопауз встречающихся в октябре. Двойная тропопауза была зафиксирована в 6 случаях, в 2018 году вторая тропопауза отсутствовала, в

2017 и 2020 году вторая тропопаузы была зафиксирована в единичном случае. Максимальное существование двойной тропопаузы длилось двое суток. Самая высокая вторая тропопауза достигала 15791 м, самая низкая – 11471 м.

Проведя анализ выше представленных графиков, можно сказать, что двойная тропопауза встречается чаще на станции «о.Хейса» в январе – 36 случаев. Самое редкое фиксирование второй тропопаузы было замечено на станции «о.Диксон» - 6 случаев. Всего случаев двойной тропопаузы над обсерваторией «о.Хейса» было отмечено 375 случая, над обсерваторией «мыс Челюскин» 218 случаев, над обсерваторией «о.Диксон» 133 случая.

В процессе исследования были обнаружены также случаи не только второй, но и третьей тропопаузы. На рисунках 3.24 – 3.26 отмечена множественная полярная тропопауза, встречающаяся больше двух раз. В таблицах 3.10 – 3.12 предоставлены характеристики множественных тропопауз.

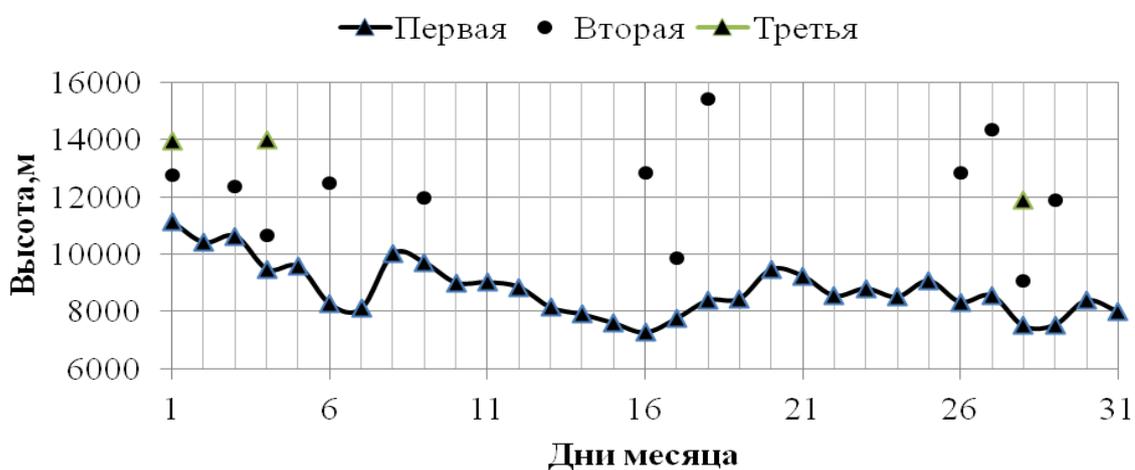


Рисунок 3.24 - Множественная тропопауза за январь 2021г. на станции «о.Хейса»

На станции «о.Хейса» третья тропопауза встречается чаще, чем над другими выбранными обсерваториями. В январе 2021 года было зафиксировано три случая множественной тропопаузы. Разница между второй и третьей тропопаузой составляла от 2 до 3 км. С Появление

множественной тропопаузы на станции «о.Хейса» объясняется частыми прохождением над обсерваторией циклонов.

Таблица 3.10 – Характеристики тропопауз за январь 2021г.
на станции «о.Хейса»

Дата	Высота, м	Давление, гПа	Температура, С°	Направление ветра, град	Скорость ветра, м/с
Первая зафиксированная тропопауза					
1.12	11270	200	-76.1	290	18
4.12	8630	300	-60.3	240	18
28.12	7153	363	-60.1	90	17
Вторая зафиксированная тропопауза					
1.12	12739	156	-72.3	355	6
4.12	10647	218	-58.9	235	11
28.12	9066	268	-60.3	60	10
Третья зафиксированная тропопауза					
1.12	13960	127	-72.9	5	4
4.12	14000	127	-65.7	300	9
28.12	11899	171	-61.3	40	11

Также над станцией «о.Диксон» (рис.3.25) в 2018 году за июль были обнаружены шесть случаев второй и три случая третьей тропопаузы.

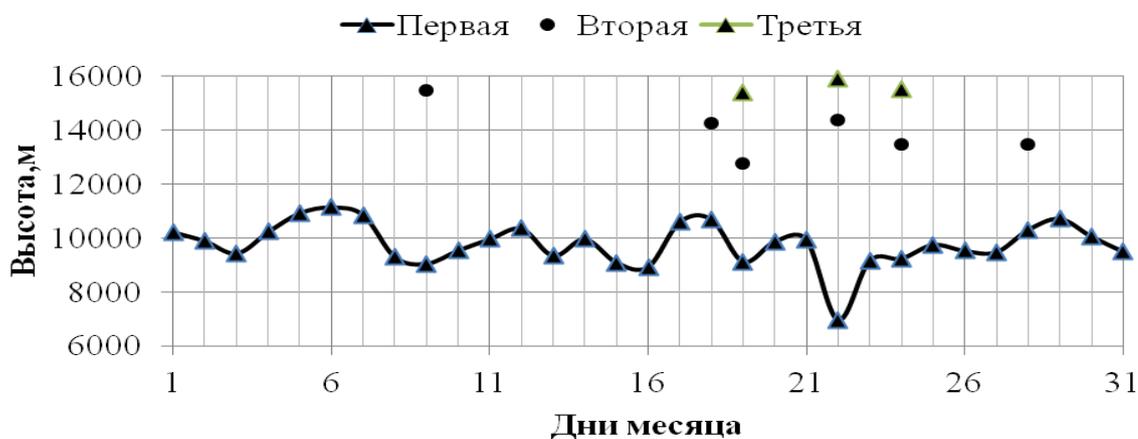


Рисунок 3.25 - Множественная тропопауза за июль 2018 г.
на станции «о.Диксон»

Таблица 3.11 – Характеристики тропопауз за июль 2018 г.
на станции «о.Диксон»

Дата	Высота, м	Давление, гПа	Температура, С°	Направление ветра, град	Скорость ветра, м/с
Первая зафиксированная тропопауза					
19.06	9116	295	-46.9	245	38
22.06	6949.5	360	-42.5	295	31
24.06	9226.5	289	-44.3	295	31
Вторая зафиксированная тропопауза					
19.06	12749	174	-42.3	225	20
22.06	14346	137	-41.7	250	8
24.06	13444	157	-43.7	300	9
Третья зафиксированная тропопауза					
19.06	15380	118	-46.5	240	11
22.06	15880	100	-43.5	240	7
24.06	15490	100	-43.9	280	6

Над станцией «мыс Челюскин» (рис.3.26) в 2019 году за июль были обнаружены пять случаев второй и два случая третьей тропопаузы.

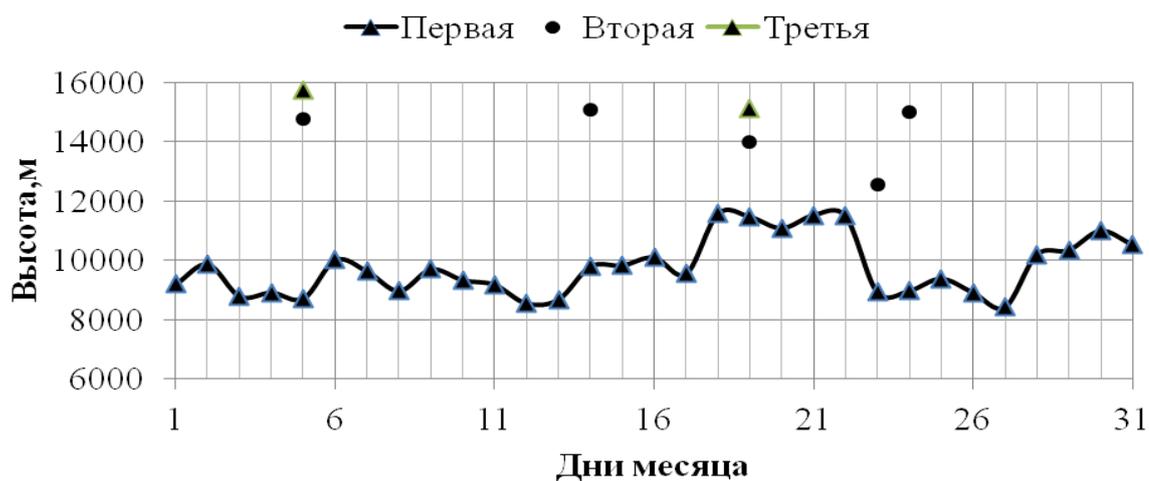


Рисунок 3.26 - Множественная тропопауза за июль 2019 г.
на станции «мыс Челюскин»

Таблица 3.12 – Характеристики тропопауз за июль 2019 г.
на станции «мыс Челюскин»

Дата	Высота, м	Давление, гПа	Температура, С°	Направление ветра, град	Скорость ветра, м/с
Первая зафиксированная тропопауза					
5.06	8777	313	-45.9	60	26
19.06	11460	219	-54.9	290	43
Вторая зафиксированная тропопауза					
5.06	14139	142	-44.5	5	13
19.06	13984	149	-49.9	305	18
Третья зафиксированная тропопауза					
5.06	15743	112	-44.3	20	9
19.06	16111	108	-47.7	295	16

Анализируя частую повторяемость в июле множественной тропопаузы в Арктике, можно сказать о воздействии интенсивного вертикального обмена, который, взамен связан с притоком солнечной радиации к земной поверхности, увеличивая турбулентный обмен до больших высот.

3.4 Зависимость температуры от высоты полярной тропопаузы

Чередование континентов, островов и океанов, морей в широтах северного полушария приводит к большой разнице температур вдоль широтных кругов. Это в свою очередь приводит к интенсивному межширотному обмену воздушными массами в тропосфере. Осуществление горизонтального переноса тепла в северном полушарии совершается как в результате упорядоченных средних и макротурбулентных движений в атмосфере, так и влиянием мощных теплых океанических течений. Они вносят наиболее существенный вклад в формирование зимнего тропосферного температурного поля. Тем не менее, вклад выхолаженных континентов может перекрывать действие адвективных притоков тепла от

океана. В результате на уровне нижней тропосферы (уровень моря – 500 гПа) в северном полушарии зимой холоднее, а летом наоборот теплее.

Таблица 3.13 - Температура на уровне тропопаузы за 2017-2021 гг.

Температура, С°		Годы				
		2017	2018	2019	2020	2021
о.Диксон	min	-76.7	-82.1	-72.1	-77.1	-79.5
	max	-56.5	-47.9	-45.9	-52.3	-50.3
	s	-65.8	-64.9	-62.8	-66.0	-62.3
м. Челюскин	min	-74.7	-74.3	-71.5	-84.9	-73.1
	max	-52.5	-47.7	-51.5	-53.7	-46.1
	s	-63.4	-62.0	-61.0	-67.1	-62.4
о. Хейса	min	-72.7	-73.9	-69.9	-80.1	-76.1
	max	-53.5	58.1	-50.3	-58.9	-50.5
	s	-63.2	-62.2	-60.4	-66.9	-62.8

Где: max – максимальная температура тропопаузы, м;

min – минимальная температура тропопаузы, м;

s – среднемесячная температура тропопаузы, м.

В таб.3.13 приведены значения минимально, максимальной и средней температуры на уровне полярной тропопаузы за 2017-2021 гг. Самая высокая температура -45,9 С°, была зафиксирована над станцией «о.Диксон» в 2019 году. Самая низкая температура -84,9 С° над станцией «мыс Челюскин» в 2020 году. Средняя температура на уровне полярной тропопаузы над выбранными обсерваториями варьировалась от -60 С° до -67 С°.

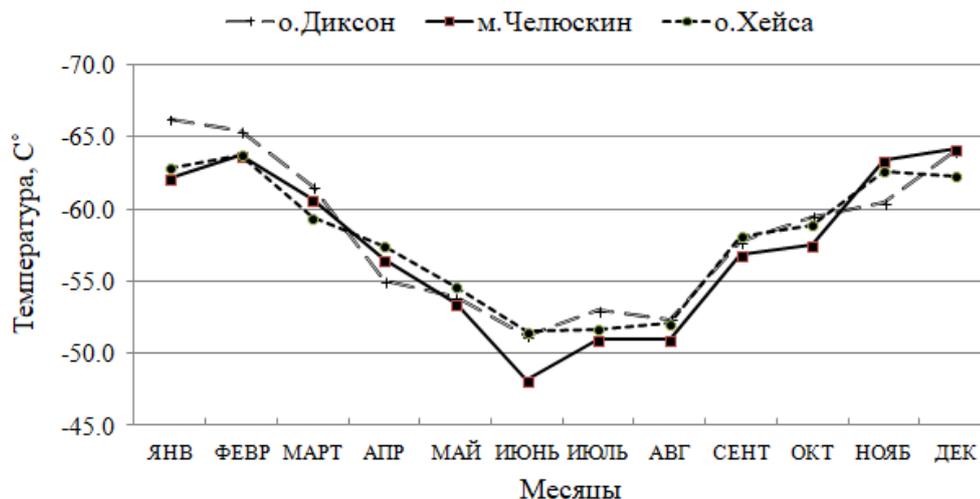


Рисунок 3.27 - Годовой ход температуры на уровне тропопаузы за период 2017-2021 гг.

На графике (рис.3.27) ярко выражен годовой ход температуры на уровне полярной тропопаузы за 2017-2021гг. над выбранными обсерваториями. Самые высокие температуры наблюдаются в летний сезон от -53 C° до -44 C° . Низкие температуры фиксируются в зимний сезон колеблются от -67 C° до -63 C° . Летом в Арктике уменьшение или увеличение высоты тропопаузы, зависит от интенсивного вертикального обмена, который объясняется притоком солнечной радиации к поверхности, тем самым увеличивая турбулентный обмен до больших высот.

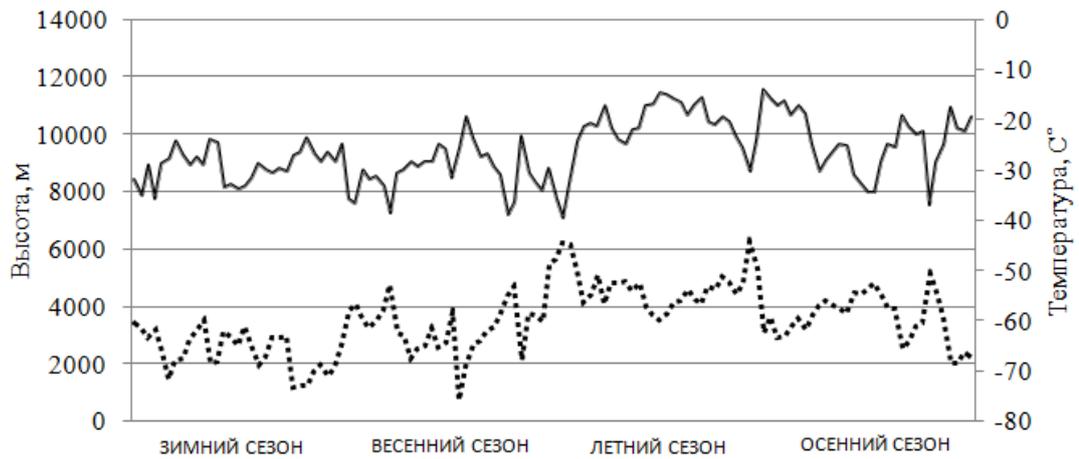


Рисунок 3.28 - Временная изменчивость высоты тропопаузы (сплошная линия) и температуры (пунктирная линия) на ее уровне, на станции «о.Диксон» за период 2017-2021 гг.

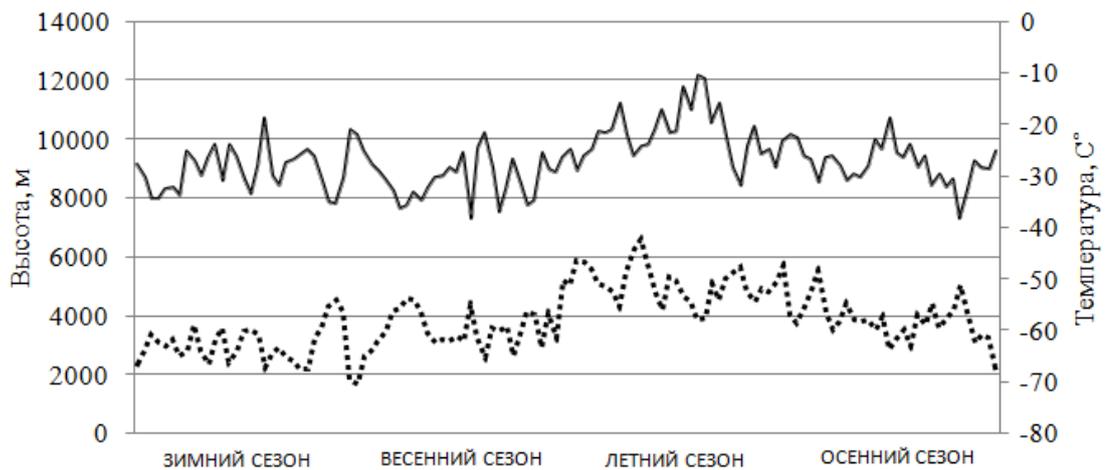


Рисунок 3.29 - Временная изменчивость высоты тропопаузы (сплошная линия) и температуры (пунктирная линия) на ее уровне, на станции «мыс Челюскин» за период 2017-2021 гг.

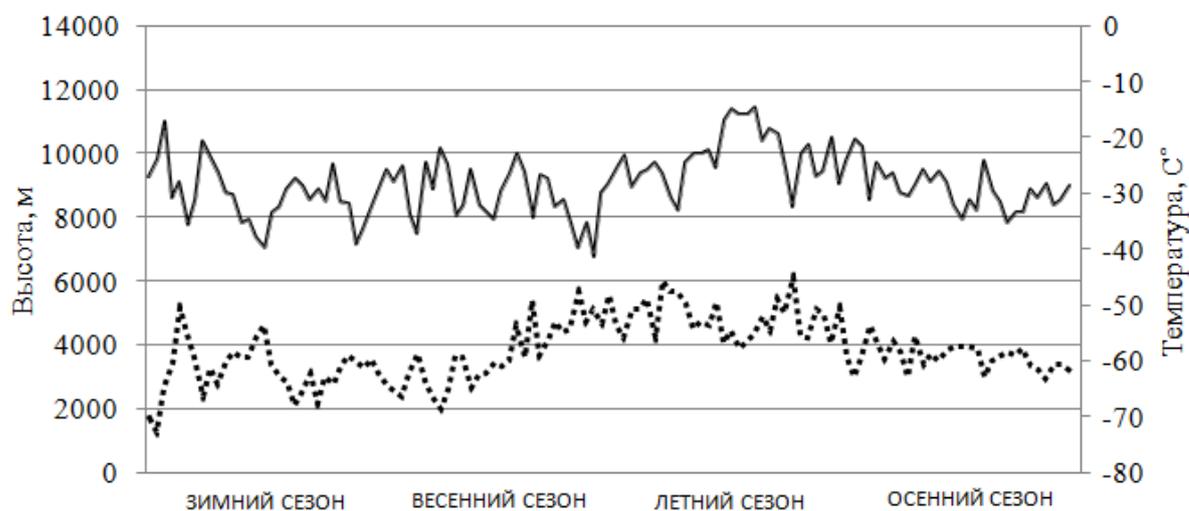


Рисунок 3.30 - Временная изменчивость высоты тропопазы (сплошная линия) и температуры (пунктирная линия) на ее уровне на станции «о.Хейса» за период 2017-2021 гг.

Изменения температуры на уровне нижней стратосфере колеблются как в годовом ходе, так и на ежедневной основе. Иногда за сутки температура на уровне переходного слоя может изменяться на 10-20 °С. Изменения температуры и высоты тропопазы описываются прохождением областей низкого и высокого атмосферного давления - циклонов и антициклонов. В циклонах температура повышается, тропопауза снижается, в антициклонах температура понижается высота тропопазы приподнимается.

В связи с этим, сравнивая годовой ход температуры и высоты, наблюдаем (рис.3.28, рис.3.29, рис.3.30), что с увеличением высоты тропопазы (летом) температура ее также растет; наоборот, с уменьшением высоты тропопазы (зимой) температура ее падает.

Летом температура на уровне тропопазы имеет, в большинстве случаев, более высокие значения, чем зимой. Отмеченные ниже закономерности подтверждаются и данными характеристик тропопазы (высота и температура) для рассматриваемых станций (рис.3.31, рис.3.32, рис.3.33).

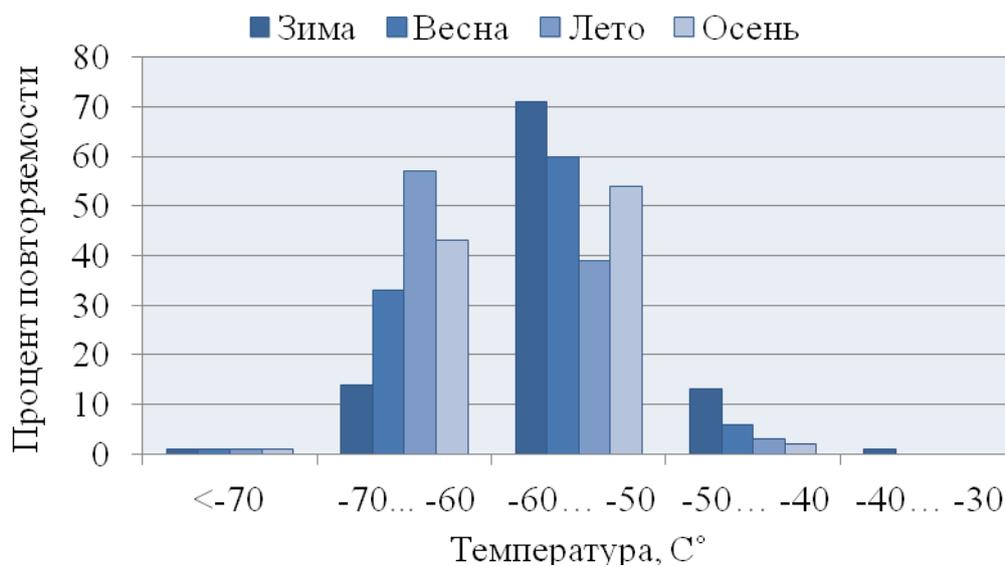


Рисунок 3.31 - Повторяемость температуры на уровне тропопаузы за период 2017-2021гг. на станции «о.Диксон»

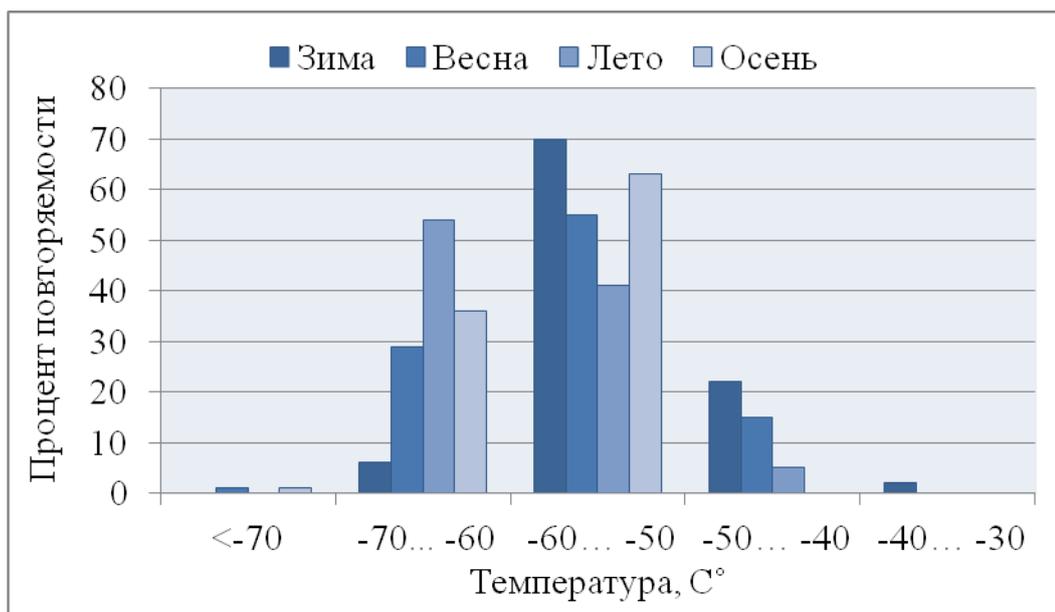


Рисунок 3.32 - Повторяемость температуры на уровне тропопаузы за период 2017-2021гг. на станции «мыс Челюскин»

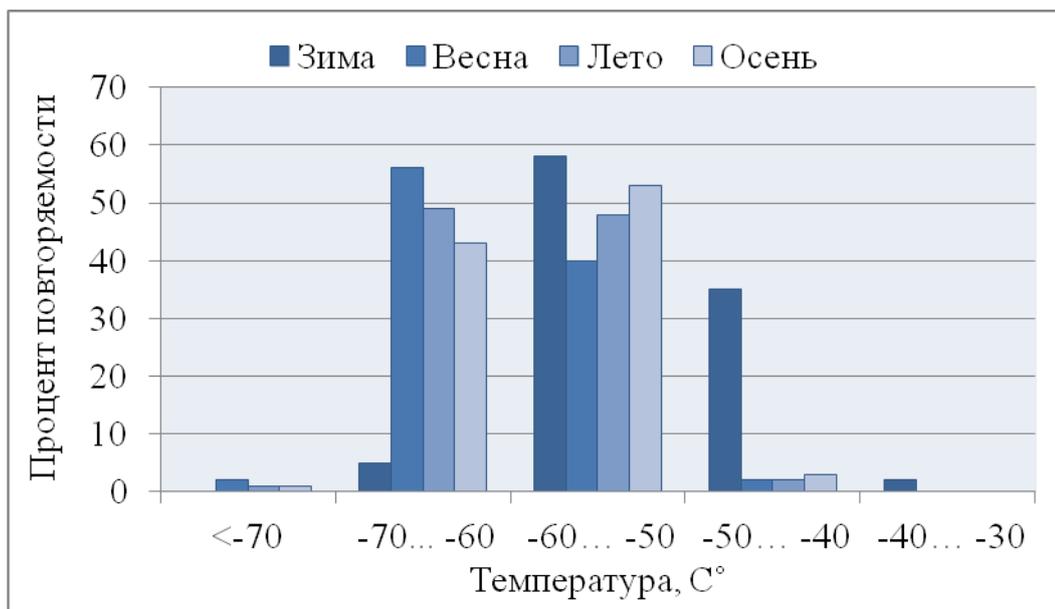


Рисунок 3.33 - Повторяемость температуры на уровне тропопаузы за период 2017-2021гг. на станции «о.Хейса»

На графике (рис.3.31) рассчитана повторяемость температуры на уровне тропопаузы на станции «о.Диксон» за весь рассматриваемый период за каждый сезон. Над данной обсерваторией были зафиксированы повторения самых низких температур ($< -70\text{ С}^\circ$), которое составило менее 2%. Самая высокая температура на уровне переходного слоя была зафиксирована зимой $-40\dots-30\text{ С}^\circ$ (1%). В среднем температура на рассматриваемом уровне над «о.Диксон» варьируется от -60 до -50 С° (более 60%).

На графике (рис.3.32) повторяемость температуры на уровне тропопаузы на станции «мыс Челюскин» за весь рассматриваемый период за каждый сезон. Над данной обсерваторией были зафиксированы повторения самых низких температур весной и осенью ($< -70\text{ С}^\circ$), которое составило менее 2%. Самая высокая температура на уровне переходного слоя была зафиксирована зимой $-40\dots-30\text{ С}^\circ$ (1%). В среднем температура на рассматриваемом уровне над «о.Диксон» варьируется от -60 до -50 С° (более 60%).

Повторяемость на графике (рис.3.33) температуры на уровне тропопаузы на станции «о.Хейса» за весь рассматриваемый период за каждый сезон. Над данной обсерваторией были зафиксированы повторения самых низких температур ($< -70\text{ C}^\circ$), которое составило менее 2% во все сезоны, кроме зимы. Самая высокая температура на уровне переходного слоя была зафиксирована зимой $-40\dots-30\text{ C}^\circ$ (1%). В среднем температура на рассматриваемом уровне над «о.Диксон» варьируется от -70 до -50 C° (более 40%).

За все рассматриваемые года с 2017 по 2021 самая часто повторяющаяся температура на уровне тропопаузы варьировалась в пределах $-60\dots-50\text{ C}^\circ$. Самая минимальная температура достигала -84.9 C° на станции «мыс Челюскин» в 2020 году 23 января. Самая максимальная температура на уровне тропопаузы была зафиксирована в значении -37.9 C° так же на станции «мыс Челюскин» в 2021 году 17 июня.

3.5 Анализ высоты тропопаузы и ветра на ее уровне

Таблица 3.14 Скорость ветра на уровне тропопаузы за 2017-2021 гг.

Скорость ветра, м/с		2017	2018	2019	2020	2021
о.Диксон	min	2	3	2	2	1
	max	47	57	47	68	42
	s	15	21	14	17	17
Мыс Челюскин	min	2	2	2	2	2
	max	44	38	41	42	41
	s	14	14	13	14	16
о.Хейса	min	2	2	2	1	2
	max	45	64	34	99	54
	s	15	17	13	12	17

Где: max – максимальная температура тропопаузы, м;

min – минимальная температура тропопаузы, м;

s – среднемесячная температура тропопаузы, м.

В табл. 3.14 представлены минимальные, максимальные и средние значения скорости ветра на уровне тропопаузы для всех сезонов с 2017 по 2021 год. Скорость ветра на рассматриваемом уровне испытывает колебания в зависимости от расположения станции и времени года. На уровне тропопаузы за рассматриваемый период на всех метеостанциях не наблюдался штиль, минимальная скорость ветра на трех станциях за все года были в пределах 1-2 м/с. Самая высокая скорость ветра была зафиксирована в 2020 году на двух станциях «о.Хейса» (99 м/с) и «о.Диксон» (68 м/с). Анализируя средних значений высоты тропопаузы за все года можно отметить ее постоянные колебания в пределах 12 – 20 м/с.

Ниже представлены графики временной изменчивости высоты переходного слоя и скорости ветра на этом уровне, осредненная по сезонам за пять лет на каждой станции.

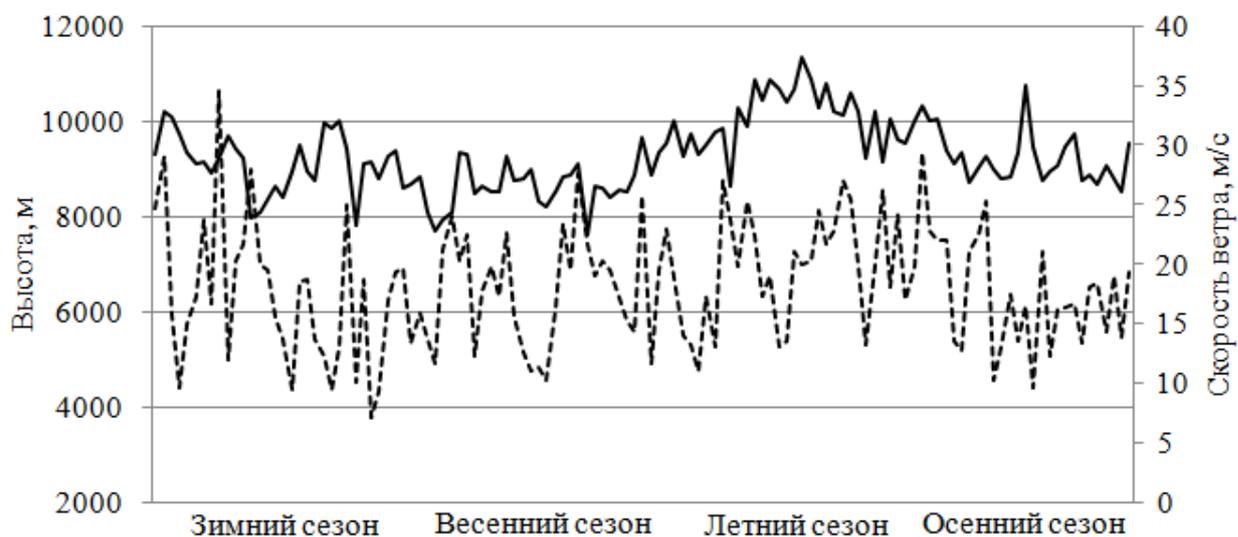


Рисунок 3.34 - Временная изменчивость высоты тропопаузы (сплошная) и скорости ветра (пунктирная) на ее уровне, на станции «о.Диксон» за 2017-2021 гг.

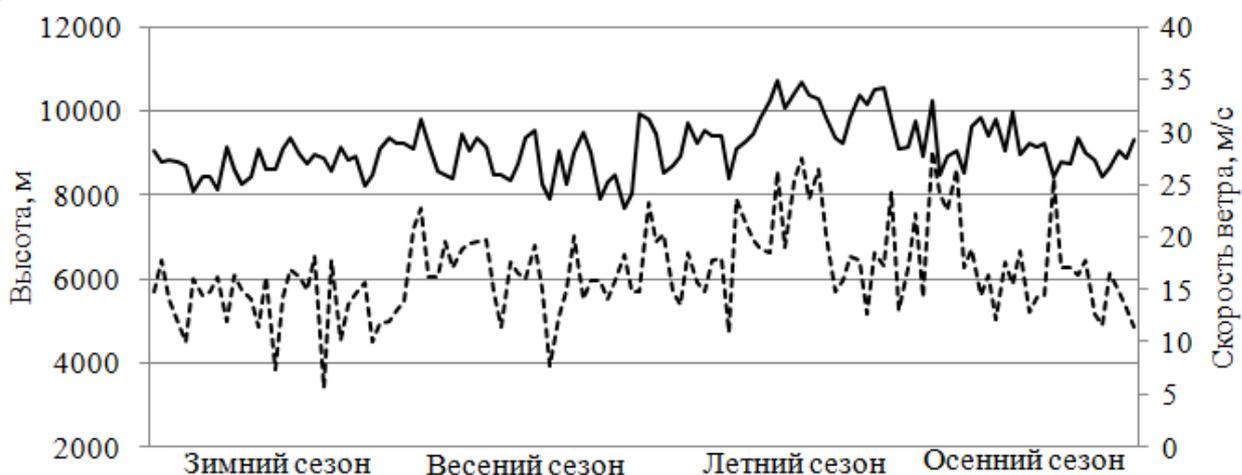


Рисунок 3.35 - Временная изменчивость высоты тропопаузы (сплошная) и скорости ветра (пунктирная) на ее уровне, на станции «мыс Челюскин» за 2017-2021гг.

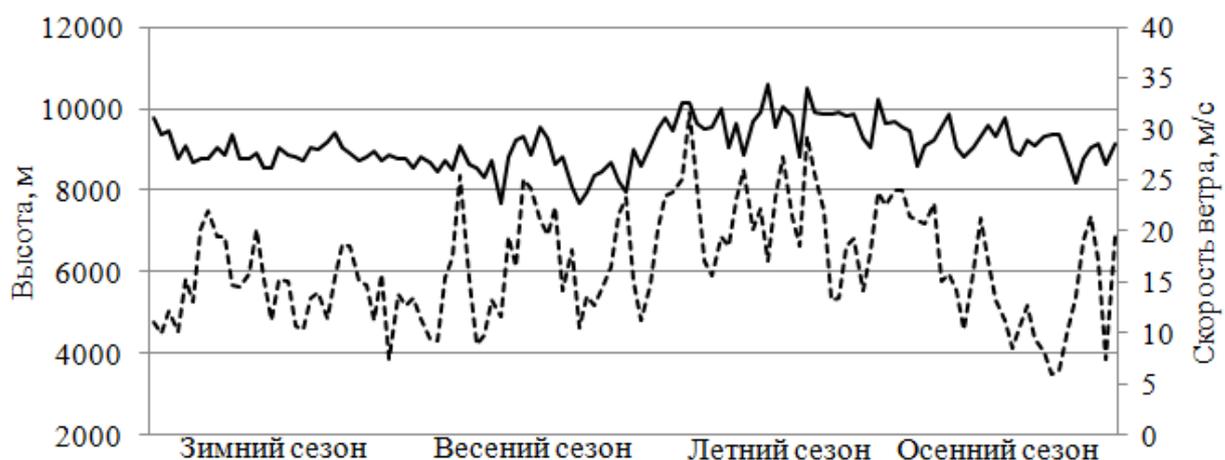


Рисунок 3.36 - Временная изменчивость высоты тропопаузы (сплошная) и скорости ветра (пунктирная) на ее уровне, на станции «о.Хейса» за 2017-2021гг.

На графиках ниже (рис.3.37, рис.3.38, рис.3.39) рассчитана повторяемость скорости ветра на уровне тропопаузы на станциях «о.Диксон», «мыс Челюскин» и «о.Хейса» за 2017 -2021 гг. за каждый сезон.

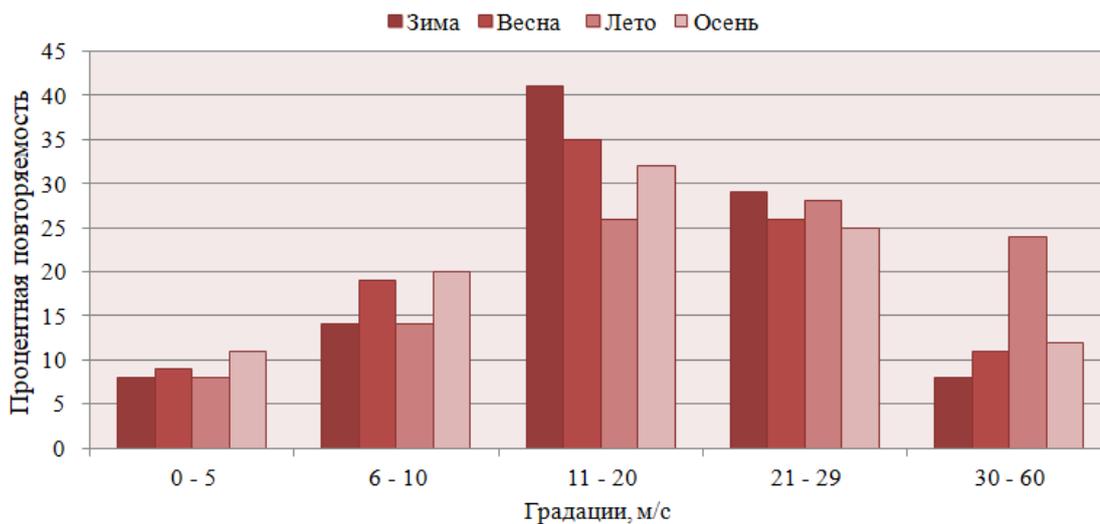


Рисунок 3.37 - Процентная повторяемость скорости ветра на уровне тропопаузы за период 2017-2021гг. на станции «о.Диксон»

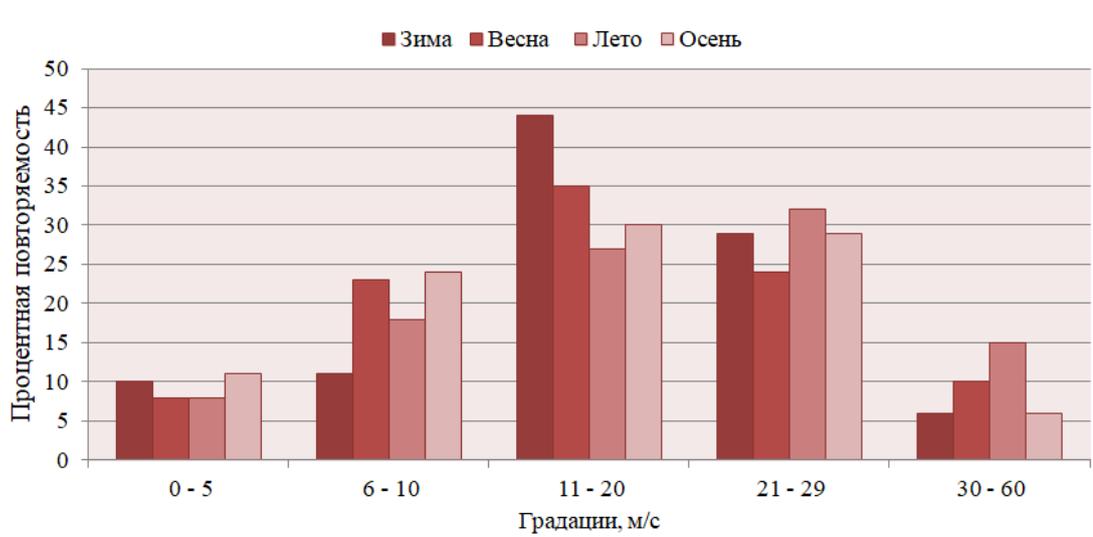


Рисунок 3.38 - Процентная повторяемость скорости ветра на уровне тропопаузы за период 2017-2021гг. на станции «мыс Челюскин»

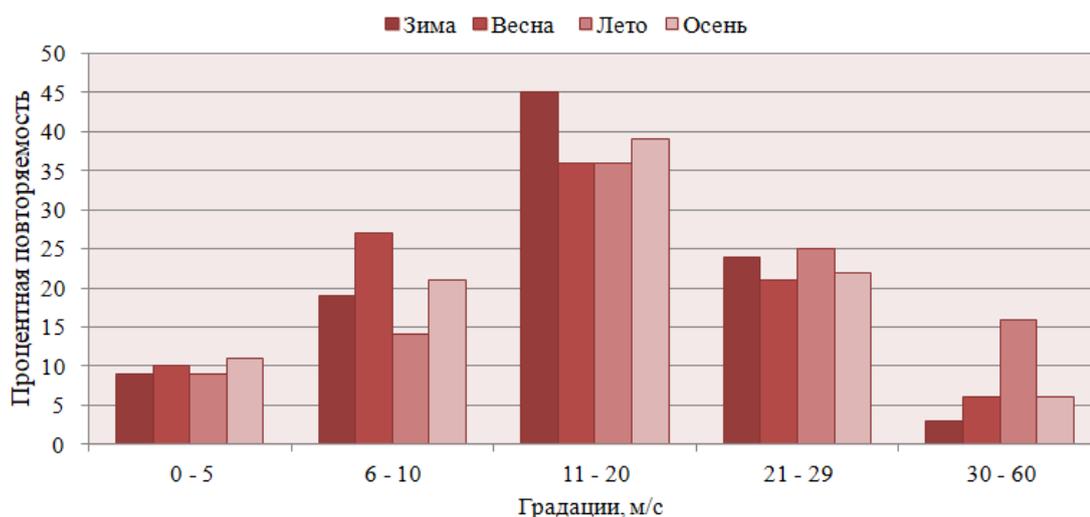


Рисунок 3.39 - Процентная повторяемость скорости ветра на уровне тропопаузы за период 2017-2021гг. на станции «о.Хейса»

На графике (рис.3.37) самая частая повторяемость скорости ветра на станции «о.Диксон» составляет 41% в градации 11-20 м/с в зимний период, в весенний – 35%, в летний – 26%, в осени – 32%. По сравнению со всеми сезонами, скорости ветра на станции «о.Диксон» чаще превышают 30 м/с в летний сезон - более 20%.

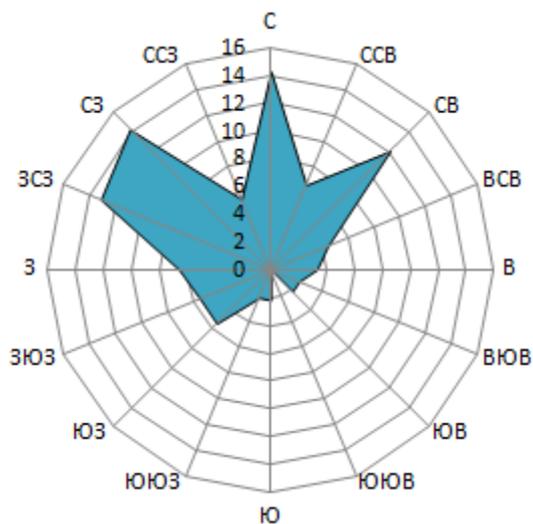
Самая частая повторяемость скорости ветра на станции «мыс Челюскин» (рис.3.38) приходится на зимний период в градации 11-20 м/с - 44%, в весенний – 35%, в летний – 28%, а в осенний 30%. Самая частая повторяемость больших скоростей ветра от 30 до 60 м/с, зафиксированы летом 15 % .

Процентная повторяемость скорости ветра на станции «о.Хейса» (рис.3.39) в зимний сезон в градации 11-20 м/с составляет 45%, в весенний и летний 36%, в осенний 39%. В летний сезон на станции зафиксирована наибольшая процентная повторяемость скорости ветра, превышающая 30 м/с, составляет более 20%.

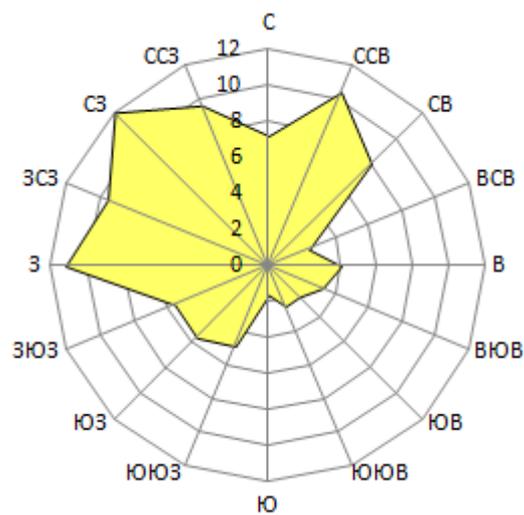
Ниже представлены розы ветров осредненных данных за пять лет для каждой станции. Для анализа были выбраны средние месяцы каждого

сезона, т.к. именно в эти месяцы были обнаружены часто повторяющиеся направления ветров на уровне тропопаузы.

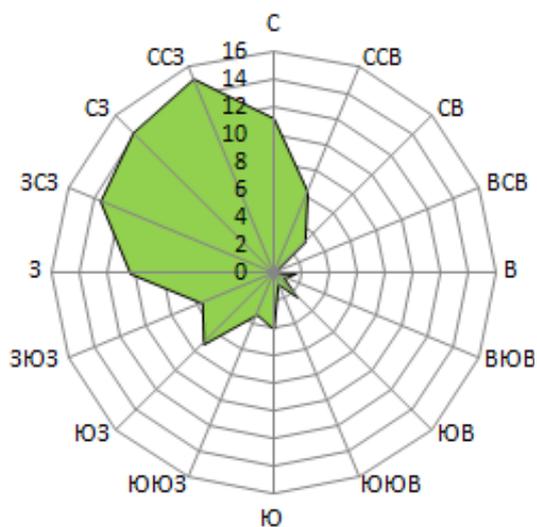
На рисунке 3.40 рассчитана повторяемость направления ветра на уровне субстратосферы за пять лет на станции «о.Диксон». Над рассматриваемой станцией господствуют северо-западные ветра(14%), дующие с Карского моря. Даже в летний сезон направление ветра остается северо-западным. Только в весенне-осенние сезоны встречается юго-восточное направление ветра (2%), чаще юго-западное (5%).



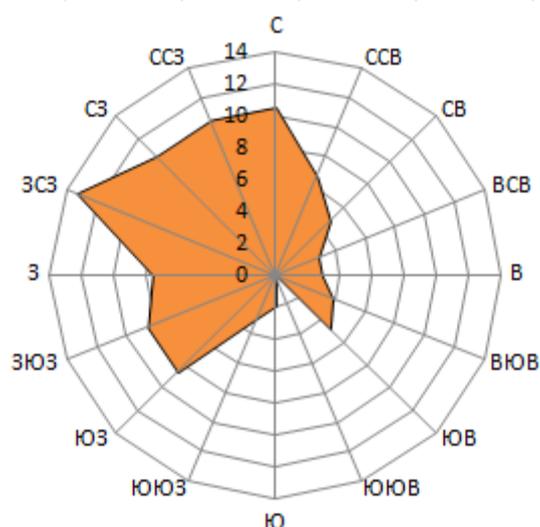
а) январь



б) апрель

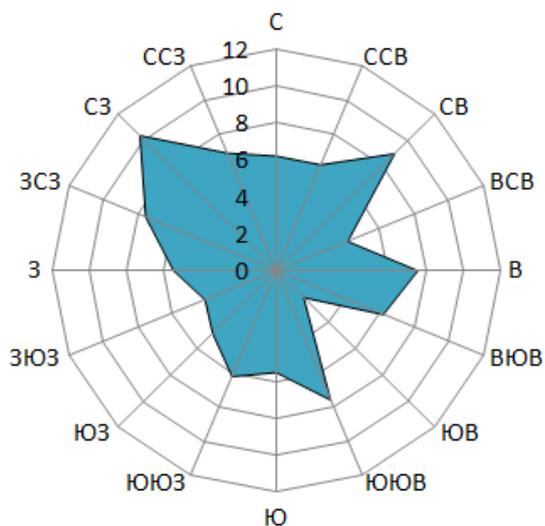


в) июль

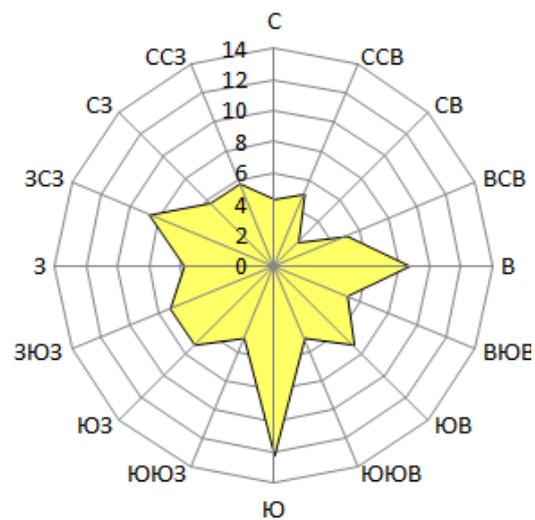


г) ноябрь

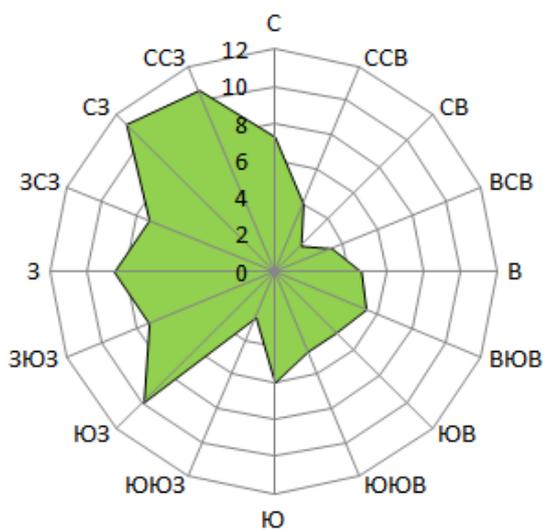
Рисунок 3.40 – Повторяемость направления ветра на уровне тропопаузы за период 2017-2021гг. на станции «о.Диксон»



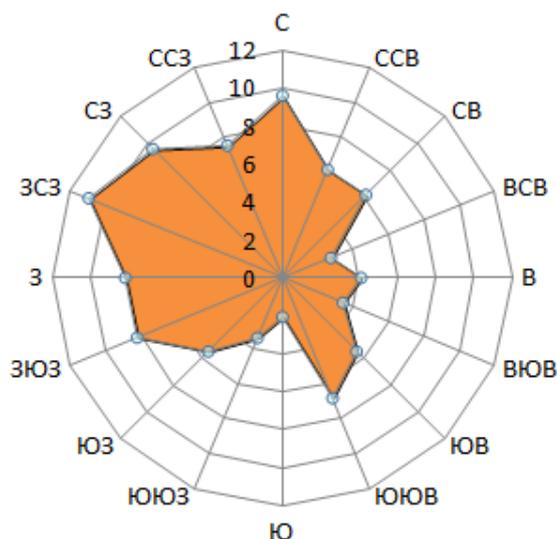
а) январь



б) апрель



в) июль



г) ноябрь

Рисунок 3.41 – Повторяемость направления ветра на уровне тропопаузы за период 2017-2021гг. на станции «мыс Челюскин»

На рисунке 3.41 рассчитана повторяемость направления ветра на уровне рассматриваемой тропопаузы за пять лет на станции «мыс Челюскин». Над станцией в зимний сезон господствуют северо-западные и северо-восточные ветра(10%), дующие с Карского моря. В весенний сезон преобладают южные ветра (12%). В летний сезон зафиксированы часто повторяющиеся северо-западные ветра (11%). В осенний сезон максимальное

количество случаев отмечено в западном северо-западном направлении (11%).

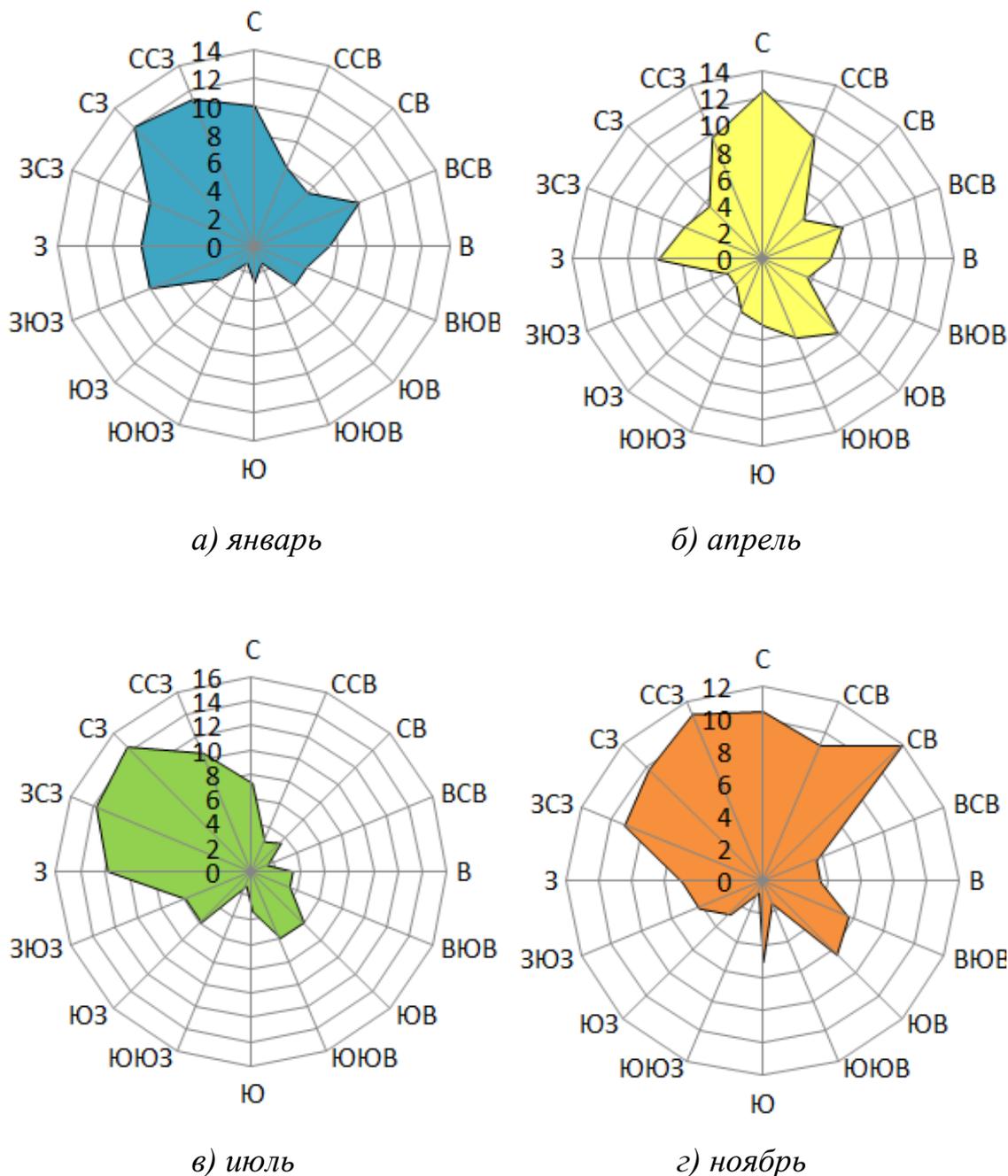


Рисунок 3.42 – Повторяемость направления ветра на уровне тропопаузы за период 2017-2021гг. на станции «о.Хейса»

На рисунке 3.42 показана повторяемость направления ветра на уровне рассматриваемой тропопаузы за пять лет на станции «о.Хейса». Над станцией в зимний сезон господствуют северо-западные ветра (12%). В весенний сезон

преобладают северные ветра (12%). В летний сезон максимальное количество случаев отмечено в западном северо-западном направлении (14%). В осенний сезон господствуют северные северо-западные и северо-восточные ветра (12%).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В проделанной работе были исследованы характеристики тропопаузы такие как высота, температура, скорость и направление ветра на ее уровне, а также зафиксированы случаи множественной тропопаузы. Для исследования были выбраны станции находящиеся за полярным кругом «о.Диксон», «Обсерватория Федорова» мыс Челюскин и «Обсерватория имени Кренкеля» остров Хейса. Была собрана база данных характеристик на уровне тропопаузы за период с 2017 по 2021 гг. за 00 и 12 часов по UTC.

В результате обработки базы данных характеристик тропопаузы, сформированы следующие выводы:

1. Тропопауза за полярным кругом имеет сезонную изменчивость, на станции о. Диксон и о. Хейса годовой ход высоты тропопаузы более плавный, чем на станции мыс Челюскин.
2. Зафиксирована самая низкая тропопаузы в 2021 году на высоте 5034 м, зимой на станции «мыс Челюскин». Частая повторяемость самой низкой нижней границы тропопаузы в зимние и весенние месяцы встречается на станции «мыс Челюскин».
3. Отмечена самая высокая тропопауза на высоте 14830 м, в летний сезон на станции «о.Хейса».
4. Анализ средних значений высоты тропопаузы за все года показал колебание высоты в пределах 8 – 10 км на всех рассматриваемых станциях.
5. Проанализировано распределение высоты тропопаузы и ее рост в летний период, связанный с притоком солнечной радиацией (наступление полярного дня).
6. Обнаружена и зафиксирована множественная тропопауза, отмечено количество встречающейся второй тропопаузы на каждой станции за пять выбранных лет ежедневно.

7. Зарегистрированы случаи третьей тропопаузы в январе 2021 года на станции «о.Хейса», за июль 2018 год на стануии «о.Диксон», за июль 2019 год на станции «мыс Челюскин».

8. Были зафиксированы повторения самых низких температур весной и осенью ($< -70\text{ C}^\circ$) на всех станциях.

9. Отмечена самая низкая температура $-84,99\text{ C}^\circ$ над станцией «мыс Челюскин» в 2020 году и самая высокая температура $-45,9\text{ C}^\circ$, над станцией «о.Диксон» в 2019 году.

10. Проанализирован годовой ход температуры на уровне полярной тропопаузы над выбранными обсерваториями, высокие температуры наблюдались в летний сезон от -53C° до -44C° , низкие температуры фиксировались в зимний сезон от -67C° до -63C° .

11. Проведен анализ повторяемости скорости ветра на уровне тропопаузы, отмечаны минимальные (1 м/с), максимальные (99м/с) и средние (18 м/с) скорости ветра на рассматриваемых станциях.

12. Проанализированы розы ветров осредненных данных за пять лет на каждой станции, отмечена повторяемость северных северо-западных ветров в каждом сезоне на рассматриваемых станциях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Маховер З.М. Климатология тропопаузы. - Ленинград: Гидрометеиздат, 1983. - 255 с
2. Шашкин Н.П., Иванова А.В. Прогнозирование метеорологических условий для авиации. –М.:Триада лтд, 2016.-312с.
3. Иванова А.В. Богаевская Н.И. Динамика арктической тропопаузы и ее связь с фронтогенезом в период 1990-2007 гг.
4. Иванова А.В. Тропопауза – многообразие определений и современные подходы к идентификации. УДК 551.510.528(047)
5. Козлова Л.Ф., Руденкова Т.В., Хохлова А.В. Массив характеристик тропопаузы по данным радиозондирования в арктическом регионе. УДК 551.524.77
6. Santer B. D. *et Tropopause Height Becomes Another Climate-Change «Fingerprint» // Science & Technology. Review, March 2004.*
<https://www.llnl.gov/str/March04/Santer.html>.
7. Шметер С. М., Постнов А. А., Шур Г. Н. Новые данные о мезомасштабных и турбулентных пульсациях температуры и ветра в зоне тропической тропопаузы // Метеорология и гидрология. 2003. № 3. С. 25 – 37.
8. Звягинцев А. М., Крученицкий Г. М., Черников А. А. Изменчивость трендов вертикального распределения озона в стратосфере и их связи с долговременными изменениями высоты тропопаузы // Изв. РАН. ФАО. 2005. Т. 41, № 4. С. 476 – 486.
9. Куколева А. А. Оценки потоков озона через тропопаузу в планетарных высотных фронтальных зонах Северного полушария // Изв. РАН. ФАО. 2002. Т. 38.
10. Añel J. C., Gimeno L., De La L. Torre, Nieto Changes in tropopause height for the eurasian region from cards radiosonde data // Naturwissenschaften. 2006. V. 93. P. 603 – 609.

11. *Añel J. C., Antuña J. A., Gimeno L, Nieto R., De La L.* Global statistics of multiple tropopause from IGRA sounding reports // *J. Geophys. Res.* 2007. V. 34. L06709. doi:10.1029/2006GL029224.

12. Иванова А.Р. Исследование характеристик тропопаузы в полярной зоне по данным радиозондирования на станции Барроу // *Метеорология и гидрология.* – 2010. – № 3. – С. 18–27.

13. Пчелко И.Г. Метеорологические условия полетов на больших высотах. - Ленинград: Гидрометеиздат, 1957.

14. Василевская Л.Н., Лисина И.А., Шлык Н.В. Климатология свободной атмосферы : практические работы : для студентов 1-го курса, обучающихся по направлениям подготовки 05.04.05 «Прикладная гидрометеорология», 05.03.06 «Экология и природопользование». – Владивосток : Издательство Дальневосточного федерального университета, 2020. – [52 с.].

15. Балакин А.И. Метеорологическое обеспечение. – Министерство обороны СССР. – Москва – 1991.

16. Козлова Л.Ф., Стерин А.М. Исследование многолетней изменчивости параметров тропопаузы над территорией РФ по радиозондовым данным // *Изв. РАН. ФАО.* 2002. Т. 38, № 5. С. 683 – 693