



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 «Особенности циклогенеза по типу Шапиро-Кейзера»

Исполнитель Стирин Андрей Александрович ПМ-Б17-2-3

(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат физико - математических наук,

(ученая степень, ученое звание)

Топтунова Ольга Николаевна

(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой

(подпись)

Кандидат физико-математических наук, доцент

(ученая степень, ученое звание)

Анискина Ольга Георгиевна

(фамилия, имя, отчество)

« 26 » мая 2021 г.

Санкт-Петербург

2021

Оглавление

| | |
|---|----|
| Введение..... | 3 |
| 1 Глава | 5 |
| 1.1 Циклогенез | 5 |
| 1.2 Первые теории возникновения циклонов в мировой метеорологии | 7 |
| 1.3 Модели возникновения и эволюции циклонов | 7 |
| 1.4 Условия образования циклонов..... | 10 |
| 2 Глава | 13 |
| 2.1 Особенности циклогенеза по Норвежскому типу..... | 13 |
| 2.2 Стадии развития циклонов по классической норвежской теории | 13 |
| 2.3 Особенности циклогенеза по типу Шапиро-Кейзера | 20 |
| 2.4 Модель «Конвейерной ленты» в формировании облачной спирали циклонов Шапиро-Кейзера..... | 24 |
| 2.5 Стинг-джеты | 30 |
| 3 Глава | 33 |
| 3.1 Параллельное сравнение норвежского циклона и циклона Шапиро-Кейзера | 33 |
| 3.2 Вертикальный разрез циклона по типу Шапиро-Кейзера..... | 45 |
| 3.3 Анализ особенностей циклогенеза по типу Шапиро-Кейзера с использованием реанализа | 53 |
| Заключение | 62 |
| Список используемой литературы | 63 |
| Приложение А | 65 |

Введение

Внетропические циклоны – важнейший элемент межширотного обмена. Многие национальные метеорологические службы выпускают синоптические карты с изображением наземных фронтов несколько раз в день. Внетропические циклоны обычно анализируются метеорологическими службами как норвежские, без учета того, что некоторые циклоны относятся к совершенно другому типу развития.

Целью данной работы является выявление особенностей циклогенеза по типу Шапиро-Кейзера.

Для достижения цели было поставлено несколько определенных задач:

1. Совершить обзор литературных источников, связанных с темой циклогенеза.
2. Найти архив карт погоды и спутниковых снимков, подобрать типовые случаи развития по норвежской модели и по модели Шапиро-Кейзера
3. Научиться интерпретировать спутниковые снимки. Работать с реанализом, графически его визуализировать.
4. Разобрать синоптические ситуации.

Предметом исследования являются спутниковые снимки, синоптические снимки и реанализ.

Классической норвежской модели возникновения и эволюции циклонов уже почти сто лет, и она не совсем полно описывает процесс циклогенеза. А теории Шапиро-Кейзера в 2021 году исполняется полных 30 лет, но тем не менее, до сих пор в русскоязычной литературе информации о данной модели нет. Знание физических механизмов позволяет улучшать качество прогнозов. В этом и заключается актуальность данной работы.

Выпускная квалификационная работа состоит из трёх глав.

В первой главе рассказывается об основных определениях, связанных с темой циклогенеза, описываются основные модели эволюции циклонов, а также условия их образования.

Во второй главе описываются стадии эволюции циклона по норвежскому типу и по типу Шапиро-Кейзера, рассматриваются их основные особенности.

В третьей главе подводятся итоги, сравниваются норвежский тип циклона с циклоном по типу Шапиро-Кейзера, проводится анализ особенностей циклона Шапиро-Кейзера с использованием данных реанализа.

В данной работе исследуются особенности модели циклонов по типу Шапиро-Кейзера, а также их основные отличия от стандартной модели норвежского циклона. У них много общего, но есть и существенные различия на протяжении своего жизненного цикла.

1 Глава

1.1 Циклогенез

Движения воздушных масс в атмосфере приводят к образованию вихрей, которые различаются между собой размерами, направлениями движения, скоростями и так далее. Многие из них приводят к катастрофам и человеческим жертвам. Их разрушительная сила может стереть с лица земли тысячи домов, повалить леса, а в некоторых случаях даже унести домашний скот на сотни километров.

Одни из самых опасных атмосферных вихрей это внетропические циклоны. Их скорость варьируется от 5 до 100 км/ч. Циклоны имеют различные размеры, в основном их диаметр составляет от тысячи километров и больше. [1]

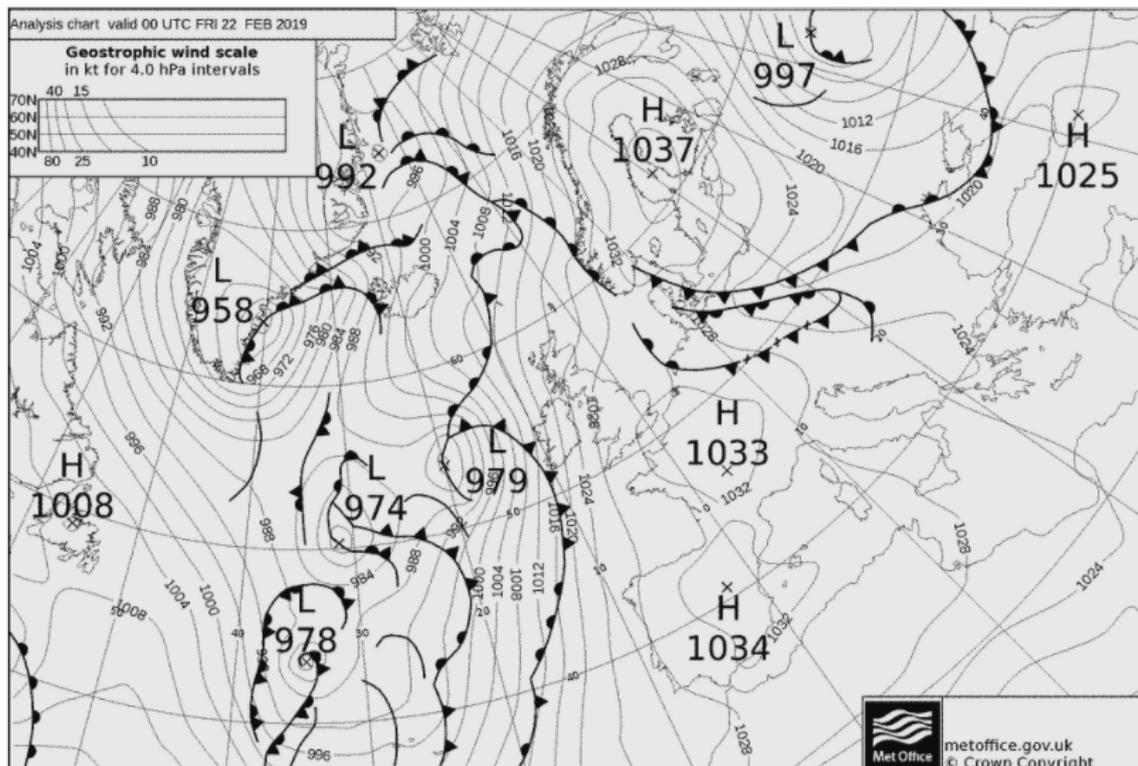


Рисунок 1.1 – Синоптическая карта с сайта «Wetterzentrale» за срок 22.02.19 г. 00:00 UTC [2]

С гидродинамической точки зрения циклон представляет собой вихри большого масштаба, в которых воздух совершает вращательные движения по

часовой стрелке в южном полушарии, и против часовой в северном. В центральной зоне формируется низкое давление, а воздушные потоки направлены вверх.

Восходящие потоки воздуха образуют плотную облачность, которая несет за собой пасмурную погоду. Летом циклон вызывает понижение температуры окружающего воздуха, а зимой оттепель. [3]

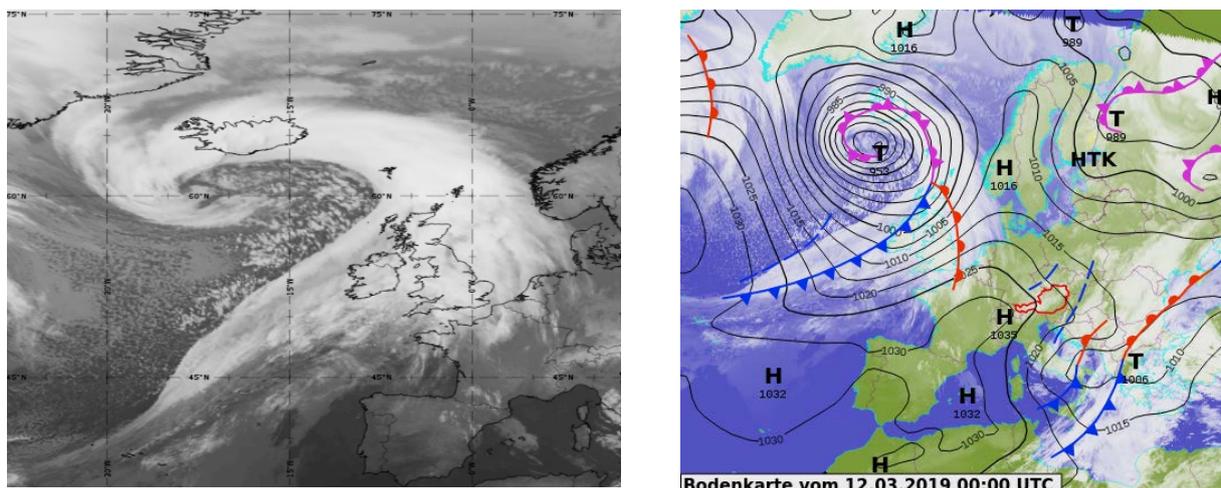


Рисунок 1.2 - Циклон по норвежскому типу над Северным Ледовитом океаном 12 марта 2019 г. Объяснение в тексте

Слева изображен спутниковый снимок облачности, он был взят с та <http://eumetrain.org>. На данном изображении отчетливо видна характерная для циклона облачная полоса, которая растянулась от берегов Португалии до Гренландии.

Справа – карта погоды, взятая с сайта <https://www.zamg.ac.at>. По данной карте можно понять, что циклон находится на стадии заполнения. Об этом нам говорит фронт окклюзии.

1.2 Первые теории возникновения циклонов в мировой метеорологии

Поскольку циклоны были обнаружены на погодных картах более 100 лет назад, было предложено многочисленное количество теорий эволюций барических образований. Какие-то из них сразу отвергались метеорологических обществом, какие-то были взяты во внимание.

Одним из первых ученых, кто предложил внятную теорию образования циклонов считается англичанин Л.Ховард. В 1820 году в своей работе он описал развитие погоды в столице Великобритании, используя понятия теплого и холодного воздуха. Хорард знаменит еще и тем, что задолго до появления знакомой нам синоптической карты, нарисовал приближенное к реальности трехмерное дождевое облако, с его основными воздушными потоками.

В 1863 году модель внетропического циклона была предложена британским исследователем адмиралом Фитцем Роем (Fitz Rroy R.), первым главой Лондонской метеорологической службы.

Он заметил, что все барические образования в основном состоят из нескольких воздушных масс, которые имеют свои отличия в параметрах. Такие как: температура, влажность, скорость и направление течения воздуха. Их этих выводов он понял, что циклоны возникают из нескольких воздушных течений. Сегодня мы понимаем, что скорее всего, Фитц Рой имел ввиду теплый и холодный фронт, но до конца свою работу он не довел из-за его ранней смерти.

К счастью, дальнейшее развитие данной теории состоялось, но только почти через 60 с лишнем лет. [6]

1.3 Модели возникновения и эволюции циклонов

Теория циклогинеза по Ли.

В 1878 году ученый Ли из Великобритании разработал первую модель циклона, которая воссоздала идею трехмерной структуры фронтального цикло-

на. Свою работу Ли начал, опираясь на известную к тому времени трехмерную модель воздушных потоков, разработанную метеорологом Пальменом (E. Palmén), которую он, в свою очередь, опубликовал в 31 году 20 века.

По этой модели в передней части циклона наблюдается слоисто-дождевая облачность, несущая за собой обложные осадки. Главным недостатком в его работе является то, что модель не смогла описать главного, чего в этот момент хотело метеорологическое общество, – дальнейшую эволюцию внетропического циклона.

Несмотря на это, Ли не остановился на разработке своей модели, и в 1879 году вместе с ученым В.Коппенем заметили признаки холодного фронта. Конечно, в то время ученые еще не знали о существовании фронтов, но их открытие потрясло все мировое сообщество. В дальнейшем, Ли так же продолжал трудиться над своей работой, но результатов она, к сожалению, больше не приносила.

Модель циклогинеза по Бьеркнесу и Сольбергу.

В начале прошлого века ученые из Норвегии Й. Бьеркнес и Х. Сольберг (Bjerknes J., Solberg H.) разработали новую модель эволюции циклона. Их работа привлекла огромное внимание метеорологов со всего мира. Все из-за того, что наконец была предложена модель, которая перестала быть неподвижной и дала понимание в эволюции барических образований.

Ученые заметили теплый фронт, который долгое время уходил от внимания метеорологов. Проследив за его перемещением, Й. Бьеркнес и Х. Сольберг обнаружили, что два фронта (холодный и теплый) смешиваются. Это ввело ученых в ступор, но разобравшись, они поняли, что существует третий фронт, который позже назвали фронт окклюзии (1919 г.). В своей модели они описали стадии развития барических образований, их основные черты и схемы.

Открытия Й. Бьеркнеса и Х. Сольберга дали огромный толчок в развитии всей метеорологии и послужили основой в создании Бергенской школы. В сле-

дующие годы норвежские ученые открыли еще множество тайн в образовании и развитии циклонов, и до сих пор метеорологи пользуются их трудами.

Модель циклогенеза Иди

В данной модели изначально предполагается, что невозмущенный зональный сдвиговый поток находится в равновесии с полем сил термической плавучести. В этом случае течение имеет неограниченную широту и ограниченную долготную протяженность, но ограничивается земной поверхностью и тропопаузой.

Максимальная длина волны из-за бароклинной неустойчивости в модели Иди составляла примерно 3600 км. Стандартный размер циклонов и антициклонов составляет одну четверть и соответствует наблюдаемому синоптическому масштабу. В этом случае характерное время циклогенеза составило около 1 суток при средних значениях метеопараметров. Эти результаты также довольно хорошо сопоставимы с эмпирическими наблюдениями фронтального циклогенеза. Кроме того, в 1956 году Н. Филлипс провел численное моделирование циклогенеза, используя результаты работы Иди.

Полученные им результаты полностью соответствовали реальным данным по циклогенезу. Итак, циклон начал развиваться из-за возмущения на поверхности раздела, после основная волна стала выделяться на фоне других возмущений. Затем наблюдалось увеличение её амплитуды, свидетельствующее об образовании молодого циклона. В последней части разработки результаты расчета соответствовали циклону заполнения.

1.4 Условия образования циклонов

Большинство циклонов, образующихся в умеренных широтах, являются фронтальными волновыми возмущениями.

Фронтальные циклоны являются результатом динамически неустойчивых бароклинных волн, возникающих на тропосферном фронте. Бароклиная неустойчивость определяется как динамическая неустойчивость в зональном переносе в атмосфере, связанная с наличием меридионального градиента температуры и, следовательно, термического ветрового потока воздушных масс. В то же время атмосфера находится в почти геострофическом равновесии (состоянии движения, в котором горизонтальная составляющая силы отклонения вращения Земли уравнивает силу горизонтального барического градиента во всех точках, то есть ветры в точках поля являются геострофическими, которые могут выполняться в свободной атмосфере, кроме экваториальных широт) и характеризуются статической устойчивостью. [9]

Нарушение состояния равновесия в атмосфере выражается движением волн. Когда амплитуда волны уменьшается со временем, общее состояние движения стабильное (и волну можно квалифицировать как устойчивую). Если амплитуда волны увеличивается со временем, то состояние движения неустойчиво (волна нестабильна). Волны на фронтах бывают как устойчивыми, так и неустойчивыми. Устойчивые волны связаны с неглубокими минимумами барического поля, и их влияние на время небольшое. Неустойчивые фронтальные волны, которые развиваются с постепенно увеличивающейся амплитудой, пока возмущение не превратится в вихрь, намного больше.

Факторами образования волн в атмосфере являются сжимаемость воздушной массы, сила тяжести, разрыв поля ветра и вращение Земли.

Сжимаемость воздуха создает продольные звуковые волны, свойства которых не имеют ничего общего с циклонами.

Сила тяжести вызывает появление гравитационных волн (например, волны на поверхности воды от брошенного в неё камня). Во время движения волн

ны происходит колебательный переход от потенциальной энергии к кинетической и наоборот. Гравитационные волны устойчивы и постепенно уменьшаются за счет трения. Гравитационные волны в атмосфере составляют десятки и сотни метров в длину, что на много порядков меньше, чем порядок величины циклонических возмущений.

Волны разрыва ветра, в отличие от гравитационных, нестабильны и увеличиваются по амплитуде со временем, чем быстрее, тем короче длина волны.

Под действием сил инерции - центробежных и кориолисовой - возмущение в среде также может приводить к волновому движению с пространственно-временными масштабами, подобными циклоническим волнам. Хотя атмосфера не имеет постоянной угловой скорости, из-за наличия ветрового режима инерционные волны размером с циклон в атмосфере будут стабильными (а в реальных условиях они нестабильны).

В результате, циклонические волны не могут быть ни чисто инерционными, ни гравитационно-инерционными. Циклонические волны - это сложные волны, в формировании которых играют роль все три фактора: сила тяжести, инерция (вращение Земли), сдвиг (разрыв поля ветра). Неустойчивость циклонических волн вызвана именно наличием на фронтальной поверхности ветрового разрыва (волны сдвига).

Устойчивость за счет силы тяжести обычно называют статической или гравитационной, устойчивость за счет сил инерции и отклоняющей силы вращения Земли - динамической устойчивостью, неустойчивость из-за сдвига ветра - разрывной неустойчивостью.

Степень устойчивости образующихся циклонных волн будет изменяться в зависимости от их длины, так как как статическая, так и динамическая устойчивость зависят от длины волны. Разрывная неустойчивость не зависит от длины волны. [9]

Неустойчивые волны появятся в диапазоне длин от 500 км до 3000 км, где статическая устойчивость уменьшается по мере того, как увеличивающаяся сила отклонения приближает орбиты колебаний частицы к горизонтальному по-

ложению, динамическая устойчивость увеличивается с увеличением силы отклонения, но в их сумму не входит разрывная неустойчивость.

2 Глава

2.1 Особенности циклогенеза по Норвежскому типу

Классическая норвежская модель циклона была разработана в начале прошлого века с использованием прибрежной сети наблюдательных пунктов. На основе этих наземных измерений была разработана модель, описывающая образование системы низкого давления, а также взаимодействие теплых и холодных воздушных масс. Первоначальная теория показала слабость в объяснении ранних стадий циклогенеза, поскольку запускающие механизмы верхней тропосферы и динамика, которую она содержит, еще не были известны. Модель была значительно расширена, особенно во время Второй мировой войны, когда стали доступны измерения параметров атмосферы с самолетов и радиозондов. [10]

2.2 Стадии развития циклонов по классической норвежской теории

В теории возникновения циклонов существует классическая Норвежская теория, где циклон проходит несколько стадий своего формирования:

1. Стадия волны
2. Молодой циклон
3. Максимальное развитие
4. Заполнение (Окклюдование)

Первая стадия – Стадия волны. На данном этапе рассматривается приземная карта. Процесс начинается с того, как первая изобара замыкается. Низкое давление на поверхности начинает нарастать, и циклоническая циркуляция вокруг низкого давления начинается с адвекции холодного воздуха на юге и теплого воздуха на севере (в северном полушарии). Погода здесь характеризуется усилением ветра, летом возникают грозы и шквалы. [11]

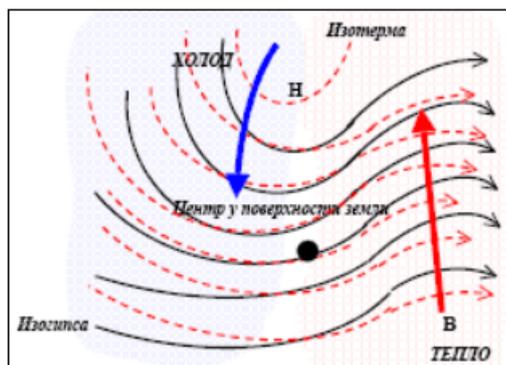


Рисунок 2.1 - Графическое изображение стадии волны образования циклона. Стрелками указано направление воздушных масс внутри барического образования [11]

На фронте появляется волнообразный изгиб, связанный с образованием области пониженного давления и начавшимся циклоническим завихрением воздушного потока. У вершины волны перед ее теплым участком фронта давление быстро падает, а в тыловой части, за холодным фронтом, растет. Изобары у вершины волны искривляются, образуя сначала ложбину, а затем и одну замкнутую линию вблизи центра развивающегося волнового циклона или волны.

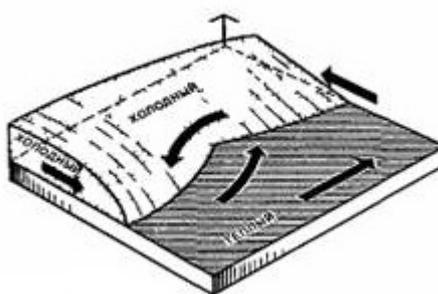


Рисунок 2.2 - Графическое изображение стадии волны в горизонтальной проекции. Стрелками указано направление воздушных масс внутри барического образования [11]

Циклон в этой стадии обычно невысокое образование. Прослеживается на высоте 3 км. (700 гПа).

Вторая стадия – Стадия молодого циклона. Здесь становятся быть ярко выраженный тыл циклона, теплый сектор и его передняя часть. Давление продолжает падать и можно провести еще одну замкнутую изобару. [11]

Когда давление в нижней части центра падает, теплый и холодный фронт становятся более организованными. Увеличение градиента давления приводит к усилению ветров, которые усиливают адвекцию тепла и холода.

Наблюдается дальнейшая деформация фронта. Адвекция холода распространяется на несколько большую часть циклона, так как холодный фронт движется быстрее теплого. Адвекция холода в тыловой части циклона оказывается более сильной, чем адвекция тепла в его передней части. Высотное поле сильно возмущено, хорошо проявляются высотные ложбины и гребень.

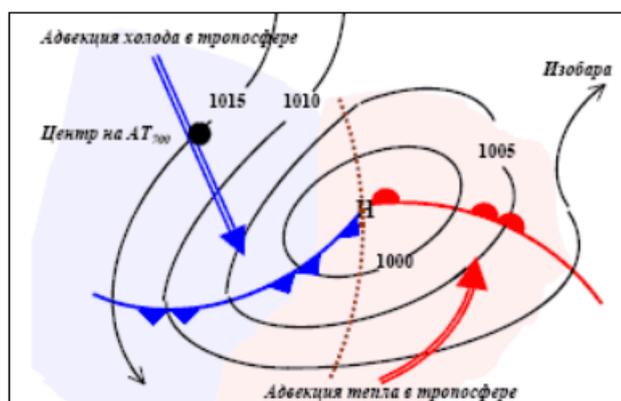


Рисунок 2.3 - Графическое изображение стадии молодого циклона. Стрелками указано направление воздушных масс внутри барического образования [11]

В этой стадии выделяют 3 зоны, которые отличаются друг от друга погодными условиями:

1. Передняя и центральная части холодного сектора циклона перед теплым фронтом. В этой части характер погоды определяется свойствами теплого фронта. Чем ближе к центру циклона и к линии теплого фронта, тем мощнее система облаков и тем вероятнее выпадение обложных осадков.

2. Тыловая часть холодного сектора циклона за холодным фронтом. Здесь погода определяется свойствами холодного фронта и холодной неустойчивой воздушной массы. При достаточной влажности и значительной неустойчивости воздушной массы в этой зоне выпадают ливневые осадки, по крайней мере в наиболее благоприятные часы суток.
3. Теплый сектор между теплым и холодным фронтами. Поскольку теплая воздушная масса является преимущественно влажной и устойчивой, то в ней наблюдается сплошная слоистая (St) или слоисто-кучевая (Sc) облачность, иногда сопровождающаяся выпадением морозящих осадков или образованием адвективных туманов. Летом в теплом секторе молодого циклона над сушей в зависимости от влажности и степени устойчивости воздушной массы может наблюдаться как малооблачная, так и облачная погода, иногда даже грозы. Днем отмечаются преимущественно кучевые облака. [11]

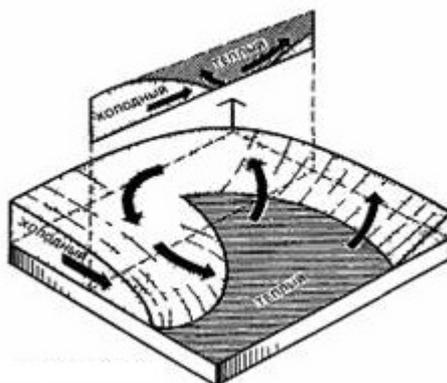


Рисунок 2.4 - Графическое изображение стадии молодого циклона в горизонтальной проекции. Стрелками указано направление воздушных масс внутри барического образования [11]

Эта стадия продолжает существовать обычно не более суток.

Третья стадия – Стадия максимального развития. Она существует не более 12 - 24 часов. Характерна тем, что вертикальная ось циклона заметно выпрямляется. В центральной части циклона изменения давления практически от-

сутствуют. Адвекция холода распространяется на большую часть циклона, но одновременно ослабевает. Адвекция тепла отмечается только в передней части циклона. То есть теплый воздух начал вытесняться в верхние слои и на переднюю периферию циклона. Размеры пространства, занимаемого циклоном, сильно вырастают и достигают максимума, как и ширина зоны облачности и осадков. В центре циклона холодный участок фронта догоняет его теплый участок, происходит смыкание фронтов, начинается процесс формирования фронта окклюзии. Погода ухудшается.

Большая часть кинетической энергии теплого фронта рассеивается, когда он поднимается над холодным воздухом. Менее плотный теплый воздух оказывает лишь небольшое влияние на более плотный холодный воздух, в то время как более плотный холодный воздух оказывает сильное влияние на теплый воздух в теплом секторе, который быстро перемещается и поднимается над холодным воздухом. Это основная причина, по которой холодные фронты имеют тенденцию двигаться намного быстрее, чем горячие, и достигают их. [11]

Когда холодный фронт догоняет теплый фронт, теплый воздух между двумя фронтами (так называемый теплый сектор) поднимается до более высокого уровня и часто вызывает обильные осадки.

Циклон в стадии максимального развития прослеживается на карта АТ-500 и АТ-400гПа. Скорость его смещения несколько замедляется по сравнению с молодым циклоном.

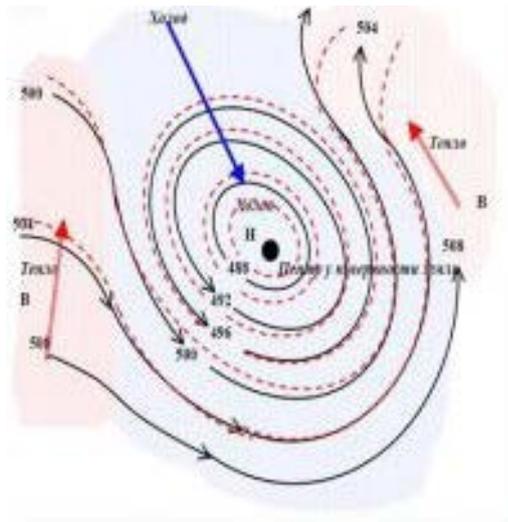


Рисунок 2.5 - Графическое изображение стадии максимального развития циклона. Стрелками указано направление воздушных масс внутри барического образования [11]

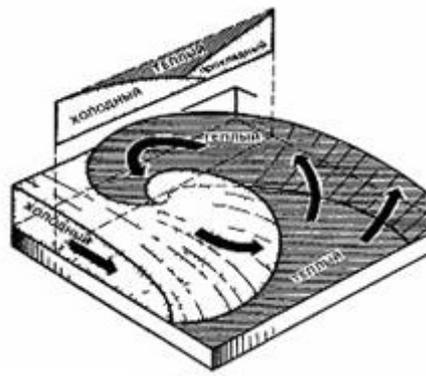


Рисунок 2.6 - Графическое изображение стадии максимального развития циклона в горизонтальной проекции. Стрелками указано направление воздушных масс внутри барического образования [11]

Четвертая, и последняя стадия развития циклона – Стадия заполнения. Здесь происходит смыкание холодного и теплого фронта, то есть окклюдирование, и сопровождается его заполнением. Давление у поверхности Земли в центре циклона повышается.

Вытеснение теплого воздуха вверх при смыкании фронтов приводит к тому, что в окклюдированном циклоне все пространство у поверхности земли заполнено холодными воздушными массами. Его облачные системы размываются, редуют, осадки прекращаются. Начинается медленное, постепенное улучшение погоды в заполняющемся циклоне.

До тех пор, пока приземный и высотный центры циклона не совпадают по географическому положению, перемещение приземного центра окклюдированного циклона, в общем, подчиняется правилу ведущего потока. При совпадении приземного и высотного центров циклон становится малоподвижным, скорость его перемещения может упасть до нуля, и дальнейшее заполнение может происходить практически на месте. [11]

Существует эта стадия около 4 суток и более.

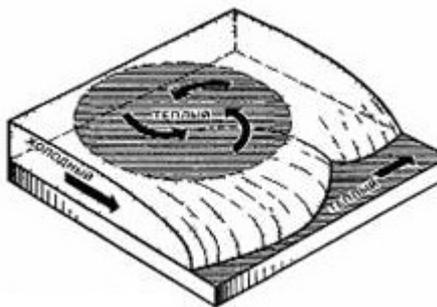


Рисунок 2.7 - Графическое изображение стадии заполнения циклона в горизонтальной проекции. Стрелками указано направление воздушных масс внутри барического образования [11]

Для того, чтобы получить необходимую информацию о состоянии барического образования, недостаточно просто изучить синоптические карты, но нужно уделить особое внимание информации со спутника, а точнее их снимкам.

2.3 Особенности циклогенеза по типу Шапиро-Кейзера

Всё вышесказанное, не описывает реальную картину событий циклогенеза. Поэтому, в 1990 году ученые М.А.Шапиро и Д.Кейзер разработали свою модель. Они заметили, что некоторые типы циклонов, в основном над акваториями океанов и морей, эволюционируют по-другому. Их фронт окклюзии формируется без непосредственного смыкания тёплого и холодного фронтов. В начале окклюдирования, холодный фронт не привязан к циклону, а дрейфует отдельно перпендикулярно основному тёплому фронту, а в тылу циклона развивается фронт окклюзии по типу тёплого. Причём, видимого смыкания фронтов как в норвежской модели, здесь не происходит. Отличительным признаком такой эволюции является возникновение секклюдии - отсечение и замыкание части тёплого сектора вблизи центра циклона.

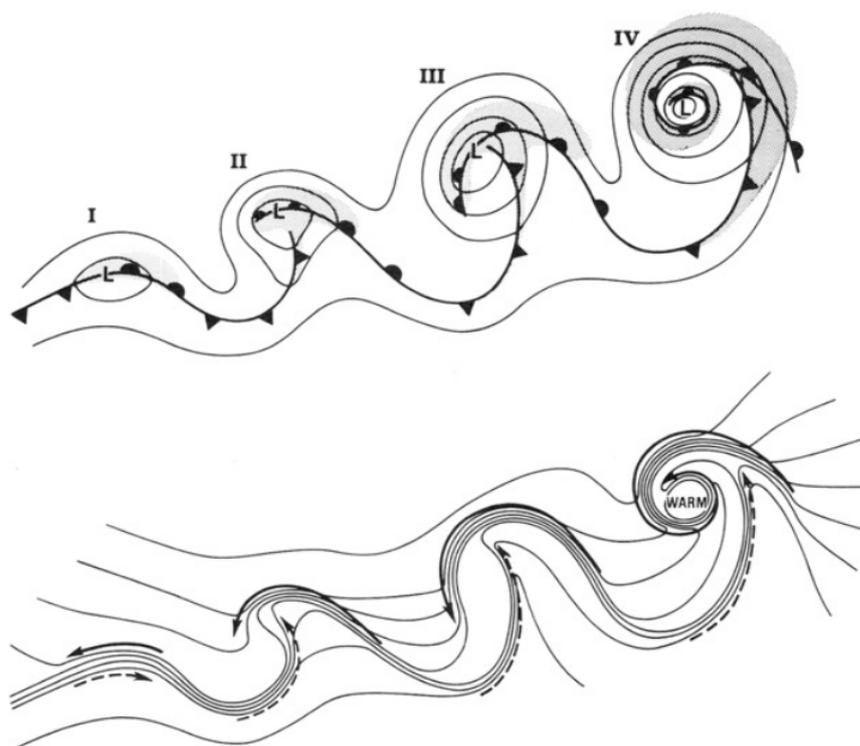


Рисунок 2.8 – Схема эволюции циклона по типу Шапиро-Кейсера [12]

Первая стадия в развитии циклона типа Шапиро-Кейзера - волновая стадия - это образование области с пониженным давлением на широкой фронталь-

ной зоне из-за бароклинной неустойчивости. На этом этапе образуются слабо выраженные фронты, которые объединяются друг с другом в центре формирующего циклона. Затоки теплого и холодного воздуха относительно слабые, выражены и направлены в противоположных направлениях вдоль фронта. [12]

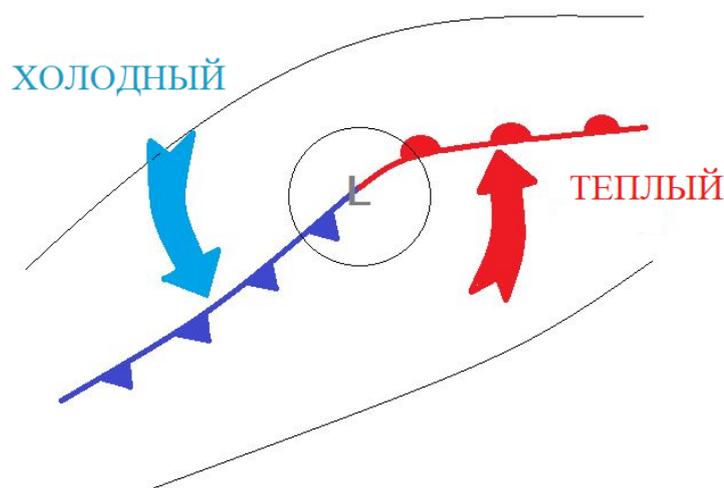


Рисунок 2.9 – Графическое изображение стадии волны. Стрелками указано направление воздушных масс внутри барического образования [12]

После следует второй этап – стадия молодого циклона. Фронтальная поверхность становится все более изогнутой. Она прерывает линии теплого и холодного фронта. Глубоко в центр циклона впадает гребень тепла. На данном этапе можно провести еще одну замкнутую изобару, образующих барические ложбины. В этот момент воздушные потоки искривляются, а их скорость увеличивается. Фактически, холодный и теплый фронты все еще связаны неактивной границей воздушных масс, которую обычно не проводят на синоптических картах (серая линия). [12]

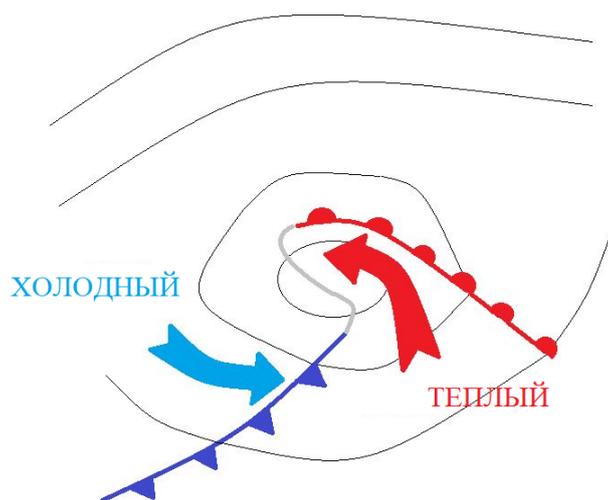


Рисунок 2.10 – Графическое изображение стадии молодого циклона по типу Шапиро-Кейзера. Стрелками указано направление воздушных масс внутри барического образования [12]

Далее идет третий этап – стадия максимального развития, которая схожа с этапом максимального развития в модели норвежского циклона, но во многом отличается от него. Главное отличие его в том, что в данной стадии окклюзия не образуется. Вместо этого граница воздушной массы отделяет теплое ядро циклона от холодного воздуха на северо-востоке, которая имеет схожесть с теплым фронтом. На самом деле там, где мы ожидали бы окклюзию на синоптической карте, прослеживается теплый изогнутый фронт. На стадии максимального развития разомкнутые фронты находятся перпендикулярно друг другу. Циклон продолжает углубляться, воздушные потоки все сильнее искривляются: холодный воздух направляется в тыловую часть циклона, а теплый - в центр со стороны теплого сектора. Холодный фронт приближается к теплову, образуя классический узор Т-образной облачности, часто наблюдаемый в развитии циклонов по типу Шапиро-Кейзера. [12]

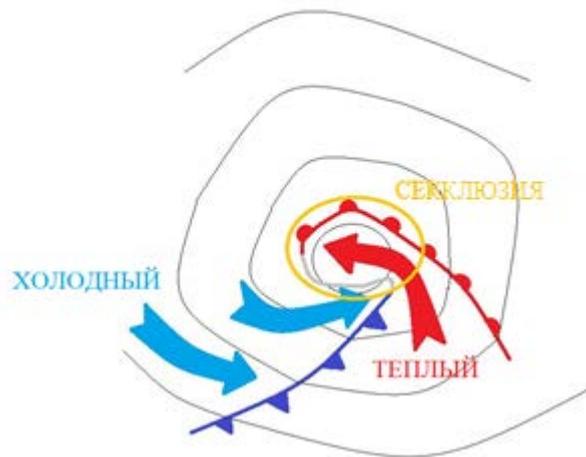


Рисунок 2.11 – Графическое изображение стадии максимального развития циклона по типу Шапиро-Кейзера. Стрелками указано направление воздушных масс внутри барического образования [12]

Четвертый этап – стадия заполнения - характеризуется образованием окклюзии. При этом естественно образуется фронт окклюзии, который оборачивает центра циклона. Данный процесс и сила воздушных потоков в этой стадии имеют максимальные значения. В то же время изотермы соединяются, образуя теплое ядро в центре циклона. [12]

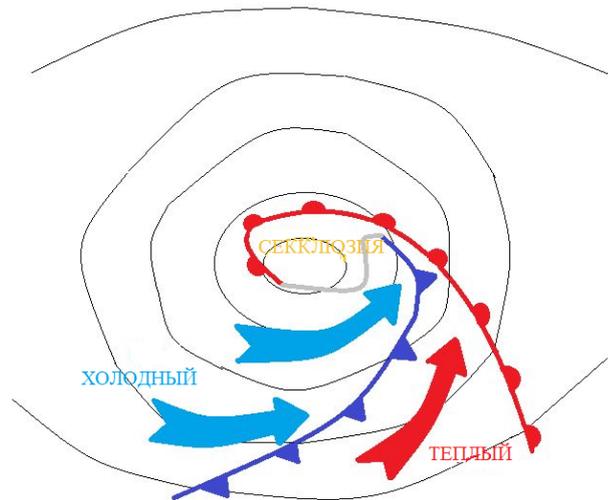


Рисунок 2.12 – Графическое изображение стадии заполнения циклона по типу Шапиро-Кейзера. Стрелками указано направление воздушных масс внутри барического образования [12]

Исходя из вышеописанного, можно сделать вывод о том, что циклоны по типу Шапиро-Кейзера имеют свои особенности, отличаясь от циклонов по норвежскому типу:

- Перелом холодного фронта;
- Развитие ветров с большой скоростью к югу от окклюзии;
- Прогрессирование холодного фронта через теплый сектор.

Холодный фронт перпендикулярен тепловому фронту;

- Развитие окклюзии за счет заново соединившихся теплого и холодного фронта.

2.4 Модель «Конвейерной ленты» в формировании облачной спирали циклонов Шапиро-Кейзера

По поводу окклюзий у метеорологов нет единого мнения. В руководстве по спутниковой метеорологии главное внимание уделяется тому, как выглядят барические образования на спутниковых снимках, а также различию их стадий

развития. Поскольку окклюзия является долгоживущим явлением, эта фаза развития может быть короче, чем стадия хорошо развитой облачной спирали, когда значительные различия в конфигурации облаков больше не могут быть распознаны.

В 1960-х годах метеорология сделала большой рывок вперед. Для более детального прогнозирования были запущены первые радиозонды, спутниковые системы, радарные установки и так далее. С их помощью, ученые поняли структуру и основные процессы в атмосфере.

В 1966 году исследователь Гринн Дж. в своих трудах описал явление размывания облачности в тыловой части циклона, опираясь на спутниковый анализ. Это явление не укладывалось в модель Бергенской школы, что за собой повело его более пристального изучения. Что в дальнейшем сделал К. Браунинг.

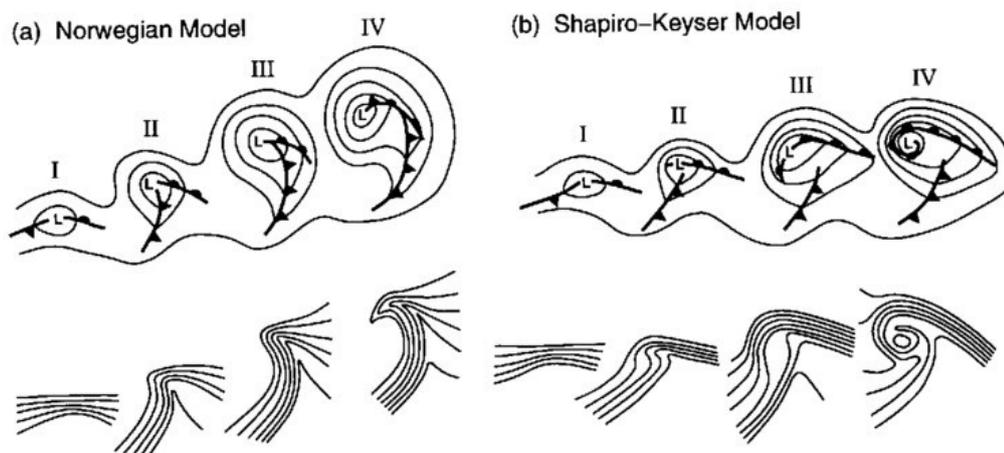


Рисунок 2.12 - Модель образования окклюзии по двум типам моделям (слева – норвежская, справа – Шапиро-Кейзер) [12]

В приведенной выше модели мы можем наблюдать образование облачной спирали. Формирование этой облачной полосы лучше всего описывается с помощью теории «конвейерной ленты». Она предполагает, что перенос воздушных масс относительно смещения фронтальной системы, движутся вместе со всей системой. К. Браунинг смог доказать, что система воздушных потоков

действует в верхних слоях атмосферы, когда как стандартная модель норвежского циклона описывает только погоду на нижних ее уровнях. Исследователь ввел термин «конвейерная лента» и разбил их на 3 типа: теплая, холодная и сухая.

«Теплый конвейер» - как правило движется на север перед холодным фронтом, а затем, догнав его, поворачивает на восток, начиная движение вверх к теплому фронту, влияя на его наклон. Достигает уровней от 500 гПа и более. Он движется вдоль линий геопотенциальной высоты (изобар) и, следовательно, движется за гребнем высокого давления к востоку. Отвечает за транспортировку теплого воздуха в формирующемся циклоне.

«Теплая конвейерная лента» оказывается в более холодном воздухе, это приводит к образованию свойственной для теплого фронта облачности (перистых, слоистых, слоисто-дождевых).

После того, как в циклоне начинает проявляться фронт окклюзии, «теплая конвейерная лента» становится ему параллельно, образуя над ним гребень тепла. Он влияет на конденсацию водяного пара, из-за этого на земную поверхность выпадает обильное количество осадков. Они зависят от влажности воздуха, поступающего на «тёплый конвейер»: чем воздух влажнее, тем больше выпадение осадков, чем меньше влажность, тем меньше осадков. Кроме того, количество осадков зависит от скорости углубления барического образования, так как в этом случае гребень тепла над окклюзией более вытянут по вертикали, следовательно, его общее влагосодержание выше.

«Холодный конвейер» - имеет свое начало в холодном воздухе под теплым фронтом, расположен севернее формирующего циклона, достигая центра циклона, он переориентирует свое движение на север.

«Холодная конвейерная лента» переносит холодную воздушную массу из нижней части тропосферы в тыловую часть циклона. Так же «Холодный конвейер» связан с количеством осадков в центральной части барического образования, так как относительно сухая воздушная масса, проходящая под влажным теплым воздухом, увлажняется. Но, если масса воздуха не была насыщена вла-

гой, то наоборот, на земную поверхность выпадет минимальное количество осадков. [13]

«Сухой конвейер» («сухое вторжение») - предполагает, что сухой воздух, исходя из нижней части тропосферы, переносится к холодному фронту. Далее он движется в тыловую часть барического образования. Когда «Сухой конвейер» достигает холодного фронта, он изменяет свое направление так, чтобы быть параллельно ему. Он отличается большой протяженностью по вертикали, низкой температурой и относительной влажностью. Эти факторы приводят к образованию относительно ясной погоды за холодным фронтом. [13]

Как итог, за холодным фронтом мы ожидаем абсолютно безоблачную погоду и если в дальнейшем «сухая конвейерная лента» окажется над поверхностью земли, то весь теплый сектор заполнится сухими воздушными массами. Это приведет к сухой и ясной погоде с небольшой конвекцией. На снимках со спутников это отчетливо заметно, в виде образовавшегося облачного «хвоста».

Но, как часто бывает, воздух из «Сухой конвейерной ленты» меняет свое направление. При движении его в верхние слои тропосферы приводит к неустойчивой синоптической обстановке. В этом случае создаются мощные конвективные ячейки, которые образуют многие опасные явления погоды, такие как: ливневые осадки, порывы ветра до 30 м/с, грозовую деятельность и так далее.

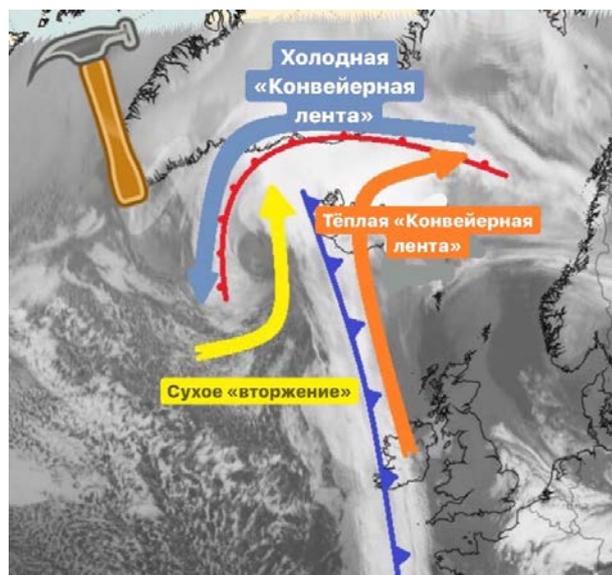


Рисунок 2.13 - Схема, показывающая положение «конвейерных лент», участвующих в процессе циклогенеза Шапиро-Кейзера. Красным отмечен теплый фронт, синим холодный. Оранжевая стрелка – «тёплый конвейер», голубая – «холодный конвейер», желтая – «сухой конвейер» [13]

К. Браунинг, с помощью своей модели, подтолкнул метеорологов к изучению процессов образования облаков и осадков. На основе его работ было открыто немало новых моделей эволюции циклонов.

Структура облачности на спутниковых снимках:

- На спутниковом снимке «теплая конвейерная лента» выглядит как антициклонически изогнутая облачная полоса, обычно находящаяся перед облачной полосой холодного фронта, но отделенная от нее.
- На ИК-изображениях серые оттенки облачной полосы «теплой конвейерной ленты» варьируются от серого до белого.
- Преобладает волокнистый характер, но могут быть и более крупные участки высокой перистой облачности.
- На спутниковом изображении облачность «теплого конвейера» значительно меньше; если и есть заметная облачность, то она состоит из небольших одиночных ячеек.

- В результате восходящей «теплой конвейерной ленты» серые оттенки на ИК-изображении становятся непрерывно ярче с юга на север или северо-восток, а затем снова уменьшаются.

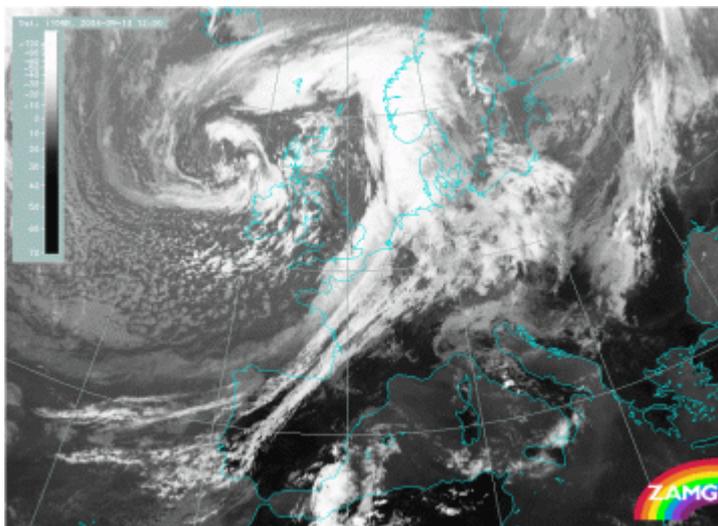


Рисунок 2.14 – Изображение со спутника Meteosat 8 IR 10.8 за 13 сентября 2004 г. 12:00 UTC

На спутниковом снимке видна антициклонически изогнутая облачная полоса «теплого конвейера», простирающаяся от Португалии через Бискайский залив над Францией до Германии, где она сливается с облачностью теплого фронта. «Теплая конвейерная лента» на ИК-снимках выглядит от серого до белого цвета.

«Теплая конвейерная лента» определяется как слой воздуха, который:

- берет начало в пограничном слое внетропического циклона;
- обычно поднимается с севера на северо-восток, образуя облачность из-за конденсации влажного воздуха;
- после поворота на юго-восток восходящее движение переходит в нисходящее, где происходит размывание облачности

Обычно «конвейерная лента» состоит только из средней и высокой облачности с почти отсутствующими или лишь незначительными осадками.

| Параметр | Описание |
|---------------------------|--|
| Осадки | <ol style="list-style-type: none"> 1. Небольшие или умеренные осадки при более густой облачности. 2. Ливни при слиянии облачности с фронтальной зоной 3. Иногда грозы наблюдаются в конвективных ячейках на задней кромке конвейерной ленты облачности. |
| Температура | Никаких существенных изменений |
| Ветер (вкл. Порывы ветра) | <ol style="list-style-type: none"> 1. В районе конвейерной ленты возможны сильные порывы ветра. 2. Изменение направления ветра в переднем части конвейерной ленты. |
| Другая информация | <ol style="list-style-type: none"> 1. Осадки не всегда достигают земли 2. В конвективных ячейках существует риск умеренного или сильного обледенения и турбулентности. |

Таблица 2.1 - Погодные условия в зоне «конвейерной ленты» [13]

В контексте данной работы данная модель интересна с точки зрения влияния на процесс образования фронтов в модели Шапиро-Кейзера.

2.5 Стинг-джеты

Шапиро и Кейзер смогли довольно точно объяснить физику эволюции циклона с помощью своей теории, но вопрос ветров с большими скоростями у холодного фронта и фронта окклюзии оставался нерешенным. В последствии К. Браунинг в ходе своей работы пришел к выводу, что эти явления являются результатом воздействия «холодного конвейера», при разделении которого возникают сильные потоки ветра. Они получили название стинг-джеты.

Данные ветра исходят из процесса отделения холодных воздушных масс от основной «Холодной конвейерной ленты». Ускоряясь, они резко спускаются к земной поверхности, скорость ветра в этом случае может достигать свыше 150 км/ч. Их большая разрушительная сила может вырывать вековые деревья с корнем, уносить автомобили и стирать с земли целые поселения. При этом, стинг-джеты приводят к быстрому охлаждению влажного воздуха, результатом этого происходит конденсация содержащейся в нем влаги с образованием дополнительной фронтальной облачности и осадков.

Это явление получило название локальной симметричной неустойчивости. [14]

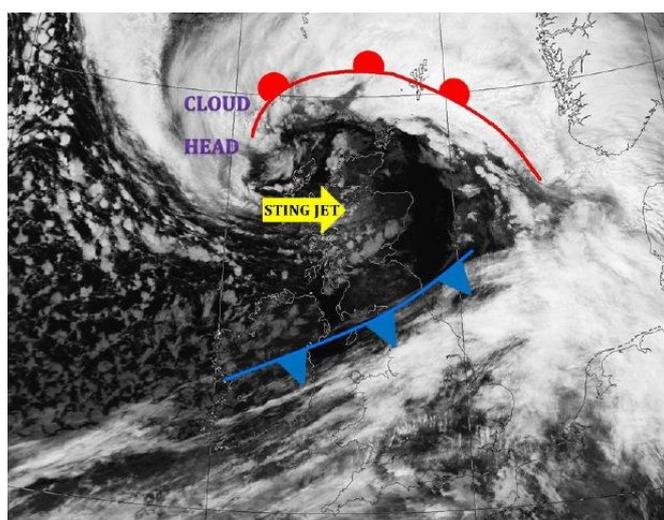


Рисунок 2.15 – Спутниковый снимок, показывающий положение стинг-джета, относительно барического образования [14]

На стадии заполнения циклона в центральной части теплый влажный воздух накапливается, при этом он со всех сторон окружен холодным воздухом, что приводит к образованию значительных градиентов температуры на его границах.

В 2012 году О. Мартинес-Альварадо опубликовал работу, посвященную тематическим исследованиям зимних циклонов в Северной Атлантике, в результате которой было установлено, что из 100 штормовых циклонов в период с 1989 по 2009 год около одной трети были связаны с стинг-джетами, поэтому факт их наличия можно связать с экстремальностью циклонов. [15]

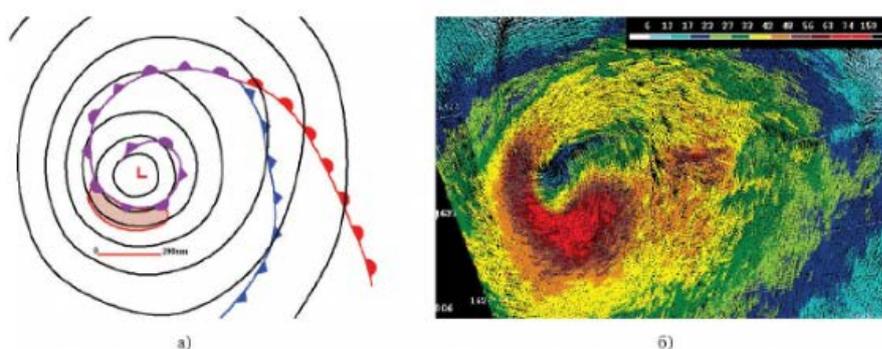


Рисунок 2.16 - Спутниковый анализ поля ветра в циклоне Шапиро-Кейзера

На рисунке «а» представлена схема расположения фронтов по модели Шапиро-Кейзера. Теплый фронт отмечен красной линией, холодный фронт – синей, фронт окклюзии – фиолетовым цветом. Черные линии указывают на линии равного давления (изобары).

На рисунке «б» представлен спутниковый снимок поля ветра со спутника QuickSCAT в циклоне Шапиро-Кейзера. (http://eumetrain.org/ePort_MapViewer/)

3 Глава

3.1 Параллельное сравнение норвежского циклона и циклона Шапиро-Кейзера

Для обоих циклонов проведем параллельное сравнение, опираясь на их этапы формирования. Как ранее было сказано, каждый тип циклона имеет 4 стадии своего существования:

1. Стадия волны
2. Молодой циклон
3. Максимальное развитие
4. Заполнение (Окклюдование)

Жизненный цикл норвежского циклона (22 февраля 2019 года, 09:00 UTC-24 февраля 2019 года, 06:00 UTC)

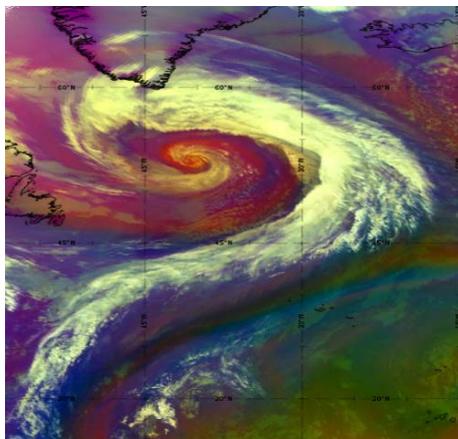


Рисунок 3.1 – Спутниковое изображение воздушных масс с сайта «eumetrain.org» за срок 04.05.21, 18:00 UTC

Жизненный цикл циклона Шапиро-Кейзера (14 марта 2019 года, 18:00 UTC-18 марта 2019 года, 00:00 UTC)

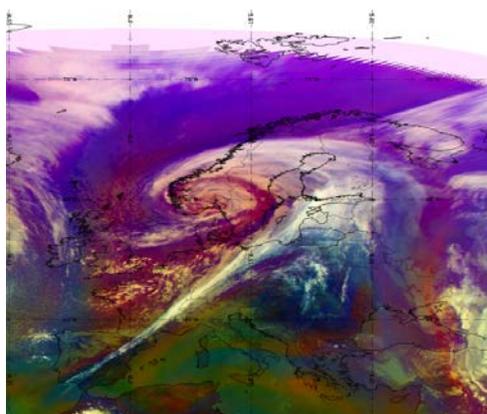


Рисунок 3.2 - Спутниковое изображение воздушных масс с сайта «eumetrain.org» за срок 17.03.19, 15:00 UTC

А. Начальная стадия

Оба примера циклонов исходят примерно из одних предпосылок: горизонтального градиента температуры в невозмущенном потоке вдоль бароклинной границы.

| Норвежский циклон (03.05.21, 06:00 UTC) | Циклон Шапиро-Кейзер (14.03.19, 18:00 UTC) |
|--|--|
| Первоначальная стадия характеризуется зональными температурными градиентами с теплой температурой воздушных масс на юге и холодной температурой на севере. | Исходным пунктом для этого типа является четко выраженная стационарная фронтальная зона, которая изолирует холодную воздушную массу на севере от более теплого воздуха на юге. |

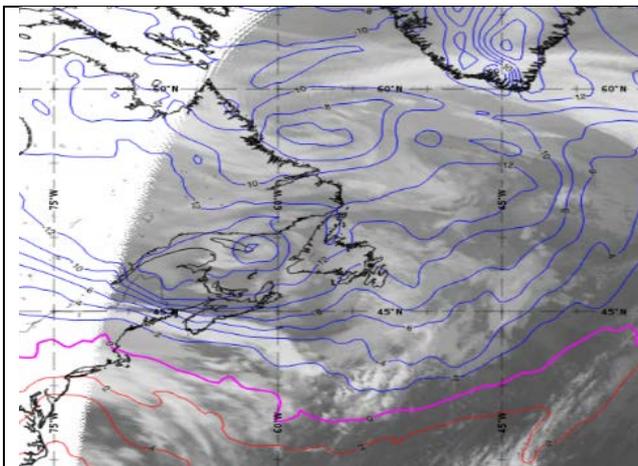


Рисунок 3.3: изображение SEVIRI IR10.8 мкм. Синие/фиолетовые/красные линии указывают на температуру на уровне 700 гПа

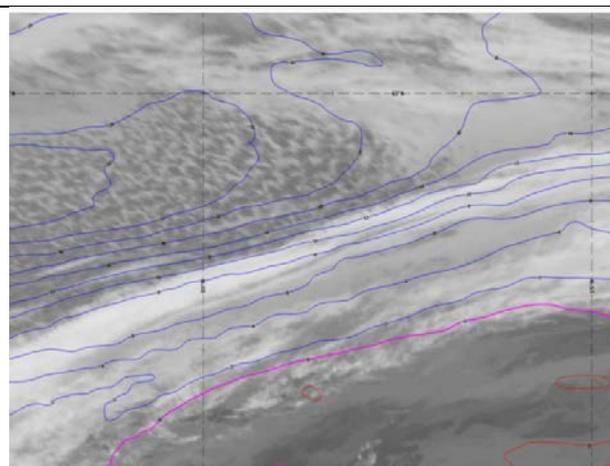


Рисунок 3.4: изображение SEVIRI IR10.8 мкм. Синие/фиолетовые линии указывают на температуру на уровне 700 гПа

На Инфракрасных снимках различается ориентированная с запада на восток бароклинная граница (то есть стационарный фронт).

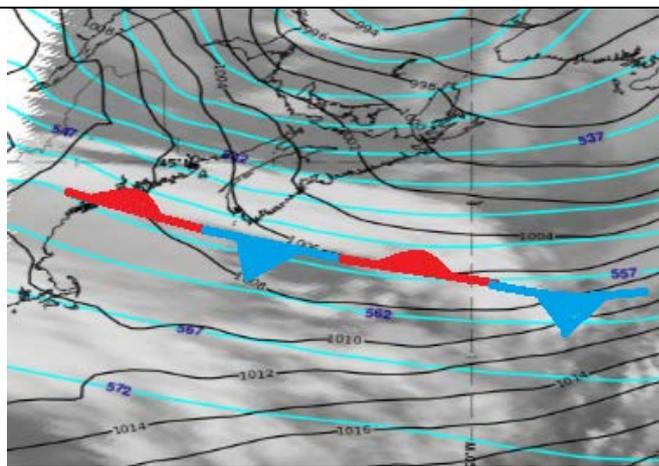


Рисунок 3.5: изображение SEVIRI IR10.8 мкм. Среднее давление на уровне моря (Черное) и геопотенциальная высота при 500 гПа (голубое)

На Инфракрасных снимках различается ориентированная с запада на восток бароклинная граница (то есть стационарный фронт).

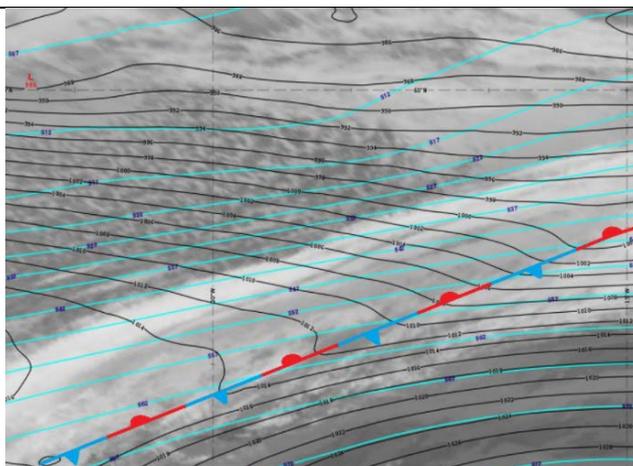


Рисунок 3.6: изображение SEVIRI IR10.8 мкм. Среднее давление на уровне моря (Черное) и геопотенциальная высота при 500 гПа (голубое)

Изолинии одинаковой скорости ветра с максимумом около 300 гПа сопровождается зональный температурный градиент.

Изолинии одинаковой скорости ветра с максимумом около 300 гПа сопровождается зональный температурный градиент.

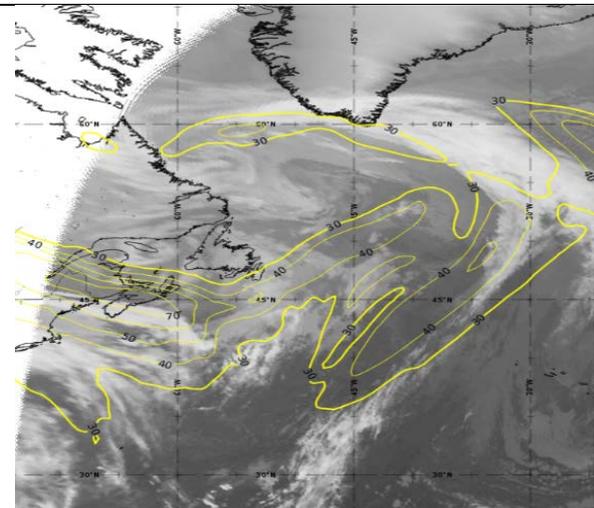


Рисунок 3.7: изображение SEVIRI IR10.8 мкм. Среднее давление на уровне моря (черный) и изотахи при 300 гПа (желтый)

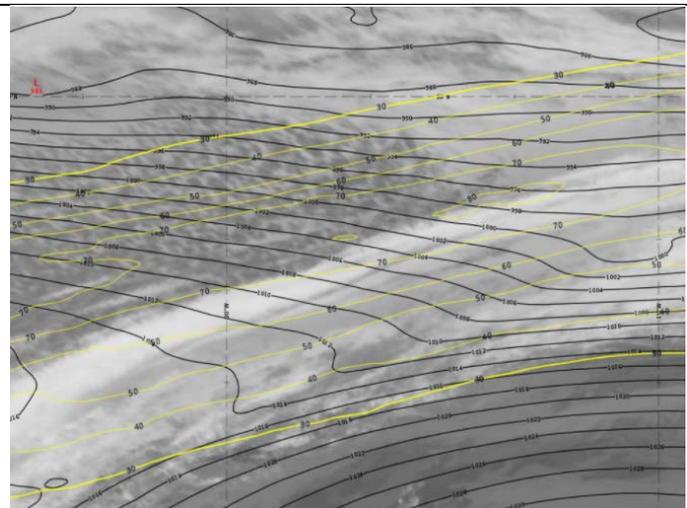


Рисунок 3.8: изображение SEVIRI IR10.8 мкм. Среднее давление на уровне моря (черный) и изотахи при 300 гПа (желтый)

Б. Стадия волны

Развитие минимальной поверхности инициируется динамикой верхнего уровня. Кривизна геострофического потока создает области дивергенции и конвергенции, которые влияют на вертикальное движение воздуха на более низких уровнях.

Существенных различий между типами норвежских циклонов и циклонами Шапиро-Кейзера на ранней стадии нет, за исключением нижнего потока верхнего яруса.

Норвежский тип циклона
(03.05.21, 15:00 UTC)

Циклон по типу Шапиро-Кейзера
(15.03.19, 06:00 UTC)

Вертикальная ось развивающегося циклона сильно наклонена к западу, а нижний поток при 500 гПа слегка расходится над поверхностью.

Вертикальная ось развивающегося циклона сильно наклонена к западу, а фоновый поток на уровне 500 гПа слегка сходится над поверхностью и является низким.

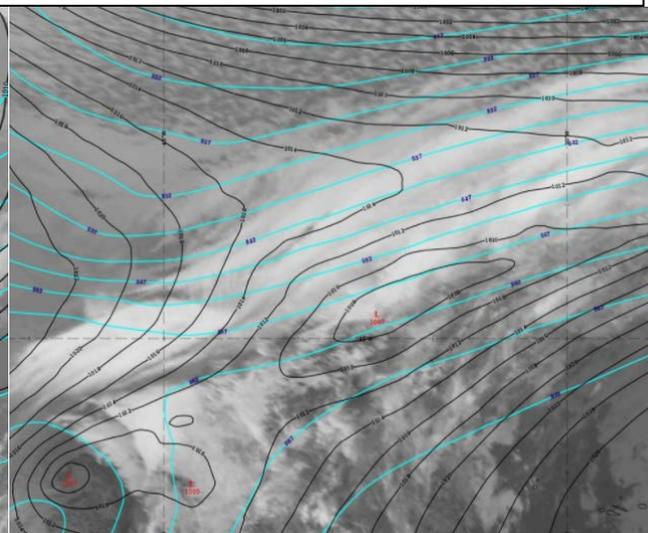
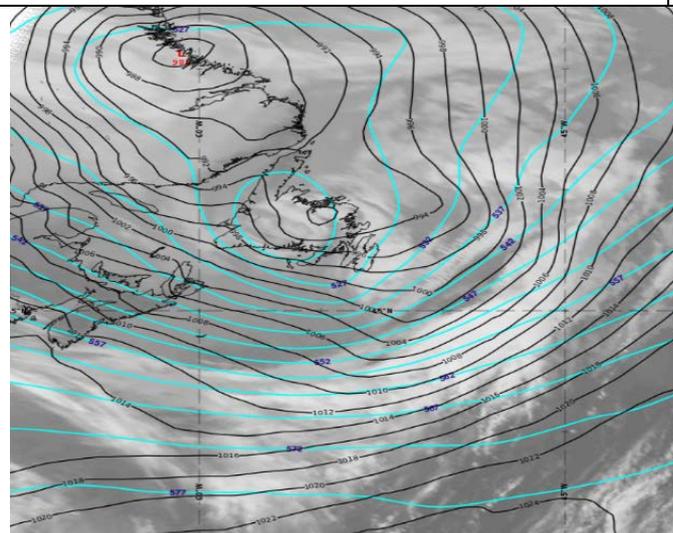
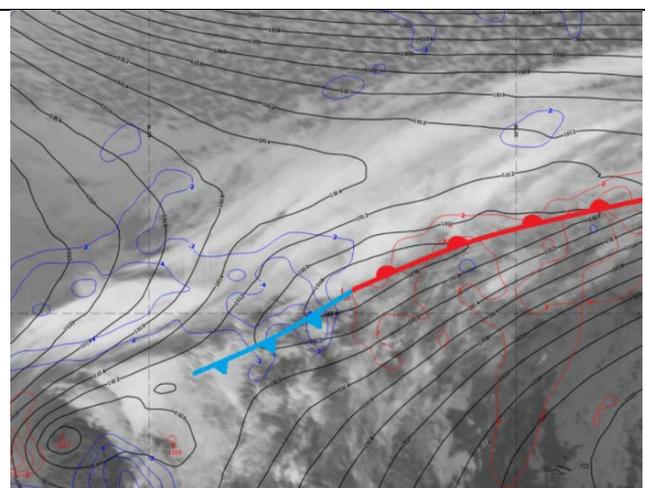
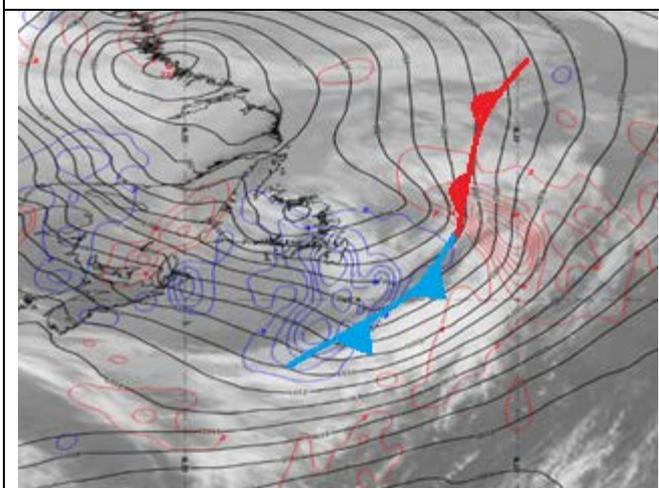


Рисунок 3.9: Изображение SEVIRI IR10.8 мкм. Среднее давление на уровне моря (черным) и геопотенциальная высота при 500 гПа (голубым)

Рисунок 3.10: Изображение SEVIRI IR10.8 мкм. Среднее давление на уровне моря (черным) и геопотенциальная высота при 500 гПа (голубым)

Поле адвекции температуры развиваются фронты теплого и холодного воздуха.

Поле адвекции температуры развиваются фронты теплого и холодного воздуха.



| | |
|---|---|
| Рисунок 3.11: Изображение SEVIRI IR10.8 мкм. Среднее давление на уровне моря и адвекция температуры при 850 гПа | Рисунок 3.12: Изображение SEVIRI IR10.8 мкм. Среднее давление на уровне моря и адвекция температуры при 850 гПа |
|---|---|

В. Молодой циклон

На стадии молодого циклона начинают проявляться основные отличия норвежской модели циклона от модели циклона Шапиро-Кейзера. В то время как для норвежского циклона теплый сектор начинает сужаться, оставляя центр циклона в холодном воздухе, мы замечаем, что центр циклона Шапиро-Кейзера захвачен теплым воздухом на более низких уровнях, с небольшим расстоянием между холодным фронтом и теплым. Теплый фронт начинает задействовать минимальное давление.

| Норвежский циклон (03.05.21, 21:00 UTC) | Циклон Шапиро-Кейзера (16.03.19, 21:00 UTC) |
|---|--|
| Во время фазы молодого циклона холодный и теплый фронт становится мощнее и легко обнаруживается на инфракрасных спутниковых снимках. Вертикальная ось циклона становится более крутой, поверхностное давление быстро уменьшается, а градиент давления увеличивается. Положение холодного фронта у Земли обозначено изломом изолиний | Во время фазы молодого циклона центральное давление циклона Шапиро-Кейзера быстро падает, и минимум давления верхнего уровня приближается к минимуму поверхности. Поверхностный холодный фронт отделяется от теплого фронта, так называемый холодный перелом (черная пунктирная линия). Холодный фронт верхнего яруса остается незатронутым продвижением теплого воздуха нижнего яруса и |

приземного давления (черные линии). Холодный и теплый фронты пересекаются под острым углом.

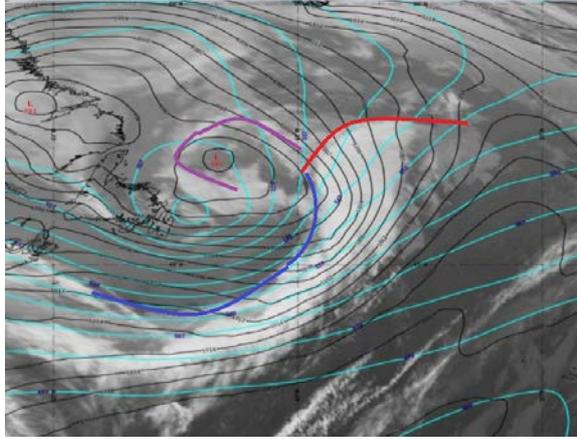


Рисунок 3.14: Изображение SEVIRI IR10.8 мкм. Среднее давление на уровне моря (Черное) и геопотенциальная высота при 500 гПа (голубое)

перемещается на юго-восток. В отличие от норвежской модели, приземный центр остается полностью в теплом воздухе на нижних уровнях.

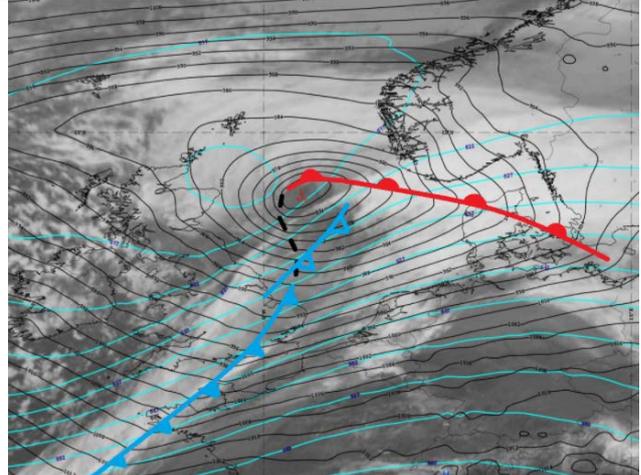


Рисунок 3.15: Изображение SEVIRI IR10.8 мкм. Среднее давление на уровне моря (Черное) и геопотенциальная высота при 500 гПа (голубое)

Углубление нижней поверхности усиливает циклоническую циркуляцию и приносит больше теплого воздуха на север и холодных воздушных масс на юг. Следовательно, адвекции тепла и холода становятся сильнее.

Следует отметить, что, в отличие от циклонов норвежского типа, температурное поле на нижних уровнях показывает ярко выраженную выпуклость теплого воздуха как раз при минимальном приземном давлении. Это отправная точка процесса теплой изоляции, где образуется теплое ядро циклона.

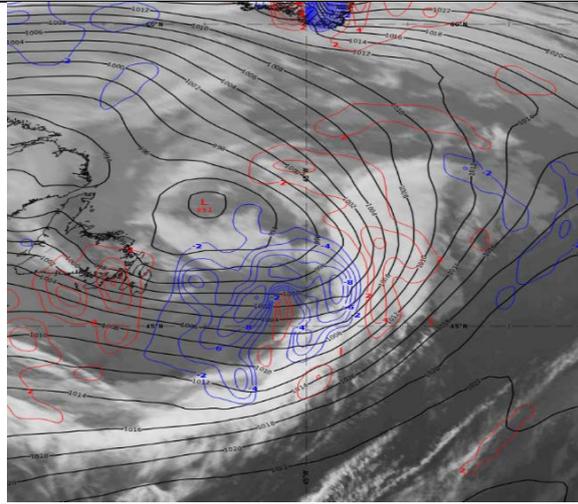


Рисунок 3.16: Изображение SEVIRI IR10.8 мкм. Температурная адвекция при 700 гПа

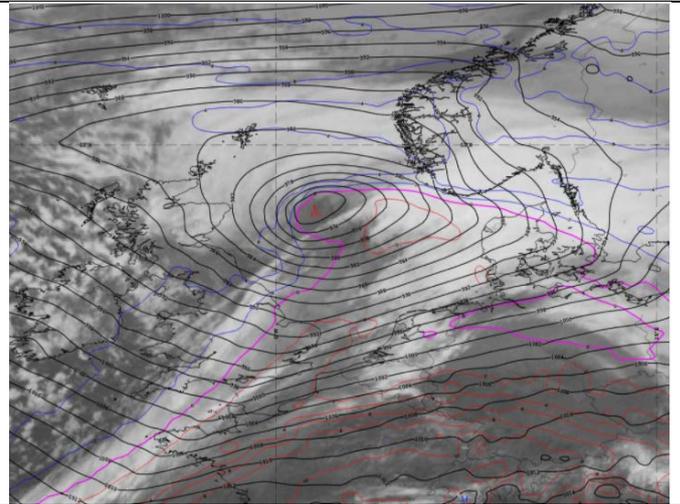


Рисунок 3.17: Изображение SEVIRI IR10.8 мкм. Среднее давление и температура на уровне моря 850 гПа

Расхождение верхнего уровня остается значимым.

Расхождение верхнего уровня остается значимым.

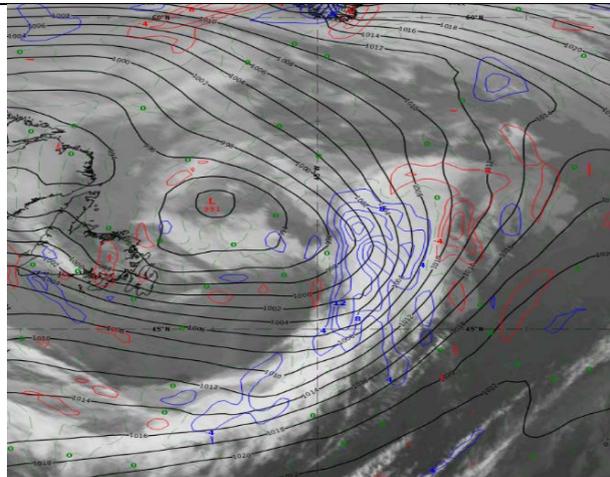


Рисунок 3.18: Изображение SEVIRI IR10.8 мкм. Среднее давление на уровне моря (Черное) и дивергенция (синее) при 300 гПа

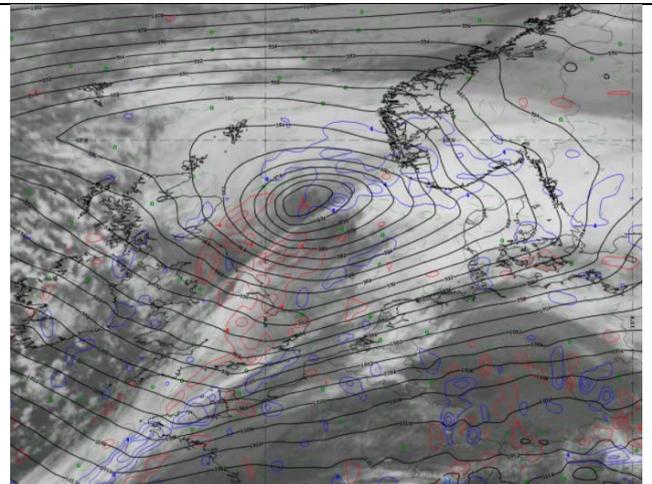
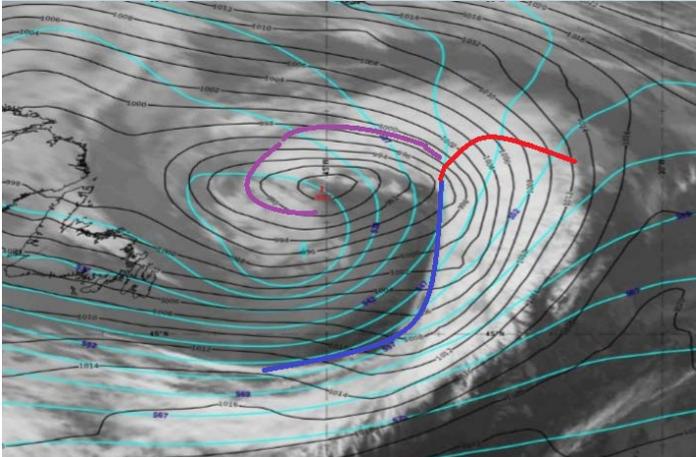
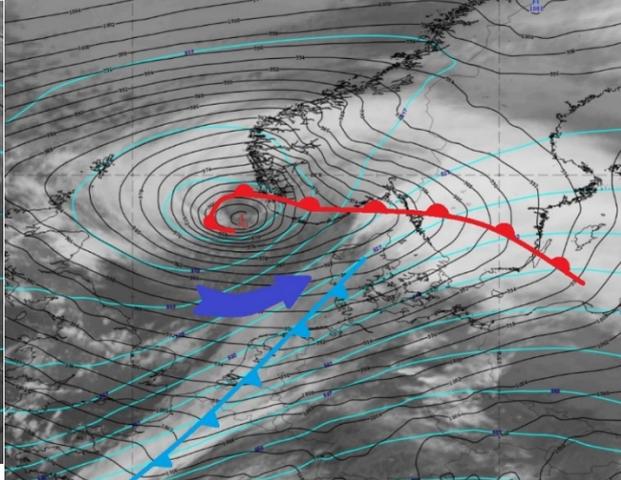
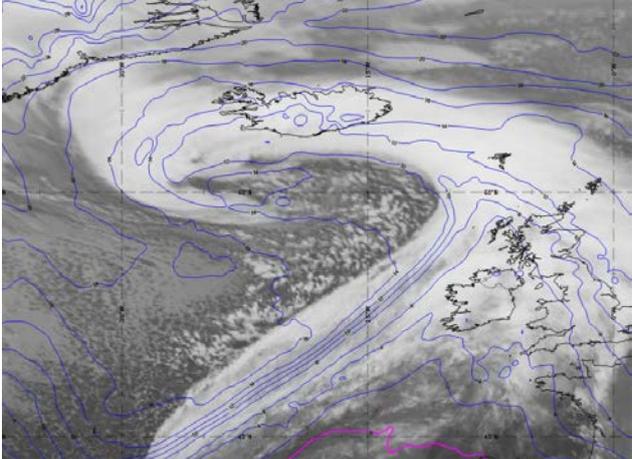
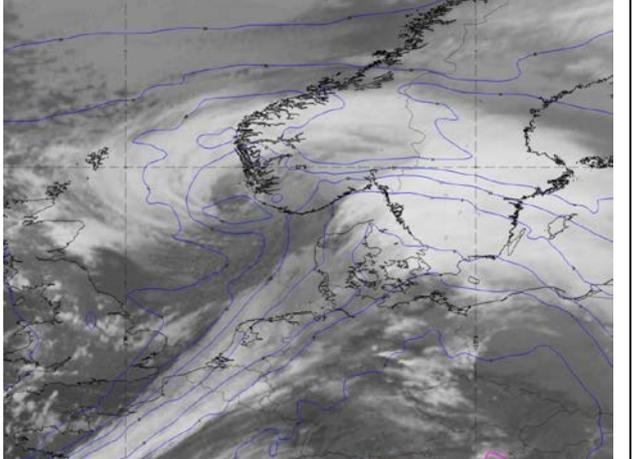


Рисунок 3.19: Изображение SEVIRI IR10.8 мкм. Среднее давление на уровне моря (Черное) и дивергенция (синее) при 300 гПа

Г. Стадия развития

| <p>Норвежский циклон (04.05.21, 06:00 UTC)</p> | <p>Шапиро-Кейзер (17.03.19, 03:00 UTC)</p> |
|--|--|
| <p>Стадия развития норвежского циклона характеризуется вертикальной суперпозицией минимумов давления каждого уровня. Центральное давление на уровне поверхности достигло своего минимального значения. Ближе к центру циклона быстро движущийся холодный фронт догоняет теплый фронт, образуя окклюзированный фронт. Внутри фронта теплый воздух из теплого сектора "сжимается" между более холодными воздушными массами, и воздух поднимается, высвобождая влагу.</p> | <p>На стадии развития теплое ядро циклона Шапиро-Кейзера становится уединенным от теплого сектора. Холодный воздух из-за холодного фронта выступает на северо-восток (синяя стрелка), начиная от верхних уровней и выступая в сторону нижних уровней. Выступающий холодный воздух протягивает холодный фронт к теплому фронту; теплый и холодный фронт образуют прямой угол, так называемый Т-образная кость характерно для циклонов Шапиро-Кейзера. На этой стадии развития окклюзии нет.</p> |
|  <p>Рисунок 3.20: Изображение SEVIRI IR10.8 мкм. Среднее давление на уровне</p> |  <p>Рисунок 3.21: Изображение SEVIRI</p> |

| | |
|--|---|
| <p>моря (черное) и геопотенциальная высота при 500 ГПа (голубое)</p> | <p>IR10.8 мкм. Среднее давление на уровне моря (черное) и геопотенциальная высота при 500 ГПа (голубое)</p> |
|--|---|

| | |
|--|--|
| <p>Температурные графики на разных уровнях показывают язык теплого воздуха, образующий окклюзионную облачную полосу. Теплый воздух исходит из теплого сектора и распространяется вокруг центра низкого давления. Холодный и теплый фронт хорошо разграничены температурным градиентом, который сильнее для холодного фронта.</p> | <p>Температурный график при 700 ГПа показывает фронтальный излом над Данией; здесь температурный градиент холодного фронта значительно ослабевает. Ядро циклона заполнено теплым воздухом, и холодный воздух, выступающий из-за холодного фронта в северо-восточном направлении, вскоре изолирует теплое ядро циклона.</p> |
|  |  |
| <p>Рисунок 3.22: Изображение SEVIRI IR10.8 мкм. Синие линии указывают на температуру 700 ГПа</p> | <p>Рисунок 3.23: Изображение SEVIRI IR10.8 мкм. Синие линии указывают на температуру 700 ГПа</p> |

Д. Стадия заполнения

| <p>Норвежский циклон (04.05.21, 18:00 UTC)</p> | <p>Шапиро-Кейзер (18.03.19, 00:00 UTC)</p> |
|---|---|
| <p>Во время стадии заполнения поверхность начинает заполняться, и давление в центре снова увеличивается. Теплый воздух окклюзионной облачной полосы смешивается с окружающим холодным воздухом, и градиенты температуры исчезают в полярной воздушной массе. Ядро норвежского циклона находится в холодном воздухе, и разница температур между полярным и тропическим воздухом уменьшилась.</p> <p>Окклюдированная облачная полоса, обернутая вокруг центра, начинает растворяться. В результате некоторые части облачности становятся невидимыми на ИК-изображениях, как в этом примере.</p> | <p>Во время стадии заполнения холодный фронт обволакивает теплое ядро циклона. Теплое ядро циклона находится в полярной воздушной массе, градиент температуры воздушной массы уменьшается.</p> <p>Циклоны Шапиро-Кейзера в данной стадии имеют процессы, характерные для норвежских циклонов, такие как слияние теплого и холодного фронта с образованием окклюзии. Это тот случай, когда холодный воздух обволакивает теплое ядро. Впоследствии холодный фронт соединяется с теплым фронтом и образует окклюзию.</p> |

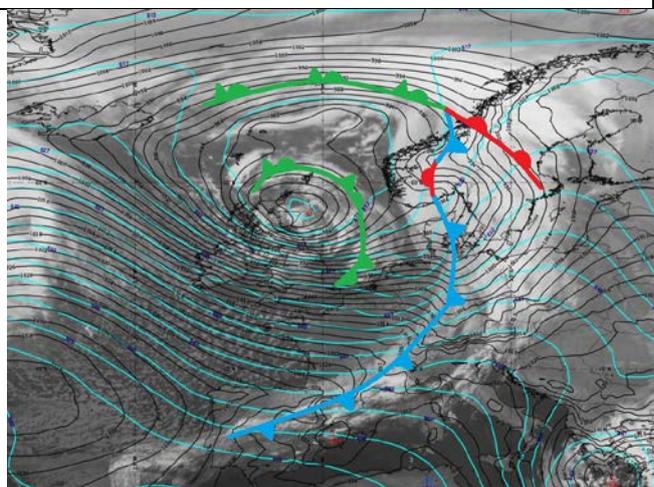


Рисунок 3.24: Изображение SEVIRI

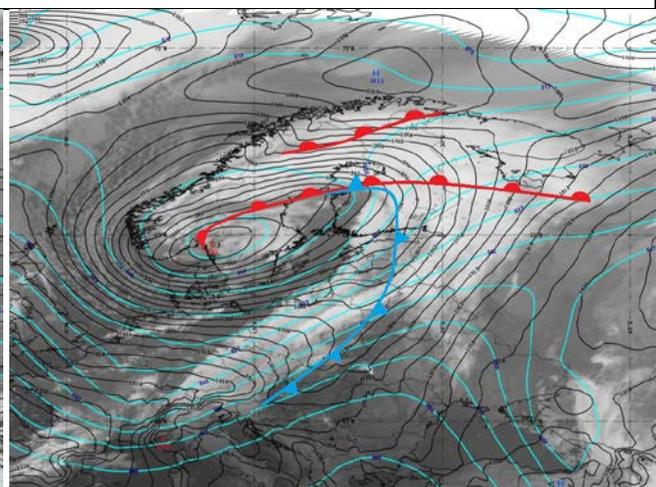


Рисунок 3.25: Изображение SEVIRI

| | |
|--|--|
| IR10.8 мкм. Среднее давление на уровне моря (черное) и геопотенциальная высота при 500 ГПа (голубое) | IR10.8 мкм. Среднее давление на уровне моря (черное) и геопотенциальная высота при 500 ГПа (голубое) |
|--|--|

| | |
|--|--|
| Растворяющаяся окклюдированная полоса облаков приводит к выравниванию температуры между полярными и тропическими воздушными массами. | Теплое ядро циклона Шапиро-Кейзера в конце своего жизненного цикла смешивается с окружающим холодным воздухом. |
|--|--|

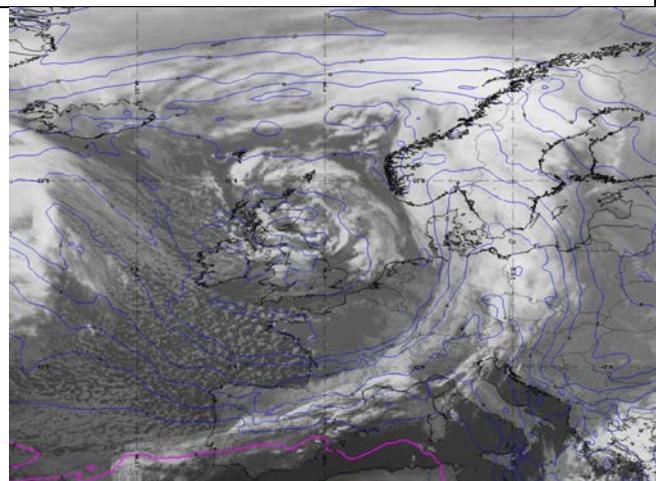


Рисунок 3.26: SEVIRI IR10.8 мкм. Синие/пурпурные линии указывают на температуру 700 ГПа.

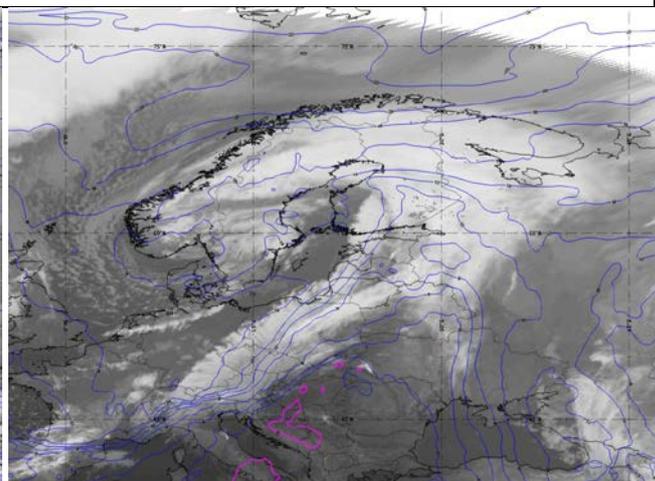


Рисунок 3.27: SEVIRI IR10.8 мкм. Синие/пурпурные линии указывают на температуру 700 ГПа.

Выводы:

На начальной стадии у циклонов оба фронта являются стационарными, имеющие одинаковый температурный градиент и отсутствие существенной разницы в распределении потенциальной температуры. Поэтому ранних признаков того, относится ли развивающийся циклон к норвежскому типу или к типу Шапиро-Кейзера на начальной стадии нет. На данном этапе определить тип циклона возможно только по спутниковым снимкам.

Наиболее важной особенностью циклона по типу Шапиро-Кейзера является динамика верхнего уровня, которая является триггером для развития всей системы.

Основным различием на стадии молодого циклона между норвежским типом и Шапиро-Кейзера является сильная теплая адвекция вблизи центра в циклоне Шапиро-Кейзера, которая контрастирует с норвежским циклоном, где холодный фронт догоняет теплый.

Из этого можно сделать несколько выводов:

- Расхождение на верхних уровнях атмосферы важно для развития обоих циклонов;
- Температурный градиент внутри теплого фронта норвежского циклона обычно слабее, чем температурный градиент теплого фронта у циклона Шапиро-Кейзера, но это не самое важное различие между двумя типами циклонов;
- Температурный градиент холодного фронта вблизи центра циклона резко уменьшается для типа Шапиро-Кейзера, но это не относится ко всему холодному фронту на данной стадии развития.

Распространение холодного воздуха в направлении теплого фронта, расположенному приблизительно под прямым углом, приводит к их взаимному сближению. Из-за этого образуется структура Т-образного смыкания в случае циклона по типу Шапиро-Кейзера.

В обоих циклонах движущая сила, то есть сильное расхождение на верхних уровнях, исчезла, потому что максимальная скорость ветра отошла от центра циклона на его периферию.

3.2 Вертикальный разрез циклона по типу Шапиро-Кейзера

1. Начальная стадия

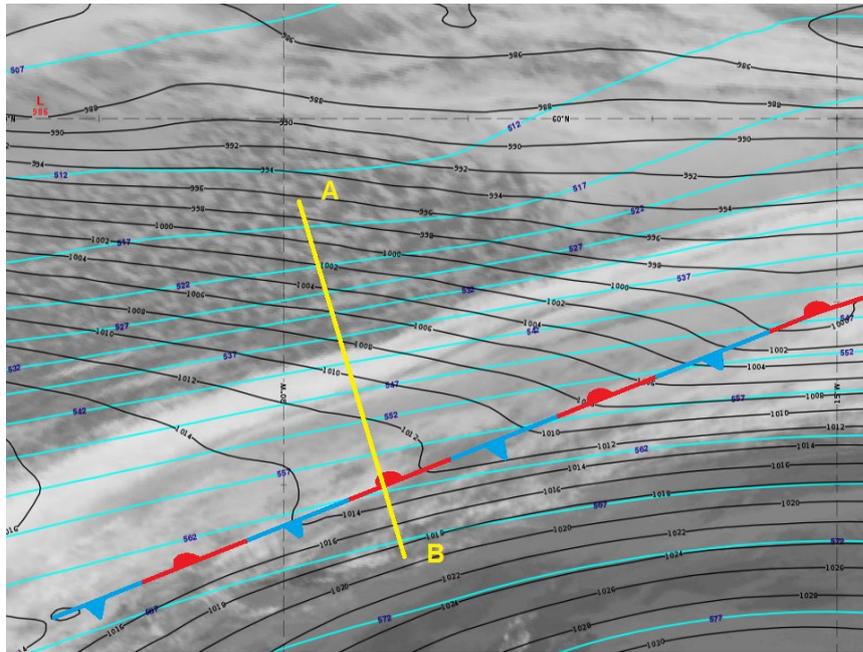


Рисунок 3.28 - Изображение SEVIRI IR10.8 мкм с желтой линией, указывающей положение вертикального поперечного сечения. Среднее давление на уровне моря (черным) и геопотенциальная высота при 500 ГПа (голубым)

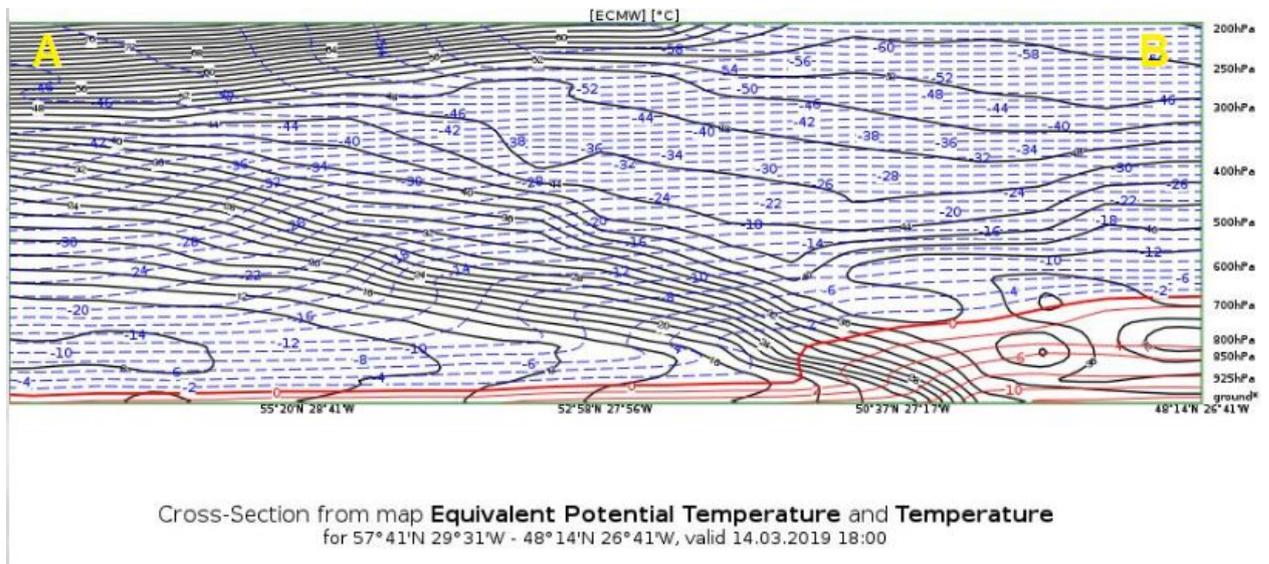


Рисунок 3.29 – Вертикальный разрез по температуре (с севера на юг), сделанного через сайт «eumetrain.org». Объяснение в тексте

Вертикальный разрез через бароклинную границу показывает выраженный температурный градиент с сильным наклоном изолиний эквивалентной по-

тенциальной температуры. Это явный признак медленно движущегося или неподвижного фронта.

2. Стадия волны

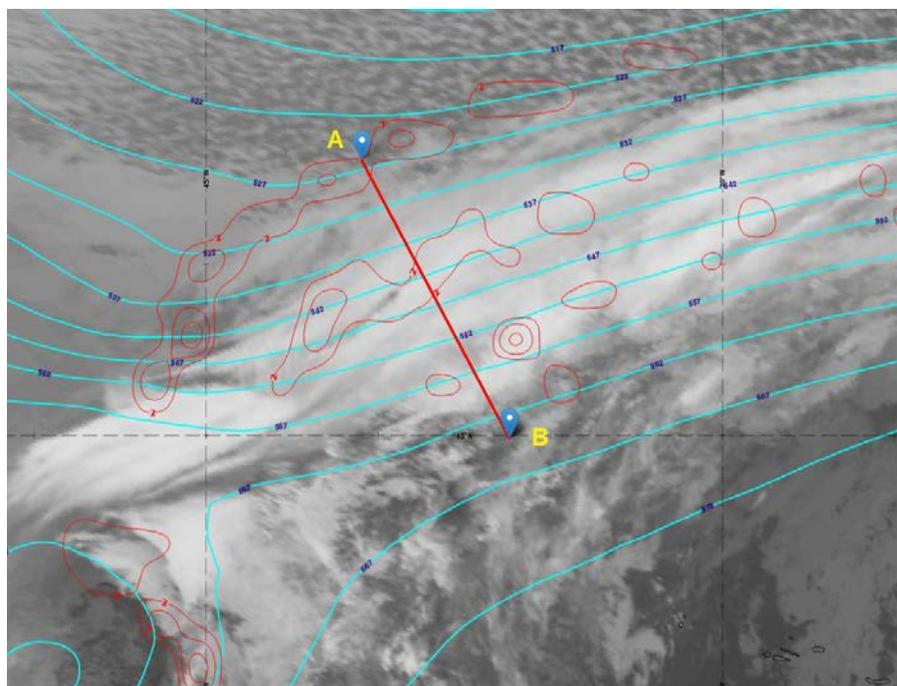
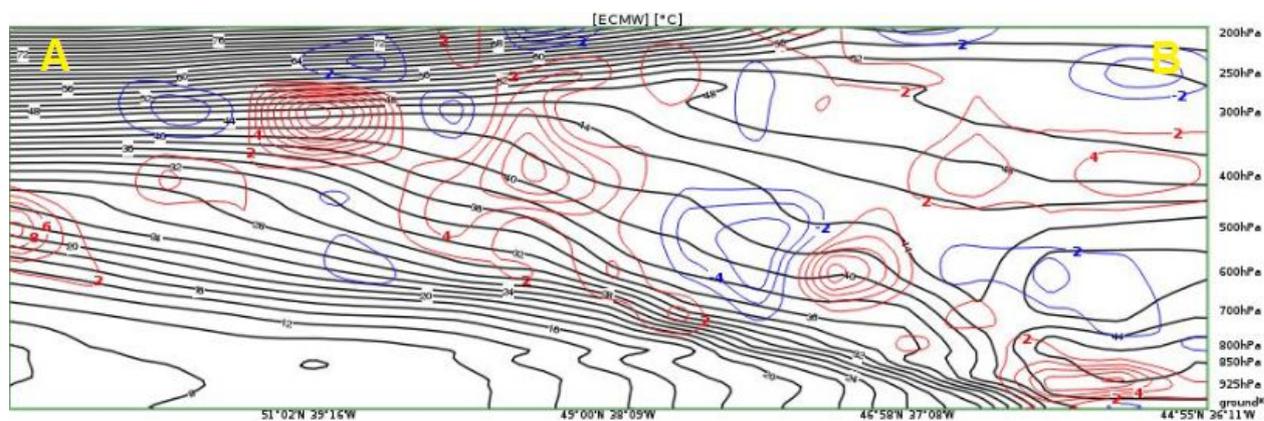


Рисунок 3.30 - Изображение SEVIRI IR10.8 мкм с красной линией, указывающей положение вертикального разреза. Голубые линии показывают высоту 500 гПа, красные изолинии-адвекцию циклонической завихренности на том же уровне



Cross-Section from map **Equivalent Potential Temperature and Vorticity Advection**
for 53°03'N 40°29'W - 44°55'N 36°11'W, valid 15.03.2019 06:00

Рисунок 3.31 – Вертикальный разрез (с северо-запада на юго-восток) модели ECMWF, сделанного через сайт «eumetrain.org». Объяснение в тексте

Вертикальный разрез через область низкой поверхности показыва-ет возрастающую положительную адвекцию циклонического вихря с высотой на переднем крае. Это необходимое условие для подъема воздушной массы.

3. Стадия молодого циклона

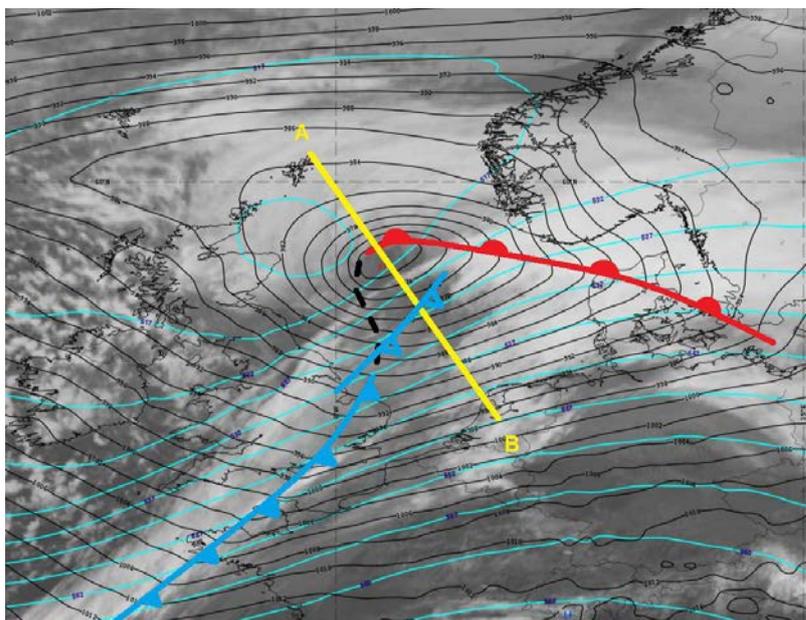


Рисунок 3.32 - Изображение SEVIRI IR10.8 мкм с желтой линией, указывающей положение вертикального поперечного сечения. Голубые линии показывают высоту 500 ГПа, а черные изолинии - давление на уровне моря

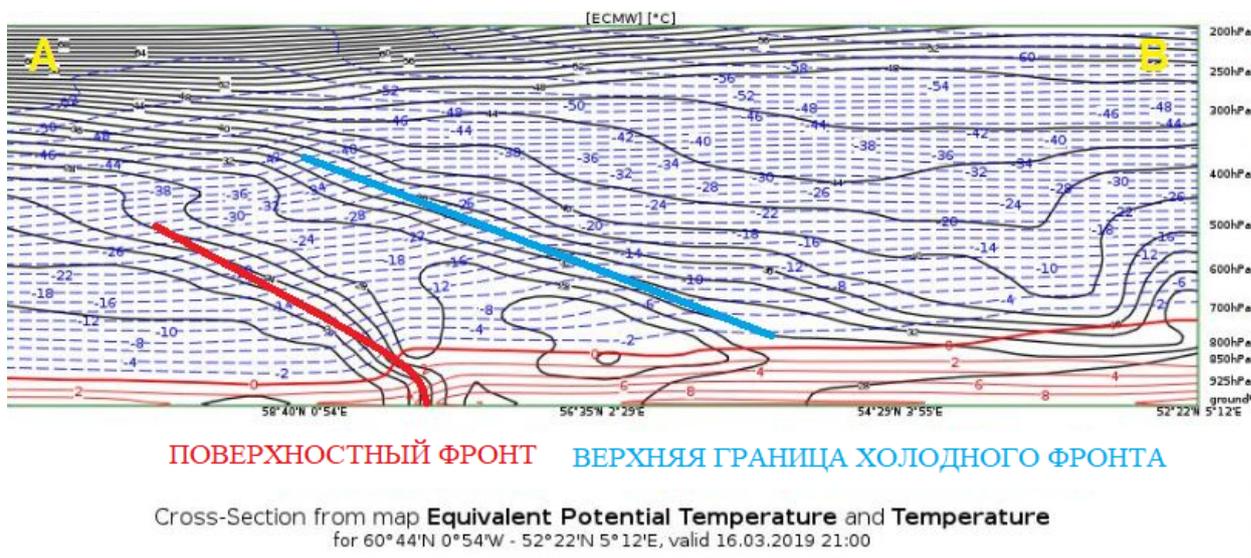


Рисунок 3.33 – Вертикальный разрез (с северо-запада на юго-восток) модели ECMWF, сделанного через сайт «eumetrain.org». Объяснение в тексте

Вертикальный разрез через ядро циклона Шапиро-Кейзера показывает две фронтальные зоны: поверхностный фронт (красный) и холодный фронт на верхнем уровне (синий). Холодный фронт был деформирован из-за выступающего теплого воздуха. Теперь он отделяет ядро циклона от холодного воздуха на севере.

Теплый фронт, обозначенный как “поверхностный фронт” на рисунке 3.33, показывает, что на стадии молодого циклона фронтальная зона все еще демонстрирует холодный фронт. Это нам показывает высокий температурный градиент и более крутая часть фронтальной зоны вблизи земной поверхности. На самом деле, с точки зрения эволюции, это бывший холодный фронт, который теперь ограничивает недавно образовавшуюся теплую воздушную массу.

4. Стадия максимального развития

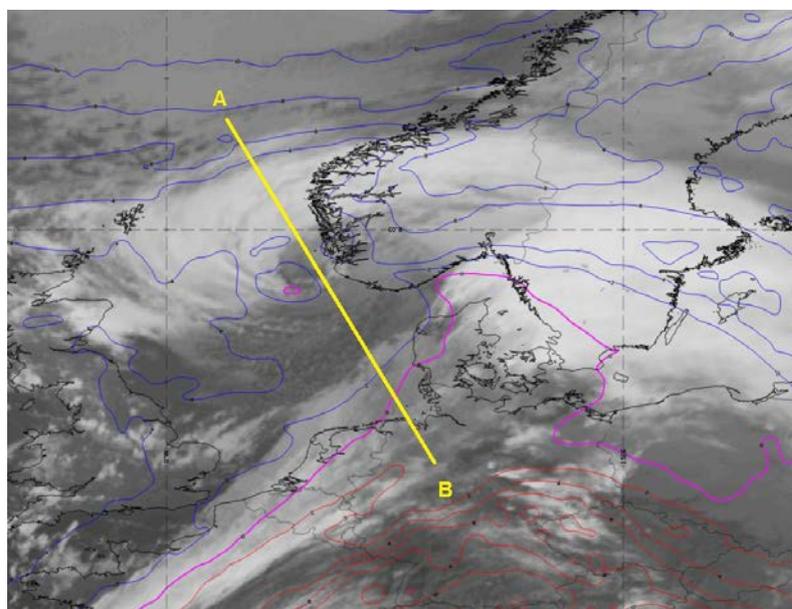


Рисунок 3.34 - Изображение SEVIRI IR10.8 мкм с желтой линией, указывающей положение вертикального поперечного сечения, синие/пурпурные линии указывают на температуру 850 Гпа

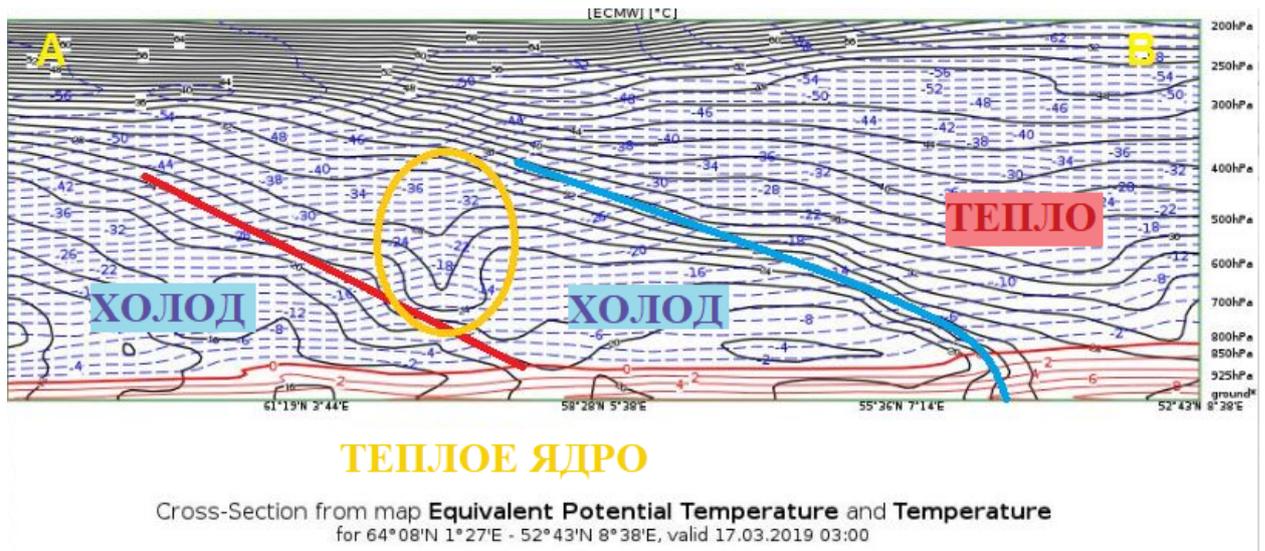


Рисунок 3.35 - Вертикальный разрез (с северо-запада на юго-восток) модели ECMWF, сделанного через сайт «eumetrain.org». Объяснение в тексте

Вертикальный разрез через центр ядра циклона Шапиро-Кейзера показывает две отдельные фронтальные зоны: холодный фронт (синий) и другая фронтальная зона, отделяющая ядро от холодного воздуха на севере (красный). Эта вторая фронтальная зона имеет четкие характеристики теплого фронта, поэтому Шапиро и Кейзер обозначили ее как теплый фронт, а не как окклюзию.

5. Стадия заполнения

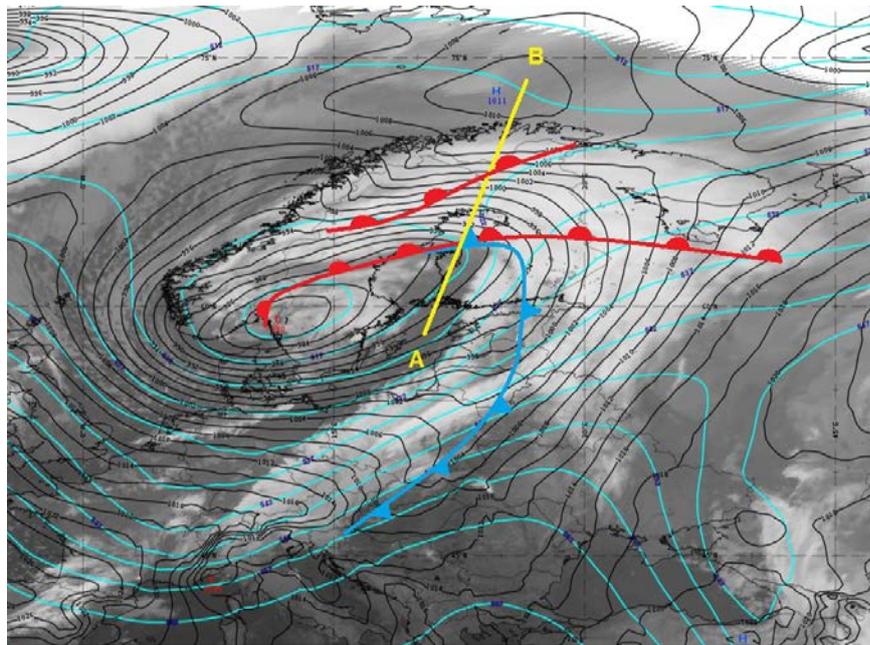
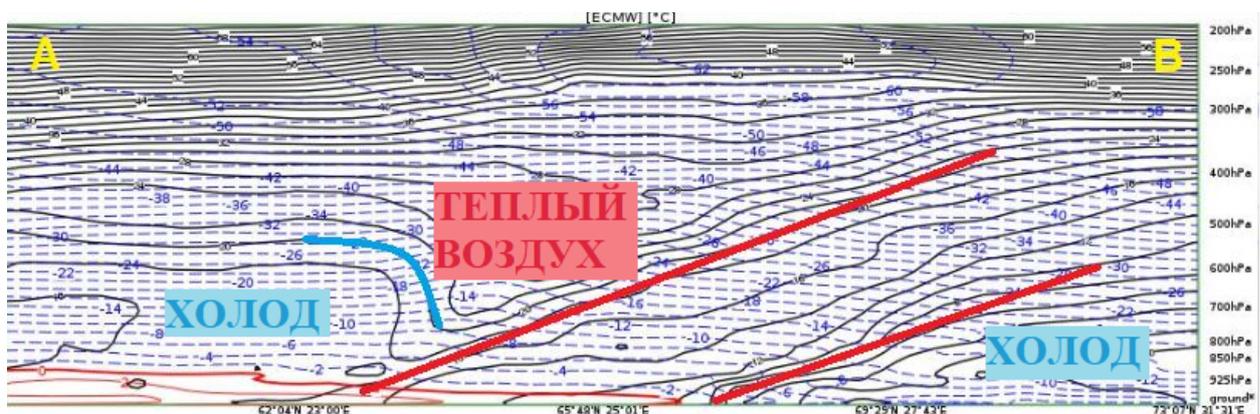


Рисунок 3.36 - Изображение SEVIRI IR10.8 мкм с желтой линией, указывающей положение вертикального сечения, среднее давление на уровне моря (черное) и геопотенциальную высоту при 500 ГПа (голубое)



Cross-Section from map **Equivalent Potential Temperature and Temperature** for 58°19'N 21°25'E - 73°07'N 31°31'E, valid 18.03.2019 00:00

Рисунок 3.37 – Вертикальный разрез (с юго-запада на северо-восток), сделанный через сайт «eumetrain.org». Объяснение в тексте

Вертикальный разрез через область слияния теплого и холодного фронтов показывает типичную картину окклюзии с теплым фронтом; холодный фронт не достигает земли, а поверхностный фронт является теплым фронтом.

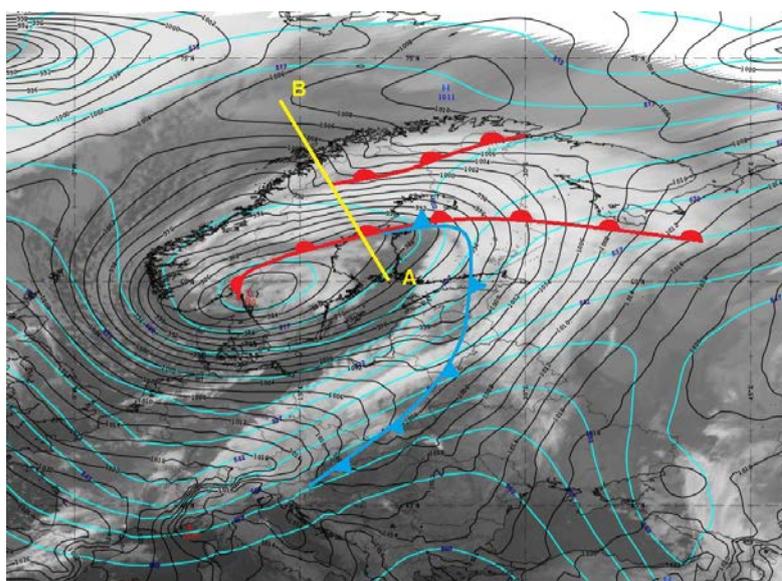


Рисунок 3.38 - Изображение SEVIRI IR10.8 мкм с желтой линией, указывающей положение вертикального поперечного сечения, среднее давление на уровне моря (черное) и геопотенциальную высоту при 500 ГПа (голубое)

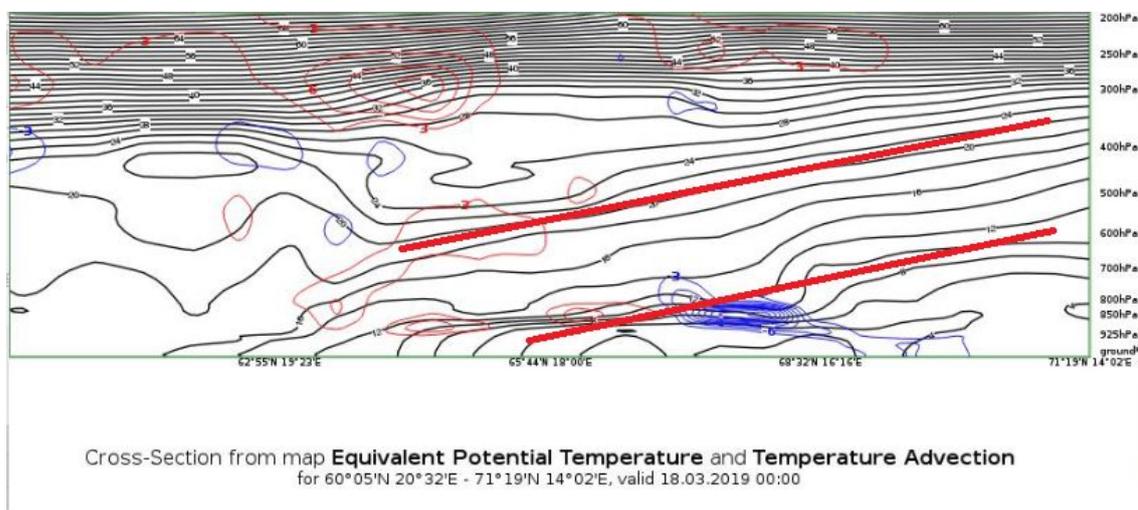


Рисунок 3.39 – Вертикальный разрез (с юго-востока на северо-запад, сделанный через сайт «eumetrain.org»). Объяснение в тексте

Вертикальный разрез, проходящий через границу, огибающую ядро циклона Шапиро-Кейзера, показывает типичную картину медленно движущегося фронта: слабый наклон эквивалентной потенциальной температуры и слабая адвекция теплого воздуха.

3.3 Анализ особенностей циклогенеза по типу Шапиро-Кейзера с использованием реанализа

Данные реанализа - Era 5 с разрешением $0.25^\circ \times 0.25^\circ$.

Реанализ циклона по норвежскому типу.

Проанализировав карты реанализа, визуализированные с помощью Open GrADS и просмотрев спутниковые снимки с сайта «eumetrain.org», видим, что циклон по норвежскому типу зародился 21.02.19 года в 00:00 часов возле восточного берега США. На спутниковых снимках он еще слабо прослеживается. Заполнился 24 февраля 2019 года в 06:00 часов. Продолжительность времени жизни циклона составила 78 часов.

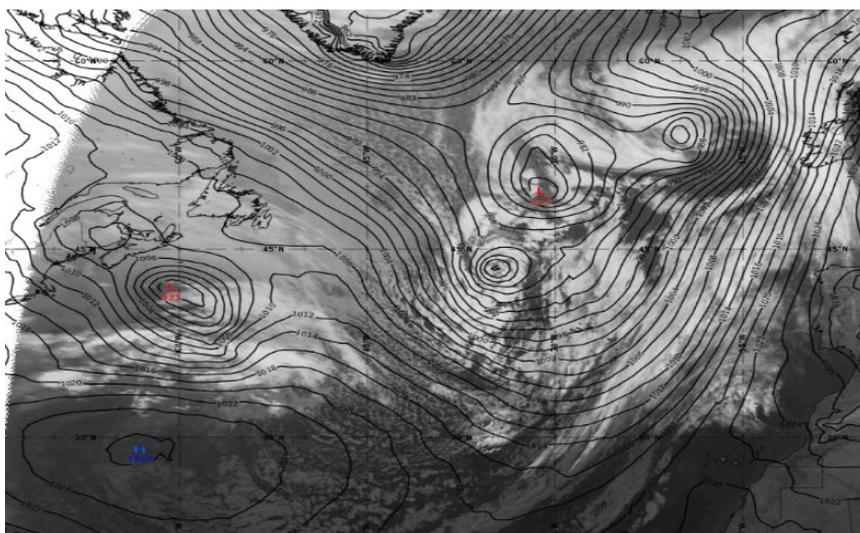


Рисунок 3.40 - Спутниковый снимок с давлением на уровне моря с сайта «eumetrain.org» за срок 22.02.19 00:00 UTC

Рассмотрим реанализ поля давления через сутки после образования циклона за 00:00 и 12:00 часов 22 февраля 2019 г.

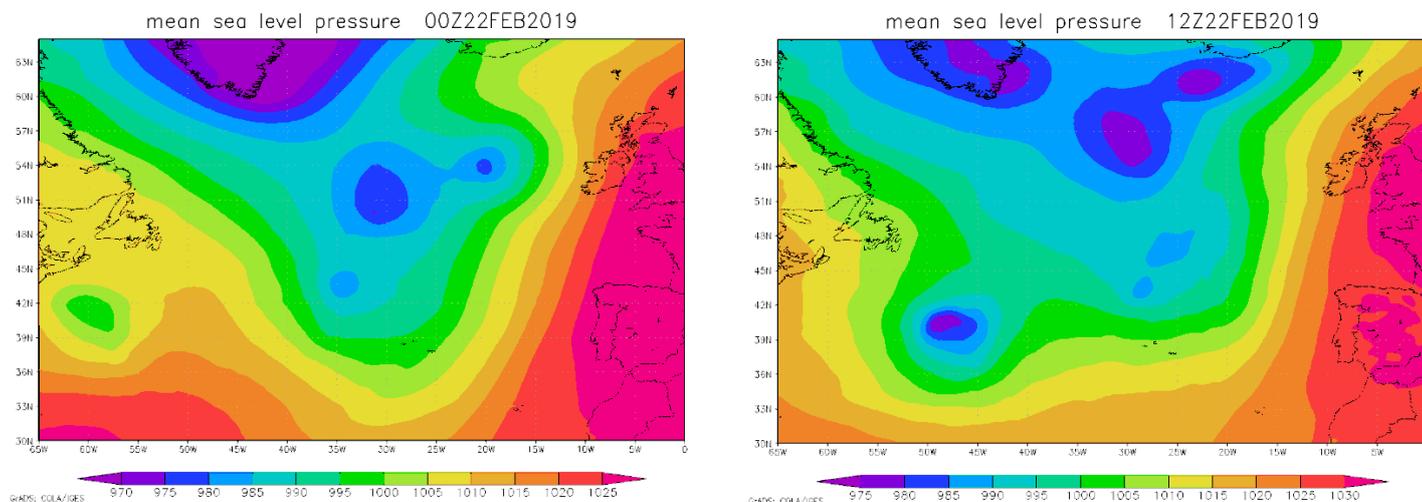
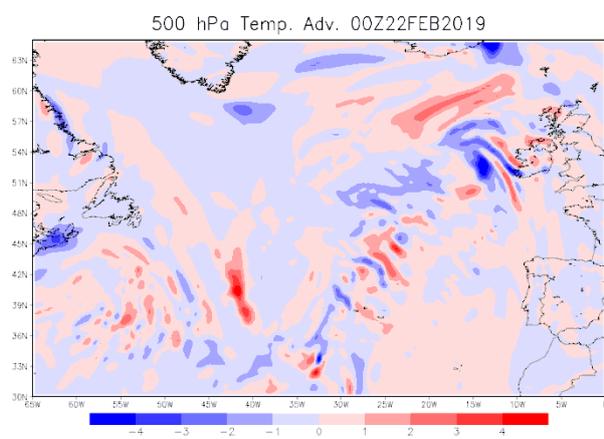


Рисунок 3.41 – Поле приземного давления за 22.02.2019 00:00 UTC и 12:00 UTC

Давление в центре начало падать. 22.02.19 в 00:00 часов оно составляло 995-1000 гПа, а уже через 12 часов давление в центре упало до 975-980 гПа. Это связано с углублением циклона.

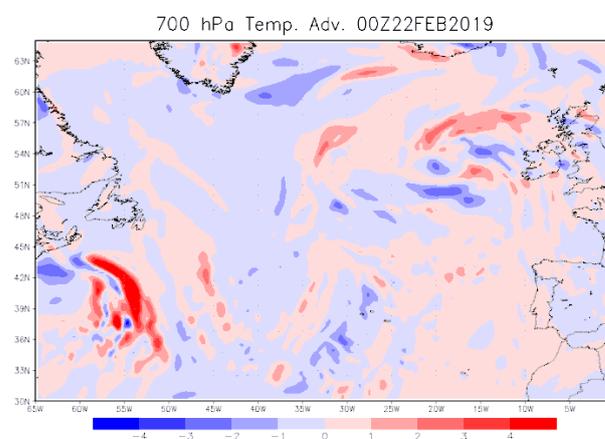
Далее рассмотрим адвекцию температуры на высотах и у земли. (Рисунок 3.42). Адвекции в реанализе нет, она была рассчитана самостоятельно.

А



В

Б



Г

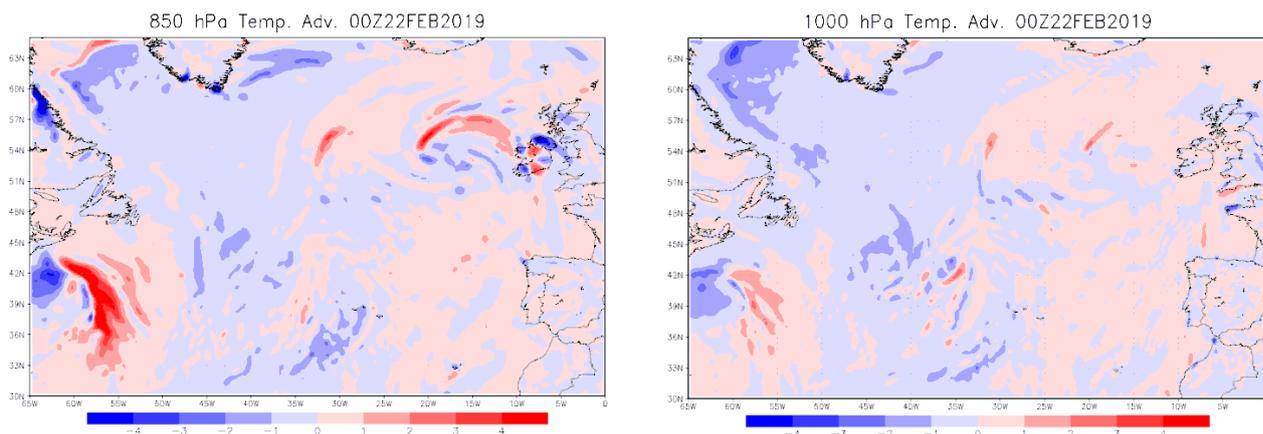


Рисунок 3.42 - Адвекция температуры на высотах и у земли с использованием реанализа за срок 22.02.2019 г. 00:00 UTC

Для развития циклона необходима адвекция холода в его тыловой части. Проанализировав карты реанализа, мы видим, что в нижней тропосфере наблюдалась сильная адвекция холода (от -1,0 до -2,0 градуса в час).

Рассмотрим циклоническую завихренность в момент образования циклона (Рисунок 3.27). Максимум вихря наблюдается до высоты 950 гПа, положительное значение завихренности наблюдается до высоты 700 гПа.

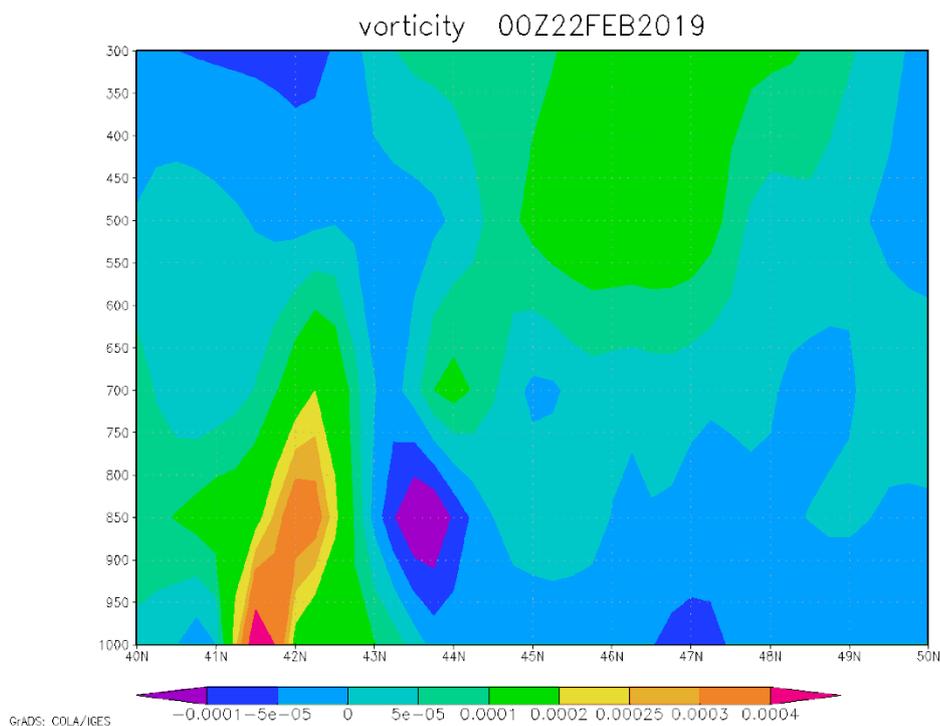


Рисунок 3.43 - Вертикальный разрез циклонического вихря с использованием реанализа за срок 22.02.19 00:00 UTC

К 12 часам 22.02.19 циклонический вихрь имеет свой максимум до 450 гПа. Это говорит нам о том, что барическое образование растет.

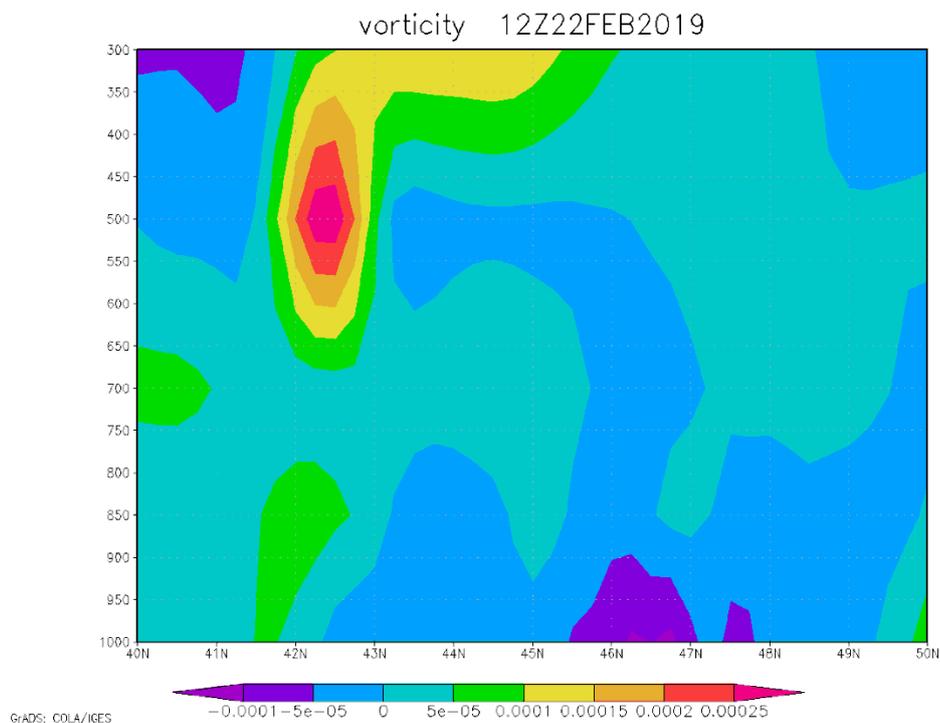
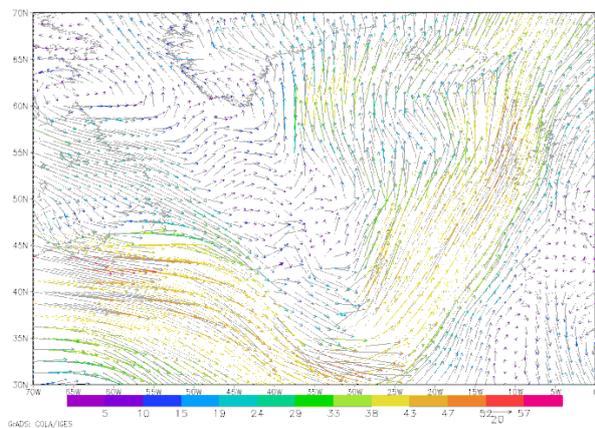


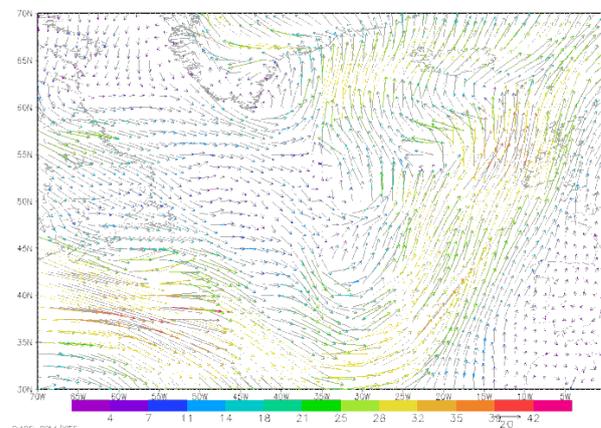
Рисунок 3.44 Вертикальный разрез циклонического вихря с использованием реанализа за срок 22.02.19 12:00 UTC

А



В

Б



Г

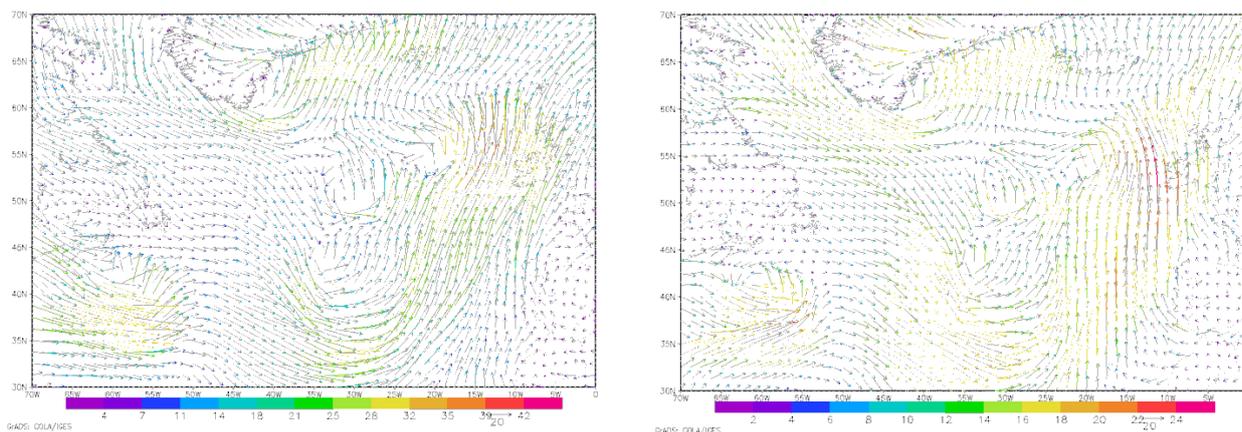


Рисунок 3.45 - Карта реанализа по ветру на высотах за срок 22.02.19 00:00 UTC

- А – 500 гПа
- Б – 700 гПа
- В – 850 гПа
- Г- 1000 гПа

Анализ ветра на высотах и у земли показывает, что максимальные скорости ветра наблюдаются на высоте примерно 5500 м. Циклон зародился с левой стороны струйного течения.

Реанализ циклона по типу Шапиро-Кейзера.

15 марта 2019 в Северо-Ледовитом океане наблюдался циклон по типу Шапиро-Кейзера. Рассмотрим и его.

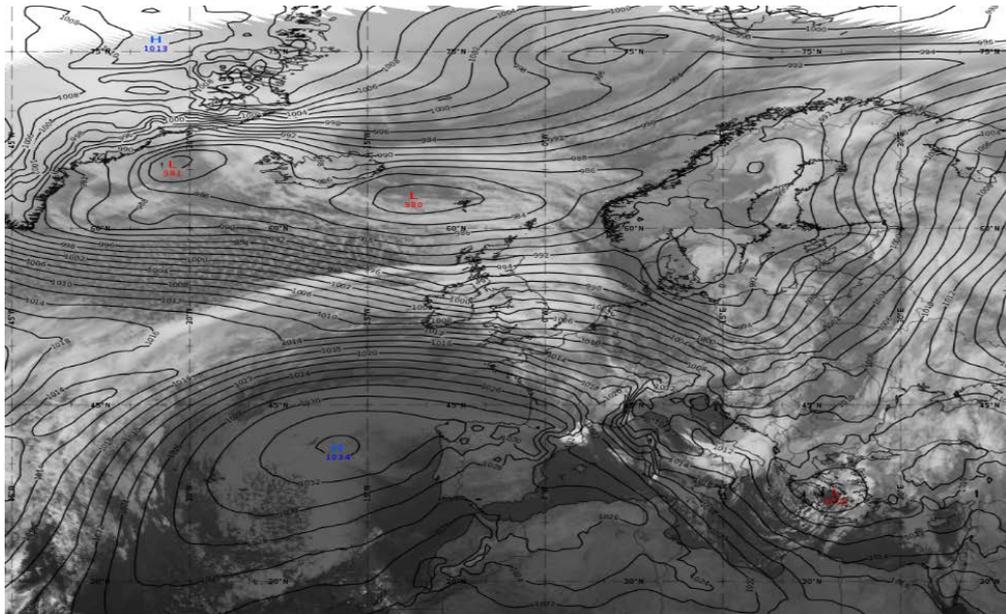


Рисунок 3.46 - Спутниковый снимок с приземным давлением с сайта «eumetrain.org» за срок 15.03.19 00:00 UTC

Данный циклон образовался на 45 широте. А к моменту максимального развития сместился к берегам Великобритании.

Рассмотрим карты реанализа за 15.03.19 года в момент его образования.

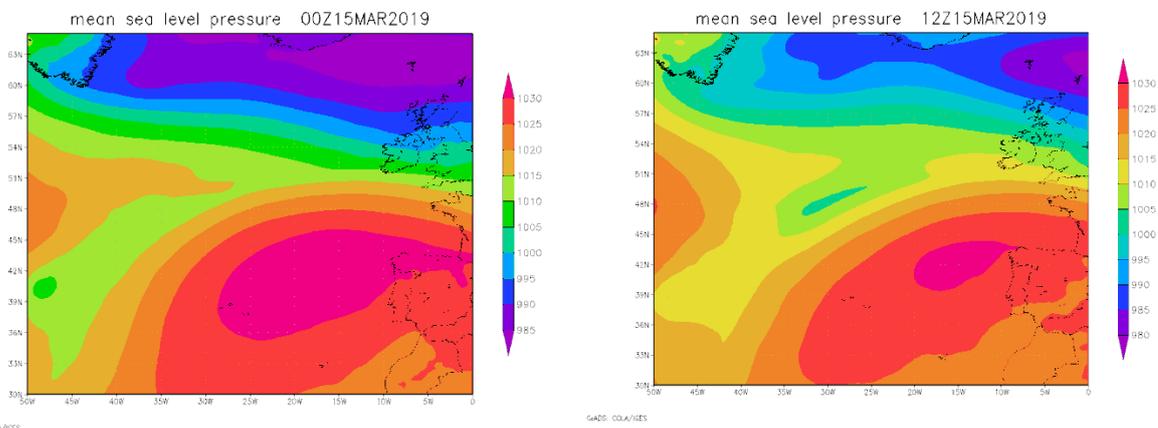
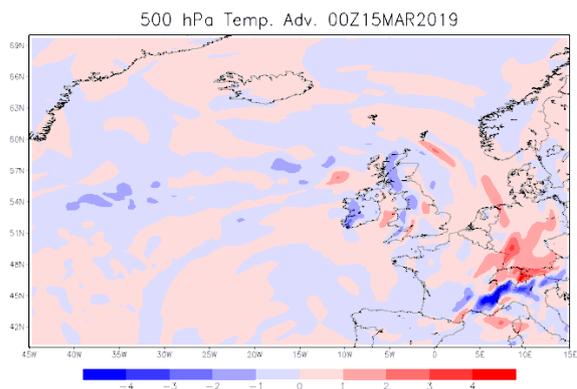


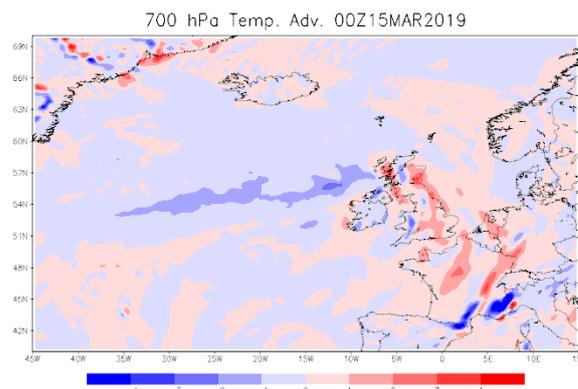
Рисунок 3.47 - Поле приземного давления с использованием реанализа за срок 15.03.2019 00:00 UTC, 12:00 UTC

По карте приземного давления видно, что за 12 часов своего существования, давление в центре циклона упало на примерно на 10 гПа (00:00 часов – 1007 гПа, 12:00 часов – 997 гПа). Циклон сместился на северо-восток.

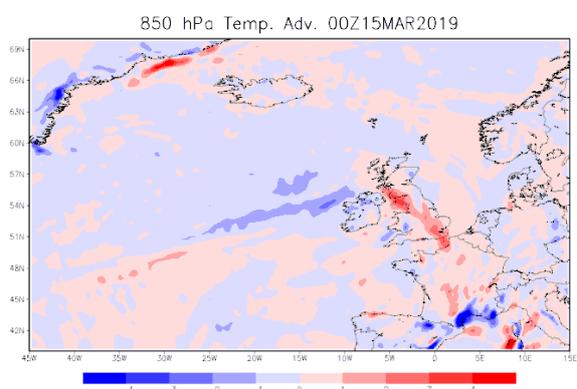
А



Б



В



Г

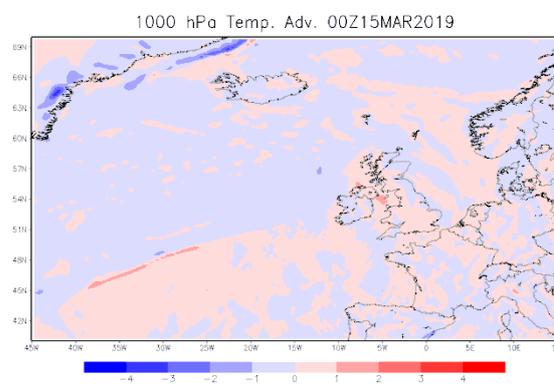


Рисунок 3.48 - Адвекция температуры на высотах с использованием реанализа за срок 15.03.2019 г. 00:00 UTC

Адвекция холода в тыловой части и адвекция тепла в передней прослеживаются почти во всей толще атмосферы. Минимальное значение имеет на высоте 850 гПа со значением от -3,0 до -4,0 градусов, а максимально у земли – 2,0 – 3,0 градусов тепла.

Далее рассмотрим карты реанализа циклонического вихря.

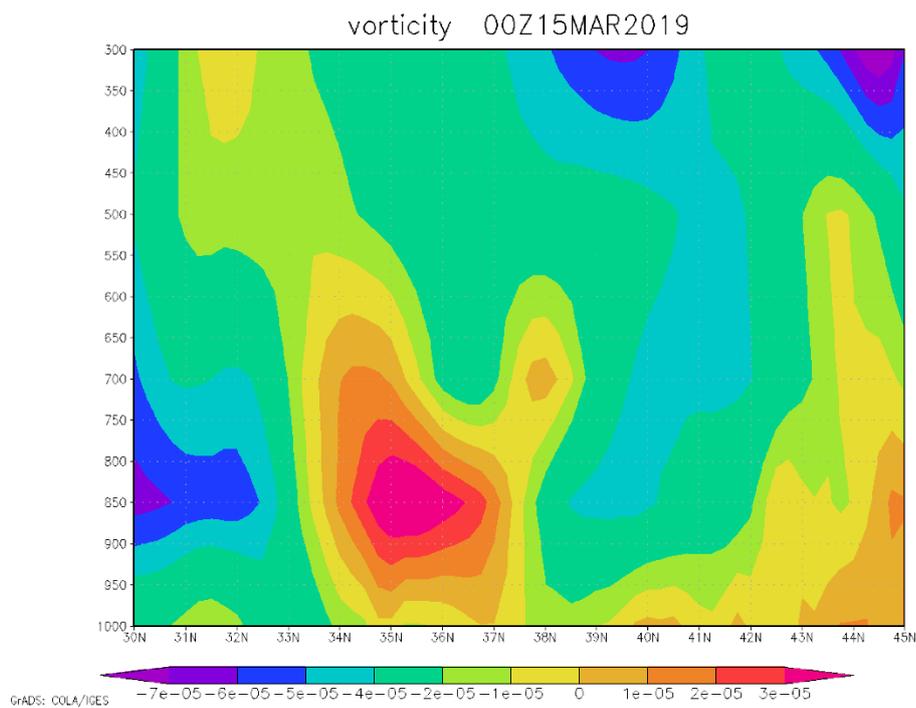


Рисунок 3.49 - Вертикальный разрез циклонического вихря с использованием реанализа за 15.03.19 00:00 UTC

Именно влиянием вихревой составляющей объясняется перенос барического образования по потоку. Перенос вихря играет роль в дальнейшем развитии циклона. Максимум вихря наблюдается на высоте 800 гПа.

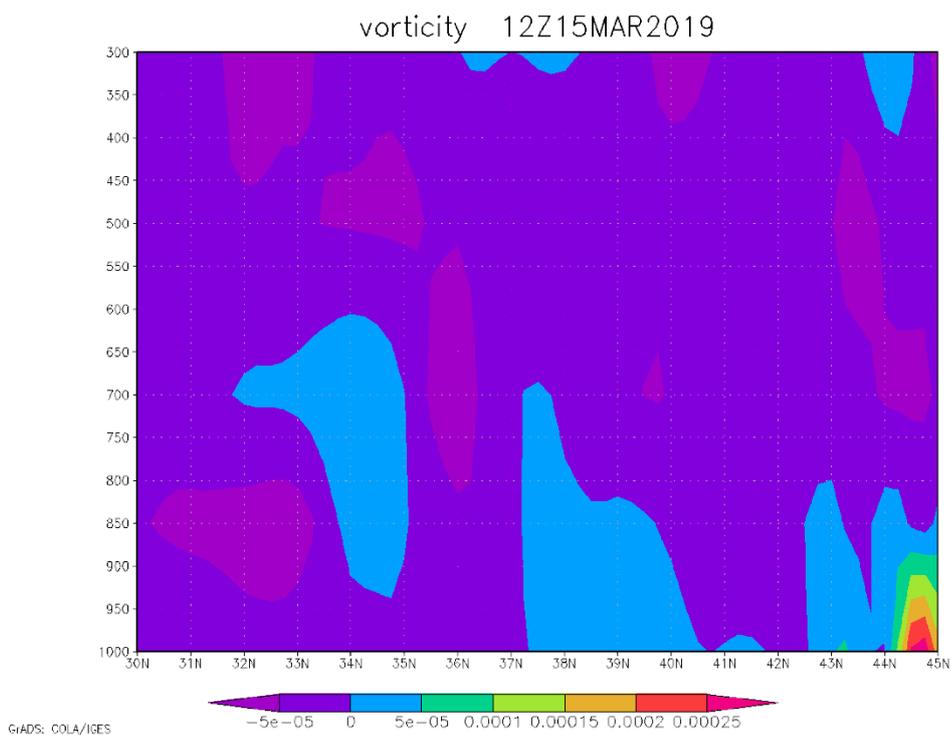


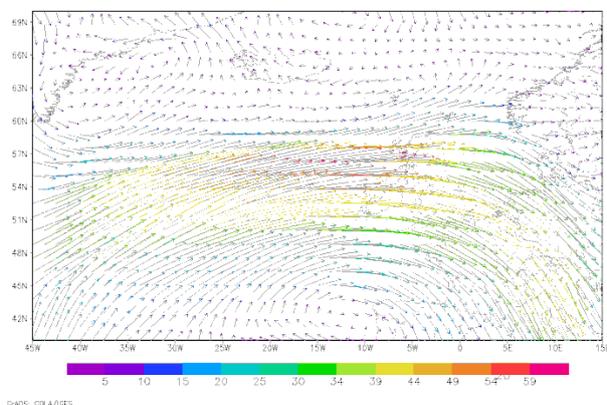
Рисунок 3.50 - Вертикальный разрез циклонического вихря с использованием реанализа за срок 15.03.19 12:00 UTC

Через 12 часов максимум вихря наблюдается на высоте 950 гПа.

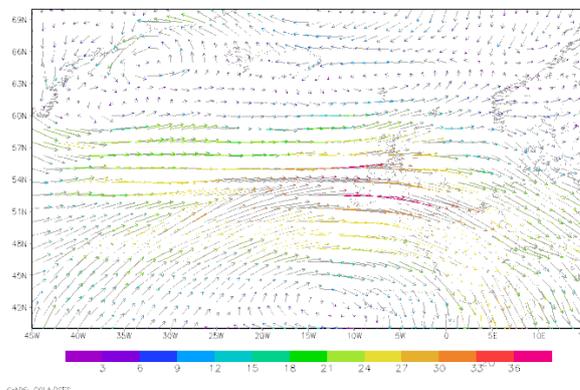
Рассмотрим ветер на высотах и у земли за 00:00 часов. Максимальная скорость ветра наблюдается на высоте примерно 5500 метров (59 м/с).

Циклон возник с левой стороны струйного течения.

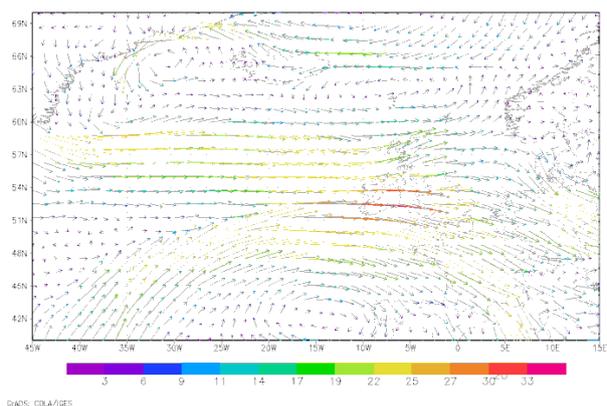
А



Б



В



Г

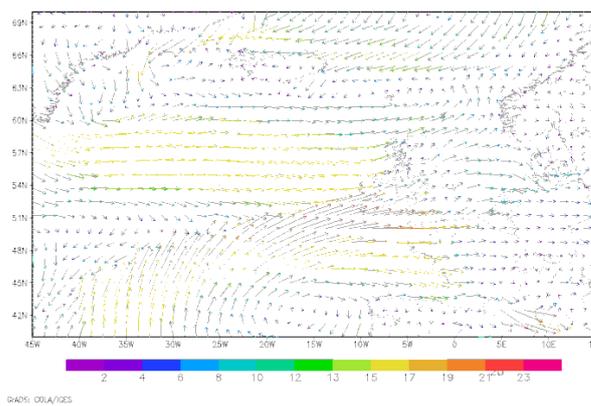


Рисунок 3.51 – Карта реанализа ветра на высотах и у земли за срок 15.03.19 00:00 UTC

- А – 500 гПа
- Б – 700 гПа
- В – 850 гПа
- Г - 1000 гПа

Заключение

Циклоны одни из основных объектов исследования в метеорологии, так как они являются основной причиной ухудшения погодных условий, наносящей разного рода ущерб социально-экономической деятельности человека. В то же время некоторые из них наносят гораздо больший ущерб, что требует их более детального изучения, чтобы минимизировать убытки, которые они создают.

Изучение механизмов эволюции циклонов и их характеристик дают более ясную картину в прогнозировании погодных условий, поэтому нужно знать их основные отличия и особенности, применяя для этого подходящие модели.

По современным данным (включая численные модели анализа и прогноза, а также результаты наблюдений с искусственных спутников Земли), синоптические процессы являются гораздо более сложными, чем это представлено в классической норвежской модели циклона умеренных широт, которой до сих пор пользуются во всех странах планеты. Например, много сомнений вызывает фронт окклюзии (якобы возникающий из-за смыкания холодного и тёплого фронтов в циклоне): по новым данным, фронт окклюзии возникает в определённых случаях даже в довольно молодом циклоне, и никакого смыкания двух фронтов при этом не происходит. То же самое можно отнести и к фронту окклюзии в тёплом секторе.

С развитием моделей и расширением их практического применения выявляется всё больше противоречий с классической норвежской теорией. Так, по данным модели Шапиро-Кейзера прогнозируется значительная по протяжённости (тысячи км) полоса влажного воздуха на высотах и связанная с ней зона осадков. Однако никаких температурных градиентов при этом нет, но по традиции метеорологи стараются обозначить эту полосу на картах как фронт (для лучшего восприятия). На самом деле никакого фронта нет, а есть только результат особого распределения вертикальных движений в атмосфере.

Список используемой литературы

[1] Дашко Н. А. Курс лекций по синоптической метеорологии, Владивосток: ДВГУ, 2005 — 523 с.

[2] [Электронный ресурс] / Европейская организация спутниковой метеорологии. Архив синоптических карт: [<http://www.wetterzentrale.de/>] (Дата обращения: 25.12.2020, 05.01.2021, 19.03.2021).

[3] [« НИР «Особенности циклогенеза по типу Шапиро-Кейзера»» Стирин А.А. 2020 г.]

[4] [Электронный ресурс] / Архив карт погоды: [<https://www.zamg.ac.at/cms/de/wetter/wetterkarte>] (Дата обращения: 19.03.2021, 6.04.2021)

[5] Толковый словарь основных терминов. Под. Ред. Берлянта А.М и Кошкарева А.В.// М., Гис-Ассоциация — 1999 — 205 с.

[6] Зверев А.С. Синоптическая метеорология // Учебник. Л. Гидрометиздат, 1977 — 712 с.

[7] [Электронный ресурс] / Большой информационный архив: [<https://big-archive.ru/>].

[8] Keith Browning, 2004: The sting at the end of the tail: Damaging winds associated with extra-tropical cyclones, Q. J. R. Meteorol. Soc., 130, pp. 375-399.

[9] Ермакова Л.Н., Тимофеева А.Г., Толмачева Н.И. // Основы метеорологии и климатологии // Учебное пособие. М., ИПК Росгидромета — 2017 — 332 с.

[10] [Электронный ресурс] / Oscar Martinez-Alvarado, Florian Weidle and Suzanne L. Gray, 2010: Sting Jets in Simulations of a Real Cyclone by Two Mesoscale Models. / [<https://journals.ametsoc.org/doi/full/10.1175/2010MWR3290.1>].

[11] Воробьёв В.И. Основные понятия синоптической метеорологии // СПб.: изд-во РГГМУ, — 2003. — 48 с

[12] Shapiro, M. A. and D. Keyser, 1990: Fronts, jet streams and the tropopause. Extratropical Cyclones, The Erik Palmén Memorial Volume, C. W. Newton and E. O. Holopainen, Eds., Am. Meteorol. Soc., 167-191.

[13] Schultz, D. M., D. Keyser and L. F. Bosart, 1998: The effect of large-scale flow on low-level frontal structure and evolution in midlatitude cyclones. Mon. Weather Rev., 126, 1767-1791.

[14] Clark P. A., K. A. Browning and C. Wang, 2005: Investigation of the 3-D Structure of the Sting Jet with a high-resolution NWP-Model, Q. J. R. Meteorol. Soc.

[15] [Электронный ресурс] / Schultz, D. M. and H. Wernli, 2001: Determining Midlatitude Cyclone Structure and Evolution from the Upper-Level Flow. / <http://www.cimms.ou.edu/~schultz/papers/marwealog.html>].

[16] [Электронный ресурс] / Изображения со спутника SEVIRI IR10.8 мкм: [http://eumetrain.org/ePort_MapViewer/]. (Дата обращения: 19.03.2021, 20.03.2021, 17.03.2021, 4.04.2021, 15.04.2021, 17.04.2021, 20.04.2021, 25.04.2021, 10.05.2021).

Приложение А

Скрипт для скачивания данных реанализа за срок 17.03.2019 г.

```
./downloader.sh varlist.ini 2019 3 17 30 65 -40 30

#exit

dir=`cat dir.txt`

rm -rf $dir'/vort' &> log
mkdir $dir'/vort' &> log

rm -rf $dir'/mssl' &> log
mkdir $dir'/mssl' &> log

lev='1000' && t='1' && rm gr.sh &> log && echo grads -lbcx ""TempAdv.gs $dir $lev $t"" > gr.sh && chmod 755 gr.sh && ./gr.sh
lev='1000' && t='13' && rm gr.sh &> log && echo grads -lbcx ""TempAdv.gs $dir $lev $t"" > gr.sh && chmod 755 gr.sh && ./gr.sh
lev='850' && t='1' && rm gr.sh &> log && echo grads -lbcx ""TempAdv.gs $dir $lev $t"" > gr.sh && chmod 755 gr.sh && ./gr.sh
lev='850' && t='13' && rm gr.sh &> log && echo grads -lbcx ""TempAdv.gs $dir $lev $t"" > gr.sh && chmod 755 gr.sh && ./gr.sh
lev='700' && t='1' && rm gr.sh &> log && echo grads -lbcx ""TempAdv.gs $dir $lev $t"" > gr.sh && chmod 755 gr.sh && ./gr.sh
lev='700' && t='13' && rm gr.sh &> log && echo grads -lbcx ""TempAdv.gs $dir $lev $t"" > gr.sh && chmod 755 gr.sh && ./gr.sh
lev='500' && t='1' && rm gr.sh &> log && echo grads -lbcx ""TempAdv.gs $dir $lev $t"" > gr.sh && chmod 755 gr.sh && ./gr.sh
lev='500' && t='13' && rm gr.sh &> log && echo grads -lbcx ""TempAdv.gs $dir $lev $t"" > gr.sh && chmod 755 gr.sh && ./gr.sh

gif $dir'/vort' 37 0
gif $dir'/mssl' 37 0
```

Скрипт для визуализации данных реанализа

```
function main(args)
  arg0=subwrd(args,1)
  say 'arg0='arg0
  arg1=subwrd(args,2)
  say 'arg1='arg1
dir=arg0
lev=arg1

* =====
* 2a. Calculate the temperature advection from gridded dataset
* =====
'set rgb 16 0 0 255'
'set rgb 17 55 55 255'
'set rgb 18 110 110 255'
'set rgb 19 165 165 255'
```

```

'set rgb 20 220 220 255'

'set rgb 21 255 220 220'
'set rgb 22 255 165 165'
'set rgb 23 255 110 110'
'set rgb 24 255 55 55'
'set rgb 25 255 0 0'

'reinit'
'sdfopen 'dir'/all.nc'
'q dims'

lons=subwrd(xline,6)' 'subwrd(xline,8)
lats=subwrd(yline,6)' 'subwrd(yline,8)

'set lev ' lev
'tmp=t'
'vwnd=v'
'uwnd=u'

'set gxout shaded'
'set mpdset hires'
'set gxout barb'
'set gxout stream'

'set t 12'

c
'set cint 1.0'
'd t'

#'d u'
#'d v'
#'d mag(u_10m,v_10m)'
'define dir=atan2(-u,-v)*180/3.141592654'
'define'
dir=const(dir,1)*(const(maskout(dir,dir),0,-u)+const(maskout(360+dir,-dir),0,-u))'
'draw title temperature and wind 12Z Mar 21, 2016'
cbarn.gs
'printim 'dir'/t+w_'lev'.png x1280 y960 white'

```