



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 "Межгодовая изменчивость полярных циклонов в Северном  
полушарии"**

**Исполнитель Гусев Дмитрий Владиленович**

**Руководитель доцент кафедры МП  
Савенкова Елена Николаевна**

**«К защите допускаю»  
Заведующий кафедрой**

---

Подпись

**Заведующая кафедрой МП  
Анискина Ольга Георгиевна**

« 26 » мая 2022г.

Санкт-Петербург  
2022

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
1. Полярные циклоны и регион исследования	4
1.1. История исследований и упоминаний полярных циклонов	4
1.2. Способы исследования полярных циклонов	8
1.3. Условия образования полярных циклонов	12
1.4. Стадии развития полярных циклонов	12
1.5. Статистические данные	13
1.6. Сложности при исследовании полярных циклонов	14
1.7. Типы полярных циклонов	14
1.8. Регион исследования	18
2. Анализ спутниковых снимков	20
2.1. Первичная статистика	21
3. Расчёт средних характеристик в программе Fortran и построение полей с помощью OpenGrADS	31
3.1. Анализ осреднённых полей метеорологических величин для полярных циклонов типа «спиралевидный вихрь»	34
3.2. Анализ осреднённых полей метеорологических величин для полярных циклонов типа «облачная запятая»	36
4. Анализ вертикальных профилей полярных циклонов различных типов в Северном полушарии за период с 2011 по 2021 гг.	39
4.1. Вертикальные профили спиралевидных вихрей	39
4.2. Вертикальные профили облачных запятых	42
Заключение	47
Список источников	48

## Введение

На сегодняшний день полярные циклоны являются недостаточно изученными в силу того, что наблюдения за ними осуществлять достаточно сложно, но наука не стоит на месте и совершенствует уже имеющиеся, а также разрабатывает новые способы наблюдения и исследования полярных циклонов.

Главная причина, по которой необходимо уделять должное внимание вопросу полярных циклонов – их пагубное влияние на судоходство, рыболовство и нефтедобывающую промышленность, так как сильные ветра и низкие температуры наносят большой ущерб перечисленным отраслям.

Целью работы является исследование межгодовой изменчивости характеристик полярных циклонов в Северном полушарии.

Для достижения цели были поставлены задачи:

1. Выявление случаев возникновения полярных циклонов над акваторией Баренцева моря на основе анализа спутниковой информации в течении 2011-2021 гг.
2. Статистическая оценка изменчивости частоты возникновения полярных циклонов различных типов в течение исследуемого периода.
3. Анализ изменчивости основных метеорологических характеристик, характерных для условий действия полярных циклонов различных типов.

В первых двух главах данной дипломной работы будет представлена информация о том, почему возникают полярные циклоны, когда был обнаружен первый полярный циклон, рассмотрены 11 лет с 2011 до 2021 года и визуальным способом по спутниковым снимкам будут обнаружены полярные циклоны, а дальше будет представлена статистика по полученной информации.

В третьей и четвертой главе диплома будут рассмотрены осредненные поля метеовеличин и их вертикальные профили для двух разных типов полярных циклонов, будет проведёт их анализ.

## 1. Полярные циклоны и регион исследования.

Циклон – воздушная масса в виде атмосферного вихря огромного диаметра с пониженным давлением в центре. Существует два основных вида циклонов – внетропические и тропические. И одним из видов внетропических циклонов являются полярные циклоны, о которых сегодня пойдёт речь. Полярные циклоны представляют собой короткоживущие, но очень интенсивные мезомасштабные системы над водной поверхностью[1].

Размеры этих вихрей от 200 до 1000 км. Срок жизни полярных циклонов от нескольких часов до нескольких суток, но чаще всего они живут не больше одних суток. Скорость ветра может достигать 35 км/ч, а основные проблемы возникают из-за того, что интенсивные вихри провоцируют штормовые ветра, обледенение и сильное ухудшение видимости. Формируются полярные циклоны за счёт переноса холодного воздуха из полярных широт на морскую поверхность, чаще всего полярные циклоны над тёплыми течениями.

Крупный полярный циклон может оказывать влияние на область площадью до 600 000 км<sup>2</sup>. Максимальные скорости чаще всего наблюдаются в юго-западных квадратах полярных циклонов [2].

### 1.1. История исследований и упоминаний полярных циклонов.

Первые упоминания полярных циклонов были в 1853 году. С помощью радиозондов первые исследования были проведены в 1952 году. В целом же, наблюдать за полярными циклонами тяжело по той причине, что они зачастую проходят в дали от метеостанций или наблюдательных пунктов, а также из-за их короткого срока жизни[1].

Не упоминая конкретно полярные циклоны, Самнер (1950) в исследовании роли вертикальной стабильности для синоптических событий пришел к выводу, что "...есть все основания предполагать, что тропические

циклоны и ряд небольших ураганоподобных центров, которые развиваются в более высоких широтах, являются результатом неустойчивости по глубине, т.е. насыщение происходит с промежутком, большим, чем адиабатическое насыщение через глубокий слой.'[3].

Одно из самых ранних упоминаний о том, что в дальнейшем станет известно как полярные циклоны, пришел Питер Данневиг, который написал о "минимумах неустойчивости" над морскими районами вокруг Норвегии в книге для пилотов (Данневиг, 1954). Данневиг составил схематическую карту погоды, показывающую связь этих вихрей с типичным воздушным потоком вокруг Норвегии во время полярной вспышки. Он также рассмотрел возможные механизмы их образования и предположил, что эти циклоны могут развиваться так же, как тропические циклоны[4].

Другая ранняя ссылка на полярные циклоны дана Шерхагом и Клаузер (1962). Шерхаг и Клаузер описали "das polartief" как молодой, активный и, главным образом, по высоте, хорошо развитый циклон с заметным минимумом давления и температуры. По словам Шерхага и Клаузера, минимумы лучше всего проявлялись над теплой морской поверхностью. Предполагалось, что поверхностные циркуляции образовались из-за вертикального обмена импульсом в сильно неустойчивых воздушных массах, внутри которых образовались минимумы. 'Das polartief' был описан следующим образом: общий поток в регионе, где он сформировался, изначально не содержал фронтов. Фронты, однако, могут в конечном итоге образоваться в виде низко проходящих поверхностей с изменяющейся температурой[5].

'Арктический минимум неустойчивости' - так назывались полярные циклоны в Норвегии вплоть до 1980-х годов. Что касается мотивации применения этого названия к рассматриваемым мелкомасштабным минимумам, Раббе (1975) объяснил, что "поскольку циклоны появляются в холодных неустойчивых воздушных массах, их можно назвать "минимумами арктической неустойчивости". В этой ранней статье Раббе представил

несколько примеров полярных циклонов вокруг Норвегии и описал их формирование с использованием уравнения завихренности. Что касается источника энергии для циклонов, Раббе указал на нагрев атмосферы океаном, отметив, что передача энергии из моря в атмосферу достигла чрезвычайно высоких значений. Раббе также привел ряд примеров почти невозможности в то время предсказать эти опасные, маломасштабные минимумы[6].

С 1960-х годов британские метеорологи проявляют большой интерес к мезомасштабным метеорологическим системам в полярных воздушных потоках, поскольку такие системы могут привести к обильным снегопадам на Британских островах, особенно в Шотландии. В Великобритании такие системы назывались 'депрессиями холодного воздуха' (Метеорологическое управление, 1962), и синоптики четко осознавали их существование и важность. Этот интерес привел к появлению ряда предварительных описательных описаний этих циклонов в литературе. Самые ранние известные тематические исследования полярных циклонов, проведенные британскими метеорологами, были опубликованы в британском журнале *Weather* 1960-х и 1970-х годах (Харли, 1960; Стивенсон, 1968; Лайалл, 1972). Лайалл показал спутниковый снимок со спутника *Nimbus 3* облаков, связанных с полярным циклоном, зафиксированным 5 января 1970 года. Снимок, который, вероятно, является первым опубликованным спутниковым изображением полярного циклона, показал, что очень активный полярный минимум (Suttie, 1970) был связан с небольшим облаком в форме запятой. В то время как эти ранние исследования были настоящими наблюдательными исследованиями, многие недавние исследования сочетают наблюдательный аспект с результатами численных моделей[7][8][9].

В исследовании Стивенсона (1968) описан полярный циклон, который пересек южную Англию, в результате чего вокруг Брайтона выпало 11 дюймов снега и произошло серьезное нарушение дорожного движения. Однако не было предпринято никаких попыток объяснить развитие циклона. Тем не менее, этот случай послужил основой для гораздо более детального

исследования, проведенного Харролдом и Браунингом (1969), которые изучали структуру циклона, используя частые запуски радиозондов и поверхностные синоптические наблюдения. Эта статья была первым полным описанием полярного циклона в рецензируемой научной литературе.

Поступление изображений со спутников на полярной орбите в 1960-е годы обеспечило значительный прогресс в изучении полярных минимумов. В первые годы существования метеорологических спутников единственными доступными данными были инфракрасные, а иногда и видимые изображения на бумажном носителе. С тех пор были доступны различные спутниковые данные, включая измерения спутникового эхолота, данные рассеивателя для оценки поверхностных ветров над морем и микроволновые данные [10].

Достаточно подробное исследование было проведено в марте 2008 года Бергенским университетом в рамках проекта IPY-THORPEX синицированного ВМО. В данном исследовании первый полярный циклон был зафиксирован 3.03.2008 г. в результате вноса холодного воздуха с суши на море. Разность температур между поверхностью моря и изобарической поверхностью 500 гПа составляла 45-50°C. В результате зондирования атмосферы выяснилось, что в эволюции полярного циклона ведущую роль играли процессы в верхних слоях атмосферы. На стадии циклогенеза циркуляция в полярном циклоне сосредоточена была ниже поверхности 700 гПа, а в зрелой стадии она поднялась до тропопаузы. Температура в ядре циклона была на 3 К выше, чем в окружающих его воздушных массах. Также в результате зондирования были получены данные о том, что в процессе развития полярного циклона потоки скрытого и явного тепла увеличивались со 175 до 300 Вт/м<sup>2</sup> и с 200 до 280 Вт/м<sup>2</sup> соответственно, исходя из этих данных было выдвинуто предположение об увеличении вклада потов тепла на поверхности моря в энергетику полярного циклона.

В рамках того же эксперимента были исследованы ещё два циклона в Норвежском море в ноябре. Основывалось исследование на приёме инфразвукового сигнала на четырех станциях. По имеющейся информации,

конвективные штормы могут быть источниками инфразвука в широком диапазоне частот, и этот сигнал прослеживается на расстоянии до 1000 км. Эти ПЦ сформировались в тыловой части крупномасштабного циклона на фоне сильного выноса холодного воздуха. Первый полярный циклон сформировался и был зафиксирован в 19:00 18.11.2008 года недалеко от северного побережья Норвегии. Время жизни этого циклона составило 25 часов. Второй же полярный циклон сформировался через несколько часов после диссипации первого и просуществовал 19 часов. Минимальное давление в центрах составляло 971 гПа и 967 гПа соответственно, а скорости ветра были равны 28 и 38 км/ч.

Очень много говорили о полярных циклонах в 2013-2014 годах в США, давая привязку экстремально холодных зим, как раз к воздействию полярных циклонов. Наводнение в Великобритании в 2014 году, экстремально холодные зимы в Британии в 2016 и в США в 2019 так же связывают с влиянием полярных циклонов.

## 1.2. Способы исследования полярных циклонов.

Основными способами наблюдения за полярными циклонами являются зондирование атмосферы и обработка спутниковых снимков. Так же используются спутниковые микроволновые радиометры. Воспроизведение полярных циклонов в различных реанализах с разной степенью точности так же является одним из способов изучения. Анализ инфракрасных и видимых изображений приборов MODIS и AVHRR - это традиционный инструмент мониторинга полярных циклонов, так как данные видимого диапазона обеспечивают исследователей ценнейшей информацией о форме и структуре облачности, сопровождающей развитие мезомасштабных вихрей. Однако, как видно из приведенных примеров, облачность верхнего яруса может полностью скрыть проявления ПЦ [11].

В последние годы было выполнено несколько исследований характеристик полярных циклонов на основе реанализов. Наиболее часто использовались реанализы ERA-Interim с пространственным разрешением  $0,75 \times 0,75^\circ$ , MERRA (Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications) с разрешением  $0,5 \times 0,667^\circ$  и ASR (Arctic System Reanalysis) с разрешением  $30 \times 30$  км, но главная проблема реанализа ASR – наличие данных только до 2013 года. В некоторых исследованиях констатируется, что качество отражения ПЦ реанализом ERA-Interim из-за довольно грубого разрешения нельзя признать удовлетворительным. Так, в Норвежском и Баренцевом морях за октябрь – май 1999–2002 гг. из 29 циклонов в реанализе ERA-Interim представлены только 13 циклонов [12].

Наиболее полно полярные циклоны представлены, по-видимому, в новом реанализе ASR для арктического региона с разрешением в первой версии 30 км. Реанализ ASR охватывает значительную часть Арктики к северу от  $40^\circ$  с. ш. и основан на выходной продукции атмосферной модели WRF, адаптированной к полярным районам. Сравнение с данными наблюдений показало, что качество воспроизведения полей ветра в ASR выше, чем в ERA-Interim, что важно для отражения полярных циклонов.

В настоящее время реализована вторая версия реанализа ASR с разрешением 15 км, что улучшило воспроизведение полей ветра. Так, если при воспроизведении сильного ветра в проливе между Гренландией и островом Элсмир 9.02.2007 г. первая версия с разрешением 30 км показала скорость ветра 15 м/с, то вторая версия – 20 м/с, что близко к наблюдаемой.

Преимущество реанализа ASR по сравнению с ERA-Interim выявлено также в отражении траектории циклонов. Показано, что наиболее эффективными параметрами для выделения полярных циклонов являются разность между приземным давлением в центре циклона и окружающей средой, разность в потенциальной температуре между поверхностью моря и уровнем 500 гПа и скорость ветра в тропопаузе к северу от циклона. Наиболее часто ПЦ возникают в высоких широтах в области кромки льда и в

прибрежных районах, а их наибольшая активность отмечается в Датском проливе, Гренландском, Норвежском и Баренцевом морях.

В работах по моделированию в большинстве случаев изучались условия, благоприятные для формирования и эволюции конкретного ПЦ, в частности, возникшего в Норвежском море в начале марта 2008 г. в период проведения натурного эксперимента IPY-THORPEX. На основе модели WRF с шагом сетки 9 км моделировались условия, благоприятные для формирования ПЦ. В одном из численных экспериментов температура поверхности моря была повышена на 5 К. Это привело к сильному выносу арктического воздуха над Норвежским морем и образованию хорошо выраженной бароклинной зоны, которая отсутствовала в контрольном эксперименте. В этой зоне сформировался вторичный мезомасштабный циклон, который перерос в интенсивный ПЦ с ураганными ветрами. Делается вывод, что формирование ПЦ было обусловлено бароклинной неустойчивостью [2].

Интересны случаи, когда полярные циклоны по структуре поля облачности напоминали тропические циклоны. Подобный циклон исследовался на основе модели WRF с разрешением 3 км. Циклон сформировался в Баренцевом море 18.12.2002 г. и был необычно глубоким (961 гПа в центре). Этот ПЦ был подобен тропическому циклону, так как имел в центре «глаз», окруженный облачностью в виде спирали. Близость ПЦ к кромке льда и большие скорости ветра (до 25 м/с) в стадии заглупления способствовали формированию больших потоков явного и скрытого тепла около 1200 и 400 Вт/м<sup>2</sup> соответственно. Численные эксперименты показали, что заглуплению ПЦ способствовали рост бароклинности и влияние потенциальной завихренности в верхних слоях атмосферы. После стадии заглупления бароклинность уменьшилась и циклон подпитывали потоки явного тепла, а потоки скрытого тепла играли второстепенную роль.

В марте 2013 г. в Норвежском море на границе продолжительного выноса холодного воздуха, способствовавшего формированию полярных

циклонов, возникла зона с большими градиентами характеристик (зона сдвига). В частности, максимальный градиент скорости ветра в нижних слоях атмосферы составлял 25 м/с на 50 км. Для исследования этой зоны использовались наблюдения с самолета, данные зондов, радара, а также данные спутниковых скаттерометров. По наблюдениям, скорость ветра достигала 27 м/с.

Численное моделирование проводилось с помощью модели Met Office, описывающей, в том числе, конвективные процессы. Модель успешно воспроизвела зону сдвига и структуру поля облачности, однако были значительно занижены величина влагосодержания и высота облачности.

Исследовалось влияние орографии Шпицбергена и морского льда в Норвежском и Баренцевом морях на развитие ПЦ. Использовалась модель Met Office с шагом сетки, разрешающим конвективные процессы. Было показано, что Шпицберген блокирует потоки устойчиво стратифицированного воздуха из покрытого льдом Северного ледовитого океана и, как дополнительный источник циклонической завихренности в нижней атмосфере, помогает формированию и развитию ПЦ. Уменьшение площади льда к западу от Шпицбергена результируется в умеренной интенсификации ПЦ, в то время как увеличение площади льда значительно препятствует развитию ПЦ.

Были выполнены численные эксперименты с моделью COSMO-Ru по изучению развития полярного циклона 25–27.03.2014 г. в Баренцевом и Карском морях. Показано, что развитие циклона существенно зависит от состояния подстилающей поверхности. В частности, при уменьшении сплоченности льда циклон усиливается и может изменить траекторию, смещаясь в направлении открытой поверхности моря.

Уникальный случай полярного циклона в Северном море был зафиксирован 1.01.1995 г. Этот циклон вызвал волну высотой 25,6 м в районе нефтяной платформы Draupner. Циклон был обнаружен в 00 ч 1.01.1995 г. у побережья Норвегии, далее быстро смещался на юг, и, когда достиг

платформы Draupner, скорость ветра в нем превышала 20 м/с. Перемещение циклона было спрогнозировано на основе атмосферной модели Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды с разрешением 9 км [2].

### 1.3. Условия образования полярных циклонов.

- 1) Приземная зона бароклинности или близкое расположение к основной бароклинной зоне
- 2) Поток холодной воздушной массы над теплой водной поверхностью
- 3) Высокая холодная барическая ложбина или депрессия

### 1.4. Стадии развития полярных циклонов.

- 1) Начальная стадия развития:
  - a. Определяющая роль бароклинной неустойчивости
  - b. Адвекция высотного положительного вихря скорости
  - c. Адвекция аномалии высотного потенциального вихря скорости
- 2) Зрелая стадия развития:
  - a. Термическая неустойчивость становится важным фактором
    - i. Условная неустойчивость второго рода (CISK – Conditional instability of second kind)
    - ii. Поверхностный ветровой теплообмен (WISHE – Wind induced surface heat exchange)
- 3) Стадия разрушения:

а. Прохождение полярного циклона над сушей или ледовым покровом

- i. Уменьшение испарения
- ii. Уменьшение потока явного тепла
- iii. Увеличение шероховатости поверхности

1.5. Статистические данные.

- 1) Большинство ПЦ не превышают в диаметре 500 км.
- 2) Среднее время жизни – 9–18 ч, и только 10 % существуют более 24 ч.
- 3) Траектория большинства ПЦ составляет 100–300 км.
- 4) Средняя скорость ветра в ПЦ около 19 м/с; наибольшие скорости (33,5 м/с) были отмечены в январе 2000 года.

На основе спутниковой информации полученной за 1999-2013 гг.:

- 1) Средний диаметр зрелых ПЦ – 350 км, 67 % ПЦ имеют диаметр от 250 до 450 км.
- 2) Большинство ПЦ существуют менее 24 ч, но некоторые более 48 ч.
- 3) Траектория ПЦ может достигать 2000 км, но более 80 % ПЦ имеют траектории менее 1000 км.

## 1.6. Сложности при исследовании полярных циклонов.

- Основные сложности при исследовании полярных циклонов возникают из-за их небольших размеров и непродолжительного времени жизни, что существенно затрудняет их обнаружение.
- Нерегулярная сеть наблюдений вблизи полярных широт не позволяет получить необходимый объём данных, требуемый для определения полярных циклонов на синоптических картах.
- Основную массу полярных циклонов можно смоделировать только с помощью мезомасштабных моделей высокого разрешения.

## 1.7. Типы полярных циклонов.

### 1.7.1. Облачная запятая

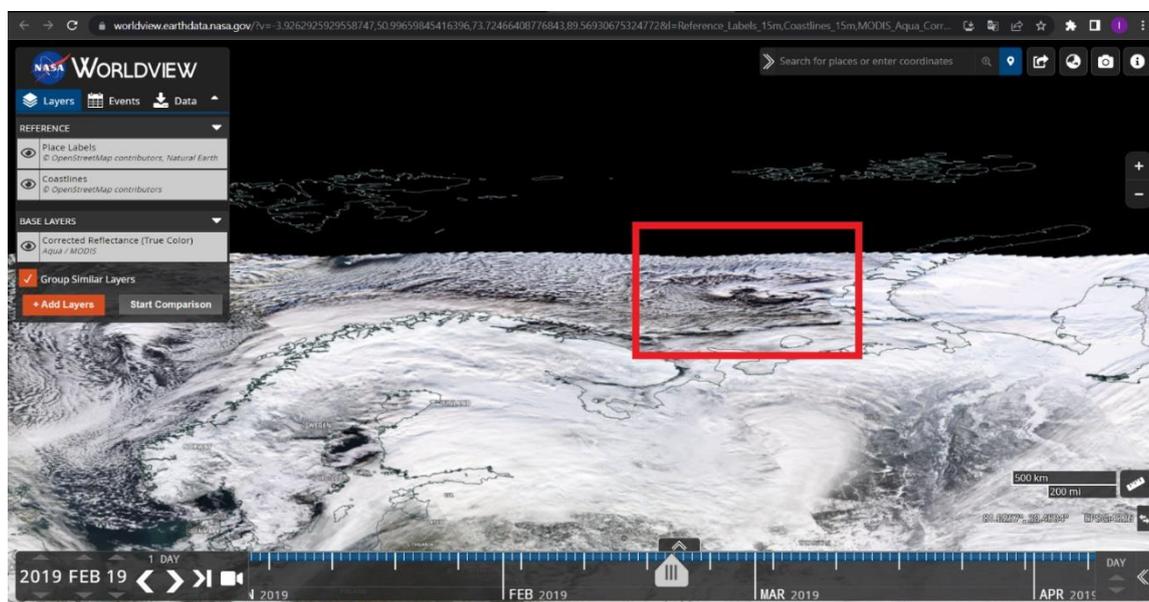


Рисунок 1 - Пример полярного циклона типа «облачная запятая» на спутниковом снимке в видимом диапазоне.

Полярные циклоны данного типа располагаются на холодной стороне основной бароклинной зоны полярного фронта.

Хвостовая часть полярного циклона соответствует ложбине давления и является передней границей вторжения холодной воздушной массы на теплую водную поверхность.

### 1.7.2. Спиралевидный вихрь

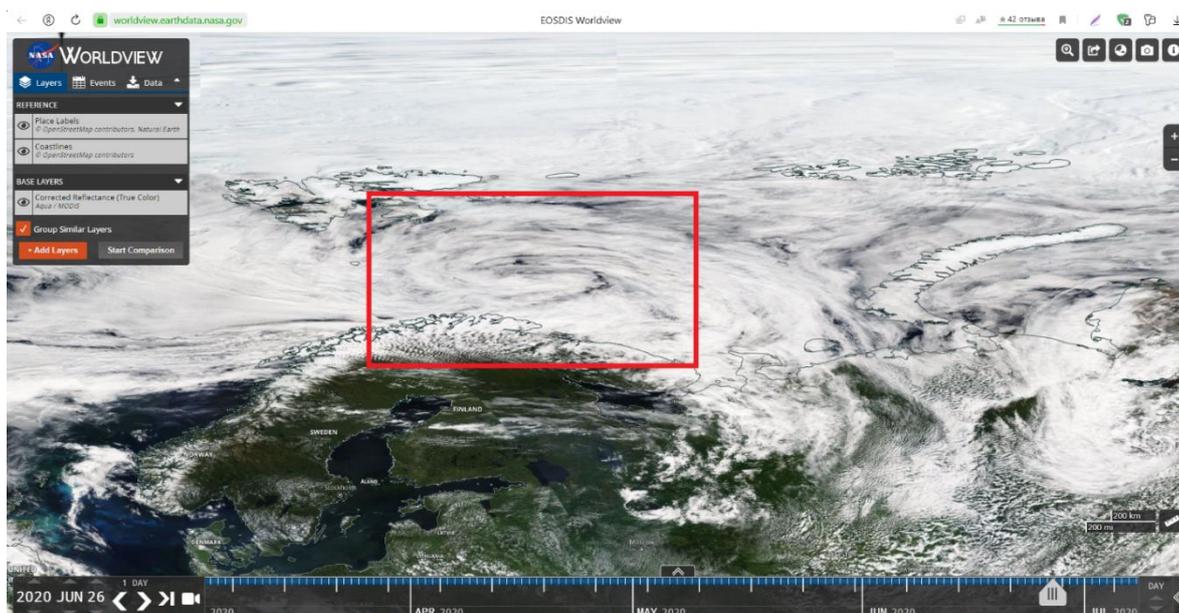


Рисунок 2 - Пример полярного циклона типа «спиралевидный вихрь» на спутниковом снимке в видимом диапазоне.

Главный фактор, который способствует образованию полярных циклонов этого типа – это, глубокая конвекция, возникающая при высотной холодной депрессии.

Структура этого типа имеет непосредственное сходство с фронтальной структурой внетропических циклонов.

### 1.7.3. Сигнатурная карусель

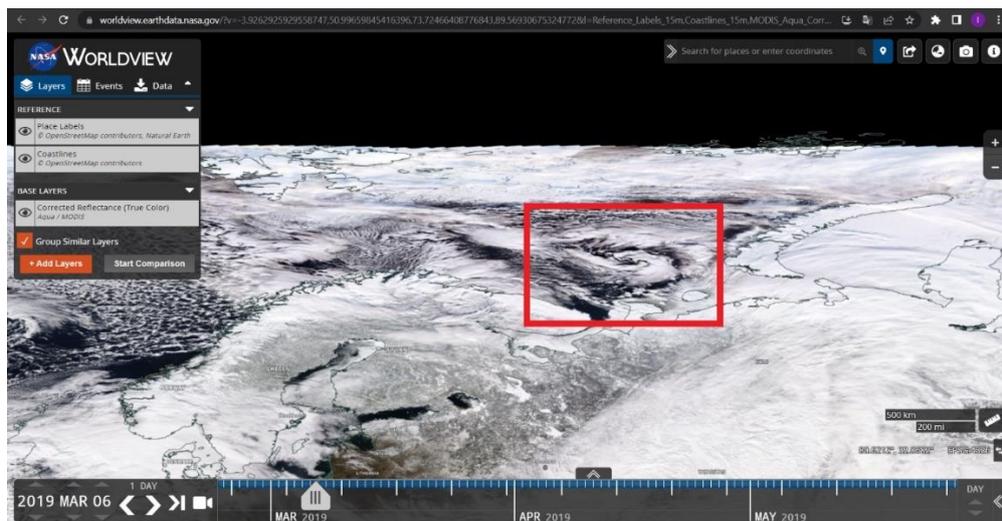


Рисунок 3 - Пример полярного циклона типа «сигнатурная карусель» на спутниковом снимке в видимом диапазоне.

Данный тип циклонов по факторам образования идентичен со «спиралевидными вихрями», также необходимо наличие высотной холодной депрессии.

### 1.7.4. Мгновенные окклюзии

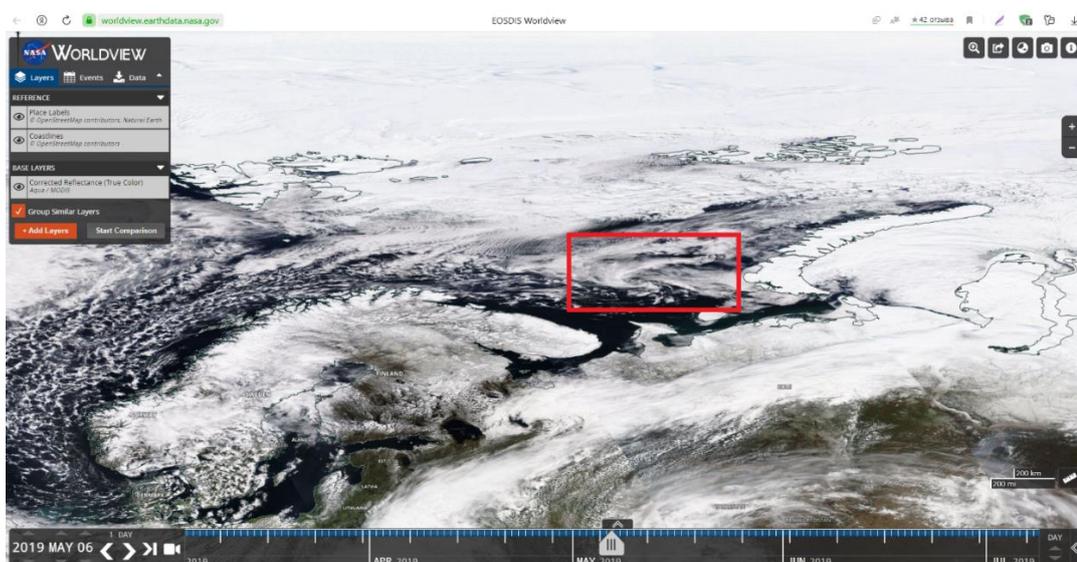


Рисунок 4 - Пример полярного циклона типа «мгновенная окклюзия» на спутниковом снимке в видимом диапазоне.

Мгновенные окклюзии возникают в результате взаимодействия полярных циклонов типа «облачная запятая» с полярным фронтом. В результате этого взаимодействия на фронте возникает волна, которая моментально переходит в стадию окклюзии.

### 1.7.5. Системы с тёплым ядром

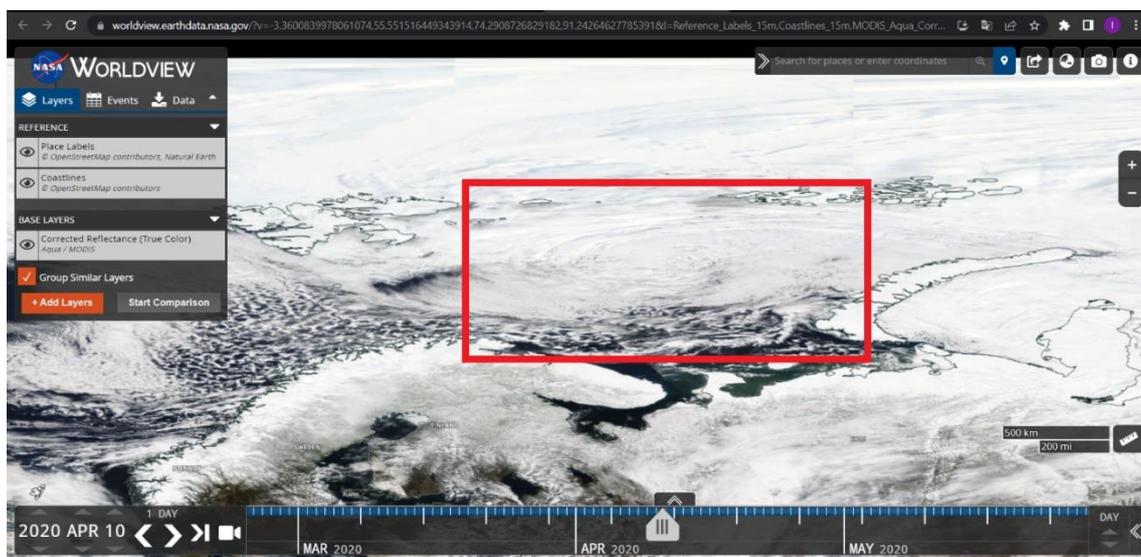


Рисунок 5 - Пример полярного циклона типа «система с тёплым ядром» на спутниковом снимке в видимом диапазоне.

При интенсивной конвекции выделяется скрытое тепло, это приводит к возникновению тёплого ядра с приземной циклонической и высотной антициклонической конвергенцией и проявляется в формировании облаков верхнего яруса над конвективными.

## 1.8. Регион исследования.

Часть исследования проводилась на основании данных взятых над поверхностью трёх морей (Норвежского, Гренландского и Баренцева), но основная часть исследования была проведена на основании данных из Баренцева моря.

Баренцево море — окраинное море Северного Ледовитого океана. Оно омывает берега России и Норвегии. Море ограничено северным побережьем Европы и архипелагами Шпицберген, Земля Франца-Иосифа и Новая Земля. Площадь моря 1424 тыс. км<sup>2</sup>, глубина до 600 м. Оно расположено на континентальном шельфе. Юго-западная часть моря зимой не замерзает из-за влияния Северо-Атлантического течения.

Климат Баренцева моря находится под влиянием тёплого Атлантического океана и холодного Северного Ледовитого океана. Частые вторжения тёплых атлантических циклонов и холодного арктического воздуха определяют большую изменчивость погодных условий. Зимой над морем преобладают юго-западные, весной и летом — северо-восточные ветры. Часты штормы. Средняя температура воздуха в феврале изменяется от  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$  на севере и до  $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$  на юго-западе. Средняя температура августа —  $0...+1\text{ }^{\circ}\text{C}$  на севере,  $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$  на юго-западе. В течение года над морем преобладает пасмурная погода. Годовое количество осадков — от 250 мм на севере, до 500 мм на юго-западе.

Поступление тёплых атлантических вод определяет относительно высокую температуру и солёность в юго-западной части моря. Здесь в феврале — марте температура воды на поверхности составляет  $+3...+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , в августе повышается до  $+7...+9\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Севернее  $74^{\circ}$  с. ш. и в юго-восточной части моря зимой температура воды на поверхности — ниже  $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а летом на севере —  $+4...0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; на юго-востоке —  $+4...+7\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Летом в прибрежной зоне поверхностный слой тёплой воды толщиной 5-8 метров может прогреваться до  $+11...+12\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Суровые климатические условия на севере и востоке Баренцева моря определяют его большую ледовитость. Во все сезоны года остаётся свободной от льда только юго-западная часть моря. Наибольшего распространения ледяной покров достигает в апреле, когда около 75 % поверхности моря занято плавучими льдами. В исключительно неблагоприятные годы в конце зимы плавучие льды подходят непосредственно к берегам Кольского полуострова. Наименьшее количество льдов приходится на конец августа. В это время граница льдов отодвигается за 78° с. ш. На северо-западе и северо-востоке моря льды держатся обычно круглый год, но в отдельные, благоприятные годы море почти полностью или даже полностью освобождается от льдов[14].

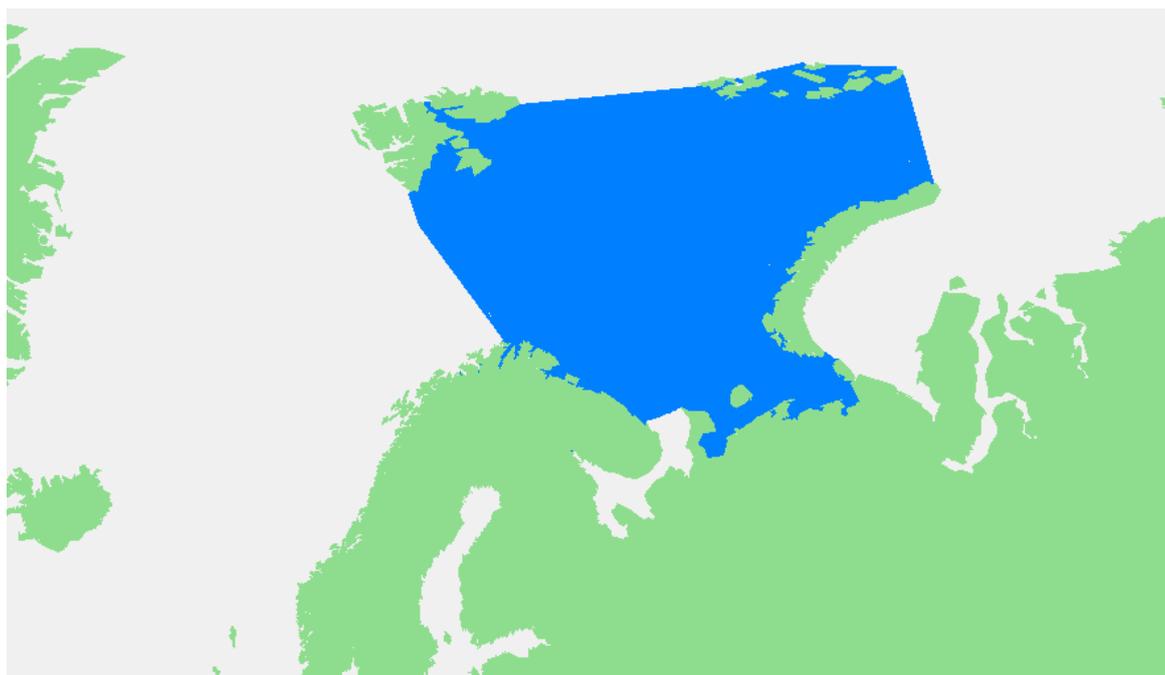


Рисунок 6 - Границы Баренцева моря.

## 2. Анализ спутниковых снимков.

Первая часть исследования заключалась в анализе спутниковых снимков полученных со спутника Aqua/MODIS с сайта <https://worldview.earthdata.nasa.gov/>.

Aqua — американский научно-исследовательский спутник. Спутник является частью комплексной программы НАСА EOS (Earth Observing System), направленной на исследование Земли и состоящей из трёх специализированных спутников Terra, Aqua и Aura, предназначенных для исследования суши, воды и атмосферы соответственно.

Спутник был запущен 4 мая 2002 года с авиабазы Ванденберг (США) и выведен на околополярную солнечно-синхронную орбиту высотой 680 км. На борту спутника установлены шесть научных инструментов, часть из которых предназначена для изучения свойств облачного покрова и определения температуры воды в морях, другая — для определения температуры атмосферы Земли и её влажности.

Предполагался шестилетний срок службы спутника; реально он действует до сих пор.

MODIS. Инструмент предназначен для получения спектральных изображений отражений с дневной части земной поверхности и дневного/ночного излучения в каждой точке поверхности Земли, как минимум, каждые два дня. В инструменте применена концепция отображающего радиометра. Прибор обеспечит получение изображения в 36 дискретных полосах спектра от 0,4 до 14,5 мкм[15].

Были проанализированы данные спутниковых снимков в период с 2011 по 2022 год. Анализ производился визуальным методом. В силу того, что рассматривались только снимки в видимом диапазоне, то данные за декабрь-январь не рассматривались, а за ноябрь и февраль территории морей рассматривались по мере движения видимой зоны с уменьшением полярной ночи.

Таблица 1 - Количество полярных циклонов за каждый рассмотренный  
год.

Год	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Количество	61	57	58	65	69	72	45	53	46	43	40

Частота возникновения полярных циклонов в области Баренцева, Норвежского Гренландского морей в период с 2011 по 2021 гг

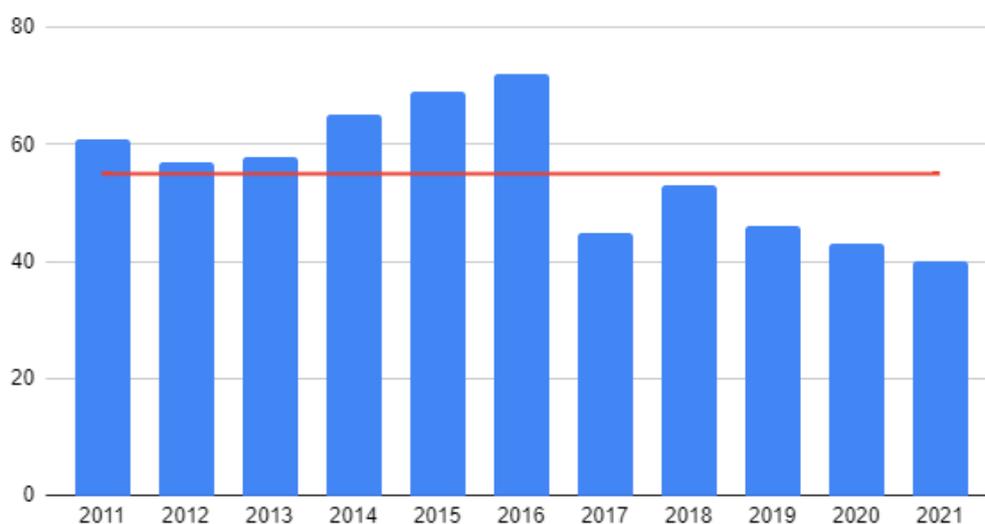


Рисунок 7 - Диаграмма распределения циклонов по годам в Баренцевом, Норвежском и Гренландском морях.

## 2.1. Первичная статистика.

Для Баренцева, Норвежского и Гренландского морей вместе.

Среднее значение:

$$\bar{x} = \frac{61 + 57 + 58 + 65 + 69 + 72 + 45 + 53 + 46 + 43 + 40}{11} = \frac{609}{11} = 55,36 \quad (1)$$

Дисперсия:

$$\begin{aligned}\sigma^2 &= \frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n - 1} = \\ &= \frac{(61 - 55,36)^2 + (57 - 55,36)^2 + (58 - 55,36)^2 + (65 - 55,36)^2}{11 - 1} \\ &+ \frac{(69 - 55,36)^2 + (72 - 55,36)^2 + (45 - 55,36)^2 + (53 - 55,36)^2}{11 - 1} \\ &+ \frac{(46 - 55,36)^2 + (43 - 55,36)^2 + (40 - 55,36)^2}{11 - 1} = 118,65\end{aligned}\quad (2)$$

где

- $x_i$  - число полярных циклонов в выбранный год  
 $\bar{x}$  - среднее значение числа полярных циклонов за 11 лет  
 $n$  - количество рассматриваемых лет

Среднее квадратичное отклонение:

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} = \sqrt{118,65} = 10,9\quad (3)$$

где

- $\sigma^2$  - дисперсия

Коэффициент вариации:

$$V = \frac{\sigma}{\bar{x}} = \frac{10,9}{55,36} = 0,19 = 19\% \quad (4)$$

где

$\sigma$  - среднее квадратичное отклонение

$\bar{x}$  - среднее значение

$$\bar{x} = 55,36$$

$$\sigma = 10,9$$

$$V = 19\%$$

Для Баренцева моря



Рисунок 8 - Диаграмма распределения циклонов по годам в Баренцевом море.

$$\bar{x} = 19,64$$

$$\sigma = 3,67$$

$$V = 19\%$$

Для Норвежского моря



Рисунок 9 - Диаграмма распределения циклонов по годам в Норвежском море.

$$\bar{x} = 18,09$$

$$\sigma = 3,33$$

$$V = 18\%$$

Для Гренландского моря



Рисунок 10 - Диаграмма распределения циклонов по годам в Гренландском море.

$$\bar{x} = 17$$

$$\sigma = 6,44$$

$$V = 38\%$$

Всего за 11 рассмотренных лет было обнаружено 609 полярных циклонов.

В среднем за год наблюдалось 55 полярных циклонов.

Из рассчитанного средне квадратичного отклонения можно сделать вывод, что в среднем отклонение от среднего значения составляет 11 полярных циклонов.

Коэффициент вариации позволяет судить об однородности совокупности и полученное значение равное 19% означает, что совокупность достаточно однородная.

В Баренцевом море:

Всего за рассмотренный промежуток было обнаружено 216 полярных циклонов.

В среднем за год обнаружено 19 полярных циклонов.

Из рассчитанного средне квадратичного отклонения можно сделать вывод, что в среднем отклонение от среднего значения составляет 3 полярных циклона.

Коэффициент вариации позволяет судить об однородности совокупности и полученное значение равное 19% означает, что совокупность достаточно однородная.

В Норвежском море:

Всего за рассмотренный промежуток было обнаружено 199 полярных циклонов.

В среднем за год обнаружено 19 полярных циклонов.

Из рассчитанного средне квадратичного отклонения можно сделать вывод, что в среднем отклонение от среднего значения составляет 3 полярных циклона.

Коэффициент вариации позволяет судить об однородности совокупности и полученное значение равное 18% означает, что совокупность достаточно однородная.

В Гренландском море:

Всего за рассмотренный промежуток было обнаружено 188 полярных циклонов.

В среднем за год обнаружено 17 полярных циклонов.

Из рассчитанного средне квадратичного отклонения можно сделать вывод, что в среднем отклонение от среднего значения составляет 6 полярных циклонов.

Коэффициент вариации позволяет судить об однородности совокупности и полученное значение равное 38% означает, что совокупность не однородная.

Из полученных данных можно сделать вывод, что с 2017 года количество полярных циклонов в Норвежском, Гренландском и Баренцевом морях уменьшается. Эта тенденция не так сильно прослеживается для каждого моря в отдельности. Больше всего совпадает с Гренландским морем, а меньше с Норвежским. А наибольшее количество полярных циклонов наблюдалось в 2016 году. При рассмотрении морей отдельно видно, что в Гренландском море сильно выбивается 2015 год.

Таблица 2 - Распределение полярных циклонов по морям и по типам.

192	Гренландское море	Облачная запятая	143
207	Норвежское море	Спиралевидный вихрь	243
216	Баренцево море	Сигнатурная карусель	81
615	Всего	Мгновенная окклюзия	73
		Система с тёплым ядром	75
		Всего	615

Распределение полярных циклонов с 2011 по 2022 года по морям

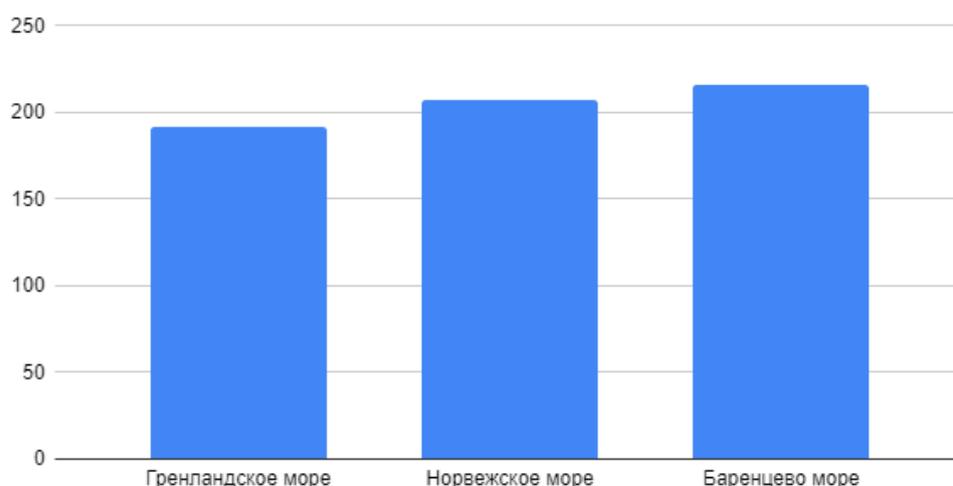


Рисунок 11 - Диаграмма распределения полярных циклонов по морям.

Распределение полярных циклонов с 2011 по 2021 года по типам.

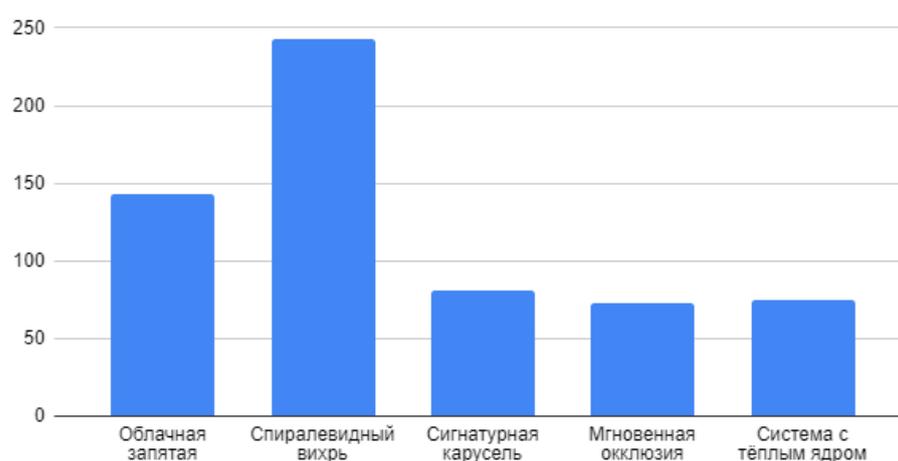


Рисунок 12 - Диаграмма распределения полярных циклонов по типам.

Из приведённой в таблицах и на диаграммах информации можно сделать вывод о том, что наибольшее количество полярных циклонов наблюдалось в Баренцевом море, а наименьшее в Гренландском, но разница незначительна. Обуславливается этот факт тем, что тёплое Северо-Атлантическое течение протекает в Норвежском море ближе к суше, чем в Баренцевом море, а соответственно оказывает большее влияние на

формирование полярных циклонов в Баренцевом море, за счёт большего градиента температуры между выносимой из полярных широт воздушной массой и водной поверхностью, в Гренландском же море тёплое течение отсутствует и влияние, которое имеется в Гренландском и Баренцевом морях отсутствует или является минимальным.

По типам больше всего наблюдалось спиралевидных вихрей, почти в два раза больше, чем облачных запятых и в четыре раза больше, чем сигнатурных каруселей, мгновенных окклюзий и систем с тёплым ядром. Этот факт обусловлен тем, что спиралевидный вихрь не требует никаких дополнительных факторов для преобразования.

Таблица 3 - Распределение полярных циклонов в Баренцевом море по типам.

Облачная запятая	52
Спиралевидный вихрь	82
Сигнатурная карусель	29
Мгновенная окклюзия	21
Система с тёплым ядром	32
Всего	216

Распределение полярных циклонов в Баренцевом море с 2011 по 2021 года по типам.

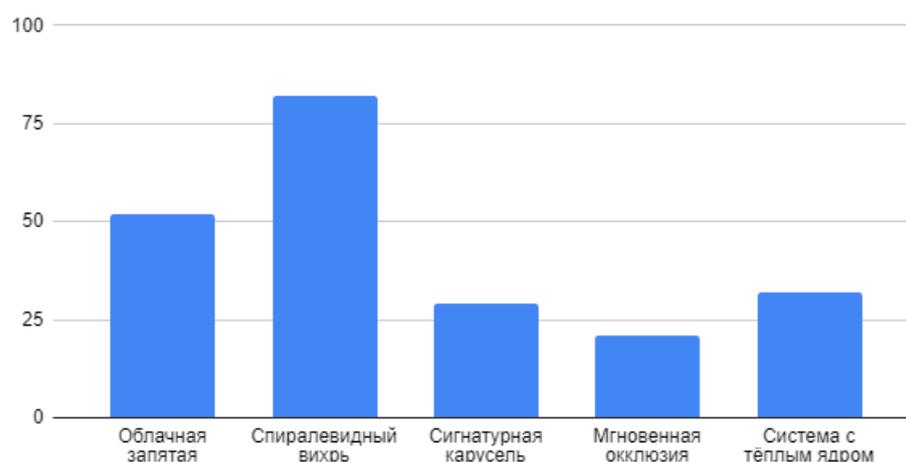


Рисунок 13 - Диаграмма распределения полярных циклонов в Баренцевом море по типам.

Из таблицы и диаграммы следует, что в Баренцевом море сохраняется общая тенденция распределения полярных циклонов по типам, наибольшее количество полярных циклонов – спиралевидные вихри.



Рисунок 14 - Области наиболее частого зарождения полярных циклонов в Баренцевом море.

### 3. Расчёт средних характеристик в программе Fortran и построение их полей с помощью программы OpenGrADS.

Второй частью исследования является получение и обработка данных и их дальнейшее сравнение с данными, когда полярные циклоны отсутствовали для полярных циклонов типа «Спиралевидный вихрь» за 2020 год и полярных циклонов типа «Облачная запятая» за 2020 и 2019 года в Баренцевом море.

Данные были взяты из модели японского реанализа JRA. С этого реанализа были получены файлы с распределением метеовеличин по всей поверхности планеты Земля в формате BIN. Далее с помощью языка программирования Fortran были рассчитаны средняя температура и горизонтальные компоненты ветра. С помощью программы OpenGrADS были построены поля средних метеовеличин для Баренцева моря.

Таблица 4 - Дни и координаты центров циклонов за 2019-2020 года, выбранные для осреднения и дальнейшего анализа их вертикальных профилей в главе 4.

Спиралевидные вихри		
Номер	Дата	Координаты
1	15.02.2020	72° с.ш., 25° в.д.
2	10.05.2020	72° с.ш., 19° в.д.
3	23.05.2020	75°30' с.ш., 47° в.д.
4	26.06.2020	74° с.ш., 30° в.д.
5	07.07.2020	73° с.ш., 23° в.д.
6	28.08.2020	72° с.ш., 47°30' в.д.
Облачные запятые		
Номера	Дата	Координаты
1	19.02.2019	72°30' с.ш., 44°30' в.д.

2	06.05.2019	72° с.ш., 43° в.д.
3	30.08.2019	75° с.ш., 28° в.д.
4	19.09.2019	72° с.ш., 42° в.д.
5	07.09.2020	73°30' с.ш., 35°30' в.д.
6	24.09.2020	72° с.ш., 28° в.д.

Таблица 5 - Дни и координаты взятые для осреднения и дальнейшего сравнения с осредненными полями полярных циклонов за 2019-2020 года.

Дни, сравниваемые со спиралевидными вихрями		
Номер	Дата	Координаты
1	20.02.2020	72° с.ш., 25° в.д.
2	13.05.2020	72° с.ш., 19° в.д.
3	26.05.2020	75°30' с.ш., 47° в.д.
4	24.06.2020	74° с.ш., 30° в.д.
5	11.07.2020	73° с.ш., 23° в.д.
6	30.08.2020	72° с.ш., 47°30' в.д.
Дни, сравниваемые с облачными запятями		
Номера	Дата	Координаты
1	23.02.2019	72°30' с.ш., 44°30' в.д.
2	10.05.2019	72° с.ш., 43° в.д.
3	26.08.2019	75° с.ш., 28° в.д.
4	17.09.2019	72° с.ш., 42° в.д.
5	04.09.2020	73°30' с.ш., 35°30' в.д.
6	27.09.2020	72° с.ш., 28° в.д.

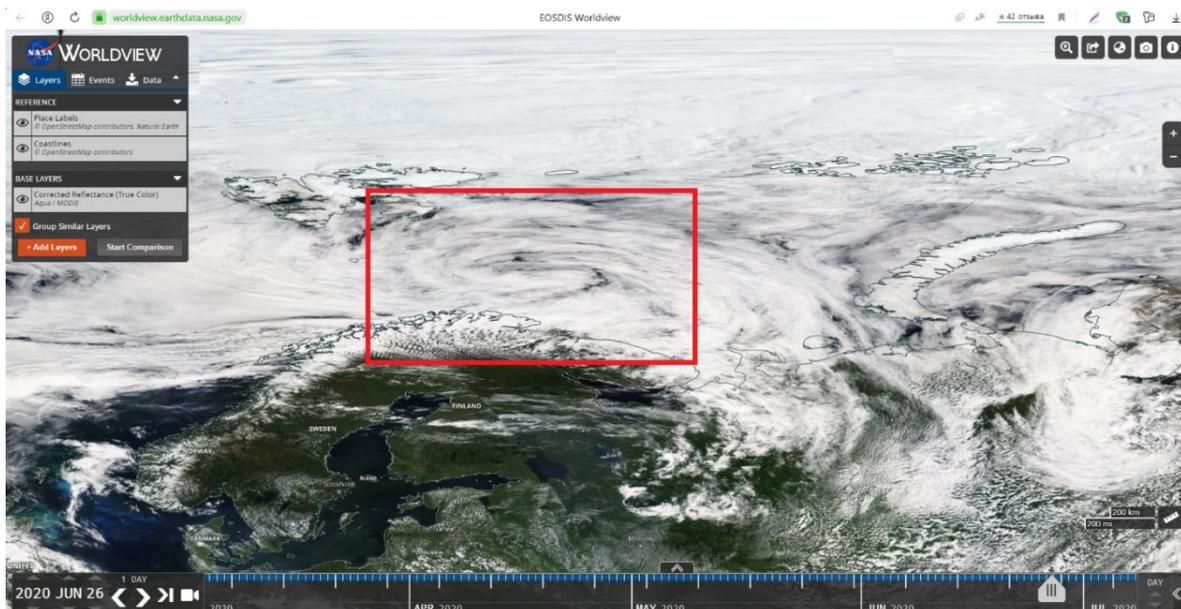


Рисунок 15 - Пример полярного циклона типа «спиралевидный вихрь» в Баренцевом море 26.06.2020 г.

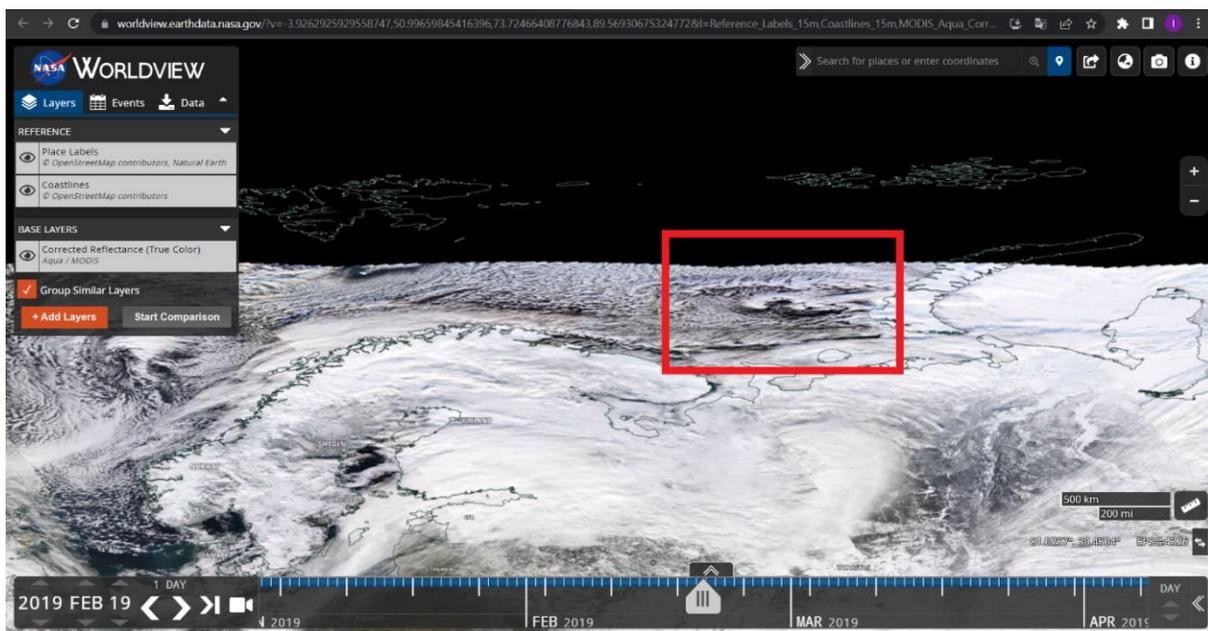


Рисунок 16 - Пример полярного циклона типа «облачная запятая» в Баренцевом море 06.05.2019 г.

### 3.1. Анализ осредненных полей метеовеличин для полярных циклонов типа «спиралевидный вихрь».

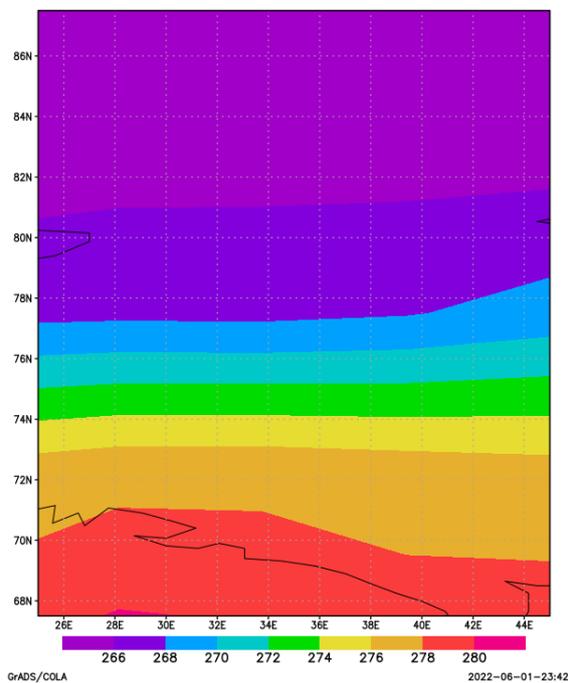


Рисунок 17 - Среднее поле температуры для полярных циклонов типа «спиралевидный вихрь» в Баренцевом море за 2020 год.

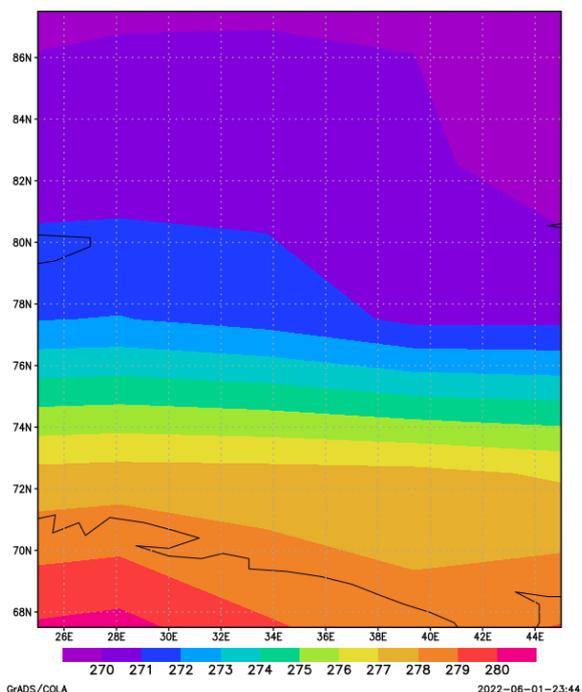


Рисунок 18 - Среднее поле температуры для дней, когда полярные циклоны отсутствовали в Баренцевом море за 2020 год.

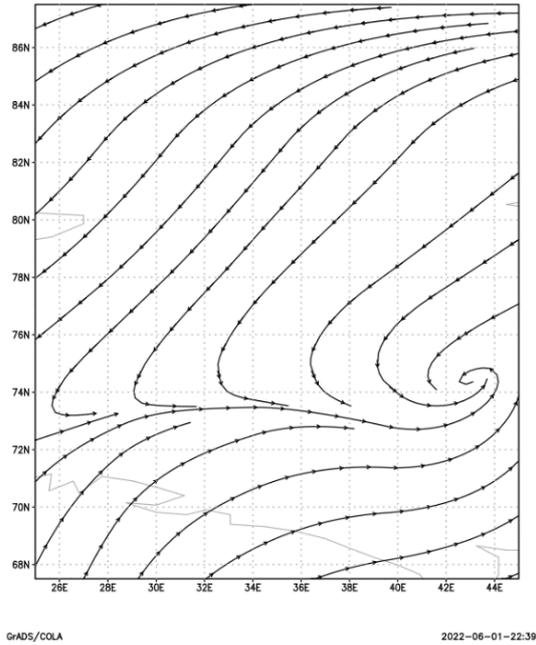


Рисунок 19 - Среднее поле ветра для полярных циклонов типа «спиралевидный вихрь» в Баренцевом море за 2020 год.

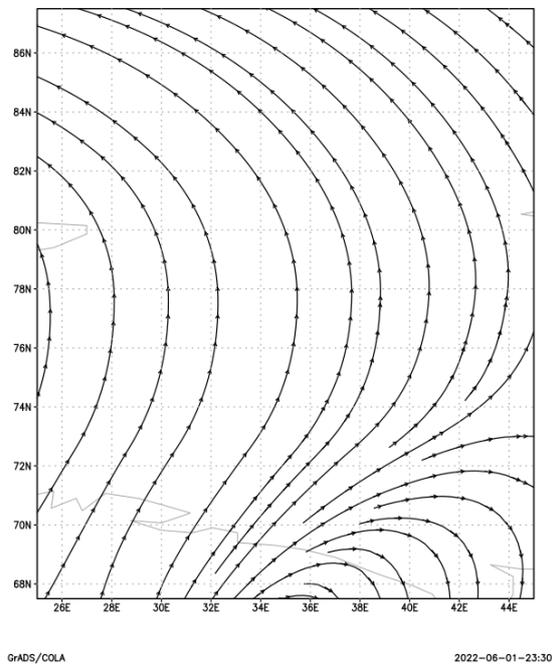


Рисунок 20 - Среднее поле ветра для дней, когда полярные циклоны отсутствовали в Баренцевом море за 2020 год.

### 3.2. Анализ осредненных полей метеовеличин для полярных циклонов типа «облачная запятая».

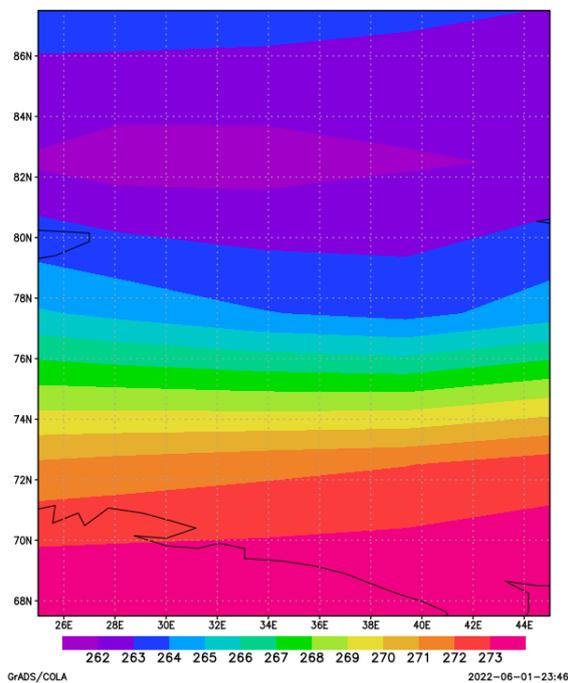


Рисунок 21 - Среднее поле температуры для полярных циклонов типа «облачная запятая» в Баренцевом море за 2019-2020 года.

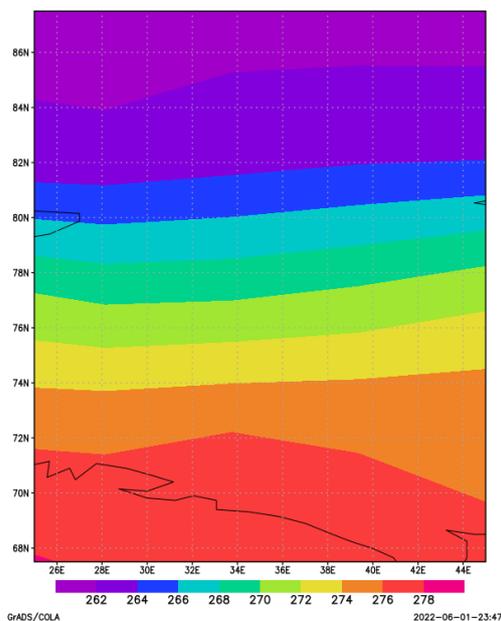


Рисунок 22 - Среднее поле температуры для дней, когда полярные циклоны отсутствовали в Баренцевом море за 2019-2020 года.

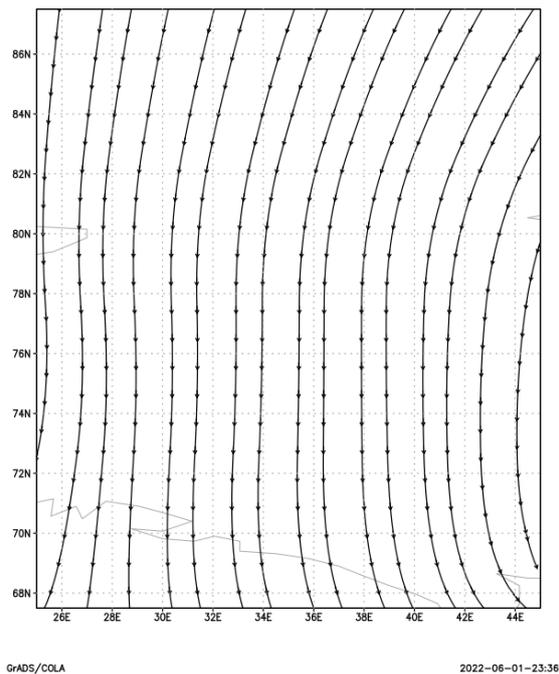


Рисунок 23 - Среднее поле ветра для полярных циклонов типа «облачная запятая» в Баренцевом море за 2019-2020 года.

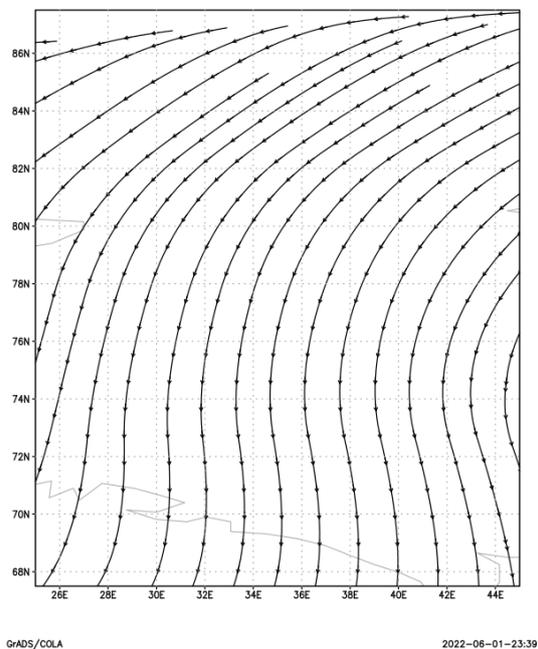


Рисунок 24 - Среднее поле ветра для дней, когда полярные циклоны отсутствовали в Баренцевом море за 2019-2020 года.

Анализируя осреднённые поля температур в дни, когда полярные циклоны типа «спиралевидный вихрь» наблюдались и в дни, когда полярных циклонов не наблюдалось видно, что наименьшая температура воздуха наблюдаемая в дни с полярными циклонами равна приблизительно 266 К(-7,15 °С), а в дни, когда они отсутствовали 270 К(-3,15°С), также важно отметить, что уровень в 270 К в дни, когда полярные циклоны наблюдаются смещён с 84° с.ш. на 76° с.ш. Переходя к осреднённым полям температур в дни, когда полярные циклоны типа «облачная запятая» наблюдались и в дни, когда полярных циклонов не наблюдалось видно, что такой существенной разницы, как в предыдущем случае нет, но на представленном рисунке 21 видно область воздушной массы вынесенной из полярных широт.

Анализ средних полей ветра показывает, насколько сильно изменяется направление ветра в дни, когда наблюдаются полярные циклоны типа «спиралевидный вихрь» относительно дней, когда полярные циклоны не наблюдались, изменение направления ветра происходит на 180 °, такого изменения не наблюдается в дни, сравниваемые для полярных циклонов типа «облачная запятая».

#### 4. Анализ вертикальных профилей полярных циклонов различных типов в Северном полушарии за период с 2011 по 2021 гг.

Последняя часть исследования заключается в анализе вертикальных профилей температуры и горизонтальных компонент ветра и их сравнение с вертикальными профилями в точках с теми же координатами в близкие дни, когда полярные циклоны отсутствовали для тех же циклонов в Баренцевом море. Данные были получены с сервера РГГМУ, а построены профили были в программе OpenGrADS.

##### 4.1. Вертикальные профили спиралевидных вихрей.

##### Вертикальные профили температуры

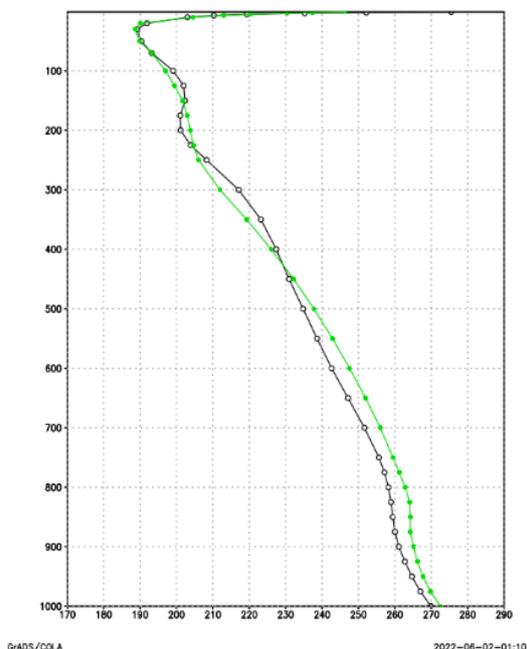


Рисунок 25 - Вертикальные профили температуры полярных циклонов типа «спиралевидный вихрь» и осреднённый за зимние месяцы.

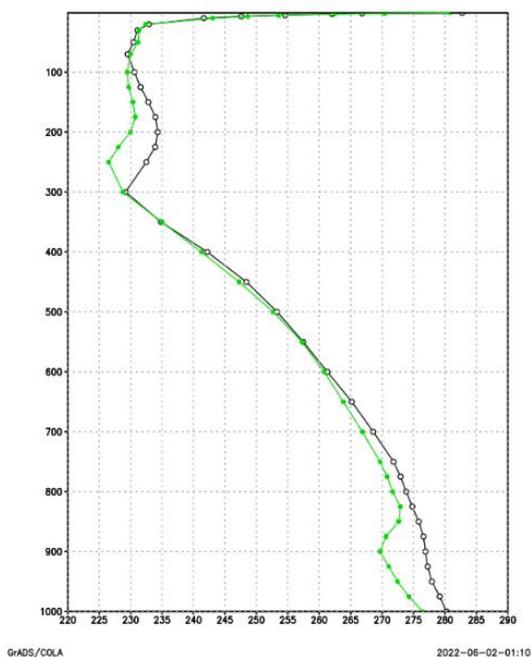


Рисунок 26 - Вертикальные профили температуры полярных циклонов типа «спиралевидный вихрь» и осреднённый за летние месяцы.

### Вертикальные профили U

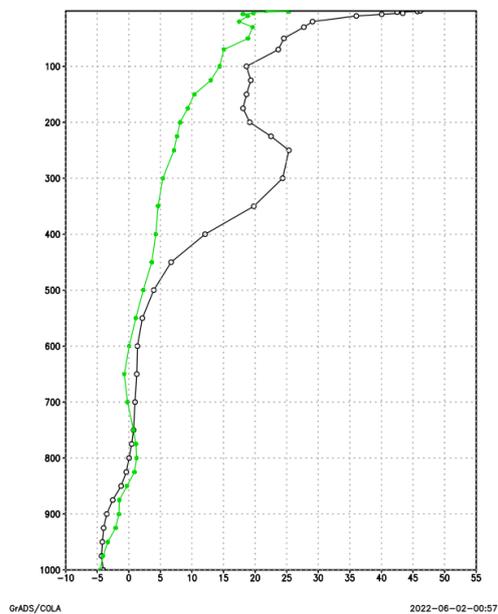


Рисунок 27 - Вертикальные профили компоненты ветра(U) полярных циклонов типа «спиралевидный вихрь» и осреднённый за зимние месяцы.

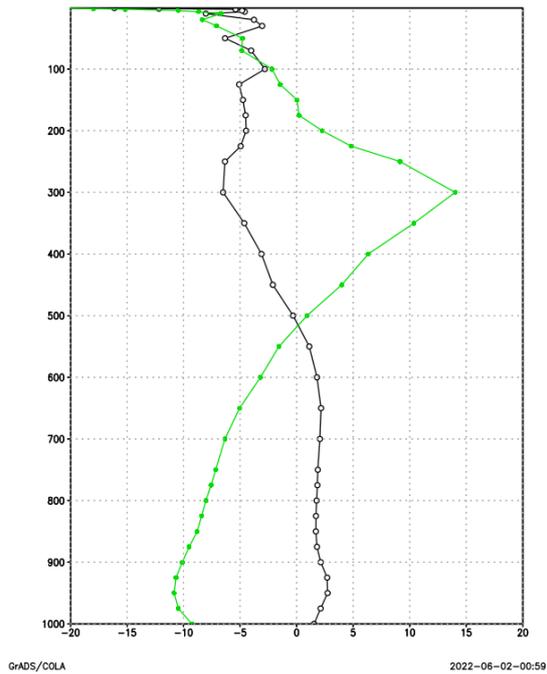


Рисунок 28 - Вертикальные профили компоненты ветра(U) полярных циклонов типа «спиралевидный вихрь» и осреднённый за летние месяцы.

### Вертикальные профили V

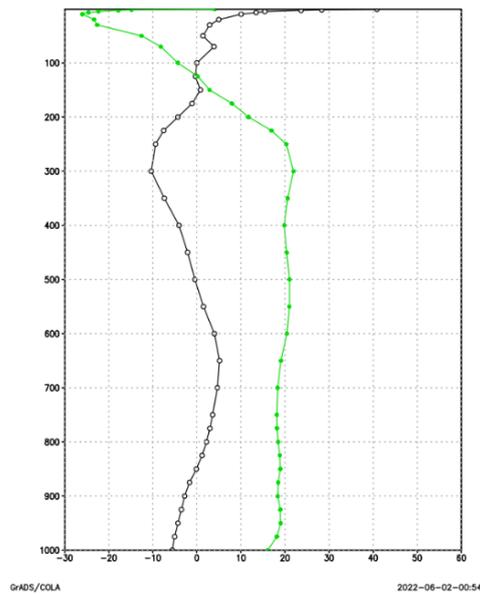


Рисунок 29 - Вертикальные профили компоненты ветра(V) полярных циклонов типа «спиралевидный вихрь» и осреднённый за зимние месяцы.

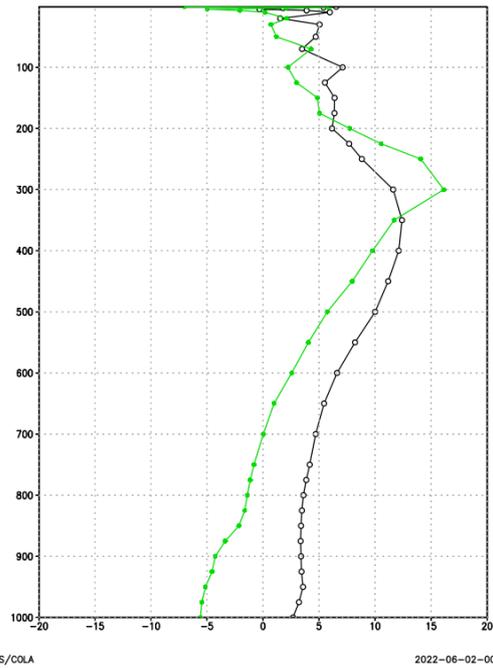


Рисунок 30 - Вертикальные профили компоненты ветра(V) полярных циклонов типа «спиралевидный вихрь» и осреднённый за летние месяцы.

#### 4.2. Вертикальные профили облачных запятых.

#### Вертикальные профили температуры

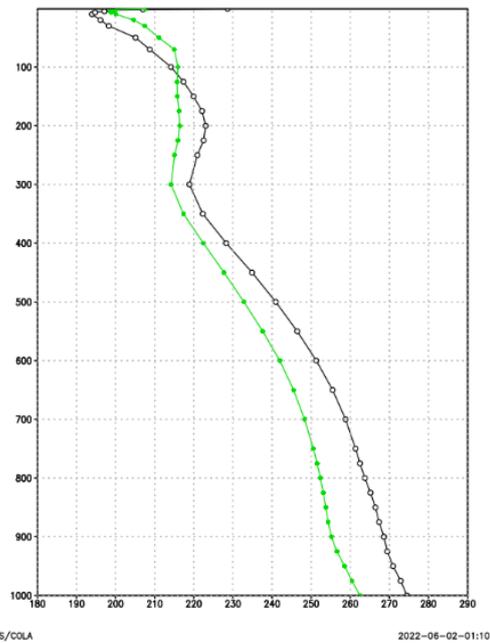


Рисунок 31 - Вертикальные профили температуры полярных циклонов типа «облачная запятая» и осреднённый за зимние месяцы.

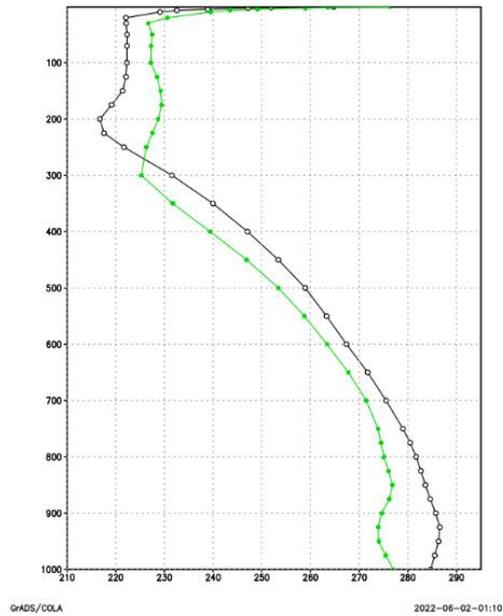


Рисунок 32 - Вертикальные профили температуры полярных циклонов типа «облачная запятая» и осреднённый за летние месяцы.

### Вертикальные профили U

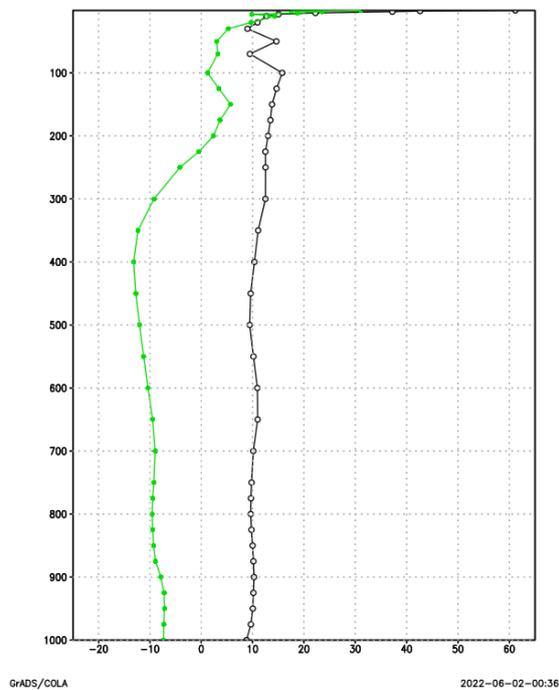


Рисунок 33 - Вертикальные профили компоненты ветра(U) полярных циклонов типа «облачная запятая» и осреднённый за зимние месяцы.

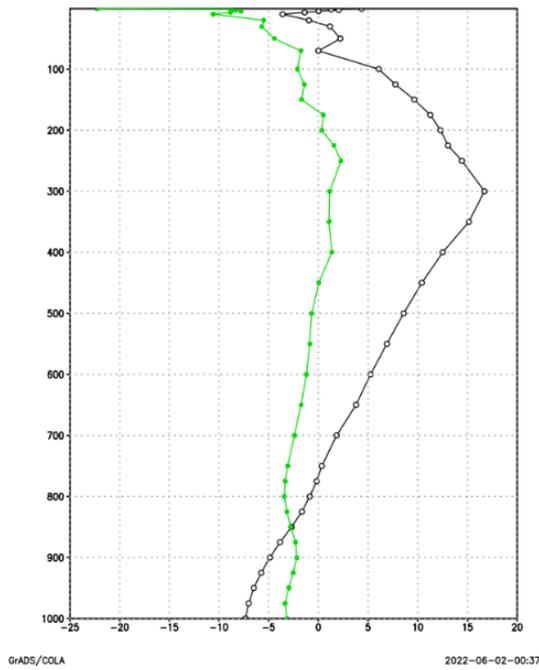


Рисунок 34 - Вертикальные профили компоненты ветра(U) полярных циклонов типа «облачная запятая» и осреднённый за летние месяцы.

### Вертикальные профили V

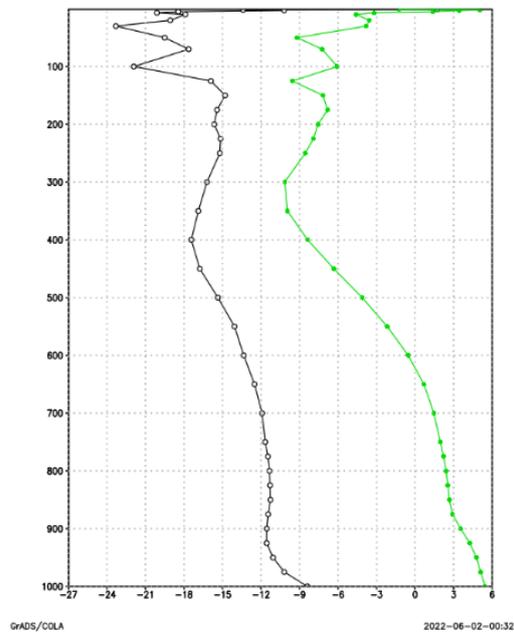


Рисунок 35 - Вертикальные профили компоненты ветра(V) полярных циклонов типа «облачная запятая» и осреднённый за зимние месяцы.

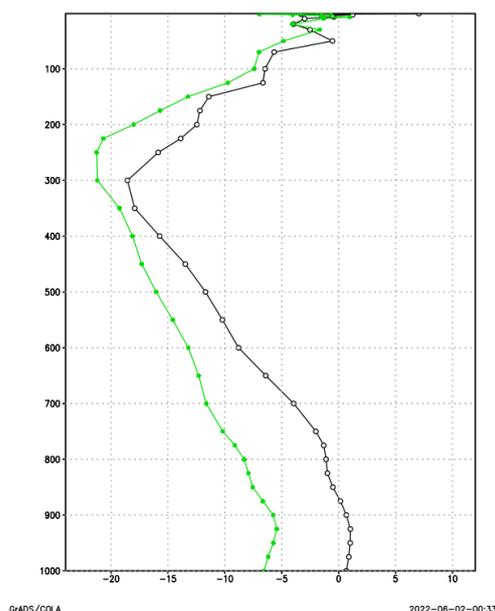


Рисунок 36 - Вертикальные профили компоненты ветра(V) полярных циклонов типа «облачная запятая» и осреднённый за летние месяцы.

Вертикальные профили температуры позволяют проверить наличие полярных циклонов при сравнении температуры воздуха у поверхности и температуры воздуха на уровне 500 гПа, а также сравнить эту разность температур для месяцев с осреднёнными значениями и понять, насколько этот критерий точен. Из имеющихся вертикальных профилей для полярных циклонов типа «спиралевидный вихрь» можно сделать вывод, что в летние месяцы этот критерий наиболее точен, так как зимой разница в обоих случаях близка к  $35^{\circ}\text{C}$ , а летом же в день с циклоном разница равна примерно  $37^{\circ}\text{C}$ , в день без  $33^{\circ}\text{C}$ . Для случаев с «облачной запятой» наоборот, зимой по этому критерию наличие полярного циклона подтверждается, а летом нет.

Анализ профилей ветра позволяет судить об изменении скорости и направления ветра с высотой. Таким образом для облачной запятой компонента V в дни, когда есть циклоны и в дни, когда их нет почти полностью совпадает в летние месяцы и совпадает по скоростям, но диаметрально противоположна по направлению в зимние. С компонентой U

ситуация аналогичная. Для спиралевидного вихря характерна смена направления ветра на высоте на  $180^\circ$ , а так они также диаметрально противоположны по направлению и равны по модулю скорости.

## Заключение

В ходе данной работы были сделаны выводы:

1) Из-за влияния тёплого Северо-Атлантического течения количество полярных циклонов уменьшается от большего к меньшему в порядке Баренцево море – Норвежское море – Гренландское море.

2) Полярные циклоны типа «спиралевидный вихрь» значительно преобладают над остальными типами, а самый ближайший по количеству типа – «облачная запятая»

3) Были рассчитаны данные первичной статистики: среднее значение, дисперсия, среднее квадратичное отклонение, коэффициент вариации, которые позволили сделать выводы:

- среднее значение полярных циклонов за год в промежуток с 2011 по 2021 год составляет 55 штук;

- среднее отклонение от среднего значения составляет 10;

- коэффициент вариации равный 19% даёт возможность сделать вывод о достаточной однородности совокупности.

4) Анализ и сравнение средних полей метеовеличин в дни, когда полярные циклоны есть с днями, когда полярные циклоны отсутствуют позволяют подтвердить, что с приходом полярных циклонов температура понижается, а ветер усиливается.

5) Анализ и сравнение средних полей в дни, когда наблюдались полярные циклоны разных типов показывают, что существенной разницы в изменении метеовеличин нет, а значит, что погодные условия, обусловленные полярными циклонами типа «спиралевидный вихрь» и полярными циклонами типа «облачная запятая» будут близки друг к другу.

6) Анализ и сравнение вертикальных профилей метеовеличин подтверждает выводы сделанные в результате анализа и сравнения осредненных полей метеовеличин в главе 3.

## Список литературы

1. Воробьев В.И. Синоптическая метеорология - Л. : Гидрометеоиздат. 1991, 615 с.
2. Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2020. № 1 (375). – М.: Гидрометцентр России, 2020. С. 65-82
3. Sumner, E.J. (1950). The significance of vertical stability in synoptic development. *Quart. J. Roy. Met. Soc.* 76, 384–92.
4. Dannevig, P. (1954). *Meteorologi for Flygere* [in Norwegian]. Aschehoug, Oslo.
5. Scherhag, R. and Klauser, L. (1962). *Grundlagen der Wettervorhersage*. In *Meteorologisches Taschenbuch*, ed. F. Bauer. Akademische Verlagsgesellschaft, Leipzig.
6. Rabbe, A. (1975). Arctic instability lows. *Met. Annaler* 6, 303–29.
7. Harley, D.G. (1960). Frontal contour analysis of a ‘polar’ low. *Met. Mag.* 89, 141–7.
8. Lyall, I.T. (1972). The polar low over Britain. *Weather* 27, 378–90.
9. Stevenson, C.M. (1968). The snowfall of early December 1967. *Weather* 23, 156–61.
10. Rasmussen, E., and J. Turner, *Polar Lows: Mesoscale Weather Systems in the Polar Regions*. Cambridge University Press, 2003, 612 pp.
11. Ю.В. Ефимова, К.Ю. Булгаков, Н.В. Федосеева, Л.О. Неелова, А.И. Угрюмов, И.В. Лаврова Анализ основных свойств механизмов формирования «взрывных» полярных циклонов – СПб.: РГГМУ, 2018. – 11 с.
12. Ю.Е. Смирнова, Е.В. Заболотских, Л.П. Бобылев, В.И. Сычев Исследование полярных циклонов в Балтийском море методами спутникового дистанционного зондирования – СПб.: РГГМУ, 2011. – 11 с.

13. Булгаков К.Ю., Федосеева Н.В., Смирнова А. И., Лопуха В.О., Кузнецов А.Д. Обработка и анализ цифровых архивов метеорологических данных удаленного доступа. Учебное пособие. – СПб.: РГГМУ, 2021. – 68 с.

14. Баренцево море // Кольская энциклопедия. В 5 т. Т. 1. А — Д / Гл. ред. А. А. Киселёв. — СПб. : ИС ; Апатиты : КНЦ РАН, 2008. — 600 с.

15. Малинников В.А., Стеценко А.Ф., Алтынов А.Е., Попов С.М. Мониторинг природной среды аэрокосмическими средствами. Учебное пособие для студентов вузов. – М.: Изд. МИИГАиК. 2008 г., 145 с.