



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

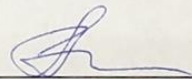
Кафедра метеорологических прогнозов

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

На тему: «Исследование характеристик тропопаузы северного полушария»

Исполнитель Багно Софья Сергеевна
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат географических наук, доцент
(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)

« 29 » мая 2024 г.

Санкт-Петербург
2024

СОДЕРЖАНИЕ

СОКРАЩЕНИЯ	3
ВВЕДЕНИЕ	4
1. ТРОПОПАУЗА И ЕЁ ХАРАКТЕРИСТИКИ	6
1.1 Причина образования тропопаузы	8
1.2 Высота тропопаузы и факторы на нее влияющие	9
1.3 Множественная тропопауза	10
1.4 Влияние струйных течений на тропопаузу	11
2. ТРОПОПАУЗА В АВИАЦИИ	14
2.1 Влияние на полёт	14
2.2 Прогноз тропопаузы	16
3. ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТРОПОПАУЗЫ В СЕВЕРНОМ ПОЛУШАРИИ	18
3.1 Климат-географическая характеристика аэрологических станций	19
3.2 Анализ высоты тропопаузы	21
3.3 Анализ температуры на уровне тропопаузы	31
3.4 Анализ давления на уровне тропопаузы	41
3.5 Анализ множественной тропопаузы	49
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	66
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	68

СОКРАЩЕНИЯ

ВС – Воздушное судно

ВМ – Воздушная масса

ВФЗ – Высотная фронтальная зона

ВЦЗП – Всемирный центр зональных прогнозов

ХВ – Холодный воздух

ТВ – Теплый воздух

СТ – Струйное течение

ЕТР – Европейская территория России

UTC – Coordinated Universal Time

ВВЕДЕНИЕ

Тропопауза служит переходным слоем между стратосферой и тропосферой. Существенное влияние на общее состояние атмосферы могут оказывать разные явления и процессы, осуществляемые около слоя тропопаузы. Большую роль для решения целого ряда прикладных и исследовательских задач играет ее пространственно-временная структура.

Изучение тропопаузы является до сих пор актуальным вопросом, так как даже маленькие изменения в динамическом, химическом или радиационном режиме между тропосферой и стратосферой могут оказывать влияние на содержание стратосферного озона, загрязнение тропосферы пылью и газами, и привести к климатическим изменениям по всей планете. А также, необходимо уметь определять и прогнозировать пространственное положение слоя тропопаузы для обеспечения безопасности полётов авиации.

Есть много разных способов определить уровень тропопаузы, при этом каждый из этих способов основывается на различиях в каких-то свойствах между тропосферой и стратосферой, например, различия в химии или температуре, а также в динамическом или радиационном режиме.

В данной работе, говоря о тропопаузе, будем подразумевать именно классическую (термическая) тропопаузу.

Целью работы является исследование характеристик тропопаузы в северном полушарии за период 2022-2023гг.

Для достижения цели работы были поставлены следующие задачи:

- Выбор аэрологических станций, на которых проводится зондирование атмосферы, таким образом, чтобы охватить разные широты в северном полушарии;
- Создание архива данных, с информацией о метеопараметрах на нижней границе тропопаузы, а также о случаях множественной тропопаузы;

- Анализ хода метеопараметров и множественной тропопаузы.

В ходе выполнения работы, для анализа характеристик тропопаузы использовались и обрабатывались данные, представленные в виде телеграмм и аэрологических диаграмм, взятые из архива с результатами радиозондирования с веб-сайта Университета Вайоминга, США ([http: //weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html](http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html)).

1. ТРОПОПАУЗА И ЕЁ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Тропопауза, являясь одной из ключевых характеристик атмосферы Земли, разделяет между собой тропосферу и стратосферу – два основных погодообразующих слоя с значительно отличающимися динамическими, химическими и радиационными режимами.

Тропопауза является слоем, в котором вертикальный градиент температуры становится равным $2^{\circ}\text{C}/\text{км}$, при условии, что он остается таким же или даже меньше данного значения в расположенном выше слое толщиной 2 километра. Но довольно часто при радиозондировании атмосферы определяют несколько уровней, которые соответствуют заданному критерию, и при таком исходе можно говорить о множественности тропопауз. И тогда над самым нижним уровнем, удовлетворяющим критерию $2^{\circ}\text{C}/\text{км}$, вторичная тропопауза должна удовлетворять критерию $3^{\circ}\text{C}/\text{км}$ [4, 7].

Именно изменение температуры воздуха с высотой является одной из основных характеристик тропопаузы. В тропосфере обычно происходит понижение температуры с высотой, в то время как в стратосфере она повышается с высотой. И таким образом, тропопаузу можно считать переходной зоной от одного вида профиля температуры к другому.

Можно выделить четыре типа тропопаузы на основе вида кривой изменения температуры воздуха с высотой:

- инверсионный слой, где с высотой температура растет;
- изотермических слой, в котором с высотой температура остается постоянной;
- слой, в котором температура с высотой незначительно понижается ($0,2 - 0,1^{\circ}\text{C}/100 \text{ м}$);
- слой, где температура имеет сложный ход.

В следствие такого изменения температуры с высотой тропопауза является задерживающим слоем для всех процессов, происходящих в

тропосфере. Именно поэтому под тропопаузой скапливаются пыль, дым, водяной пар, образуются облака и плотные дымки, которые способны ухудшать видимость. В тропосфере наиболее развиты вертикальные движения, за счет чего она является слоем интенсивного перемешивания. Именно поэтому тропопаузу часто называют запирающим слоем или «крышкой» тропосферы, но при этом она также является основанием вышележащего слоя инверсии, то есть стратосферы. А также, тропопауза является слоем с активным химическим обменом между двумя разделенными ею слоями – тропосферой и стратосферой. Поэтому на уровне тропопаузы также происходят важные химические реакции, например, разрушение тропосферного озона и образование стратосферного озона.

Все из ныне существующих способов определения положения тропопаузы в некотором роде являются эмпирическими. До сих пор не существует полного и адекватного описания её фундаментальной природы, которое могло бы в полной мере объяснить ее идентификацию с точки зрения физики процессов. Для определения тропопаузы нужно понимать какое из различий между тропосферой и стратосферой будет братья за основу – это могут быть фундаментальные отличия или отличия в определенных свойствах и характеристиках. И уже в зависимости от него формируют конкретный способ ее идентификации.

На сегодняшний день в литературе используются нижеприведенные определения тропопаузы [6]:

- классическая (термическая);
- тропопауза, определенная по критерию устойчивости;
- тропопауза холодной точки;
- динамическая;
- радиационная тропопауза в ясном небе;
- озоновая;
- химическая;
- тропопауза, основанная на характеристиках влажности;

- тропопауза как изобарическая поверхность;
- тропопауза как изэнтропическая поверхность;
- тропопауза как минимум эффективной диффузии;
- смешанная (динамико-термическая) тропопауза.

1.1 Причина образования тропопаузы

Тропосфера по праву считается одним из важнейших слоев атмосферы, так как в ней находится рекордное количество водяного пара (почти 99%), вследствие чего именно в ней формируется облачность, с последующим выпадением осадков. Вертикальное распределение температуры здесь характеризуется общим падением ее с высотой, хотя часто встречаются инверсии или даже слой изотермии.

Стратосфера — второй по важности слой атмосферы, который располагается между тропопаузой (в основании) и стратопаузой (на верхней границе), находящейся на высоте около 50 км. Благодаря очень маленькому содержанию водяного пара в стратосфере, именно озон играет основную роль в регулировании температурного режима этого слоя. Слой атмосферы, насыщенный озоном, располагается между 15 и 60 км, достигая своей максимальной концентрации на высоте от 23 до 30 км. Молекулы озона поглощают приходящую ультрафиолетовую радиацию, что становится причиной нагрева стратосферы и повышению температуры с высотой, а это, в свою очередь, препятствует развитию конвективных явлений и создает стабилизирующее влияние, ограничивающее турбулентность тропосферой. На основании этого, формулируется определение тропопаузы, отражающее ее физический смысл: это граница между конвективно-управляемым слоем и вышележащим слоем радиационного равновесия.

Таким образом, формирование тропопаузы в атмосфере, в первом приближении, обусловлено балансом между радиационным нагреванием атмосферы, когда стратосферный озон поглощает солнечную радиацию и

процессами, происходящими в тропосфере, включающими собственное длинноволновое излучение земли, перемешивание и фазовые переходы. Именно благодаря данному фактору происходит повышение высоты тропопаузы от полюсов в направлении экватора.

1.2 Высота тропопаузы и факторы на неё влияющие

Высота на которой находится тропопауза не постоянна по планете в силу того, что она зависит от температурного режима Земли. А он, в свою очередь, неравномерен, так как на разные широты распространяется разный поток приходящей солнечной радиации.

На высоту тропопаузы могут оказываться влияние следующие факторы:

- время года (в летний период в высоких и умеренных широтах тропопауза выше примерно на 1-2 км, чем в зимний сезон, в тропиках сезонные колебания гораздо меньше);
- время суток (днём тропопауза выше чем ночью);
- широта места (в полярных широтах высота тропопаузы около 300 гПа (8-10 км), в умеренных широтах 200 гПа (10-12 км), в тропиках около 100 гПа (16-18 км));
- воздушная масса (над теплыми ВМ тропопауза выше, чем над холодными ВМ);
- барическая система (над циклонами тропопауза ниже в среднем на 2-3 км, чем над антициклоном);
- проходящий атмосферный фронт (при прохождении холодного фронта тропопауза понижается, достигая минимума над высотной линией фронта, при прохождении теплого фронта она повышается, достигая максимума над приземной линией фронта).

Над областями холода она залегает в виде ложбины, а над областями тепла – в виде гребня. Над полярными широтами средняя температура на

уровне тропопаузы в летний сезон может достигать -45°C , а в зимний -65°C . А над экватором температура около -70°C и ниже. В высоких и умеренных широтах тропопауза в зимний сезон на $8-15^{\circ}\text{C}$ холоднее, чем в летний.

1.3 Множественная тропопауза

В стандартных условиях в атмосфере Земли определяется единственная тропопауза на высоте 10-15 километров над уровнем моря. Но в некоторых ситуациях может сформироваться несколько тропопауз, например, около полюсов или если в атмосфере присутствуют сильные возмущения. И в таком случае, при определении нескольких границ между тропосферой и стратосферой говорят о множественности тропопауз.

Согласно исследованиям А.Р. Ивановой [4] больше всего случаев множественной тропопаузы и в северном, и в южном полушарии наблюдается в умеренных широтах (это широтная полоса $40-60^{\circ}$).

Причинами, по которым образовалась множественная тропопауза, могут служить самые разные факторы, это и изменение температуры, и сдвиг ветра по скорости с высотой. Например, из-за температурных инверсий, когда температура растёт с высотой в тропосфере, а затем снова падает в стратосфере, способна сформироваться еще одна складка тропопаузы. Множественная тропопауза может повлиять на смещение ВМ и образование циклонов и антициклонов, которые, в свою очередь, определяют погодные условия на поверхности Земли. Также, множественная тропопауза может влиять на химические процессы, происходящие в атмосфере, такие как образование и разрушение озона.

Следует понимать, что множественная тропопауза — это крайне нестабильная и очень изменчивая величина, образование которой зависит от разных факторов. Благодаря чему её изучение затруднено и является непростой задачей, хотя при этом она и остается важной характеристикой атмосферы, играя не последнюю роль для полётов авиации, так как при

изменении таких метеопараметров как температура и скорость ветра в зоне тропопаузы может возникать турбулентность и прочие опасные условия для полётов. Понимание физики образования множественной тропопаузы способно повысить качество прогнозов погоды, а также создавать и применять более эффективные меры защиты.

1.4 Влияние струйных течений на тропопаузу

Струйным течением (СТ) – называется узкая зона сильных ветров со скоростью 100 км/ч и более (30 м/с) с внушительной протяженностью по горизонтали. Самые большие скорости ветра фиксируются в центре этой узкой зоны, также известной как ось струйных течений, а ближе к перифериям скорости замедляются.

В атмосфере струйные течения наблюдаются и в стратосфере, и в тропосфере, которые в свою очередь делятся на: внетропические, субтропические и экваториальные.

С разных сторон от оси струйных течений давление и температура распределены по-разному (рис. 1). Справа от оси располагается зона повышенного давления и более теплый воздух, именно поэтому она также известна как антициклоническая или теплая сторона. Слева от оси располагается область пониженного давления и более холодный воздух, и она известна как циклоническая или холодная сторона. Подобное распределение температуры и давления в СТ вызвано тем, что в ХВ барическая ступень гораздо меньше, чем в ТВ. Следовательно, на высотах пониженное давление будет фиксироваться в холодном воздухе, а повышенное – в теплых.

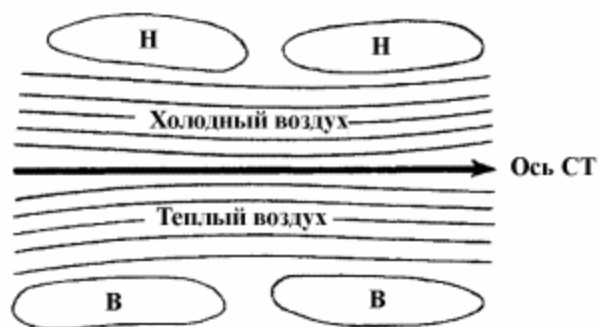


Рисунок 1 – Распределение давления и температуры в струйных течениях

Также, пространственное положение оси СТ меняется в зависимости от влияющего на неё фронта. Ось параллельна ХФ и ТФ, однако в верхней тропосфере она располагается на 400-500 км перед приземной линией ТФ, и на 100-300 км отстаёт от приземной линии ХФ (рис. 2).



Рисунок 2 – Положение оси струйного течения относительно атмосферных фронтов

Внетропические СТ обычно бывают связаны с главными атмосферными фронтами и высотными фронтальными зонами (ВФЗ). Физика формирования струйного течения объясняется следующим образом (рис. 3). Контрасты температур ($8-10^{\circ}\text{C}$ и более) служат причинами образования больших горизонтальных градиентов давления, а, следовательно, и силы барического градиента. Из-за влияния последней начинается натекание теплого воздуха на границу фронтального раздела. Зажатый между тропопаузой и фронтальной поверхностью находящийся наверху ТВ, приобретает высокие скорости и стремится вдоль ВФЗ. На циклонической стороне СТ наблюдается более

крутой наклон тропопauses, и поэтому она наиболее опасна для полётов, в отличие от центральной и антициклонической.

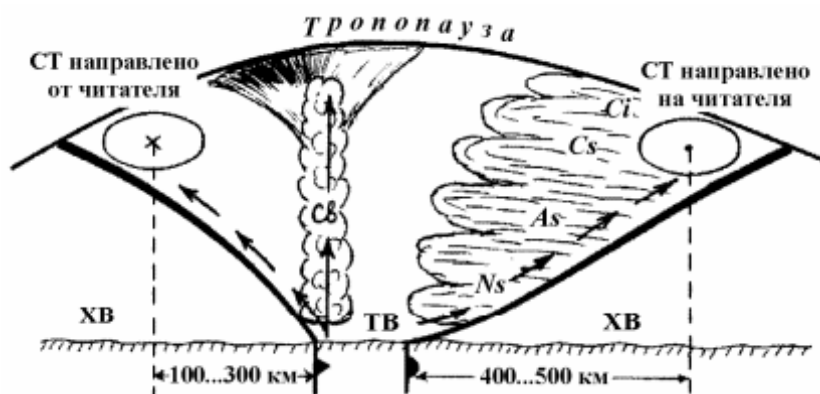


Рисунок 3 – Причины образования струйного течения

Под влиянием СТ может происходить разрыв тропопauses, в таком случае ее невозможно определить на протяжении многих километров, но затем она фиксируется уже на иной высоте (рис. 4) [3].

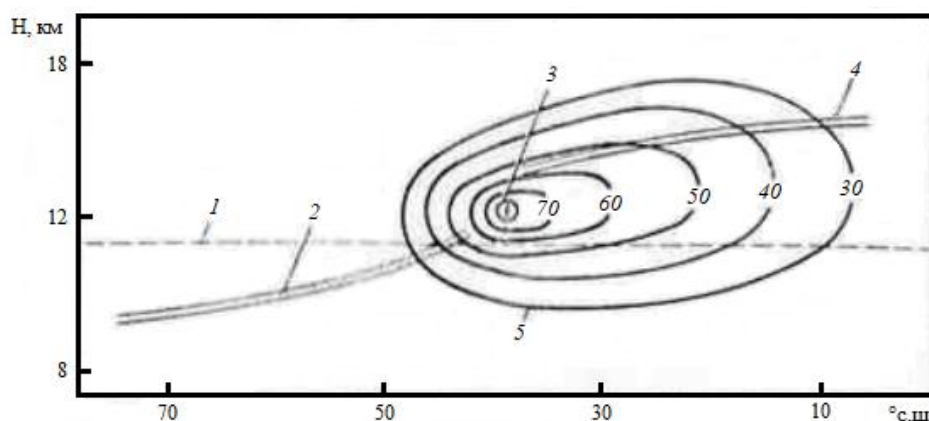


Рисунок 4 – Тропопаузы в струйном течении в северном полушарии

(1 – высота тропопauses при отсутствии струйного течения; 2 – положение тропопauses в высоких и умеренных широтах; 3 – ось струйного течения; 4 – положение тропопauses в низких широтах; 5 – линии равной скорости ветра в м/с)

2. ТРОПОПАУЗА В АВИАЦИИ

Тропопаузу, называемую запирающим слоем, в котором сильнее турбулентность и хуже видимость, чем в окружающих слоях, отнюдь не относят к опасным для полетов.

При совершении полетов вблизи тропопаузы ее можно определить по цветам – место, где происходит переход от белого неба (ниже) к фиолетово-синему (выше) и является верхней границей тропопаузы [1, 8].

Вся облачность верхнего яруса обычно находится под тропопаузой или даже на 200-300 м ниже, и только мощные кучевые или кучево-дождевые облака способны пробить ее и фиксироваться выше на 2-3 км. При отсутствии облачности тропопаузу всё равно можно определить визуально по скоплению влаги под ней (и, следовательно, образованию дымки). Зона максимальных скоростей ветра чаще всего обнаруживается под тропопаузой, примерно на 1-2 км ниже. Наличие вертикальных и горизонтальных воздушных потоков под тропопаузой является причиной образования сильной неустойчивости атмосферы, вызывающей болтанку самолетов.

2.1 Влияние на полёт

Тропопауза, являясь достаточно сильным задерживающим слоем, препятствует проникновению вертикальных движений из тропосферы в стратосферу и наоборот. Вследствие чего также задерживается облачность, возникающая в тропосфере, и тропопауза обычно является верхней границей развития кучево-дождевых облаков. Полет в кучево-дождевой облачности запрещен, но и обход таких облаков затрудняется тем, что часто их верхняя граница достигает уровня тропопаузы, препятствующей их дальнейшему распространению, и происходит их растекание под слоем тропопаузы, образование характерных наковален и уменьшение расстояния между ними.

В ходе работы двигателей происходит сгорание топлива и конденсация водяного пара, оставляющая за самолетом конденсационный след, также известный как облачность вида Cirrus tractus. Эти следы обнаруживаются в верхней тропосфере, под тропопаузой.

Из чего можно выделить небольшие признаки, по которым возможно определить тропопаузу:

- замедление или полное прекращение падения температуры воздуха с высотой;
- смена цвета неба на более резкий и темный;
- отсутствие конденсационных следов за самолетом.

Турбулентность может быть вызвана наблюдаемыми под тропопаузой воздушными потоками, имеющими резкое изменение скорости и направления. Самая сильная турбулентность наблюдается в местах, где тангенс угла наклона тропопаузы к поверхности земли равен 0,003 и больше (рис. 5). Пересекать тропопаузу в таких местах очень опасно. Короткие гравитационные волны на границах раздела также могут вызывать сильную болтанку, даже без наличия струйных течений.

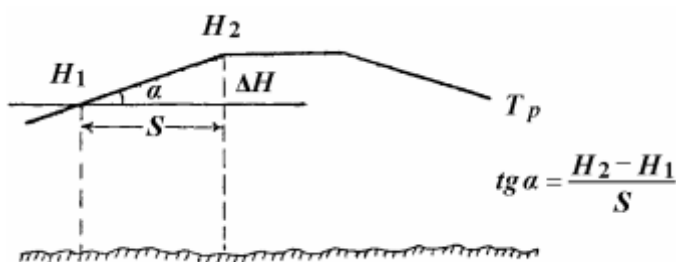


Рисунок 5 – Определение угла наклона тропопаузы

Ныне используемые в авиации самолеты летают вблизи от слоя тропопаузы, и именно здесь вполне разумно совершать переход к сверхзвуковой скорости ввиду того, что на этом уровне двигатели достигают максимума своего КПД.

Плотность понижается быстрее в слоях инверсии и изотермии, т.е. на уровне тропопаузы, что приводит к уменьшению тяги и «потолка» самолета.

2.2 Прогноз тропопаузы

Чтобы судить о высоте тропопаузы можно опираться на эти правила:

- Минимальная высота тропопаузы наблюдается в тыловой части приземного циклона (на высотных картах где центр циклона).
- Максимальная высота тропопаузы будет наблюдаться в тылу приземного антициклона (на высотных картах там располагается центр антициклона).
- С повышением высоты тропопаузы происходит понижение температуры, с понижением высоты – повышение.
- Для прогноза высоты тропопаузы чаще всего используют карты АТ-500 и АТ-300. С приближением барической ложбины она понижается, а с приближением барического гребня наоборот повышается.
- По карте ОТ 500/1000: при адвекции холода в верхней тропосфере (левый поворот ветра) высота тропопаузы понижается, при адвекции тепла (правый поворот ветра) повышается.
- В струйных течениях в левой (холодной) части струйного течения наблюдается понижение высоты тропопаузы, в правой (теплой) – повышение.

Всемирные центры зональных прогнозов (ВЦЗП) выпускают карты прогнозов следующего вида:

1. SIGWX – прогностические карты особых явлений погоды:
 - SWH (для полётов выше 400 гПа), FL250-630 ;
 - SWM (для полётов между 400 и 700 гПа), FL100-250;
 - SWM/SWH (для полётов между 150 и 700 гПа), FL100-450;
 - SWL (для полётов ниже 700 гПа), ниже FL100.
2. IS – прогностические карты температуры и ветра на высотах.

Вышеописанные карты предоставляются экипажу ВС вместе с другой полётной документацией, в виде карт формата А4 [5]. Пример карты SIGWX представлен на рисунке 6.

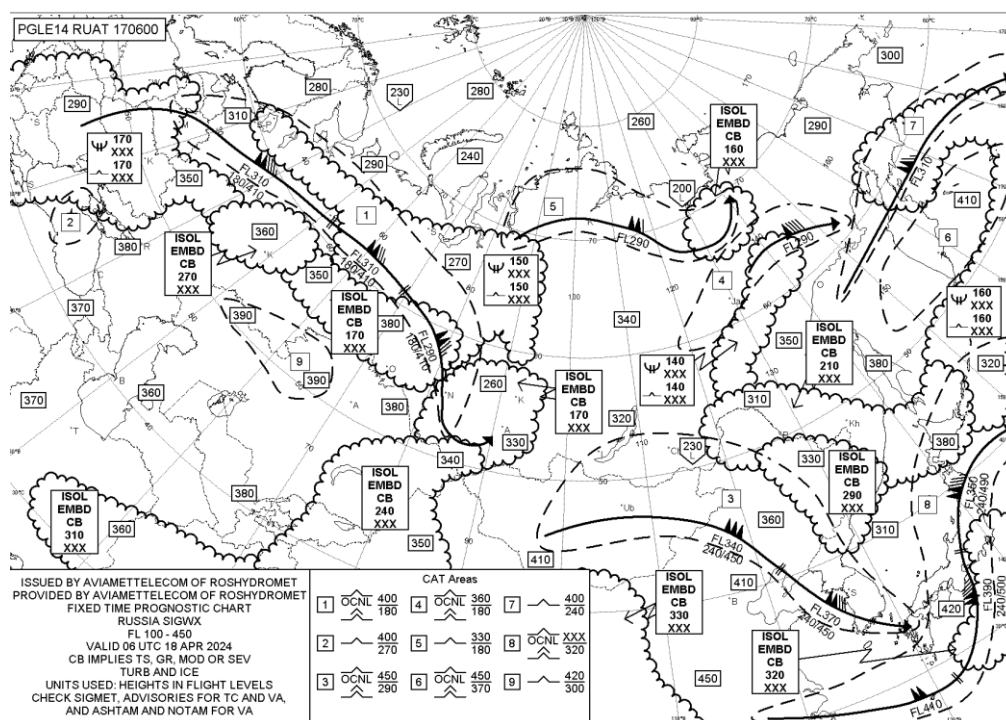


Рисунок 6 – Пример карты SIGWX для региона Российской Федерации

На выпущенных ВЦЗП картах все высоты указаны в уровнях полета (FL – flight level) в сотнях футов, в том числе и высоты тропопаузы (рис. 7), а скорости указаны в узлах.



Рисунок 7 – Наноска высот тропопаузы на картах SIGWX

а) высокая тропопаузы б) высота тропопаузы в) низкая тропопауза

3. ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТРОПОПАУЗЫ В СЕВЕРНОМ ПОЛУШАРИИ

Для получения данных о пространственном распределении характеристик атмосферы используются методы микроволнового профилирования, ракетного и спутникового зондирования [2].

Радиозондовые данные считаются наиболее точным методом определения положения тропопаузы, поскольку они основаны на прямых измерениях с высоким разрешением по вертикали. Запускаемые дважды в день (в 00 и 12 по UTC), радиозонды измеряют температуру, влажность, высоту над уровнем моря, скорость и направление ветра, а также атмосферное давление. Информация включает данные этих метеопараметров на стандартных изобарических поверхностях, а также на уровне тропопаузы и особых точках.

Благодаря доступности и скорости получения данных, был использован обширный архив радиозондовых измерений, размещенный на веб-сайте Университета Вайоминга (США). Кроме того, несомненным плюсом этого архива является то, что аэрологические данные представлены в нескольких форматах: в виде таблиц с распределением метеопараметров по высоте, в виде аэрологических диаграмм с профилями температуры и в виде наборов телеграмм, закодированных по стандарту КН-04. Именно данные в виде телеграмм значительно упрощают определение нижнего уровня тропопаузы, поскольку информация о ней представлена в отдельном блоке и легко извлекается, так как имеет отличительные цифры кода – «88».

Основываясь на данных радиозондирования Университета Вайоминга, велось исследование изменчивости высоты нижней границы тропопаузы, температуры воздуха и давления для трех станций с отличными друг от друга климатическими условиями.

3.1 Климат-географическая характеристика аэрологических станций

В качестве станций для анализа характеристик тропопаузы были выбраны 3 города находящихся в ЕТР: Мурманск, Санкт-Петербург и Туапсе. На рисунке 8 показано их расположение на Google Maps.



Рисунок 8 – Расположение анализируемых аэрологических станций на Google Maps

Рассматриваемые станции, географические координаты, высота над уровнем моря, а также международные индексы представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Географические характеристики станций, выбранных для анализа тропопаузы

Индекс станции	Название станции	Широта, град	Долгота, град	Высота над уровнем моря, м
22008	Мурманск	68,10 с.ш.	33,11 в.д.	121
26075	Санкт-Петербург	59,95 с.ш.	30,70 в.д.	72
37011	Туапсе	44,10 с.ш.	39,07 в.д.	41

Мурманск, расположенный за Северным полярным кругом, является крупнейшим в мире городом, находящимся в этой зоне. Город обладает

уникальным климатом, сформированным влиянием теплого Северо-Атлантического течения, которое делает его климат более мягким, чем у других городов за Полярным кругом. Расположенный в атлантико-арктической зоне умеренного климата, Мурманск по классификации Кёппена относится к субарктическому континентальному типу (Dfc). Близость Баренцева моря оказывает сильное влияние на климат, что проявляется в муссонном характере ветров. Зимой преобладают южные ветра с материка, приносящие холод и сухость, а летом – северные ветра с моря, которые повышают влажность воздуха и делают летнюю погоду прохладной. Город раскинулся на восточном побережье Кольского залива, характеризующейся значительной изменчивостью высот. Аэрологическая станция располагается на высоте 121 м.

Санкт-Петербург (п. Воейково) характеризуется умеренным климатом, причем переменным от континентального к морскому. По классификации климатов Кёппена он относится к влажному континентальному (Dfb). Это объясняется маленьким числом приходящего тепла и света ввиду географического расположения. Также существенное воздействие могут оказывать приходящие с Балтики циклоны, создающие непродолжительное влажное лето и длительную сырую и холодную зиму. Посёлок располагается на Колтушской возвышенности, что восточнее от Колтушей. Наибольшая зафиксированная высота камовых холмов равняется 78 м. Аэрологическая станция располагается на высоте 72 м.

Туапсе характеризуется влажным субтропическим климатом. По классификации климатов Кёппена он относится к умеренному океанскому (Cfa). Благодаря сильно проветриваемому Шаумянскому перевалу в город происходит приток холодных ВМ с севера, этому же способствует и ущелье реки Туапсе. Туапсе лежит в предгорье Главного Кавказского хребта, и высоты начинают расти по мере удаления от побережья Чёрного моря. Аэрологическая станция располагается на высоте 41 м.

3.2 Анализ высоты тропопаузы

В таблице 2 представлены значения максимальной, средней и минимальной высоты нижней границы тропопаузы для каждой исследуемой станции за 2022 и 2023 год.

Таблица 2 – Высота тропопаузы в 2022-2023 гг. на станциях в Мурманске, Санкт-Петербурге, Туапсе

Станция	Высота, м	Год	
		2022	2023
Мурманск	Максимальная	14000	13121
	Средняя	9951	9864
	Минимальная	5725	5862
Санкт-Петербург	Максимальная	15501	15310
	Средняя	10029	10144
	Минимальная	6563	6101
Туапсе	Максимальная	16830	16770
	Средняя	11412	11494
	Минимальная	7566	7291

Средняя высота тропопаузы в Мурманске в 2022 году составила 9951м, а в 2023 году – 9864м. Так как станция в Мурманске по географическому положению относится к полярным широтам, где в среднем высота тропопаузы соответствует 8-10 км, то можно сказать, что полученные результаты в пределах нормы. Максимальная высота тропопаузы за 2022 год равна 14000м и наблюдалась 28 февраля в 00 UTC, в 2023 году она составила 13121м 21 мая в 00 UTC. Минимальная высота в 2022 году была 5725м 27 апреля в 00 UTC, а в 2023 – 5862м 28 февраля в 12 UTC.

Средняя высота тропопаузы в Санкт-Петербурге в 2022 году составила 10029м, а в 2023 году – 10144м. Станция в Санкт-Петербурге по своему географическому положению относится к умеренным широтам, где в среднем высота тропопаузы соответствует 10-12 км, следовательно, можно сделать вывод о том, что полученные результаты являются нормальными, но вследствие приближенности станции к северным границам умеренных широт,

и высоты ближе к нижним границам. Максимальная высота тропопаузы за 2022 год равна 15501м и наблюдалась 2 июня в 00 UTC, в 2023 году она составила 15310м 5 октября в 00 UTC. Минимальная высота в 2022 году была 6563м 10 февраля в 12 UTC, а в 2023 – 6101м 13 марта в 00 UTC.

Средняя высота тропопаузы в Туапсе в 2022 году составила 11412м, а в 2023 году – 11494м. В Туапсе станция по географическому положению относится к умеренным широтам, где в среднем высота тропопаузы соответствует 10-12 км, то можно сказать, что полученные результаты в пределах нормы, но вследствие приближенности станции к южным границам умеренных широт, и высоты ближе к верхним границам. Максимальная высота тропопаузы за 2022 год равна 16830м и наблюдалась 12 августа в 12 UTC, в 2023 году она составила 16770 9 августа в 12 UTC. Минимальная высота в 2022 году была 7566м 12 марта в 00 UTC, а в 2023 – 7291м 16 февраля в 00 UTC.

Можно заметить несоответствие между полученными данными максимальных и минимальных значений и факторов, влияющих на высоту тропопаузы. Например, максимальные высоты тропопауз в Мурманске и Санкт-Петербурге наблюдаются в срок за 00 UTC, но исходя из теоретических сведений – высота тропопаузы выше над теплыми ВМ, из чего следует, что в срок 12 UTC она должна быть выше, чем в 00 UTC. В таком случае, вклад данного фактора (зависимость высоты от времени суток) может быть меньше, чем других – времени года или барической системы. На основе чего пришли к заключению, что при анализе и прогнозе высоты тропопаузы для достижения более точных результатов необходимо судить не по каждому фактору по отдельности, а рассматривать их в комплексе.

В таблице 3 представлены средние высоты тропопаузы по месяцам для станций в Мурманске, Санкт-Петербурге и Туапсе за 2022-2023гг.

Таблица 3 - Средние высоты тропопаузы по месяцам для станций в Мурманске, Санкт-Петербурге и Туапсе за 2022-2023гг.

Месяцы	2022г.			2023г.		
	Мурманск	Санкт-Петербург	Туапсе	Мурманск	Санкт-Петербург	Туапсе
Январь	9789	9326	10060	10023	10289	11131
Февраль	9522	9170	10169	10013	10193	10195
Март	10300	10243	9549	8011	8687	10403
Апрель	8912	9330	11002	9456	9970	10461
Май	9330	9484	11130	9669	9866	10870
Июнь	10116	10581	11440	9868	10195	11763
Июль	10631	10553	12075	10581	10174	12344
Август	10820	11566	15300	11021	11321	14626
Сентябрь	10561	10117	12147	10507	11389	11709
Октябрь	9600	10464	11554	9459	10015	11860
Ноябрь	10481	10216	11443	9661	9959	11172
Декабрь	9350	9296	11069	10099	9674	11388

На рисунке 9 и 10 представлен годовой ход средней высоты тропопаузы в Мурманске за 2022 и 2023 гг.

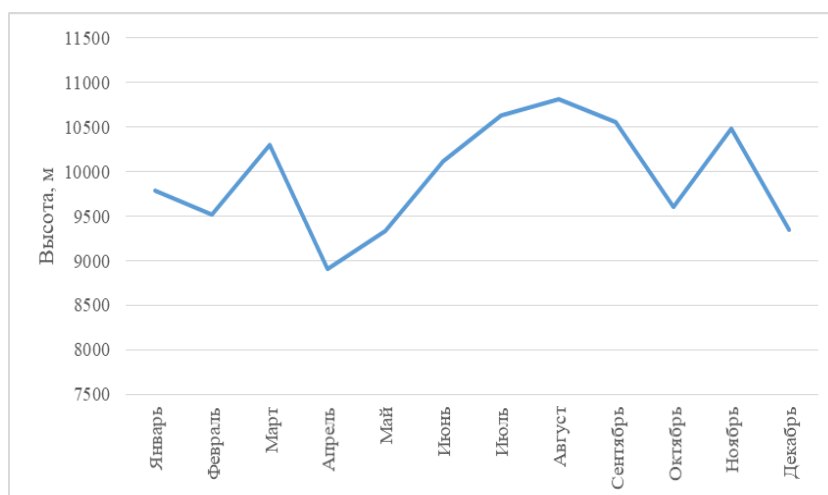


Рисунок 9 – Годовой ход средней высоты тропопаузы в Мурманске за 2022 г.

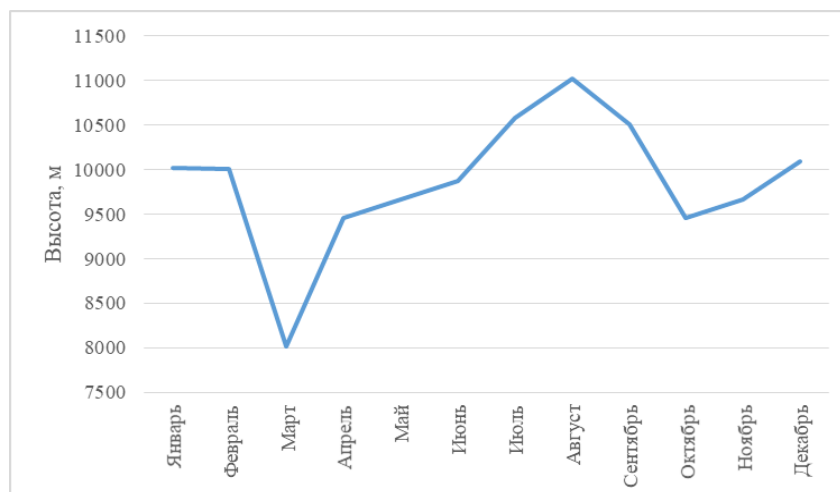


Рисунок 10 – Годовой ход средней высоты тропопаузы в Мурманске за 2023 г.

Годовой ход средней высоты тропопаузы в Мурманске в 2022 и 2023 году почти соответствует нормальному сезонному ходу, с максимумом высоты летом – 10820м август 2022 и 11021м август 2023, а минимум высоты наблюдается весной, а не зимой – 8912м апрель 2022 и 8011м март 2023г.

На рисунке 11 и 12 представлен годовой ход средней высоты тропопаузы в Санкт-Петербурге за 2022 и 2023 гг.

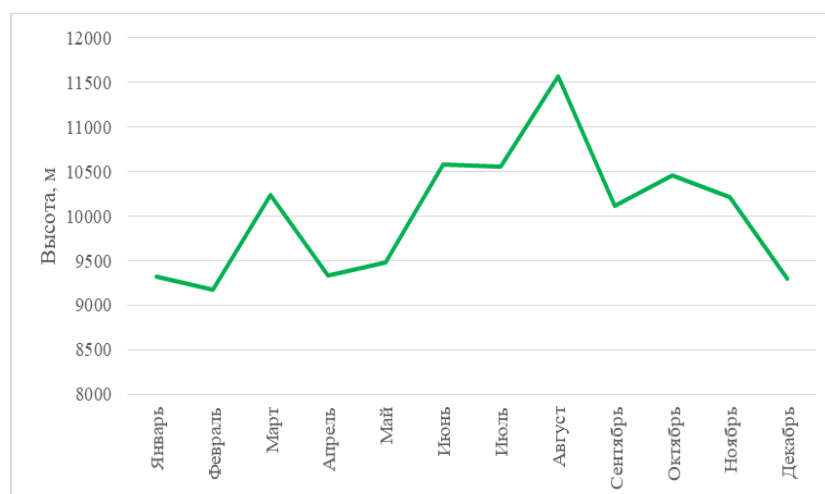


Рисунок 11 – Годовой ход средней высоты тропопаузы в Санкт-Петербурге за 2022 г.

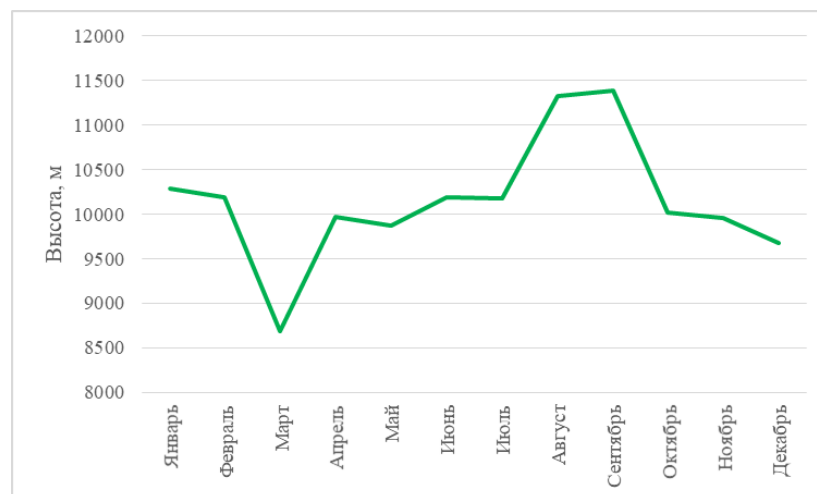


Рисунок 12 – Годовой ход средней высоты тропопаузы в Санкт-Петербурге за 2023 г.

Годовой ход средней высоты тропопаузы в Санкт-Петербурге в 2022 году соответствует нормальному сезонному ходу, с максимумом высоты в летние месяцы – 11566м в августе, а минимумы высоты наблюдаются в зимние месяцы – 9170м в феврале, 9296м в декабре и 9326м в январе. А годовой ход средней высоты тропопаузы в 2023 году почти соответствует нормальному, максимум – в сентябре 11389м и в августе 11321м, минимум – в марте 8687м.

На рисунке 13 и 14 представлен годовой ход средней высоты тропопаузы в Мурманске за 2022 и 2023 гг.

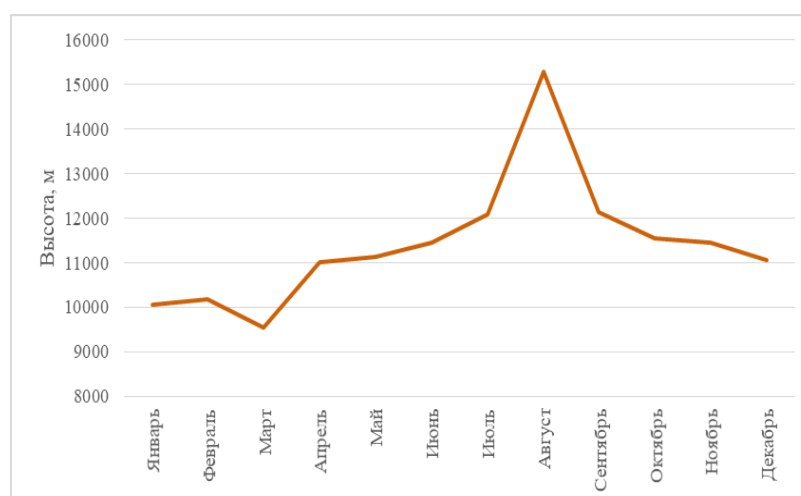


Рисунок 13 – Годовой ход средней высоты тропопаузы в Туапсе за 2022 г.

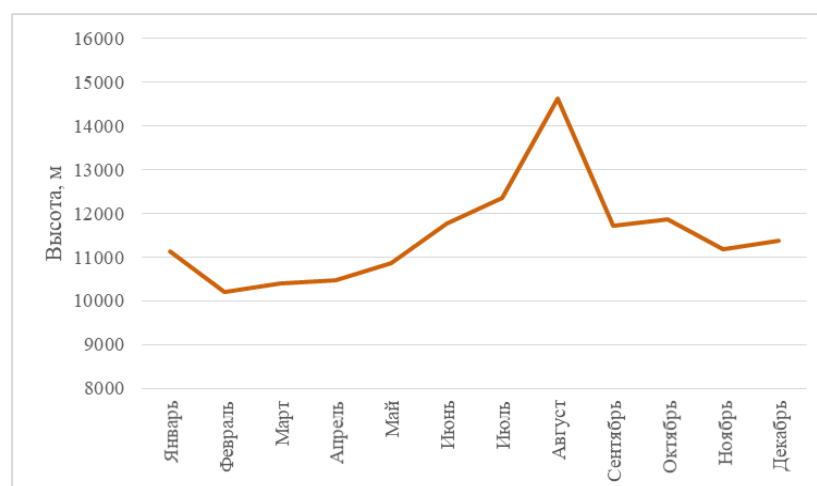


Рисунок 14 – Годовой ход средней высоты тропопаузы в Туапсе за 2023 г.

Годовой ход средней высоты тропопаузы в Туапсе в 2022 году почти соответствует нормальному сезонному ходу, с максимумом высоты в летние месяцы – 15300м в августе, а минимум высоты наблюдается весной – 9549м в марте. А годовой ход средней высоты тропопаузы в 2023 году соответствует нормальному, максимум летом – 14626м в августе, минимум зимой – 10195м в феврале.

На рисунке 15 и 16 представлен совмещенный график средних высот тропопаузы в 2022 и 2023 году для станций в Мурманске, Санкт-Петербурге и Туапсе.

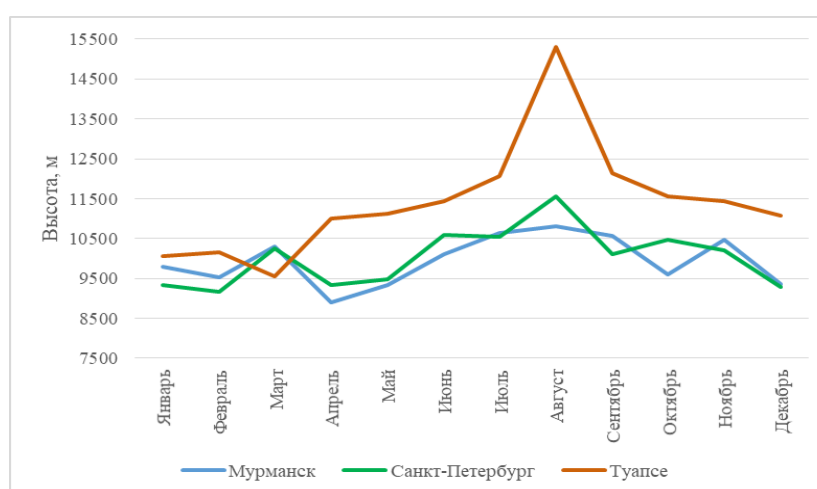


Рисунок 15 – Совмещенный график средней высоты тропопаузы по станциям Мурманск, Санкт-Петербург, Туапсе за 2022 г.

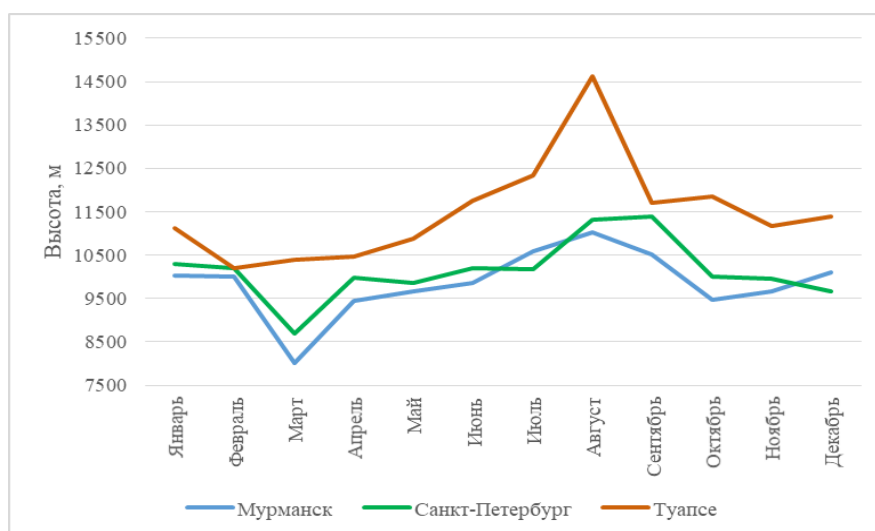


Рисунок 16 – Совмещенный график средней высоты тропопаузы по станциям Мурманск, Санкт-Петербург, Туапсе за 2023 г.

Распределение средних высот тропопаузы в течение года имеет более плавный ход на станциях в Мурманске и Санкт-Петербурге, с незначительными различиями между станциями в пределах 1 км и в 2022 году, и в 2023. Разброс между максимумом и минимумом в Мурманске в 2022 году составил 1908м, а в 2023 году 3010м. В Санкт-Петербурге этот же разброс был равен 2396м в 2022 году, и 2702м в 2023. Можно сделать вывод что на этих станциях незначительная сезонная изменчивости высоты тропопаузы, около 2-3 км, что в целом почти является нормой. В Туапсе же сезонные колебания больше – разность между наибольшей и наименьшей высотой составила 5751м в 2022 году и 4431м в 2023.

Низкая высота тропопаузы в теории должна быть в зимние месяцы, когда наблюдаются более низкие температуры воздуха. Однако, в Мурманске и Санкт-Петербурге в 2023 году самое низкое значение высоты тропопаузы за год наблюдается в марте. Проанализировав синоптические ситуации за весь месяц, был сделан вывод о том, что на такое распределение высоты могли повлиять барические системы, а именно: 25 дней из 31 за март на Мурманск и Санкт-Петербург оказывали влияния череда циклонов. А над циклонами высота тропопаузы может понижаться. К тому же, эти циклоны чаще всего имели траекторию смещения с юга-запада на северо-восток, проходя под

Мурманском таким образом, что он оказывался в тыловой части циклона за холодным фронтом, т.е. в холодной ВМ, что также могло способствовать понижению высоты тропопаузы. Это еще раз подтверждает, что все факторы влияющие на её высоту необходимо оценивать комплексно.

В таблице 4 представлены значения средних высот тропопаузы в месяцы соответствующие середине каждого сезона в 2023 году для станций в Мурманске, Санкт-Петербурге и Туапсе за разные сроки наблюдений.

Таблица 4 – Средняя высота тропопаузы по Мурманску, Санкт-Петербургу, Туапсе за середину каждого сезона в 2023г. в 00 и 12 UTC

Сезоны 2023г.	Высота, м					
	Мурманск		Санкт-Петербург		Туапсе	
	00 UTC	12 UTC	00 UTC	12 UTC	00 UTC	12 UTC
Январь	10015	10032	10262	10314	11180	11088
Апрель	9458	9454	9917	10022	10529	10391
Июль	10620	10542	10256	10098	12247	12452
Октябрь	9479	9438	10266	9772	11705	11980

В идеальном случае, распределение высот тропопаузы в течение года должно быть следующим: минимальная высота зимой, максимальная летом, а весна и осень являются переходными сезонами со значениями высот между зимой и летом, на уровне средних. Для анализа были выбраны именно средние месяцы каждого сезона, так как каждый из них может характеризовать весь сезон, хотя, конечно же и бывают исключения, к примеру, март и апрель в Санкт-Петербурге может иметь погодные явления характерные для зимних месяцев.

На рисунке 17 и 18 представлены средние высоты тропопауз в 2023 году для всех исследуемых станций за середину каждого сезона, но для разных сроков наблюдений (00 и 12 UTC).

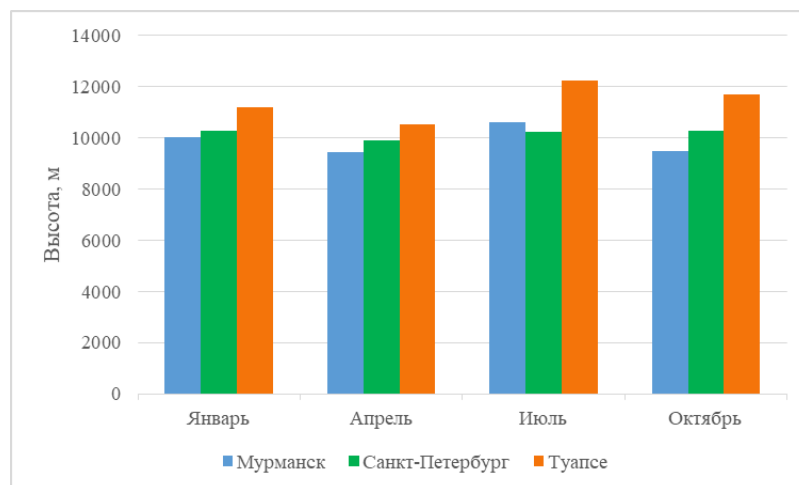


Рисунок 17 – Средние высоты тропопаузы за середину каждого сезона в 2023г. по станциям г. Мурманск, Санкт-Петербург, Туапсе за 00 UTC

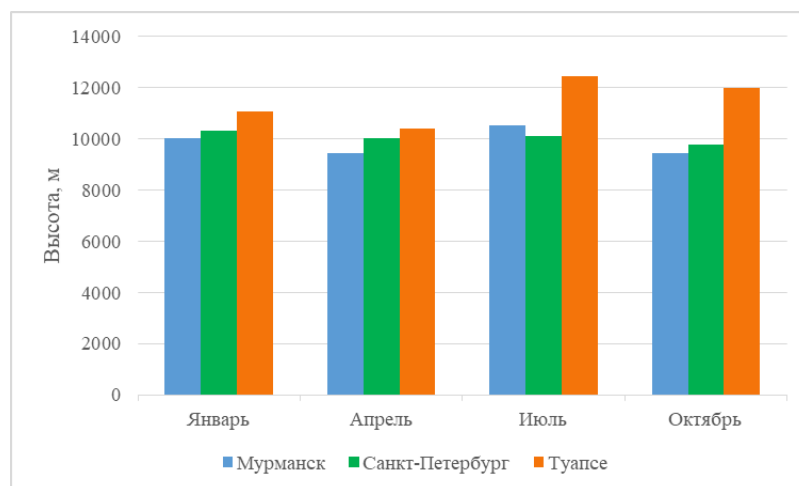


Рисунок 18 – Средние высоты тропопаузы за середину каждого сезона в 2023г. по станциям г. Мурманск, Санкт-Петербург, Туапсе за 12 UTC

На данных рисунках хорошо видно, что ситуация с годовым ходом высот не соответствует идеальному случаю, так как значения в январе выше ожидаемых, хоть и являются всё еще ниже, чем летние значения средних высот тропопаузы. Проанализировав синоптические ситуации за январь 2023 года для всех исследуемых станций, можно сказать о том, что на Мурманск и Санкт-Петербург 25-26 дней из 31 в январе оказывали воздействие циклоны, большинство из которых имели траекторию движения с запада на восток с Северной Атлантики над морями Северного Ледовитого океана. Следовательно, чаще всего они проходили севернее и эти две станции оказывались перед теплым фронтом или в теплом секторе циклона. В таком

случае, приближение теплого фронта или теплые ВМ в теплом секторе могли повлиять на высоту тропопаузы, несколько приподняв ее. В Туапсе в январе 2023 года циклоны воздействовали на город 18 дней из 31, имея траекторию смещения с запада на восток над Средиземным и Черным морем и к Туапсе приближался теплый фронт или фронт окклюзии, что в свою очередь тоже способствовало повышению высоты тропопаузы.

На рисунках 19, 20 и 21 представлены значения средних высот для середины сезона для каждой станции по отдельности за разные сроки наблюдений.

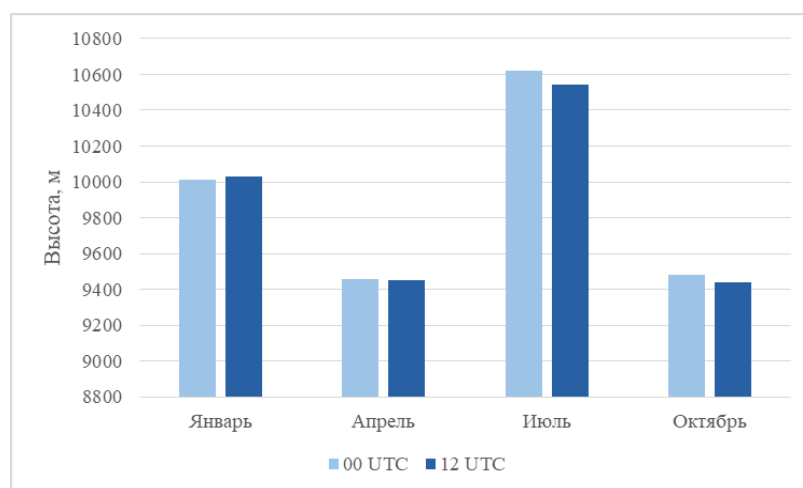


Рисунок 19 – Средние высоты тропопаузы за середину каждого сезона в 2023г. по станции г.Мурманск за 00 и 12 UTC

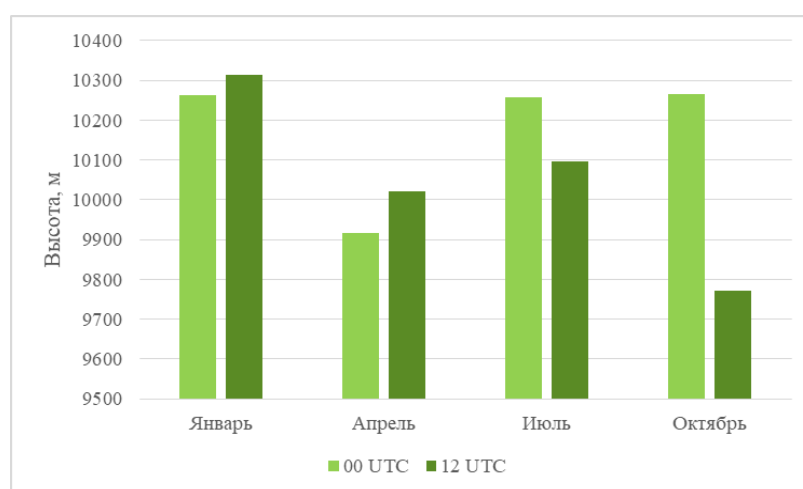


Рисунок 20 – Средние высоты тропопаузы за середину каждого сезона в 2023г. по станции г.Санкт-Петербург за 00 и 12 UTC

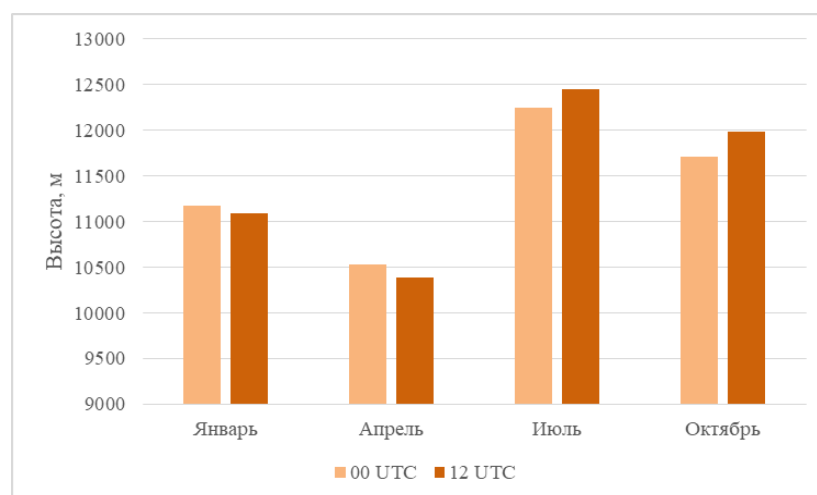


Рисунок 21 – Средние высоты тропопавузы за середину каждого сезона в 2023г. по станции г.Туапсе за 00 и 12 UTC

Суточная изменчивость высоты тропопавузы на станциях в Мурманске, Санкт-Петербурге и Туапсе в 2023 году незначительна во все сезоны. Возможно именно поэтому ее вклад в реальную высоту тропопавузы меньше, чем вклад от других факторов: времени года или барической системы.

3.3 Анализ температуры на уровне тропопавузы

В таблице 5 представлены значения максимальной, средней и минимальной температуры на нижней границе тропопавузы за 2022-2023гг.

Таблица 5 – Температура на уровне тропопавузы в 2022-2023 гг. на станциях Мурманск, Санкт-Петербург, Туапсе

Станция	Температура, °C	Год	
		2022	2023
Мурманск	Максимальная	-36,7	-36,7
	Средняя	-58,4	-58,0
	Минимальная	-78,7	-83,1
Санкт-Петербург	Максимальная	-33,7	-38,1
	Средняя	-57,7	-58,1
	Минимальная	-75,9	-83,3
Туапсе	Максимальная	-34,9	-36,7
	Средняя	-57,9	-59,2
	Минимальная	-76,5	-74,5

Средняя температура тропопаузы в Мурманске в 2022 году составила $-58,4^{\circ}\text{C}$, а в 2023 году $-58,0^{\circ}\text{C}$. Максимальная температура тропопаузы за 2022 год равна $-33,7^{\circ}\text{C}$ и наблюдалась 21 июня в 00 UTC, в 2023 году она составила $-36,7^{\circ}\text{C}$ 2 июля в 00 UTC. Минимальная температура в 2022 году была $-78,7^{\circ}\text{C}$ 10 марта в 12 UTC, а в 2023 $-83,1^{\circ}\text{C}$ 9 февраля в 00 UTC.

Средняя температура тропопаузы в Санкт-Петербурге в 2022 году составила $-57,7^{\circ}\text{C}$, а в 2023 году $-58,1^{\circ}\text{C}$. Максимальная температура тропопаузы за 2022 год равна $-33,7^{\circ}\text{C}$ и наблюдалась 20 июля в 00 UTC, в 2023 году она составила $-38,1^{\circ}\text{C}$ 3 июня в 00 UTC. Минимальная высота в 2022 году была $-75,9^{\circ}\text{C}$ 12 марта в 00 UTC, а в 2023 $-83,3^{\circ}\text{C}$ 9 февраля в 12 UTC.

Средняя температура тропопаузы в Туапсе в 2022 году составила $-57,9^{\circ}\text{C}$, а в 2023 году $-59,2^{\circ}\text{C}$. Максимальная температура тропопаузы за 2022 год равна $-34,9^{\circ}\text{C}$ и наблюдалась 28 июля в 00 UTC, в 2023 году она составила $-36,7^{\circ}\text{C}$ 26 декабря в 12 UTC. Минимальная температура в 2022 году была $-76,5^{\circ}\text{C}$ 1 апреля в 00 UTC, а в 2023 $-74,5^{\circ}\text{C}$ 26 февраля в 12 UTC.

Распределение максимальных и минимальных зафиксированных температур на уровне тропопаузы соответствует нормальному сезонному ходу – максимальные температуры в летние месяцы и минимальные температуры в зимние и весенние месяцы, являющиеся переходными.

В таблице 6 представлены средние температуры тропопаузы по месяцам для станций в Мурманске, Санкт-Петербурге и Туапсе за 2022-2023 гг.

Таблица 6 - Средние температура тропопаузы по месяцам для станций в Мурманске, Санкт-Петербурге и Туапсе за 2022-2023 гг.

Месяцы	2022г.			2023г.		
	Мурманск	Санкт-Петербург	Туапсе	Мурманск	Санкт-Петербург	Туапсе
Январь	-65,4	-61,7	-58,7	-66,5	-64,1	-64,4
Февраль	-64,8	-60,3	-58,1	-65,9	-65,2	-62,2
Март	-65,3	-63,7	-56,5	-54,2	-56,1	-60,3
Апрель	-55,7	-56,8	-60,2	-56,9	-59,0	-58,6
Май	-53,4	-54,1	-58,2	-54,4	-54,7	-57,6
Июнь	-52,3	-53,7	-53,7	-52,6	-54,4	-56,6
Июль	-52,7	-53,2	-49,7	-52,7	-51,5	-52,4
Август	-55,0	-57,3	-60,6	-53,6	-54,9	-59,8
Сентябрь	-57,7	-55,1	-57,1	-55,3	-57,7	-54,7
Октябрь	-55,6	-57,6	-58,0	-57,4	-57,4	-60,8
Ноябрь	-62,2	-59,4	-61,5	-60,7	-60,9	-59,8
Декабрь	-60,1	-59,6	-63,1	-66,1	-61,5	-63,3

На рисунке 22 и 23 представлен годовой ход средней температуры тропопавзы в Мурманске за 2022 и 2023 гг.

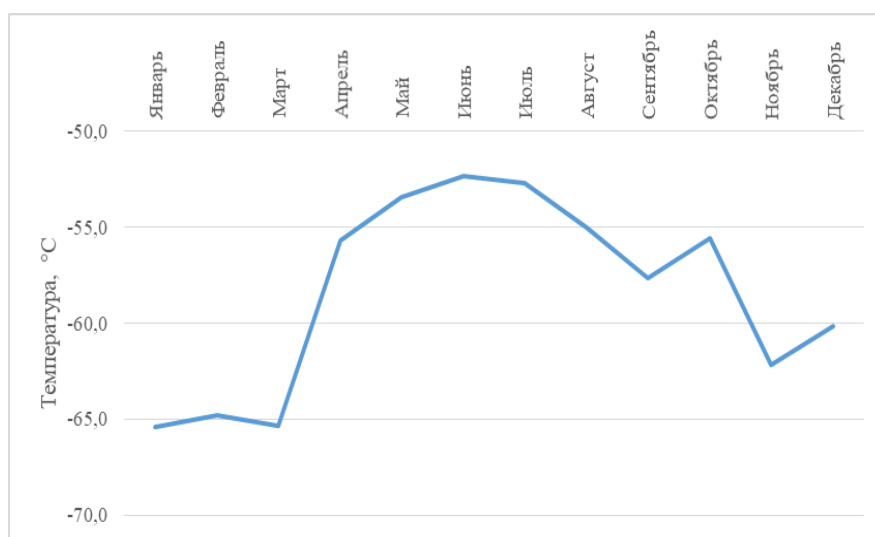


Рисунок 22 – Годовой ход средней температуры тропопавзы в Мурманске за 2022 г.

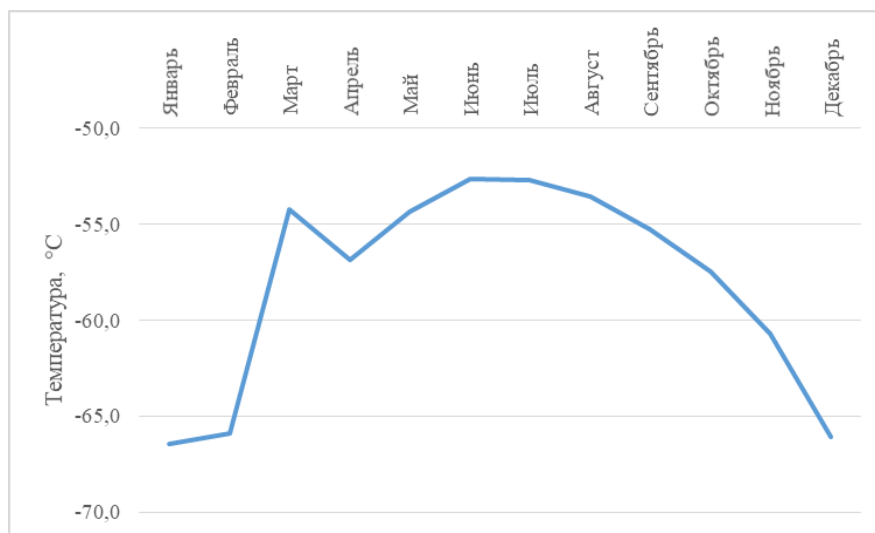


Рисунок 23 – Годовой ход средней температуры тропопаузы в Мурманске за 2023 г.

Годовой ход средней температуры тропопаузы в Мурманске в 2022 и 2023 году полностью соответствует нормальному сезонному ходу, с максимумом значений температур летом: $-52,3^{\circ}\text{C}$ июнь 2022 и $-52,6^{\circ}\text{C}$ июль 2023, а минимум температуры наблюдается зимой: $-65,4^{\circ}\text{C}$ январь 2022 и $-66,5^{\circ}\text{C}$ январь 2023г.

На рисунке 24 и 25 представлен годовой ход средней температуры тропопаузы в Санкт-Петербурге за 2022 и 2023 гг.

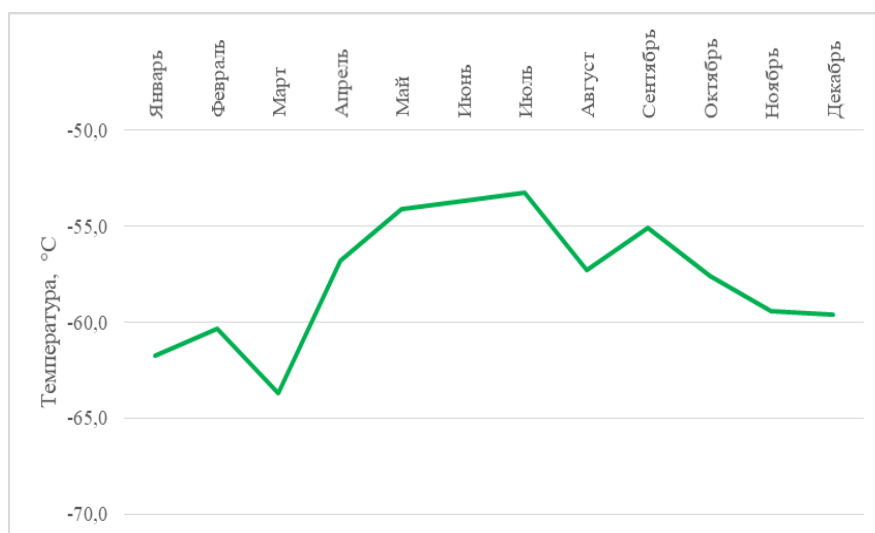


Рисунок 24 – Годовой ход средней температуры тропопаузы в Санкт-Петербурге за 2022 г.

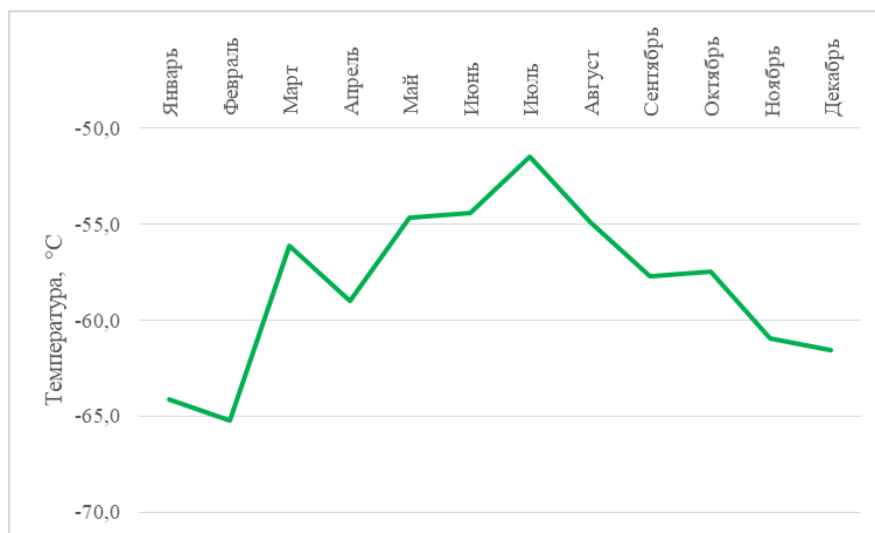


Рисунок 25 – Годовой ход средней температуры тропопаузы в Санкт-Петербурге за 2023 г.

Годовой ход средней температуры тропопаузы в Санкт-Петербурге в 2022 и 2023 году почти соответствует нормальному сезонному ходу, с максимумом значений температур летом: $-53,2^{\circ}\text{C}$ июль 2022 и $-51,5^{\circ}\text{C}$ июль 2023, а минимум температуры наблюдается весной и зимой: $-63,7^{\circ}\text{C}$ март 2022 и $-65,2^{\circ}\text{C}$ февраль 2023г.

На рисунке 26 и 27 представлен годовой ход средней температуры тропопаузы в Туапсе за 2022 и 2023 гг.

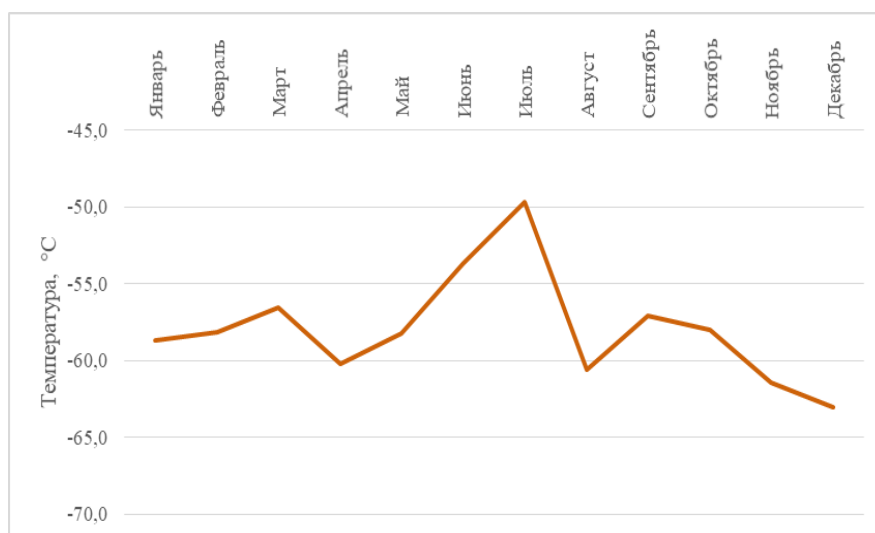


Рисунок 26 – Годовой ход средней температуры тропопаузы в Туапсе за 2022 г.

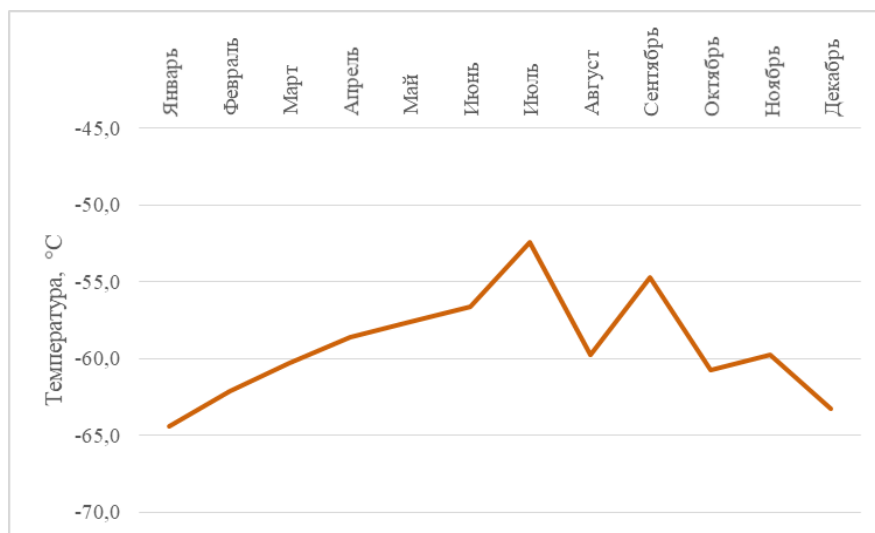


Рисунок 27 – Годовой ход средней температуры тропопаузы в Туапсе за 2023 г.

Годовой ход средней температуры тропопаузы в Санкт-Петербурге в 2022 и 2023 году полностью соответствует нормальному сезонному ходу, с максимумом значений температур летом: $-49,7^{\circ}\text{C}$ июль 2022 и $-52,4^{\circ}\text{C}$ июль 2023, а минимум температуры наблюдается зимой: $-63,1^{\circ}\text{C}$ декабрь 2022 и $-64,4^{\circ}\text{C}$ январь 2023г.

На рисунке 28 и 29 представлен совмещенный график средних температур тропопаузы в 2022 и 2023 году для станций в Мурманске, Санкт-Петербурге и Туапсе.

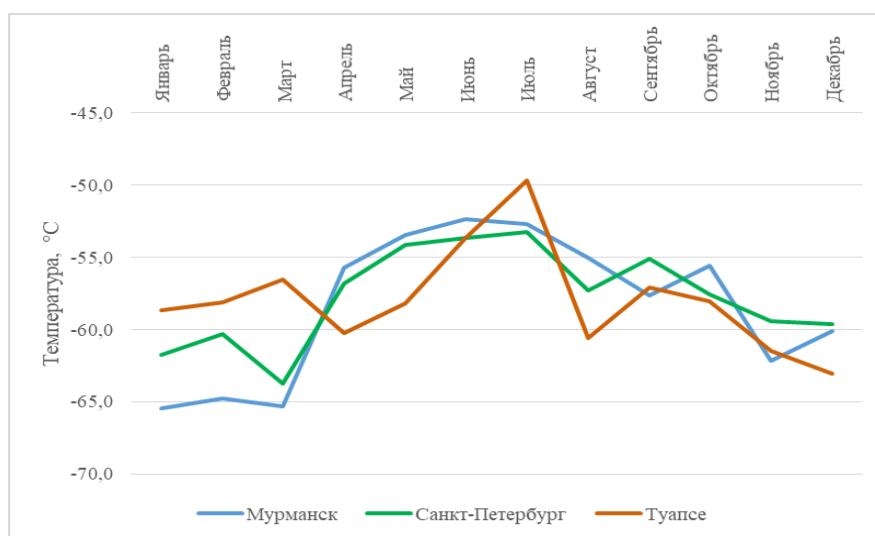


Рисунок 28 – Совмещенный график средней температуры тропопаузы по станциям г. Мурманск, Санкт-Петербург, Туапсе за 2022 г.

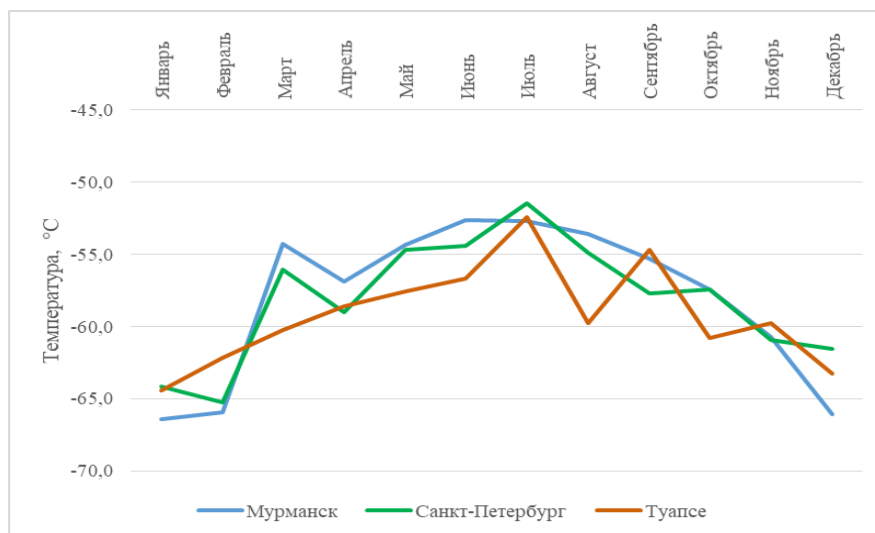


Рисунок 29 – Совмещенный график средней температуры тропопаузы по станциям г. Мурманск, Санкт-Петербург, Туапсе за 2023 г.

Разница между максимумом и минимумом в Мурманске в 2022 году составила $13,1^{\circ}\text{C}$, а в 2023 году $13,9^{\circ}\text{C}$. В Санкт-Петербурге эта же разница была равна $10,5^{\circ}\text{C}$ в 2022 году, и $13,7^{\circ}\text{C}$ в 2023. В Туапсе она составила $13,4^{\circ}\text{C}$ в 2022 году и $12,0^{\circ}\text{C}$ в 2023. Можно сделать вывод что на этих станциях нормальная сезонная изменчивости температуры, ведь в среднем температура тропопаузы в высоких и умеренных широтах летом бывает на $8-15^{\circ}\text{C}$ выше, чем зимой. Годовой ход средних температур имеет более плавный ход на станциях в Мурманске и Санкт-Петербурге, в Туапсе же он имеет более ломанные линии, и следовательно более резкие изменения температуры в течение года. Но опять же, все отклонения и резкие изменения можно объяснить при помощи синоптической ситуации. Например, всё тот же март 2023 года, где у нас наблюдалась череда циклонов из-за которой высота тропопаузы понизилась, т.е. тропопаузы опустилась ниже, а температура наоборот повысилась, так как чем ближе к поверхности (в тропосфере), тем выше температура.

В таблице 7 представлены значения средних температур тропопаузы в месяцы соответствующие середине каждого сезона в 2023 году для станций в Мурманске, Санкт-Петербурге и Туапсе за разные сроки наблюдений.

Таблица 7 – Средняя температуры тропопаузы по Мурманску, Санкт-Петербургу, Туапсе за середину каждого сезона 2023г. в 00 и 12 UTC

Сезоны 2023г.	Температура, °C					
	Мурманск		Санкт-Петербург		Туапсе	
	00 UTC	12 UTC	00 UTC	12 UTC	00 UTC	12 UTC
Январь	-66,6	-66,3	-65,1	-63,2	-64,8	-64,1
Апрель	-57,2	-56,6	-58,8	-59,2	-59,0	-58,3
Июль	-53,2	-52,2	-51,4	-51,5	-51,7	-53,3
Октябрь	-58,1	-56,8	-58,5	-56,4	-60,5	-60,9

В идеальном случае, распределение температур на уровне тропопаузы в течение года должно быть следующим: минимальная температура наблюдается зимой, максимальная летом, а весной и осенью, которые являются переходными сезонами, значения температур должны быть между зимними и летними. Для анализа, как и в случае с высотой, выбраны именно средние месяцы каждого сезона, так как каждый из них может характеризовать весь сезон, хотя, конечно же и бывают исключения, к примеру, март и апрель в Санкт-Петербурге может иметь погодные явления характерные для зимних месяцев.

На рисунке 30 и 31 представлены средние температуры тропопауз в 2023 году для всех исследуемых станций за середину каждого сезона, но для разных сроков наблюдений (00 и 12 UTC).

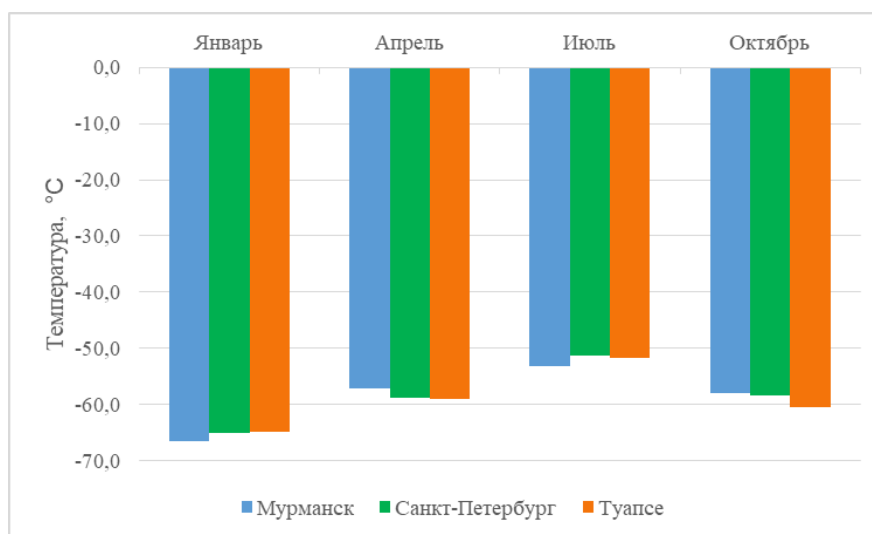


Рисунок 30 – Средние температуры тропопаузы за середину каждого сезона в 2023г. по станциям г. Мурманск, Санкт-Петербург, Туапсе за 00 UTC

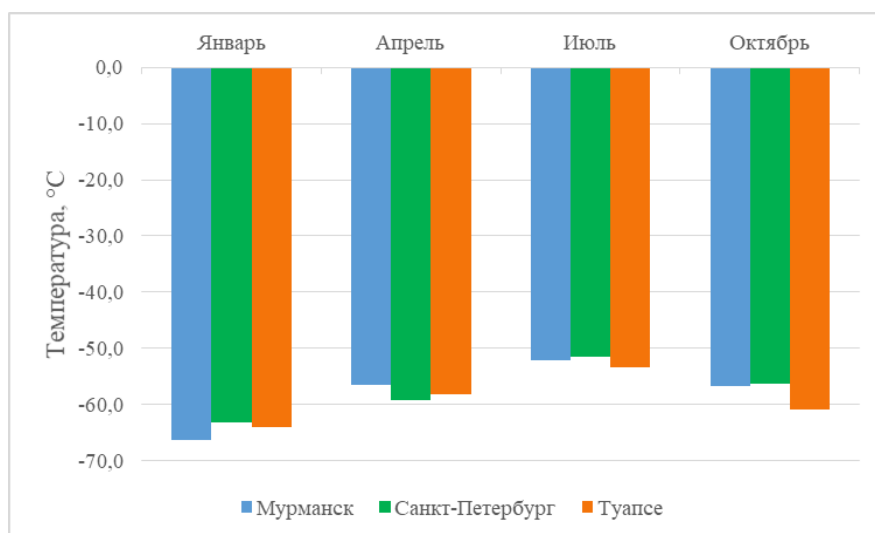


Рисунок 31 – Средние температуры тропопаузы за середину каждого сезона в 2023г. по станциям г. Мурманск, Санкт-Петербург, Туапсе за 12 UTC

На рисунках 30 и 31 хорошо видно, что годовой ход температур на уровне тропопаузы соответствует идеальному случаю.

На рисунках 32, 33 и 34 представлены значения средних температур для середины сезона для каждой станции по отдельности за разные сроки наблюдений.

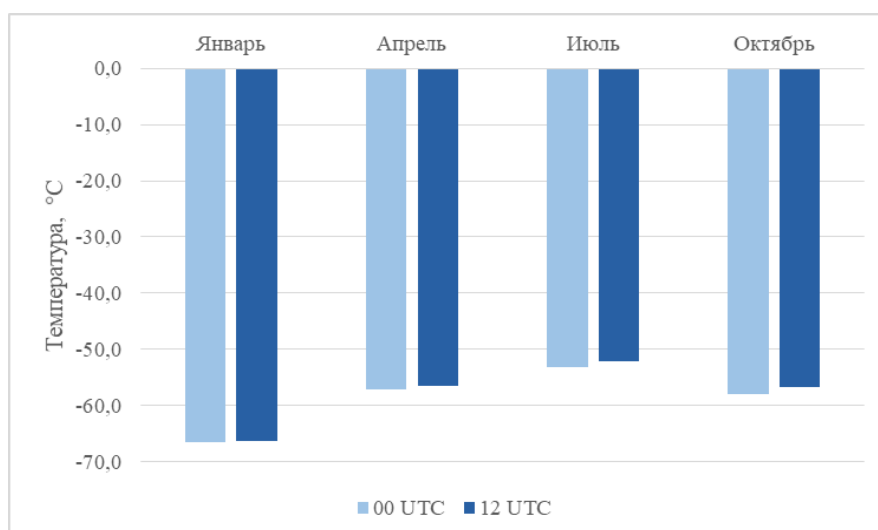


Рисунок 32 – Средние температуры тропопаузы за середину каждого сезона в 2023г. по станции г.Мурманск за 00 и 12 UTC

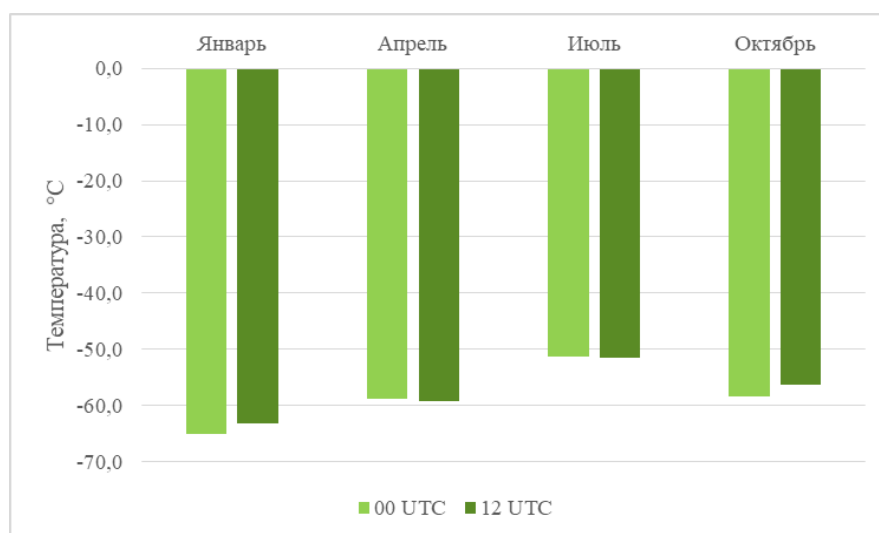


Рисунок 33 – Средние температуры тропопаузы за середину каждого сезона в 2023г. по станции г.Санкт-Петербург за 00 и 12 UTC

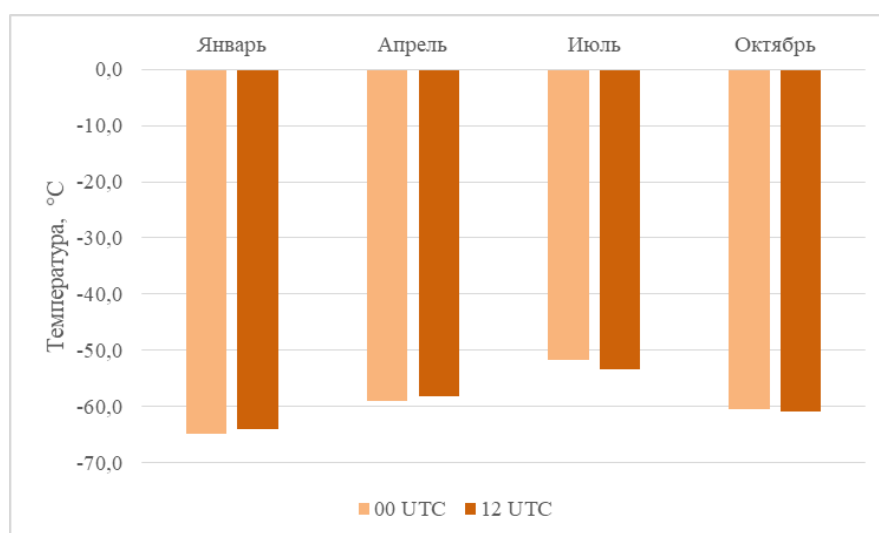


Рисунок 34 – Средние температуры тропопаузы за середину каждого сезона в 2023г. по станции г.Туапсе за 00 и 12 UTC

Суточная изменчивость высоты тропопаузы на станциях в Мурманске, Санкт-Петербурге и Туапсе в 2023 году имеет очень маленькие различия во все сезоны. Причем в Мурманске суточный ход соответствует полностью – в срок 12 UTC на уровне тропопаузы теплее, чем в 00 UTC.

3.4 Анализ давления на уровне тропопаузы

В таблице 8 представлены значения максимального, среднего и минимального давления на нижней границе тропопаузы для каждой исследуемой станции за 2022 и 2023 год.

Таблица 8 – Давление на уровне тропопаузы в 2022-2023 гг. на станциях Мурманск, Санкт-Петербург, Туапсе

Станция	Давление, гПа	Год	
		2022	2023
Мурманск	Максимальное	453	444
	Среднее	258	261
	Минимальное	128	162
Санкт-Петербург	Максимальное	407	437
	Среднее	259	254
	Минимальное	126	122
Туапсе	Максимальное	366	372
	Среднее	222	218
	Минимальное	100	100

Среднее давление на уровне тропопаузы в Мурманске в 2022 году составило 258 гПа, а в 2023 году – 261 гПа. Максимальное давление за 2022 год равно 453 гПа и наблюдалось 27 апреля в 00 UTC, в 2023 году оно составило 444 гПа 28 февраля в 12 UTC. Минимальное давление в 2022 году было 128 гПа 28 февраля в 00 UTC, а в 2023 – 162 гПа 7 февраля в 00 UTC.

Среднее давление на уровне тропопаузы в Санкт-Петербурге в 2022 году составило 259 гПа, а в 2023 году – 254 гПа. Максимальное давление за 2022 год равно 407 гПа и наблюдалось 20 июля в 00 UTC, в 2023 году оно составило 437 гПа 5 мая в 00 UTC. Минимальное давление в 2022 году было 126 гПа 2 июня в 00 UTC, а в 2023 – 122 гПа 5 октября в 00 UTC.

Среднее давление на уровне тропопаузы в Туапсе в 2022 году составило 222 гПа, а в 2023 году – 218 гПа. Максимальное давление за 2022 год равно 366 гПа и наблюдалось 19 марта в 12 UTC, в 2023 году оно составило 372 гПа

16 февраля в 00 UTC. Минимальное давление в 2022 году было 100 гПа 12 августа в 12 UTC, а в 2023 – 100 гПа 9 августа в 12 UTC.

Встречающиеся максимальные и минимальные значения давления соответствуют распределению высот по широтам. С высотой давление уменьшается. Самое минимальное давление располагается на большей высоте и встречается на самой южной станции – в Туапсе, где встречающиеся высоты тропопауз наибольшие. Самое максимальное давление располагается ближе к поверхности земли и встречается на самой северной станции – в Мурманске.

В таблице 9 представлено среднее давление на уровне тропопаузы по месяцам для станций в Мурманске, Санкт-Петербурге и Туапсе за 2022-2023 гг.

Таблица 9 – Среднее давление на уровне тропопаузы по месяцам для станций в Мурманске, Санкт-Петербурге и Туапсе за 2022-2023 гг.

Месяцы	2022г.			2023г.		
	Мурманск	Санкт-Петербург	Туапсе	Мурманск	Санкт-Петербург	Туапсе
Январь	247	272	255	241	239	220
Февраль	257	279	253	245	242	249
Март	237	245	276	326	302	246
Апрель	296	281	229	279	260	246
Май	284	281	227	274	272	236
Июнь	263	248	224	271	261	214
Июль	246	252	218	246	261	206
Август	240	219	130	234	227	147
Сентябрь	241	259	202	245	222	216
Октябрь	270	244	215	269	257	205
Ноябрь	238	250	215	260	252	223
Декабрь	272	281	223	239	259	213

На рисунке 35 и 36 представлен годовой ход среднего давления тропопаузы в Мурманске за 2022 и 2023 гг.

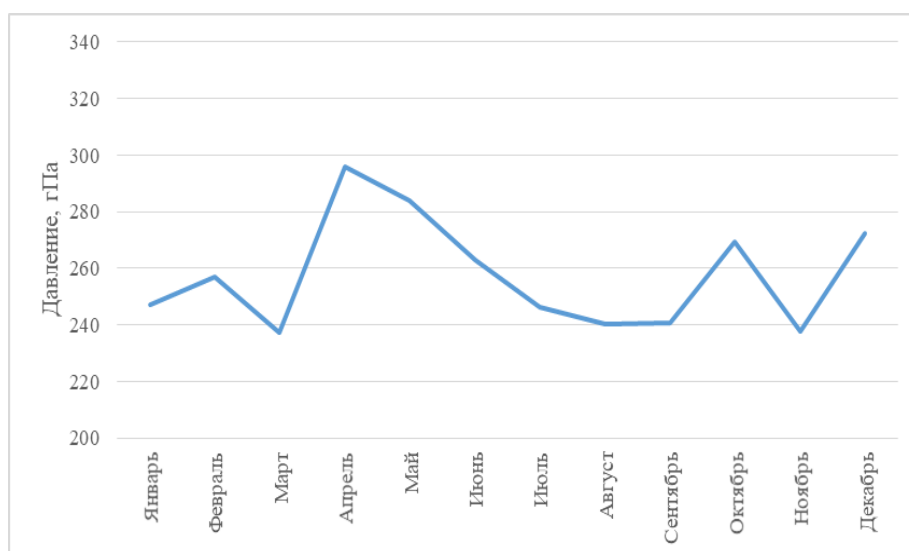


Рисунок 35 – Годовой ход среднего давления тропопазы в Мурманске за 2022 г.

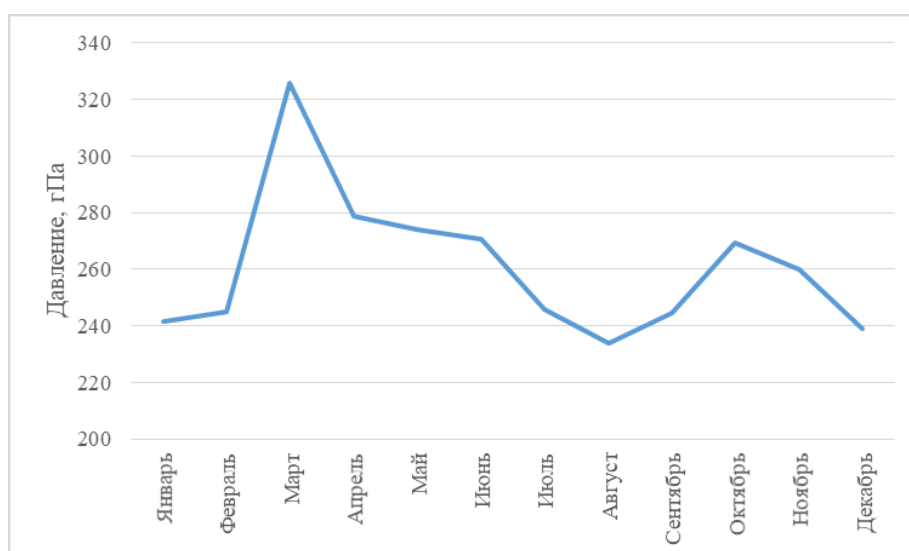


Рисунок 36 – Годовой ход среднего давления тропопазы в Мурманске за 2023 г.

Максимальное значение давления в Мурманске отмечается весной: 296 гПа в апреле 2022 и 326 гПа в марте 2023г. Минимальное значение давления в Мурманске наблюдается весной и летом: 237 гПа в марте 2022 и 147 гПа в августе 2023г.

На рисунке 37 и 38 представлен годовой ход среднего давления тропопазы в Санкт-Петербурге за 2022 и 2023 гг.

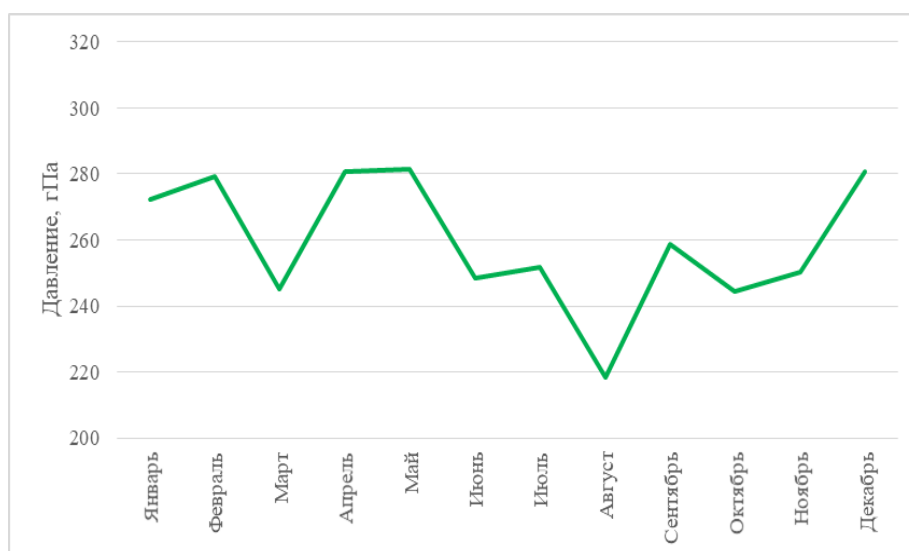


Рисунок 37 – Годовой ход среднего давления тропопаузы в Санкт-Петербурге за 2022 г.

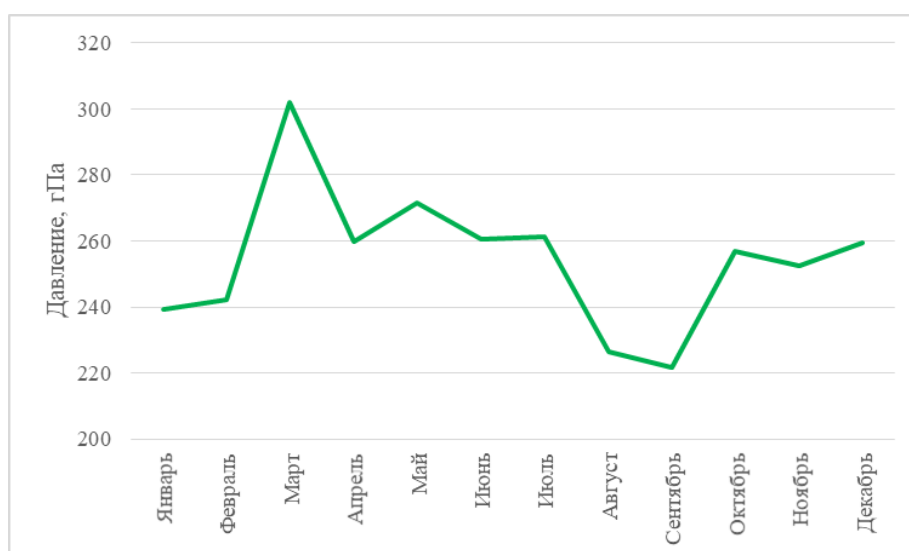


Рисунок 38 – Годовой ход среднего давления тропопаузы в Санкт-Петербурге за 2023 г.

Максимальное значение давления в Санкт-Петербурге отмечается весной и зимой: 281 гПа в мае и декабре 2022 года и 302 гПа в марте 2023г. Минимальное значение давления в Санкт-Петербурге наблюдается летом и осенью: 219 гПа в августе 2022 года и 222 гПа в сентябре 2023г.

На рисунке 39 и 40 представлен годовой ход среднего давления тропопаузы в Туапсе за 2022 и 2023 гг.

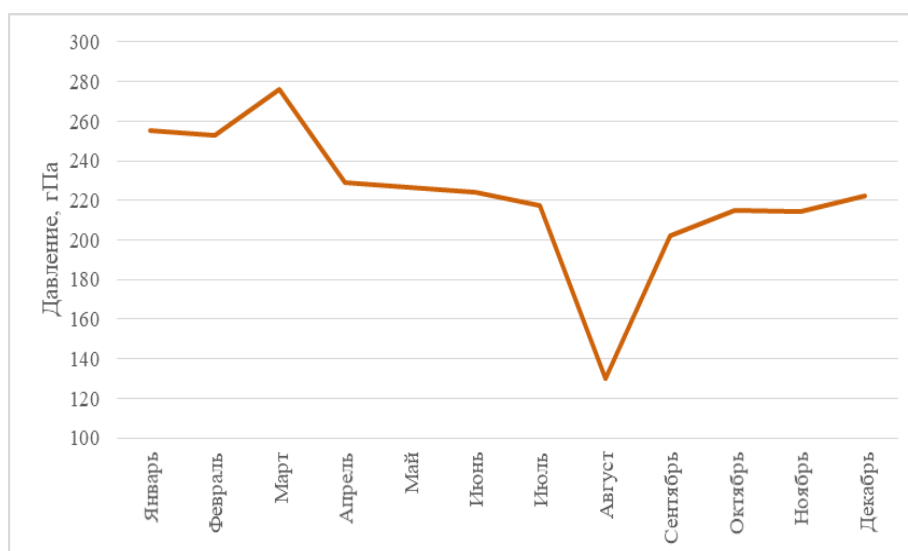


Рисунок 39 – Годовой ход среднего давления тропопаузы в Туапсе за 2022 г.

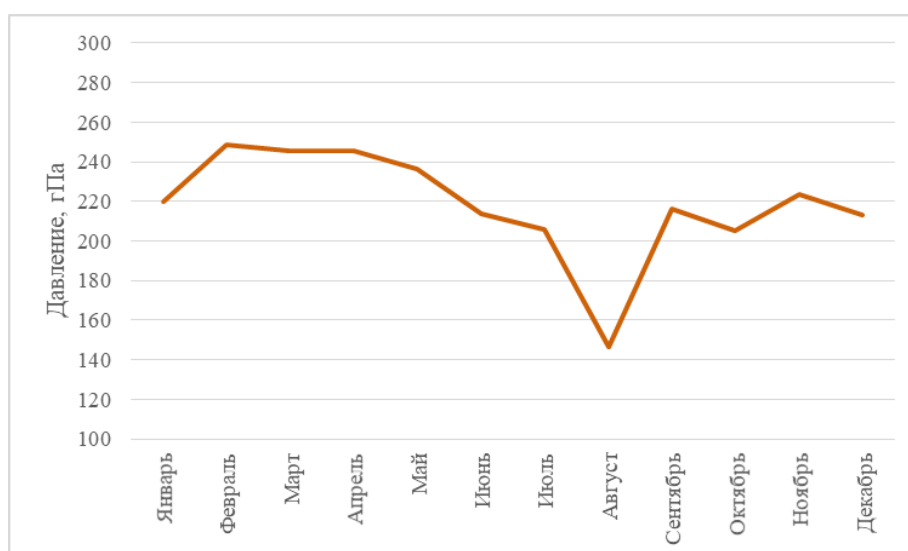


Рисунок 40 – Годовой ход среднего давления тропопаузы в Туапсе за 2023 г.

Максимальное значение давления в Туапсе отмечается весной и зимой: 276 гПа в марте 2022 года и 249 гПа в феврале 2023г. Минимальное значение давления в Санкт-Петербурге наблюдается летом: 130 гПа в августе 2022 года и 147 гПа в августе 2023г.

На рисунке 41 и 42 представлен совмещенный график среднего давления на уровне тропопаузы в 2022 и 2023 году для станций в Мурманске, Санкт-Петербурге и Туапсе.

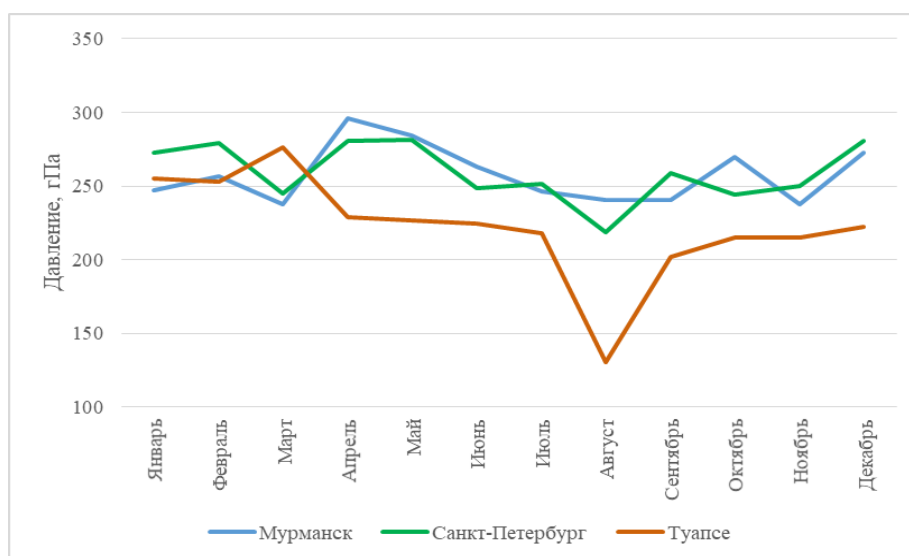


Рисунок 41 – Совмещенный график среднего давления по станциям г. Мурманск, Санкт-Петербург, Туапсе за 2022 г.

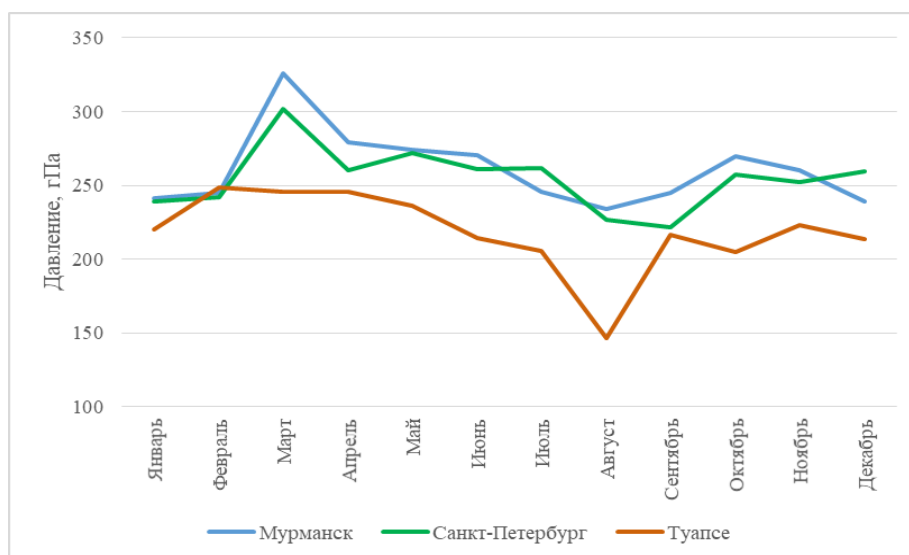


Рисунок 42 – Совмещенный график среднего давления по станциям г. Мурманск, Санкт-Петербург, Туапсе за 2023 г.

Разброс между максимумом и минимумом в Мурманске в 2022 году составил 59 гПа, а в 2023 году 179 гПа. В Санкт-Петербурге этот же разброс был равен 62 гПа в 2022 году, и 80 гПа в 2023. В Туапсе он составил 146 гПа в 2022 году и 102 гПа в 2023. Судить о «правильности» годового хода среднего давления невозможно, так как распределение давления по планете зависит от циркуляции в атмосфере и барических систем, которые неодинаковы из года в год.

В таблице 10 представлены значения среднего давления на уровне тропопаузы в месяцы соответствующие середине каждого сезона в 2023 году для станций в Мурманске, Санкт-Петербурге и Туапсе за разные сроки наблюдений.

Таблица 10 – Среднее давление тропопаузы по Мурманску, Санкт-Петербургу, Туапсе за середину каждого сезона 2023г. в 00 и 12 UTC

Сезоны 2023г.	Давление, гПа					
	Мурманск		Санкт-Петербург		Туапсе	
	00 UTC	12 UTC	00 UTC	12 UTC	00 UTC	12 UTC
Январь	242	240	241	238	218	221
Апрель	278	280	262	258	243	249
Июль	244	247	258	264	209	202
Октябрь	268	271	249	265	210	201

На рисунках 43, 44 и 45 представлены значения среднего давления на уровне тропопаузы для середины сезона для каждой станции по отдельности за разные сроки наблюдений.

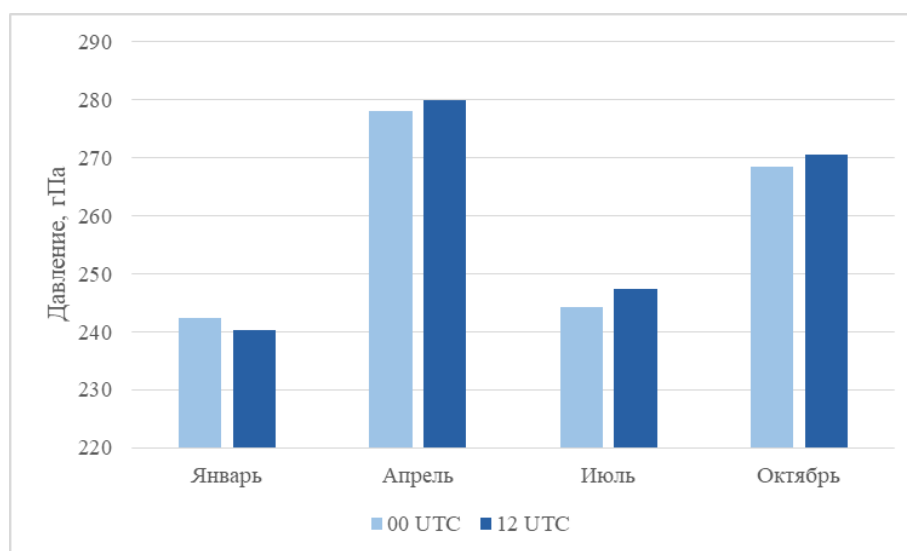


Рисунок 43 – Среднее давление тропопаузы за середину каждого сезона в 2023г. по станции г.Мурманск за 00 и 12 UTC

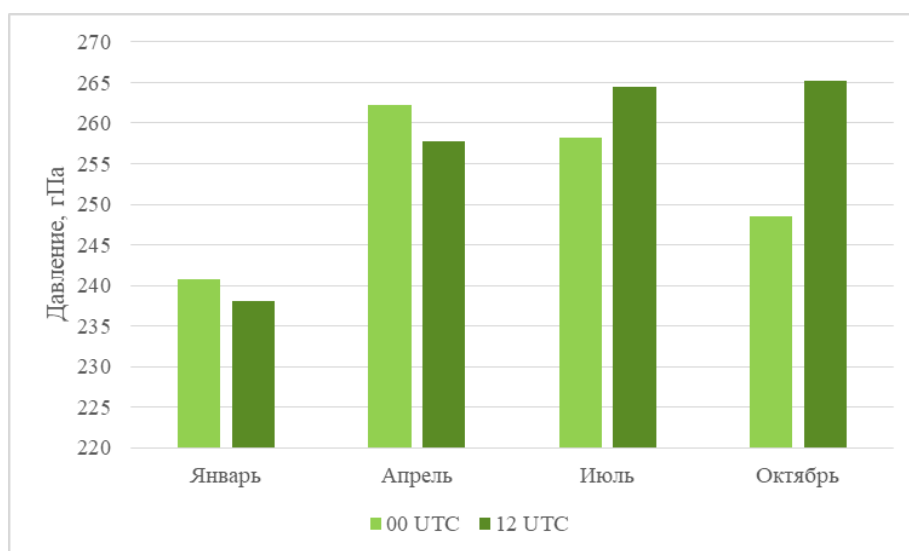


Рисунок 44 – Среднее давление тропопазузы за середину каждого сезона в 2023г. по станции г.Санкт-Петербург за 00 и 12 UTC

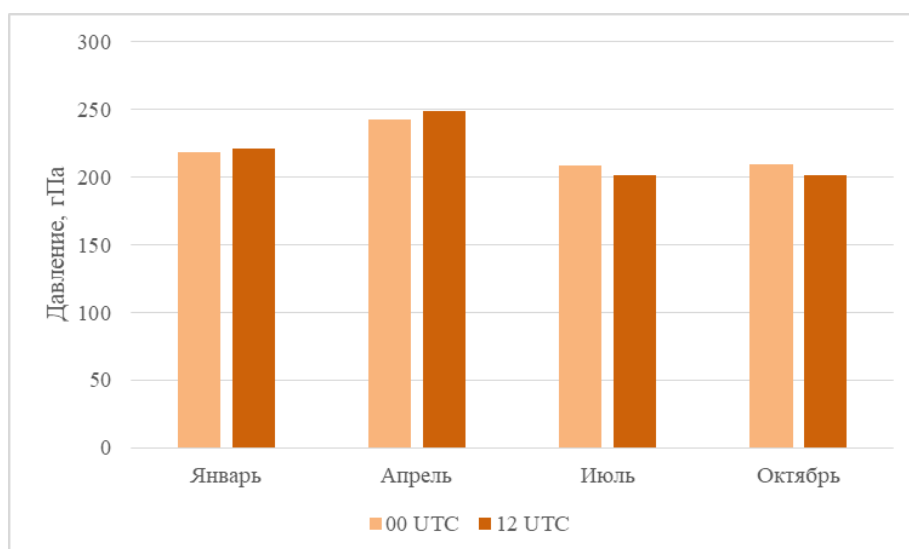


Рисунок 45 – Среднее давление тропопазузы за середину каждого сезона в 2023г. по станции г.Туапсе за 00 и 12 UTC

Суточная изменчивость среднего давления на уровне тропопазузы на станциях в Мурманске и Туапсе в 2023 году имеет маленькие различия во все сезоны, кроме станции в Санкт-Петербурге. По тому, насколько велико различие в значениях давлениях за разные сроки наблюдений можно судить лишь о том, насколько быстро меняется барическое поле на данной станции. А его изменение приводит к изменениям и движениям барической системы, которые в свою очередь могут влиять на другие характеристики тропопазузы.

3.5 Анализ множественной тропопаузы

В таблице 11 представлено количество случаев с множественной тропопаузой (две и более) по месяцам за 2022-2023гг. для станций Мурманск, Санкт-Петербург и Туапсе. Множественная тропопауза в разные сроки (00 и 12 UTC) считалась отдельным случаем.

Таблица 11 – Количество случаев множественной тропопаузы по станциям в Мурманске, Санкт-Петербурге, Туапсе за 2022-2023гг.

Месяцы	2022г.			2023г.			2022-2023гг.		
	Мурманск	Санкт-Петербург	Туапсе	Мурманск	Санкт-Петербург	Туапсе	Мурманск	Санкт-Петербург	Туапсе
Январь	24	11	17	15	7	7	39	18	24
Февраль	14	3	20	16	7	13	30	10	33
Март	15	3	18	5	4	16	20	7	34
Апрель	9	3	18	9	3	19	18	6	37
Май	7	5	6	6	4	10	13	9	16
Июнь	4	3	17	4	4	12	8	7	29
Июль	0	4	16	2	5	18	2	9	34
Август	7	4	3	8	11	8	15	15	11
Сентябрь	1	1	14	7	10	20	8	11	34
Октябрь	13	9	25	5	3	15	18	12	40
Ноябрь	5	9	14	18	4	12	23	13	26
Декабрь	17	7	8	11	6	8	28	13	16
Всего	116	62	176	106	68	158	222	130	334

На рисунке 46 для наглядности представлено общее количество случаев множественной тропопаузы за 2022-2023гг. для станций в Мурманске, Санкт-Петербурге и Туапсе.

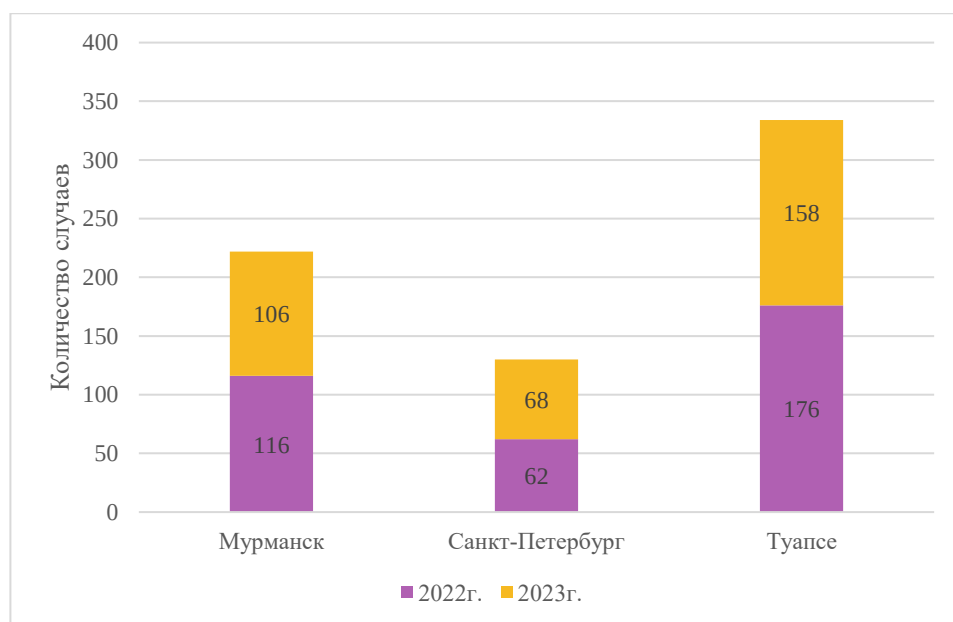


Рисунок 46 – Общее количество случаев множественной тропопаузы по станциям Мурманск, Санкт-Петербург, Туапсе за 2022-2023 гг.

Меньше всего случаев множественной тропопаузы зафиксировано в Санкт-Петербурге 130 случаев: из них 62 случая в 2022 году и 68 случаев в 2023. В 2023 году по сравнению с 2022 количество случаев множественной тропопаузы выросло на 6. Больше случаев зафиксировано в Мурманске – 222 случая: 116 случаев в 2022 году и 106 случаев в 2023. В 2023 году по сравнению с 2022 количество случаев множественной тропопаузы упало на 10. Больше всего зафиксировано в Туапсе – 334 случая: 176 случаев в 2022 году и 158 случаев в 2023. В 2023 году по сравнению с 2022 количество случаев множественной тропопаузы упало на 18.

На рисунках 47, 48 и 49 представлен годовой ход повторяемости случаев множественной тропопаузы для всех исследуемых станций по годам.

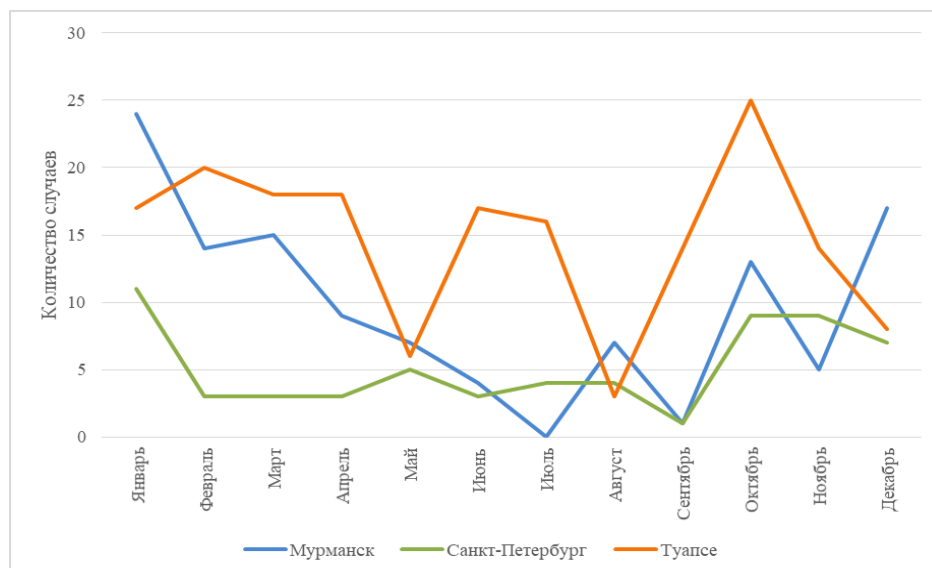


Рисунок 47 – Количество случаев множественной тропопаузы по станциям г. Мурманск, Санкт-Петербург, Туапсе за 2022 г.

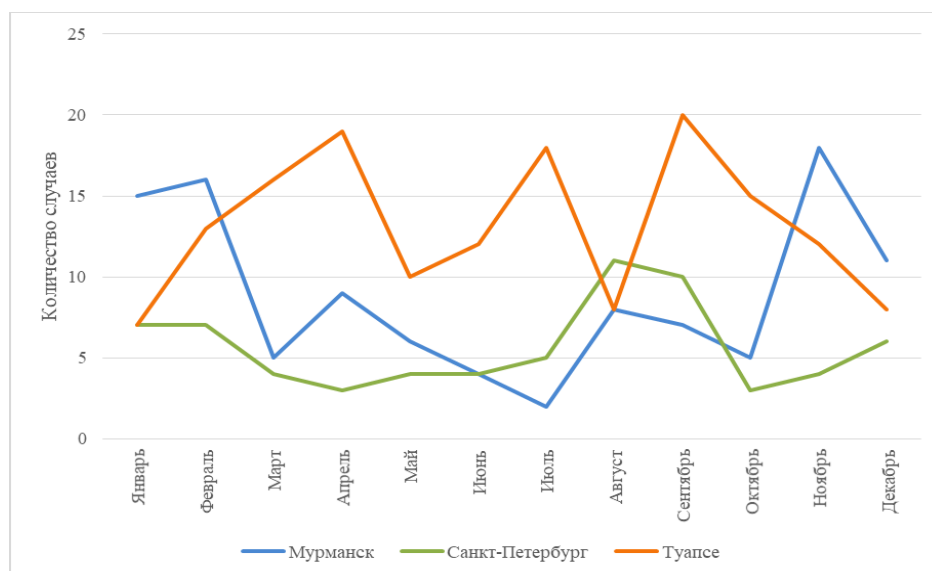


Рисунок 48 – Количество случаев множественной тропопаузы по станциям г. Мурманск, Санкт-Петербург, Туапсе за 2023 г.

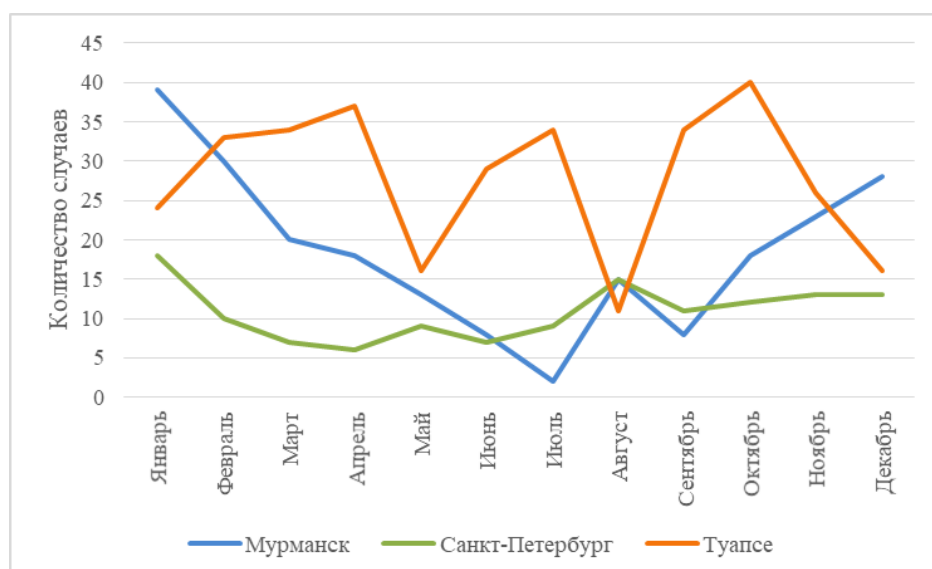


Рисунок 49 – Общее количество случаев множественной тропопаузы за 2022-2023гг. по станциям г. Мурманск, Санкт-Петербург, Туапсе

В Мурманске в 2022 году чаще всего множественная тропопауза встречается в январе, феврале, марте и декабре; в 2023 году в январе, феврале и ноябре.

В Санкт-Петербурге в 2022 году чаще всего множественная тропопауза встречается в январе, октябре, ноябре и декабре; в 2023 году в январе, феврале, августе и сентябре.

В Туапсе в 2022 году много случаев множественной тропопаузы встречается во все месяцы, кроме мая и августа. В 2023 году больше всего случаев зафиксировано апреле, июле и сентябре.

В таблице 12 представлены количество случаев множественной тропопаузы по исследуемым станциям за 2022-2023гг. разбитое на сезоны.

Таблица 12 – Количество случаев множественной тропопаузы на станциях г. Мурманск, Санкт-Петербург, Туапсе по сезонам за 2022-2023 гг.

Сезоны	2022г.			2023г.			2022-2023гг.		
	Мурманск	Санкт-Петербург	Туапсе	Мурманск	Санкт-Петербург	Туапсе	Мурманск	Санкт-Петербург	Туапсе
Зима	55	21	45	42	20	28	97	41	73
Весна	31	11	42	20	11	45	51	22	87
Лето	11	11	36	14	20	38	25	31	74
Осень	19	19	53	30	17	47	49	36	100

На рисунках 50, 51 и 52 представлено распределение случаев множественной тропопаузы по станциям Мурманска, Санкт-Петербурга и Туапсе по сезонам за 2022, 2023 и в сумме за оба года.

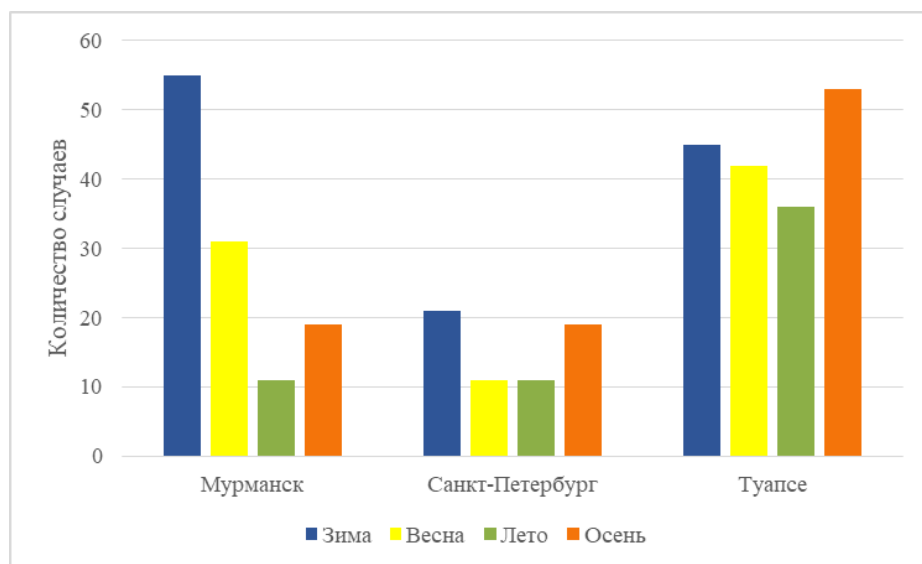


Рисунок 50 – Количество случаев множественной тропопаузы на станциях в Мурманске, Санкт-Петербурге и Туапсе по сезонам за 2022 г.

В 2022 году наибольшее количество случаев с множественной тропопаузой наблюдалось зимой – в Мурманске; весной, летом и осенью – в Туапсе.

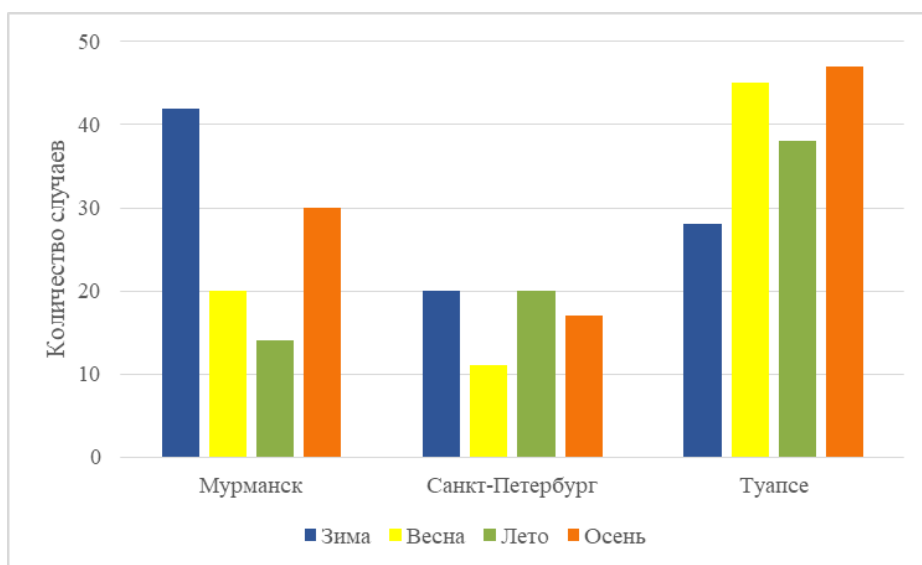


Рисунок 51 – Количество случаев множественной тропопаузы на станциях в Мурманске, Санкт-Петербурге и Туапсе по сезонам за 2023 г.

В 2023 году наибольшее количество случаев с множественной тропопаузой наблюдалось зимой – в Мурманске; а весной, летом и осенью – в Туапсе.

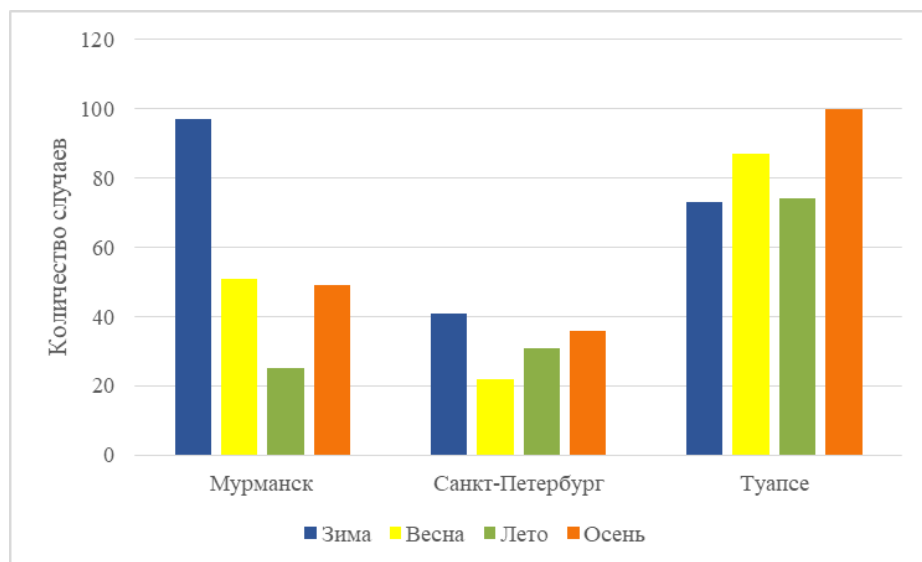


Рисунок 52 – Количество случаев множественной тропопаузы на станциях в Мурманске, Санкт-Петербурге и Туапсе по сезонам за 2022-2023 гг.

Если судить об общем количестве случаев множественной тропопаузы за оба года, то по рисунку 52 можно сделать вывод: в Мурманске чаще всего она образуется зимой, реже всего летом; в Санкт-Петербурге чаще всего образуется зимой, реже всего весной; в Туапсе чаще всего осенью, реже всего зимой и летом.

Известно, что причиной разрыва тропопаузы и таким образом образования двух складок может быть сдвиг ветра по скорости, например усиление ветра, наблюдаемое в струйном течении. Следует проверить, может ли сдвиг ветра по направлению стать причиной образования дополнительной складки. Для этого были проверены все зафиксированные за исследуемые два года случаи с двумя или более тропопаузами. Таких случаев на всех трех станциях было 686: 222 случая в Мурманске, 130 случаев в Санкт-Петербурге и 334 случая в Туапсе. За резкий сдвиг ветра по направлению было принято значение ≥ 60 градусов, на примере кода METAR.

В таблице 13 представлены количество случаев множественной тропопаузы со сдвигом ветра по направлению по разным градациям и их повторяемость для всех исследуемых станций за 2022-2023гг.

Таблица 13 – Количество случаев множественной тропопаузы со сдвигом ветра по направлению по разным градациям и их повторяемость для станций в Мурманске, Санкт-Петербурге и Туапсе за 2022-2023гг.

Сдвиг ветра, град	Мурманск		Санкт-Петербург		Туапсе	
	Количество случаев за 2022-2023гг.	Повторяемость, %	Количество случаев за 2022-2023гг.	Повторяемость, %	Количество случаев за 2022-2023гг.	Повторяемость, %
0	57	26	43	33	103	31
5	87	39	40	31	141	42
10	41	18	20	15	45	13
15	21	9	11	8	21	6
20	6	3	7	5	12	4
25	6	3	2	2	4	1
30	2	1	2	2	4	1
35	1	0	0	0	2	1
40	0	0	1	1	2	1
45	0	0	0	0	0	0
50	0	0	1	1	0	0
55	1	0	0	0	0	0
≥60	0	0	3	2	0	0
Всего	222	100	130	100	334	100

На рисунках 53, 54 и 55 представлены повторяемости случаев множественной тропопаузы со сдвигом ветра по направлению в каждой из градаций для каждой из исследуемых станций по отдельности за 2022-2023гг.

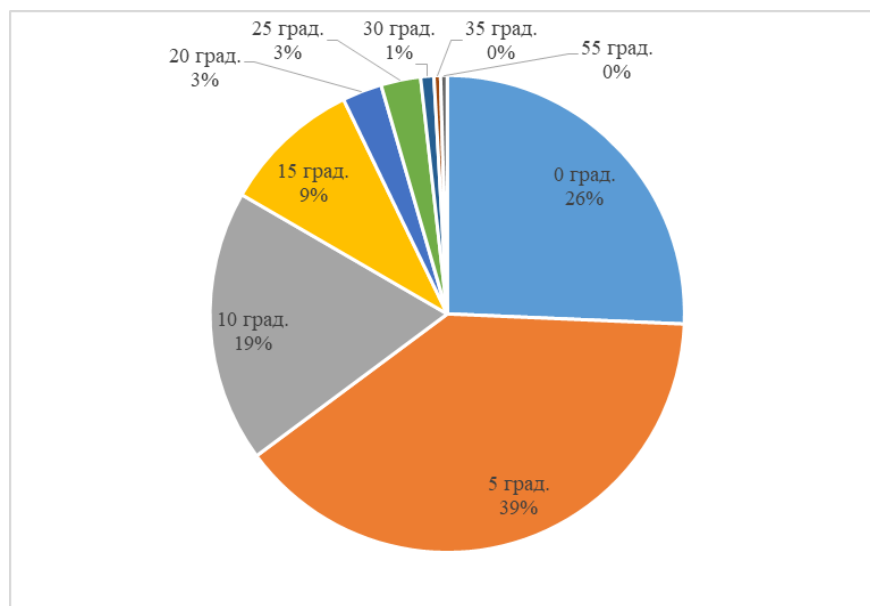


Рисунок 53 – Повторяемость случаев множественной тропопаузы со сдвигом ветра по направлению в каждой из градаций для станции Мурманск за 2022-2023 гг.

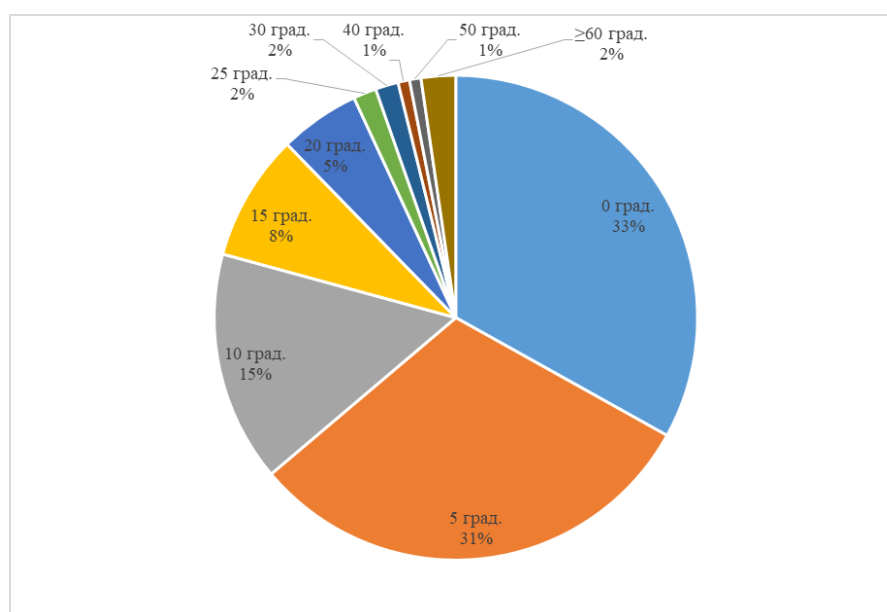


Рисунок 54 – Повторяемость случаев множественной тропопаузы со сдвигом ветра по направлению в каждой из градаций для станции Санкт-Петербург за 2022-2023 гг.

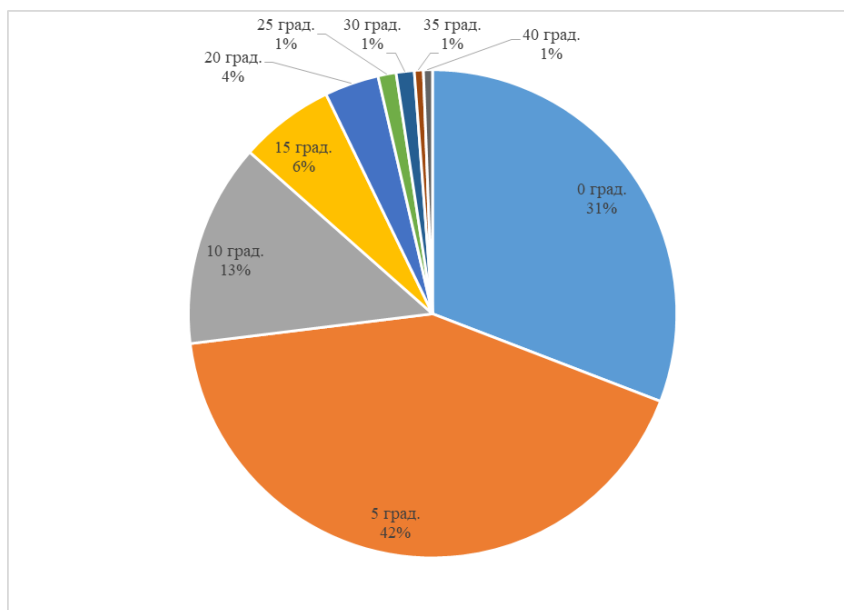


Рисунок 55 – Повторяемость случаев множественной тропопаузы со сдвигом ветра по направлению в каждой из градаций для станции Туапсе за 2022-2023 гг.

На станции Мурманск за 2022-2023гг. не было случаев множественной тропопаузы где наблюдался бы резкие сдвиг ветра по направлению. Чаще всего (в 39% случаев) ветер менял свое направление на 5 градусов, реже (в 26% случаев) он не менял свое направление или менял его на 10 градусов (в 19% случаев).

На станции Санкт-Петербург за 2022-2023гг. в 2% случаев множественной тропопаузы наблюдался резкий сдвиг ветра по направлению – всего 3 случая: 2 из них в 2022 году и 1 в 2023 году. Чаще всего (в 33% случаев) ветер не менял свое направление, немного реже (в 31% случаев) он менял свое направление на 5 градусов или менял его на 10 градусов (в 15% случаев).

На станции Туапсе за 2022-2023гг. не было случаев множественной тропопаузы где наблюдался бы резкие сдвиг ветра по направлению. Чаще всего (в 42% случаев) ветер менял свое направление на 5 градусов, реже (в 31% случаев) он не менял свое направление или менял его на 10 градусов (в 13% случаев).

На рисунке 56 представлены результаты повторяемости множественной тропопаузы со сдвигом ветра по направлению в каждой из наблюдаемых градаций за 2022-2023гг. для всех исследуемых станций.

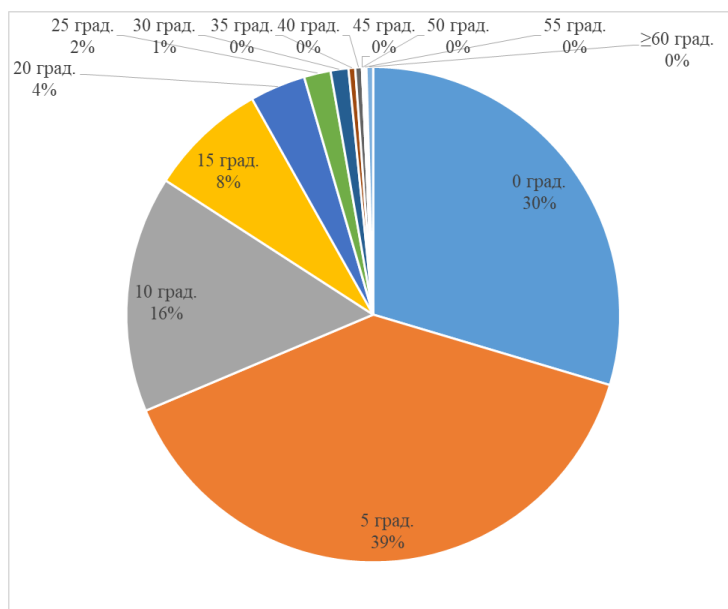


Рисунок 56 – Повторяемость случаев множественной тропопаузы со сдвигом ветра по направлению в каждой из градаций за 2022-2023гг. для всех исследуемых станций

Из диаграммы видно, что интересующая нас градация « ≥ 60 градусов» имеет повторяемость 0% (если еще точнее – 0,4%). Получается, что всего в 3 случаях из 686 с множественной тропопаузой наблюдается резкий сдвиг ветра по направлению. На основе чего, мы можем сделать вывод о том, что резкое изменение направления ветра не может служить предиктором для образования множественной тропопаузы.

За исследуемые 2022-2023гг. всего был один единственный случай множественной тропопаузы с 4 складками тропопаузы. Этот случай произошел 26 апреля 2022 года в 12 UTC на станции в Мурманске.

В телеграмме, закодированной по коду КН-04 каждая тропопауза кодируется отличительными цифрами кода – 88.

Телеграмма по станции Мурманск за 26 апреля 2022 году в 12 UTC:

ТТАА 26121 22008 99993 02763 34005 00070 // // 92680 08962 30009 85326
 15958 30010 70757 25361 31516 50514 36365 24522 40666 44364 23530 30859 42767
 24019 25983 38970 24017 20136 39374 24013 15332 41577 20505 10604 46776 34003
88363 46565 23529 88204 41174 24013 88166 41776 25507 88102 47575 33003 77999
 ТТВВ 26123 22008 00993 02763 11835 17357 22804 19756 33744 23958 44707 24960
 55656 29164 66645 28765 77586 30365 88402 44364 99383 43965 11360 46565 22326
 44765 33317 41566 44290 43167 55239 36572 66204 41174 77189 37375 88166 41776
 99136 41177 11102 47575 21212 00993 34005 11902 29010 22765 31013 33723 31520
 44664 29012 55626 26518 66409 23530 77341 23025 88320 24522 99284 23019 11238
 25513 22199 24013 33177 27511 44148 19504 55136 25003 66101 33503 31313 56203
 81131 41414 25500
 ТТСС 26121 22008 70840 48975 26502 50062 47975 17003 30398 48775 06504 20664
 48575 07506 10122 46576 01008 88999 77999

В таблице 14 раскодированы данные о давлении, температуре, направлении и скорости ветра на нижней границе каждой складки тропопаузы.

Таблица 14 – Данные четырех тропопауз 26 апреля 2022 г. на станции Мурманск

Высота, м	Давление, гПа	Температура, °C	Направление ветра, градусы	Скорость ветра, м/с
7310	363	-46,5	235	29
11225	204	-41,1	240	13
12634	166	-41,7	255	7
15909	102	-47,5	330	3

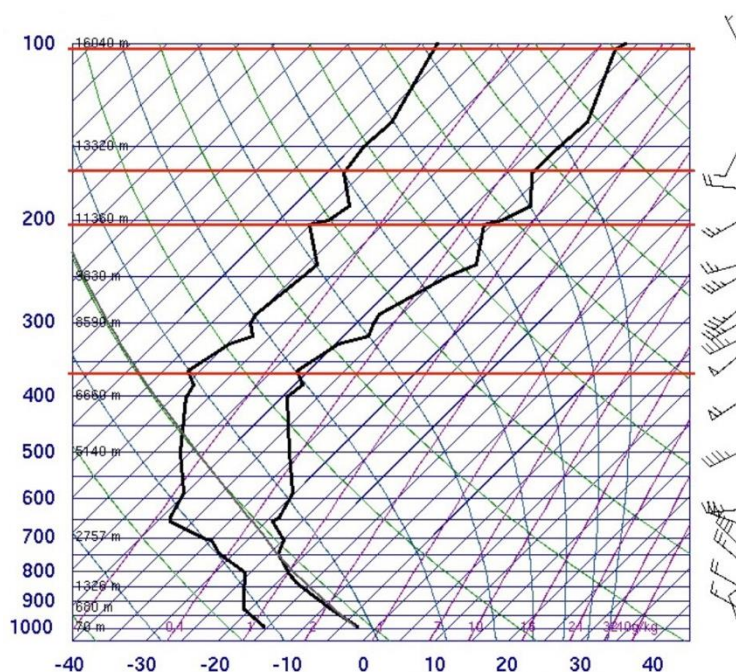


Рисунок 57 – Аэрологическая диаграмма за 26 апреля 2022г. в 12 UTC по станции Мурманск

На основе рисунков 58-62 был проведен анализ синоптической ситуации, в результате которой образовалось 4 складки тропопаузы.

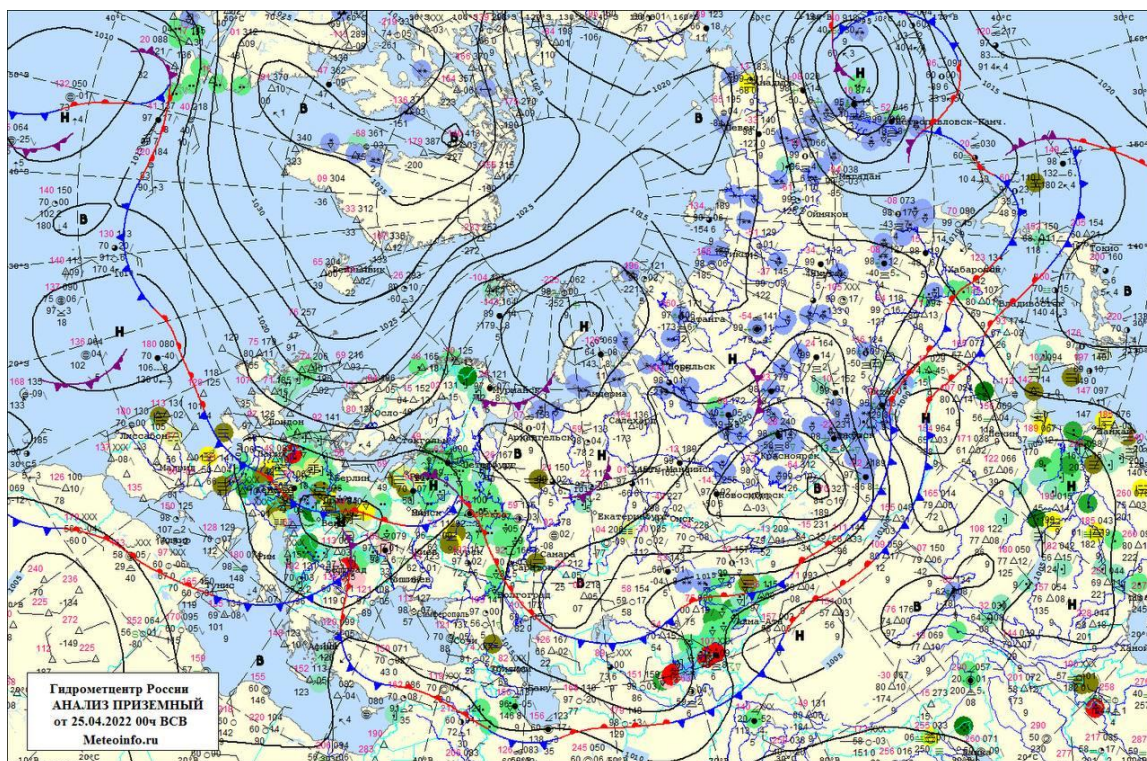


Рисунок 58 – Карта приземного анализа от 25 апреля 2022г. за 00 UTC

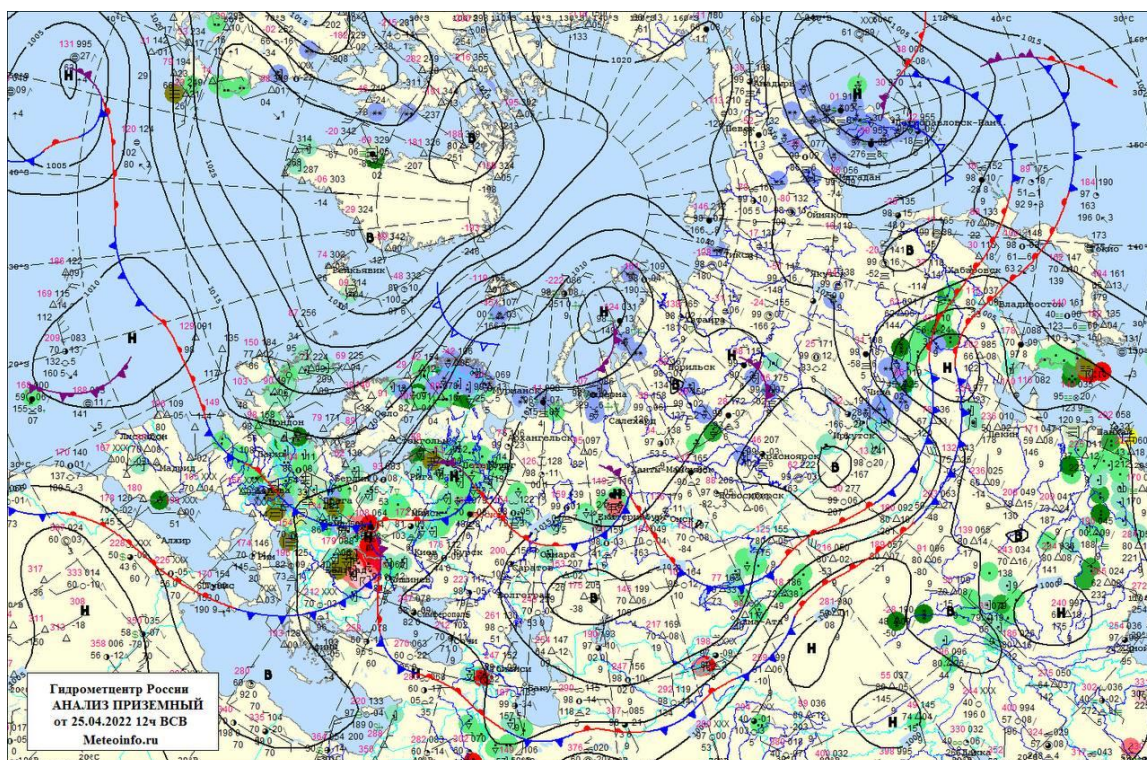


Рисунок 59 – Карта приземного анализа от 25 апреля 2022г. за 12 UTC

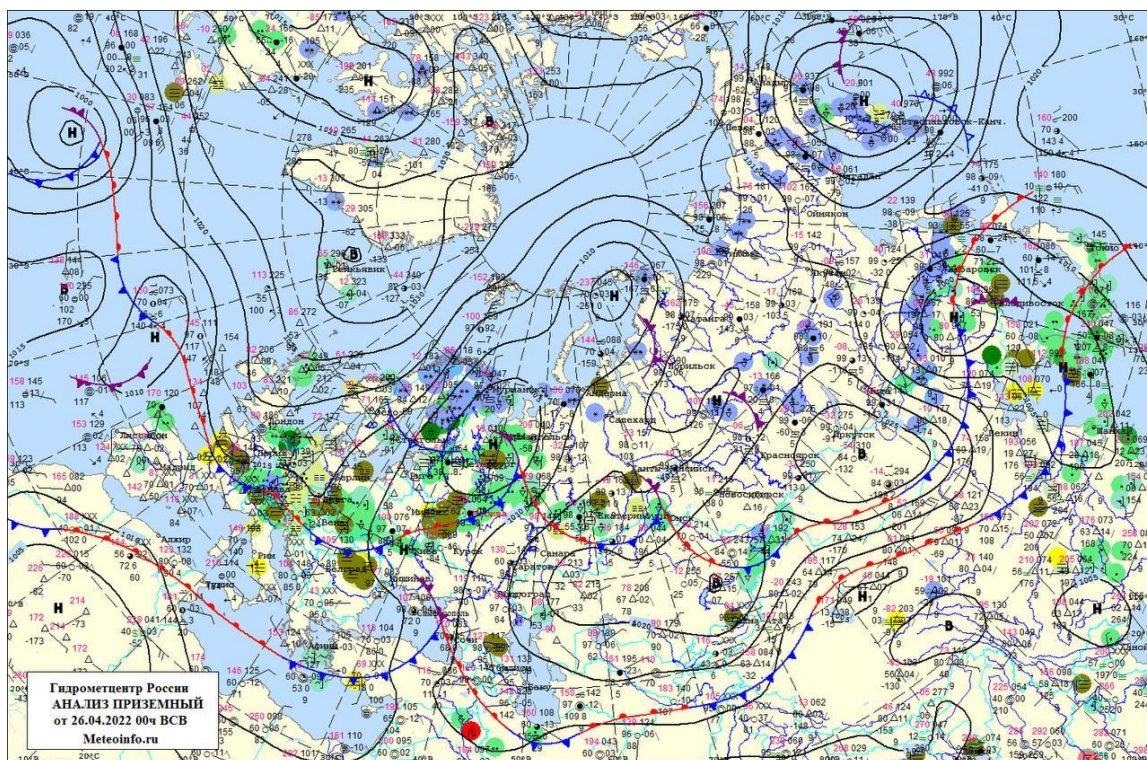


Рисунок 60 – Карта приземного анализа от 26 апреля 2022г. за 00 UTC

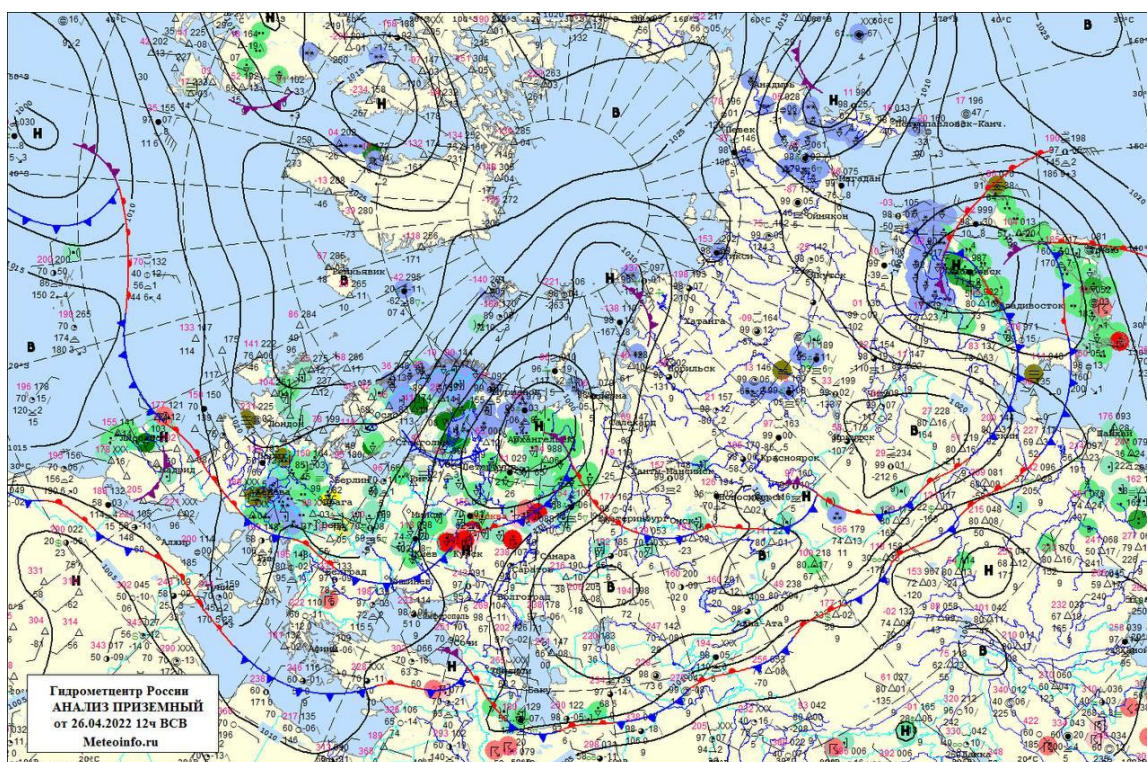


Рисунок 61 – Карта приземного анализа от 26 апреля 2022г. за 12 UTC

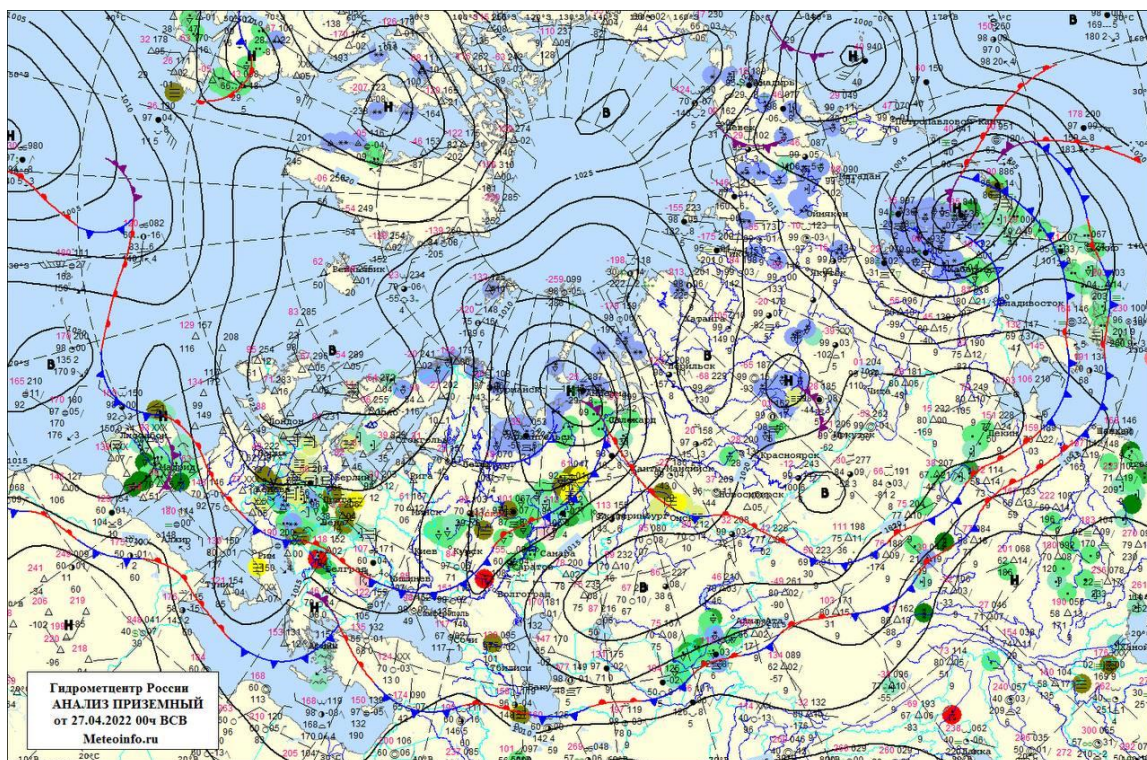


Рисунок 62 – Карта приземного анализа от 27 апреля 2022г. за 00 UTC

25 апреля в 00 часов по UTC окклюдированный циклон с давлением в центре 1008 гПа над Латвией и Белорусью смещался на северо-запад. Над о.Северный, Новая Земля находился другой циклон с давлением в центре 1005 гПа в стадии развития. Для удобства будем называть их «Южным» и «Северным» циклоном соответственно. В это же время их разделял гребень высокого давления расположенный над территорией республики Коми. Затем 25 апреля в 12 часов по UTC, гребень высокого давления сместился на юго-восток и там соединился с антициклоном расположенным над территорией Казахстана, тем самым перестав быть препятствием между двумя выше описанными циклонами. Давление в Южном циклоне 1005 гПа, а в Северном 1003 гПа. По данным радиозондирования атмосферы 25 апреля в 12 часов по UTC в Мурманске была одна тропопауза на высоте 10046м. 26 апреля в 00 часов по UTC циклон смещающийся с территории Латвии и Белоруссии уже находился над Архангельской областью с давлением 1001 гПа, имея как минимум одну общую замкнутую изобару с циклоном расположенным над Новой Землей, который уже тоже начал окклюдировать с давлением 1004 гПа.

При этом на аэрологической диаграмме за 26 апреля в 00 часов по UTC (рис. 63) уже появляется вторая складка тропопаузы, расположенная на высоте 15954м и ветры на этой высоте имеют северное направление. На основании этого можно сделать предположение, что началось вторжение холодных воздушных масс из полярных широт в умеренные и сближение двух циклонов.

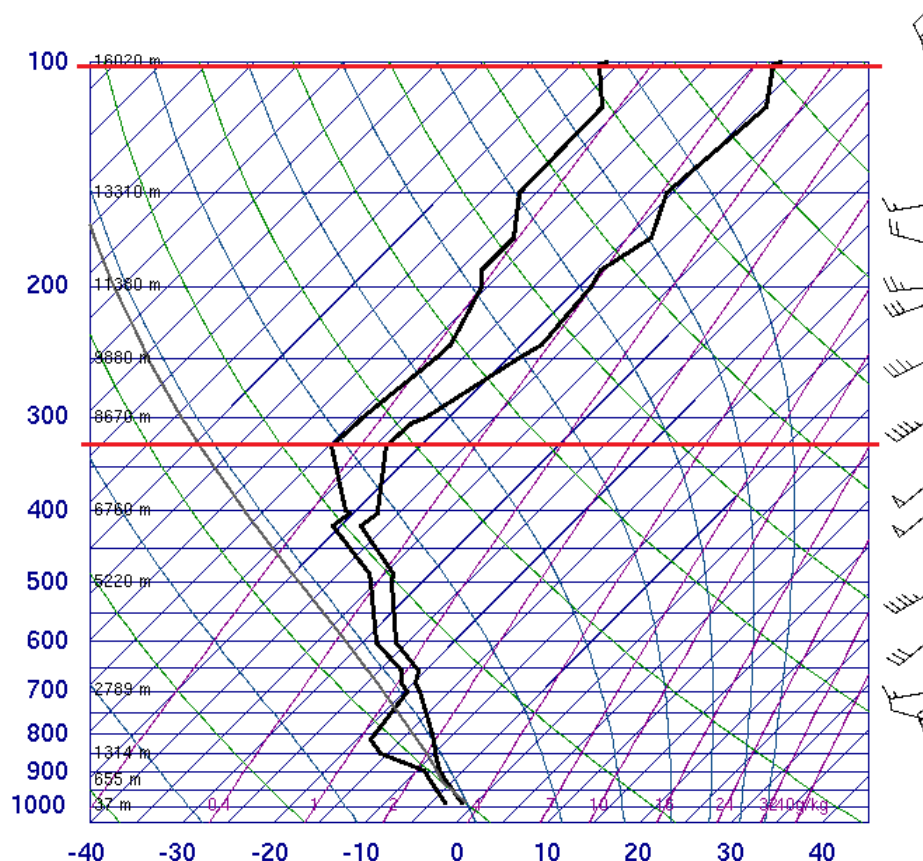


Рисунок 63 – Аэрологическая диаграмма за 26 апреля 2022г. в 00 UTC по станции Мурманск

И наконец, 26 апреля в 12 часов по UTC, когда наблюдается 4 складки тропопаузы, на приземной карте мы видим, что окклюдированный циклон над Новой Землей находится в стадии заполнения, так как количество замкнутых вокруг него изобар начинает уменьшаться и давление повышается до 1009 гПа, а второй циклон переместился с Архангельской области на территорию республики Коми, при этом снова начав углубляться, о чем нам говорит увеличение замкнутых вокруг него изобар (2 изобары), а также рост его площади и понижение давления до 998 гПа. Вероятнее всего, благодаря

вторжению и притоку холодного воздуха из полярных широт, а также сближению этих двух циклонов произошел процесс регенерации одного циклона за счет другого. И действительно, в следующий срок 27 апреля за 00 часов по UTC мы видим, что вокруг этого вновь углубляющегося регенерировавшего циклона уже 4 замкнутые изобары и давление в центре 988 гПа, а от северного циклона остается лишь излом изобар с областью пониженного давления около 1011 гПа.

На основе данного анализа можно сделать вывод, что одной из причин образования множественной тропопаузы может являться резкое вторжения ВМ, отличающейся своими характеристиками, а также сильные атмосферные возмущения (резкое углубление циклона), вызванные таким процессом, как регенерация. Но следует провести анализ большего количества случаев регенерации циклонов для выявления такой закономерности.

Для наглядности в таблицу 15 сведены данные о давлении в центрах двух анализируемых циклонов за все рассмотренные сроки наблюдения.

Таблица 15 – Давление в центре «южного» и «северного» циклона

	25 апреля за 00 UTC	25 апреля за 12 UTC	26 апреля за 00 UTC	26 апреля за 12 UTC	27 апреля за 00 UTC
«Северный» циклон	1005 гПа	1003 гПа	1004 гПа	1009 гПа	1011 гПа
«Южный» циклон	1008 гПа	1005 гПа	1001 гПа	998 гПа	988 гПа

На рисунке 64 также представлено изменения давления в этих двух циклонах за 5 сроков наблюдений, начиная с 25 апреля в 00 UTC и заканчивая 27 апреля в 00 UTC.

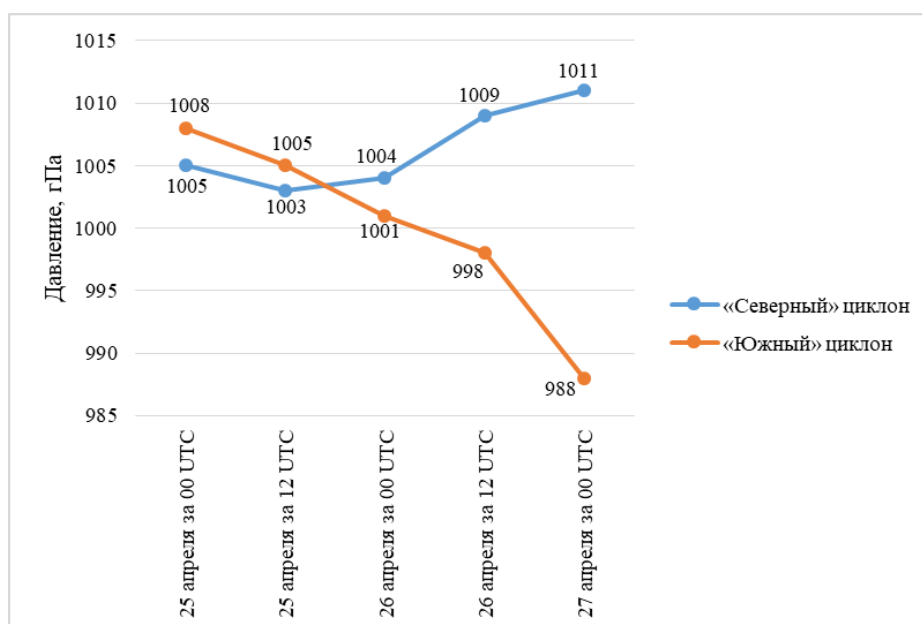


Рисунок 64 – Изменение давления в двух анализируемых циклонах в апреле 2022г.

«Северный» циклон находится в стадии развития, его давление с 1005 гПа 25 апреля за 00 UTC понижается до 1003 гПа 25 апреля за 12 UTC. Однако 25 апреля за 12 UTC уже виден его фронт окклюзии и к 26 апреля за 00 UTC его давление начинает повышаться до 1004 гПа, при этом происходит его сближение с «южным» циклоном. 26 апреля за 12 UTC уже наблюдается значительный рост давления в нем до 1009 гПа. А 27 апреля за 00 UTC, когда на приземной карте он выглядит как небольшая область пониженного давления давление уже составляет 1011 гПа.

25 апреля за 00 UTC уже окклюдированный «южный» циклон имеет давление 1008 гПа, но по мере его сближения с «северным» циклоном давление в нем снова начинает понижаться, он углубляется и регенирирует за счет «южного».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выпускной квалификационной работы был создан архив данных, включающий основные метеопараметры на высоте тропопаузы и случаи множественной тропопаузы за период 2022-2023гг. Были построены графики среднегодового хода метеопараметров и проведен их анализ. Также проанализированы случаи множественной тропопаузы и подробный разбор одного из них для выявления причин образования дополнительных складок.

Основные выводы:

1. Средние за год высоты на всех трех станциях соответствуют нормальному широтному ходу.
2. Распределение средних высот за разные сроки (00 и 12 UTC) не всегда соответствует нормальному суточному ходу, и в целом, суточная изменчивость незначительна во все сезоны, следовательно на высоту тропопаузы вклад времени суток имеет меньшее влияние, чем другие факторы – время года и барические системы.
3. При анализе и прогнозе высоты тропопаузы для достижения более точных результатов необходимо судить о высоте не по каждому фактору отдельно, а рассматривать их в комплексе.
4. Годовой ход средней высоты на каждой станции соответствует нормальному сезонному ходу – с максимумом высот в летний период, и минимумом зимой. Редко наблюдаются небольшие отклонения максимумов и минимумов на переходные периоды (весну и осень), что бывает связано с барическими системами, оказывающими существенное влияние на высоту тропопаузы.
5. На всех исследуемых станциях нормальный сезонный ход температуры, ведь в среднем температура тропопаузы в высоких и умеренных широтах летом бывает на 8-15°C выше, чем зимой, что соответствует наблюдаемой ситуации. Все отклонения и резкие изменения средних

температур связаны с барическими системами, оказывающими существенное влияние.

6. Меньше всего случаев множественной тропопаузы зафиксировано в Санкт-Петербурге 130 случаев. Больше случаев зафиксировано в Мурманске – 222 случая. Больше всего зафиксировано в Туапсе – 334 случая.

7. Множественная тропопауза в Мурманске чаще всего образуется зимой, реже всего летом. В Санкт-Петербурге чаще всего образуется зимой, реже всего весной. В Туапсе она образуется чаще всего осенью, реже всего зимой и летом.

8. Резкое изменение направления ветра не может служить предиктором для образования множественной тропопаузы, так как наблюдается всего в 0,4% случаев (3 случая из 686).

9. Одной из причин образования множественной тропопаузы может являться резкое вторжения ВМ, отличающейся своими характеристиками, а также сильные атмосферные возмущения (резкое углубление циклона), вызванные таким процессом, как регенерация. Но следует провести анализ большего количества случаев регенерации циклонов для выявления такой закономерности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богаткин О.Г. Авиационная метеорология: Учебник / О.Г. Богаткин. – СПб.: РГГМУ, 2005. – 328 с.
2. Червяков М. Ю., Шаркова С. А. Изменчивость характеристик тропопаузы в Арктике по данным радиозондирования атмосферы // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Науки о Земле. 2019. Т. 19, вып. 1. С. 42–48.
3. Авиационная метеорология: Учеб. пособие / П.Д. Астапенко, А.М. Баранов, И.М. Шварев и др. – М.: Транспорт, 1979. – 263 с.
4. Иванова А.Р. Тропопауза – многообразие определений и современные подходы к идентификации // Метеорология и гидрология. 2013. 38, С. 808–817.
5. Руководство по авиационной метеорологии. Издание десятое, 2015. Дос: 8896. ИКАО
6. Маховер З.М. Климатология тропопаузы / З.М. Маховер. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1983. – 255 с.
7. Иванова А.Р. Динамика внетропической тропопаузы северного полушария: Автореф. дис. доктор физико-математических наук. – Москва, 2011. – 39 с.
8. Пчелко И.Г. Метеорологические условия полетов на больших высотах / И.Г. Пчелко. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1957. – 56 с.