

Полярные циклоны:
особенности формирования и развития
по данным измерений, спутникового
зондирования и моделирования

Хворостовский К.С.

*Российский государственный гидрометеорологический университет,
Санкт-Петербург*

Актуальность изучения ПЦ

Полярные циклоны (ПЦ) – непродолжительные интенсивные мезомасштабные циклоны, возникающие над морской поверхностью вне основных бароклинических зон и характеризующиеся высокими скоростями ветра и интенсивными осадками (Rasmussen and Turner, 2003)

- Пространственная протяженность: < 1000 км
- Время существования: от нескольких часов до 3 дней
- Скорость ветра на поверхности: > 15 м/с

ПЦ – экстремальные погодные явления

- Затрудняет судоходство
- Наносит ущерб нефтегазовой инфраструктуре



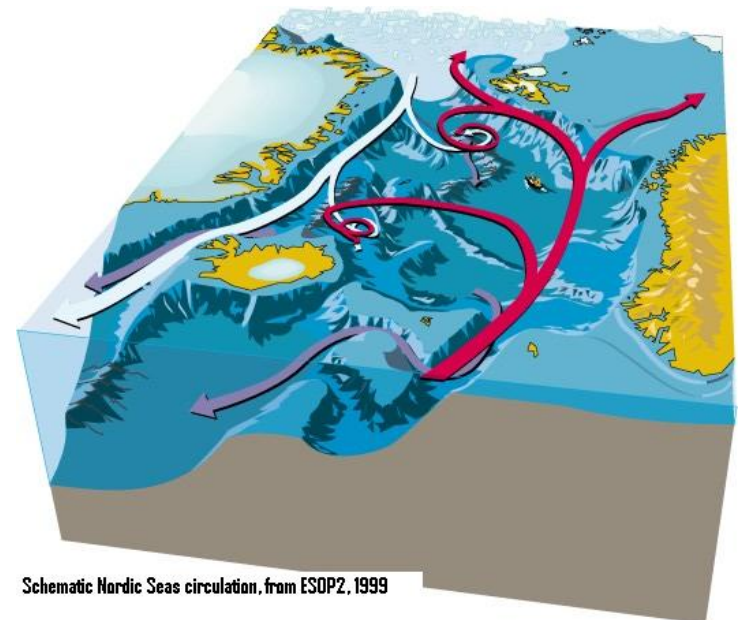
Актуальность изучения ПЦ

Полярные циклоны (ПЦ) – непродолжительные интенсивные мезомасштабные циклоны, возникающие над морской поверхностью вне основных бароклинических зон и характеризующиеся высокими скоростями ветра и интенсивными осадками (Rasmussen and Turner, 2003)

- Пространственная протяженность: < 1000 км
- Время существования: от нескольких часов до 3 дней
- Скорость ветра на поверхности: > 15 м/с

Влияние ПЦ на климат

- Являются важным фактором, определяющим интенсивность термохалинной циркуляции в северной Атлантике (Condrón and Renfrew, 2013, *Nature Geoscience*)
- В условиях глобального потепления прогнозируется уменьшение частоты ПЦ в северной Атлантике и смещение к северу районов их возникновения (Zahn and von Storch, 2010, *Nature*)

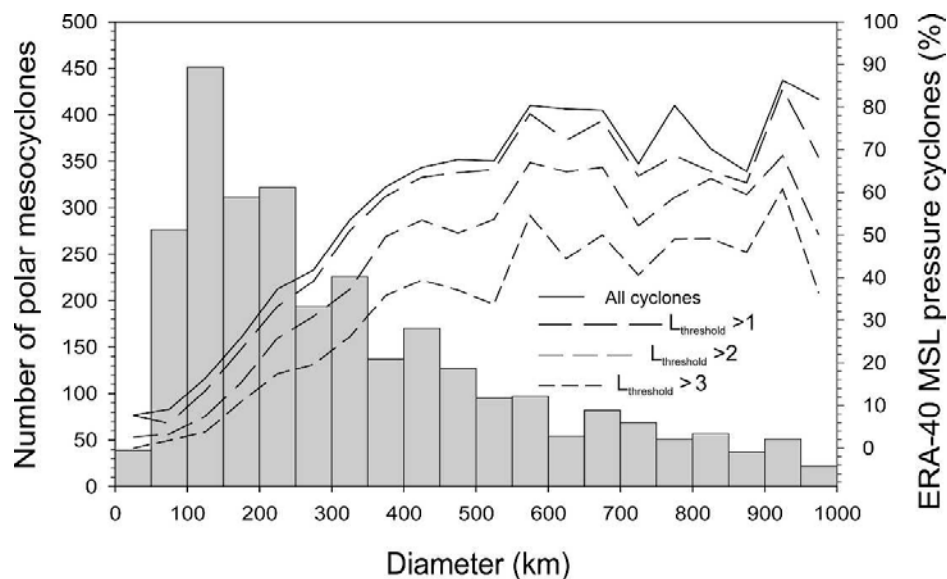


Schematic Nordic Seas circulation, from ESOP2, 1999

Сложности при исследовании полярных циклонов

- Небольшие размеры и время жизни затрудняют обнаружение и изучение ПЦ
- Редкая сеть наблюдений не обеспечивает необходимым объемом данных для выявления многих ПЦ на синоптических картах и в данных реанализа
- Моделирование большинства ПЦ возможно только с использованием мезомасштабных (негидростатических) моделей высокого разрешения

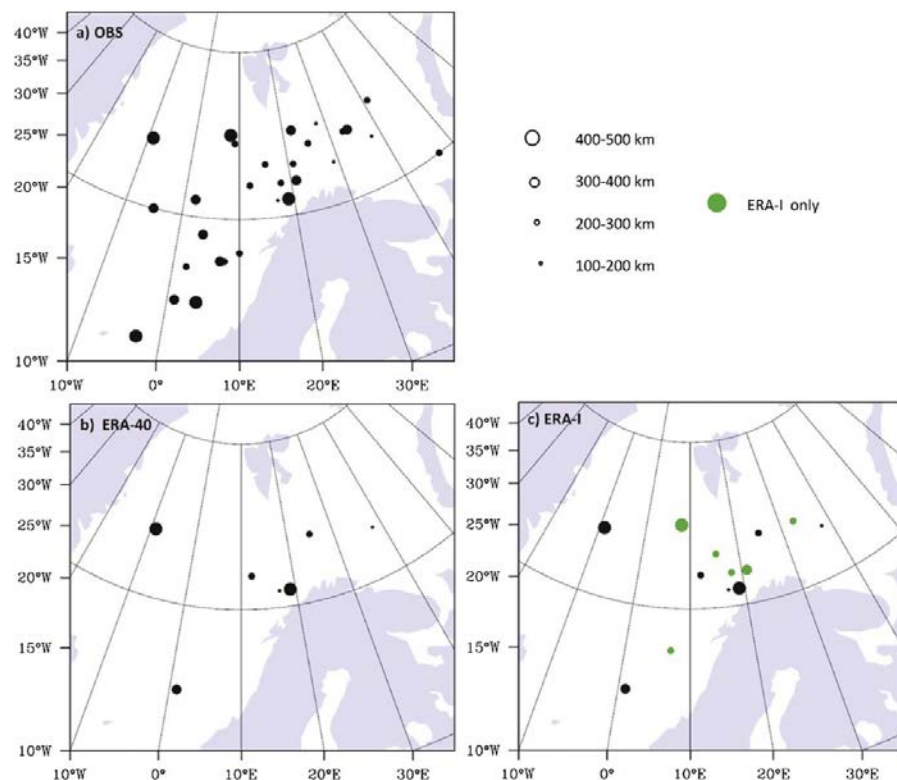
Количество мезоциклонов обнаруженных на спутниковых снимках AVHRR (Harold et al, 1999) и по данным реанализа ECMWF ERA-40 за период октябрь 1993– сентябрь 1995. (Condrón, et al., 2006, *MWR*)



Сложности при исследовании полярных циклонов

- Небольшие размеры и время жизни затрудняют обнаружение и изучение ПЦ
- Редкая сеть наблюдений не обеспечивает необходимым объемом данных для выявления многих ПЦ на синоптических картах и в данных реанализа
- Моделирование большинства ПЦ возможно только с использованием мезомасштабных (негидростатических) моделей высокого разрешения

ПЦ по данным наблюдений (Noer et al. 2011) и реанализа ECMWF ERA-40 и ERA-Interim за период 1999–2002 (Laffineur et al., 2014, *MWR*)



Спутниковые данные при изучении ПЦ

Спутниковые данные предоставляют возможность проводить регулярный мониторинг ПЦ в полярных районах, изучать их время жизни, интенсивность и траектории движения

- ✓ Снимки спектрорадиометров в ИК и видимом диапазонах
- ✓ Поля ветра по данным микроволновых скаттерометров
- ✓ Изображения радиолокаторов с синтезированной апертурой
- ✓ Поля ветра, влагосодержания и водозапаса по данным пассивных микроволновых радиометров

Спутниковые снимки в ИК и видимом диапазонах

- ✓ Сенсор: спектрорадиометр (MODIS, AVHRR)
- ✓ Для изучения облачности в высоких широтах наиболее полезны снимки в ИК диапазоне (зимой полярная ночь);
- ✓ Высокая частота наблюдений обеспечивается большим количеством спутников со спектрорадиометрами на полярной орбите
- ✓ Достаточное для обнаружения ПЦ пространственное разрешение (сотни метров для видимого диапазона, ~ 1 км для ИК)

Наблюдения с 1960-х гг. выявили различные структуры облачного покрова ПЦ

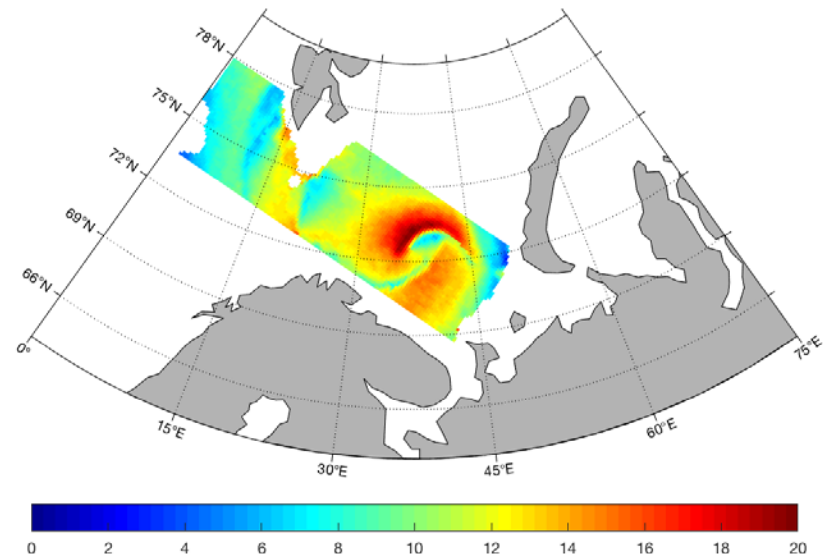
ИК снимок NOAA-9,
27 февраля 1987, 8:31 UTC



Скаттерометры

- ✓ Сенсор: микроволновый радар (ASCAT)
- ✓ Обеспечивает регулярные измерения полей скорости и направления ветра включая полярные районы
- ✓ Измерения проводятся независимо от наличия облачности и времени суток
- ✓ *Сигнал насыщается в случае сильных ветров, что занижает значения скорости ветра > 15 м/с*

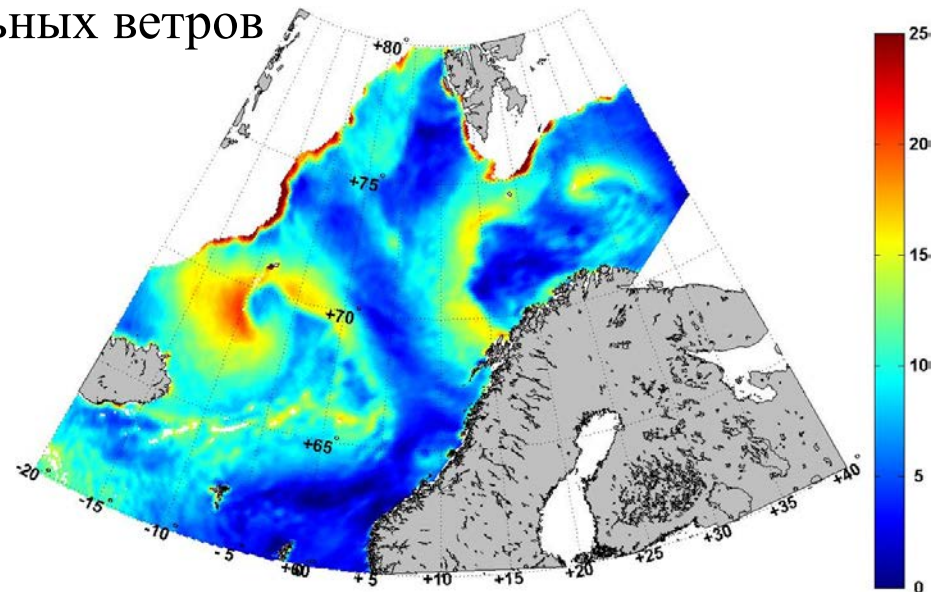
Скорость приземного ветра
по данным ASCAT,
4 апреля 2009, 15:03 UTC



Микроволновые радиометры

- ✓ Сенсор: пассивный микроволновый радиометр (SSMIS, AMSR-2)
- ✓ Обеспечивает регулярные измерения полей скорости ветра, влагосодержания и водозапаса включая полярные районы
- ✓ Измерения проводятся независимо от наличия облачности и времени суток
- ✓ Сигнал не насыщается в случае сильных ветров

Скорость приземного ветра
по данным AMSR-2,
30 March 2013, ~03:00 UTC



Радиолокаторы с синтезированной апертурой

- ✓ Сенсор: активный радиолокатор с синтезированной апертурой (Sentinel-1, Radarsat-2)
- ✓ Измерения проводятся независимо от наличия облачности и времени суток
- ✓ Обеспечивает измерения полей ветра включая полярные районы, в том числе вблизи кромки льда

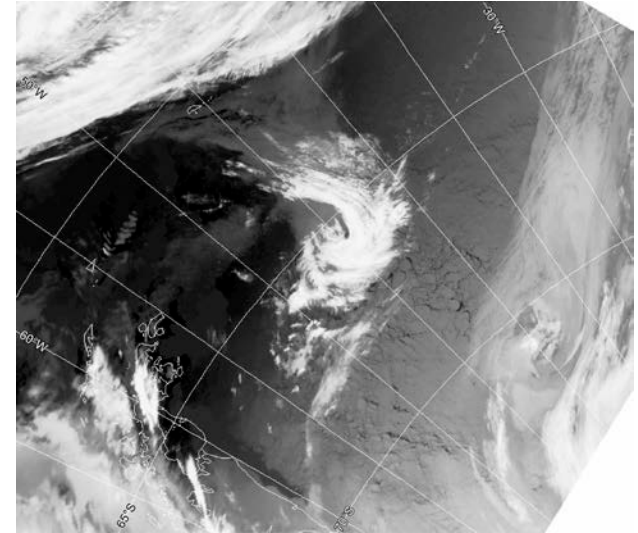
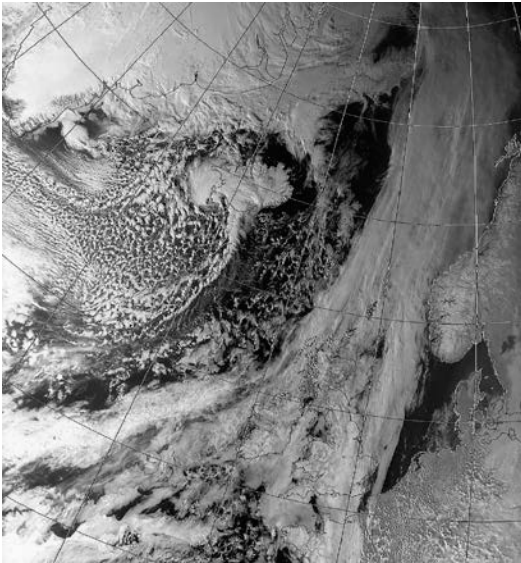
Северная часть моря Лабрадор
29 December 1997, 21:00 UTC



Структура облачного покрова ПЦ на спутниковых снимках

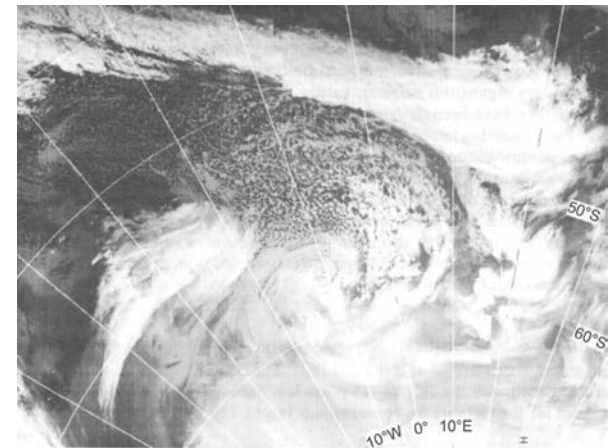
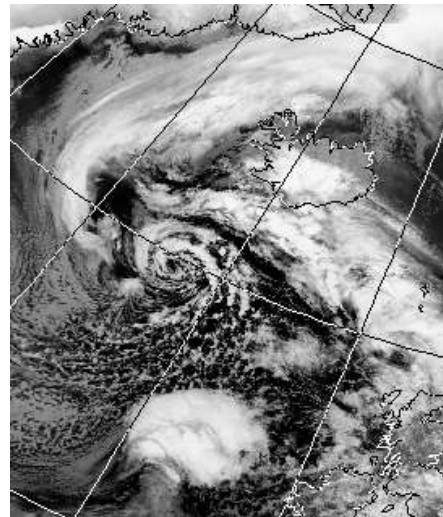
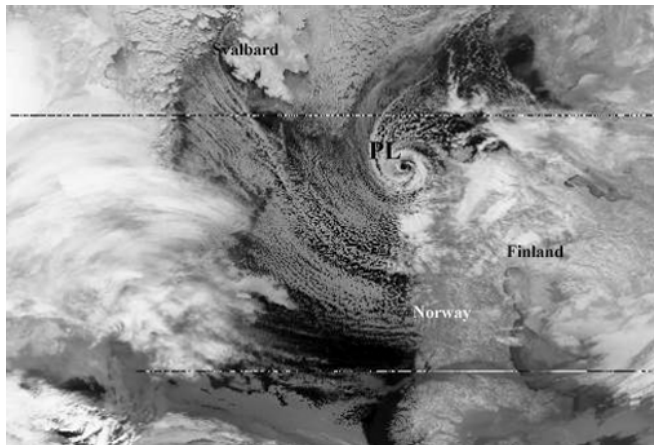
- ✓ **Облачная запятая**
- ✓ **Спиралевидный вихрь**
- ✓ Сигнатура карусель
- ✓ Мгновенные окклюзии
- ✓ Бароклинные волны
- ✓ Системы с теплым ядром

Облачная запятая



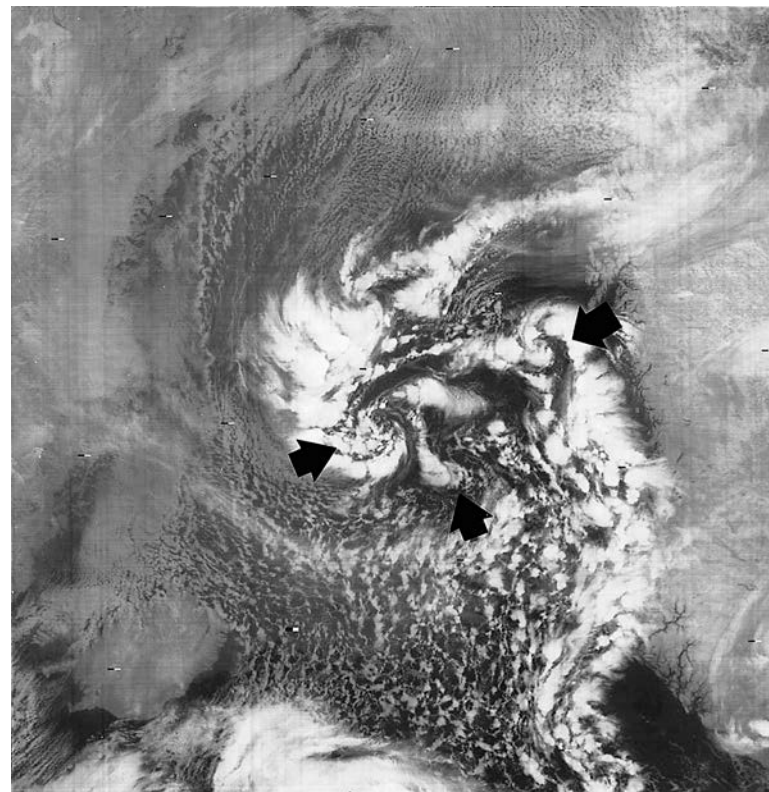
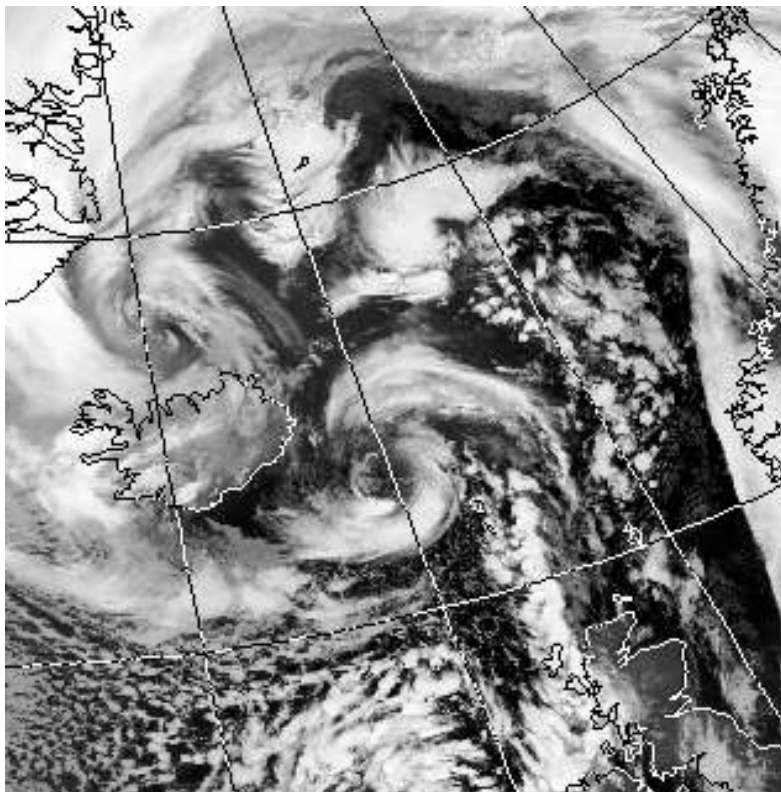
- ПЦ располагаются на холодной стороне основной бароклининой зоны: полярного или арктического/антарктического фронта
- Хвостовая часть ПЦ соответствует ложбине давления и является передней границей вторжения холодной воздушной массы

Спиралевидный вихрь



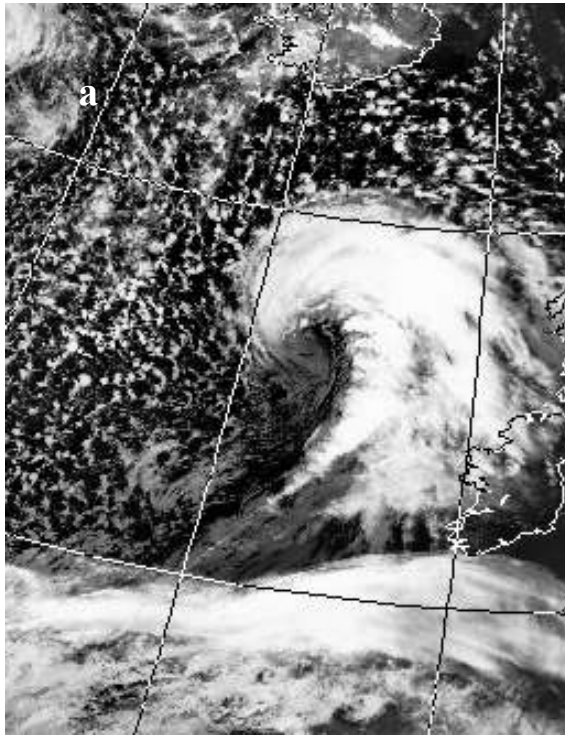
- Основным фактором образования является глубокая конвекция, возникающая при наличии высотной холодной депрессии
- Структура имеет сходство с фронтальной структурой внетропических циклонов

Сигнатура карусель

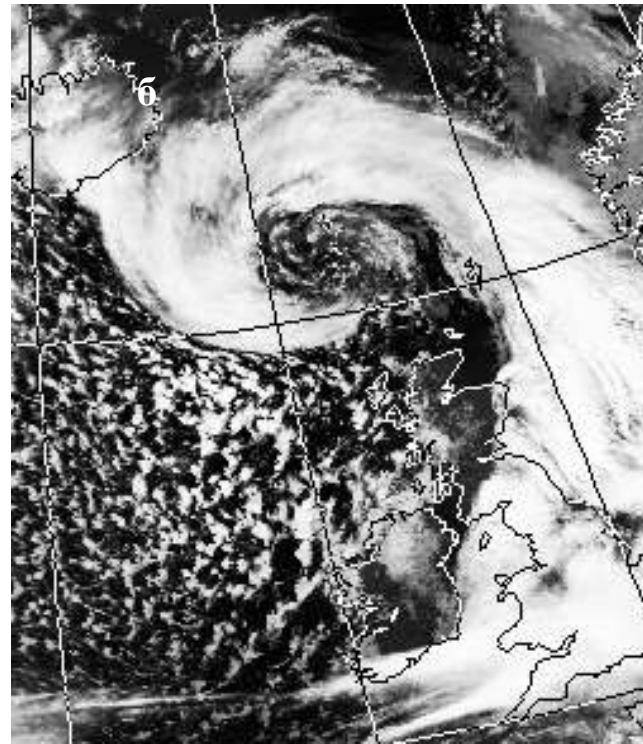


Как и для спирали основным фактором образования является наличие высотной холодной депрессии

Мгновенные окклюзии



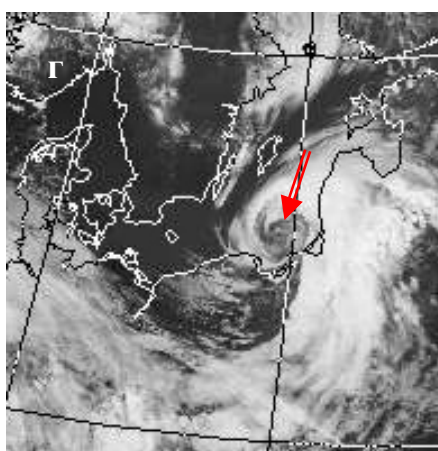
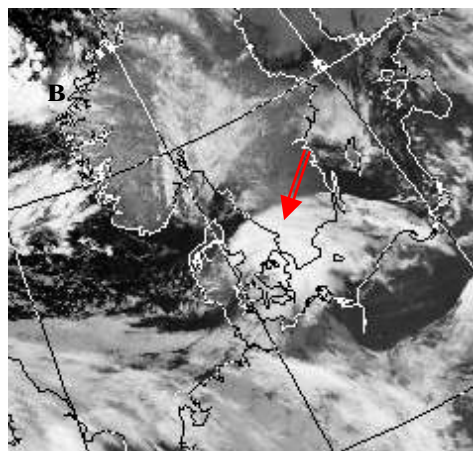
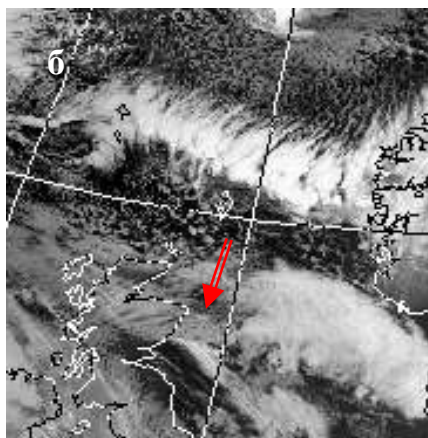
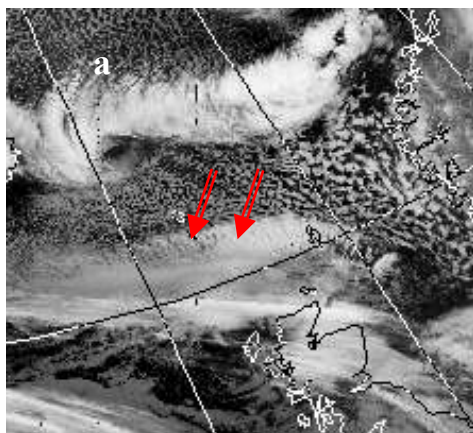
17:21 GMT 2 марта 1994



05:34 GMT 3 марта 1994

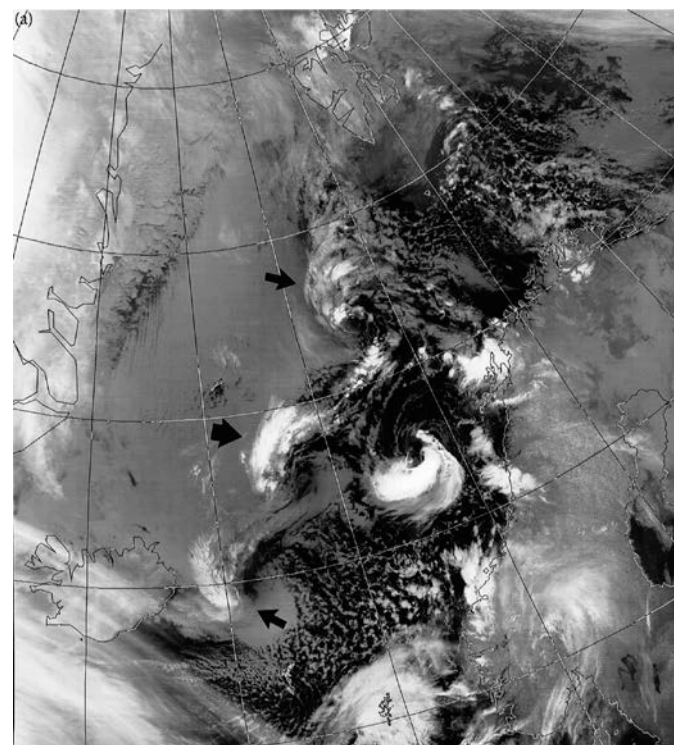
Образуется при взаимодействии ПЦ в форме облачной запятой с полярным фронтом. На фронте возникает волна, которая сразу переходит в стадию окклюзии и может приводить к развитию нового ПЦ

Бароклинные волны



Глубокая бароклинность

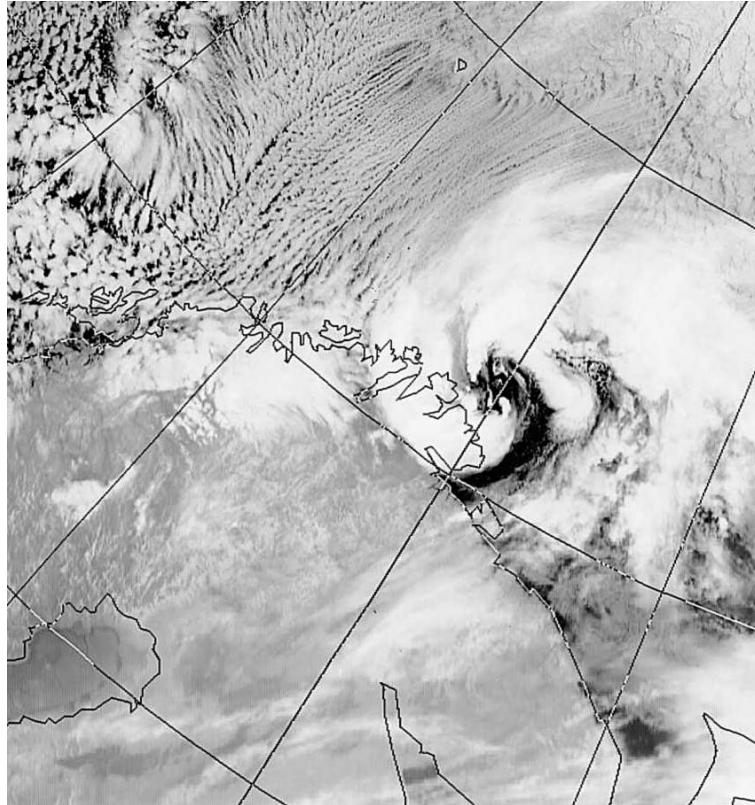
ПЦ развивается на вторичном фронте к северу от полярного фронта



Приземная бароклинность

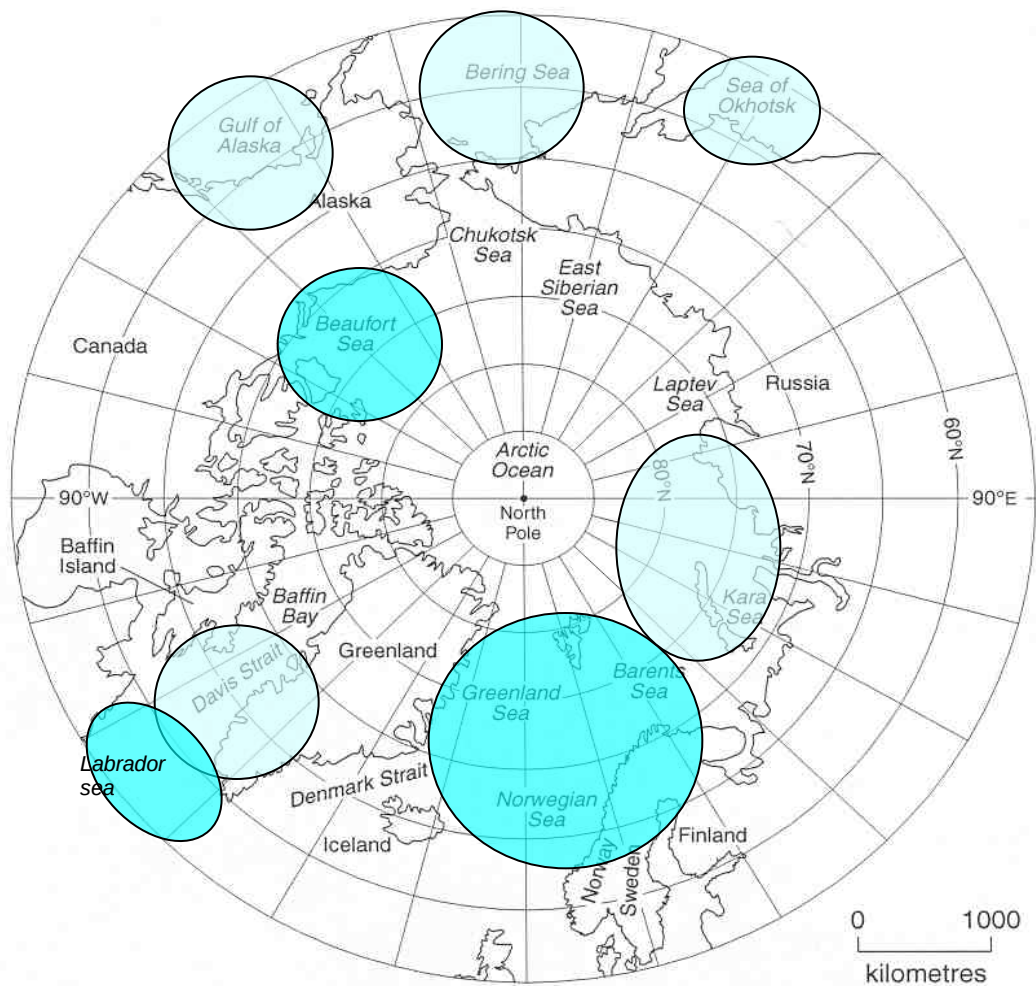
Серия ПЦ развивается на границе между холодной воздушной массой к западу и теплой морской к востоку

Системы с теплым ядром



Выделение скрытого тепла при интенсивной конвекции и формирование теплого ядра с приземной циклонической конвергенцией и высотной антициклонической конвергенцией, что проявляется в образовании облаков верхнего яруса над конвективными.

Районы распространения ПЦ в северном полушарии



Климатические факторы образования ПЦ в Арктике

- Приземная зона бароклинности вдоль кромки льда (особенно в зимой):

Радиационное выхолаживание



Сильная температурная инверсия
у поверхности льда/снега

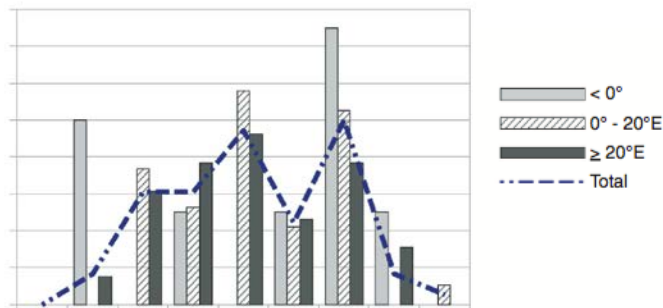


Большой градиент температуры между
холодным подинверсионным воздухом и
теплым морским

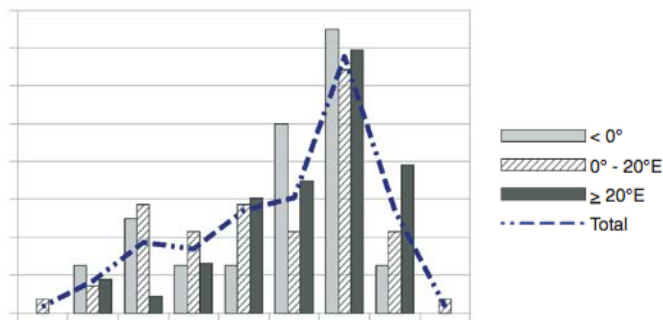
- Холодный циркумполярный вихрь
 - зимой три ложбины:
 - над Канадским Архипелагом
 - вблизи Новой Земли
 - вблизи Камчатки и Японского моря
 - циклогенез в средних широтах
 - глубокие высотные холодные депрессии в центральной зоне, которые влияют на приземную циркуляцию при пересечении границы снега/льда

Климатология ПЦ в северной части Атлантики

1999/2000 - 2005/2006

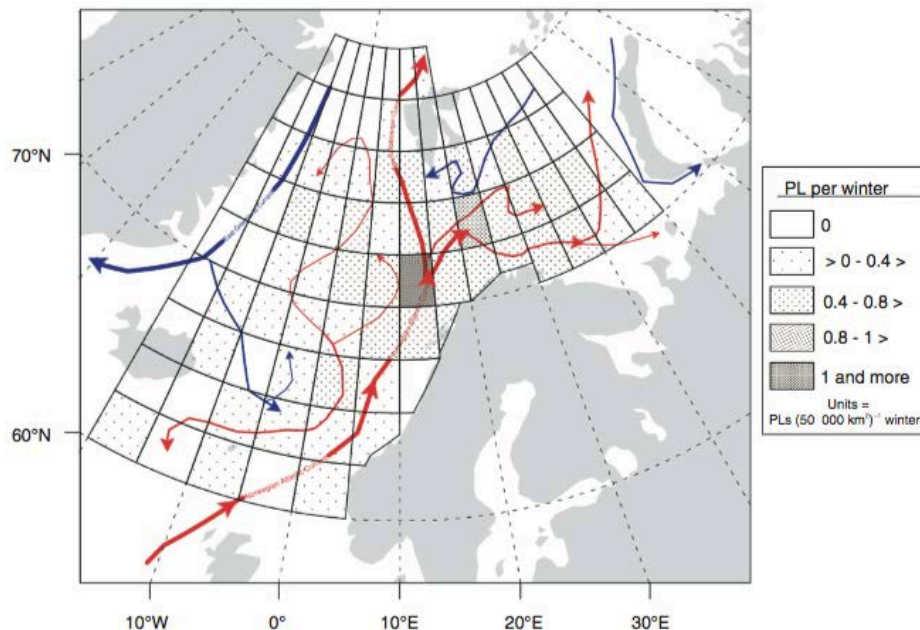


2006/2007 - 2012/2013



Изменение сезонного распределения
ПЦ с северной Атлантике

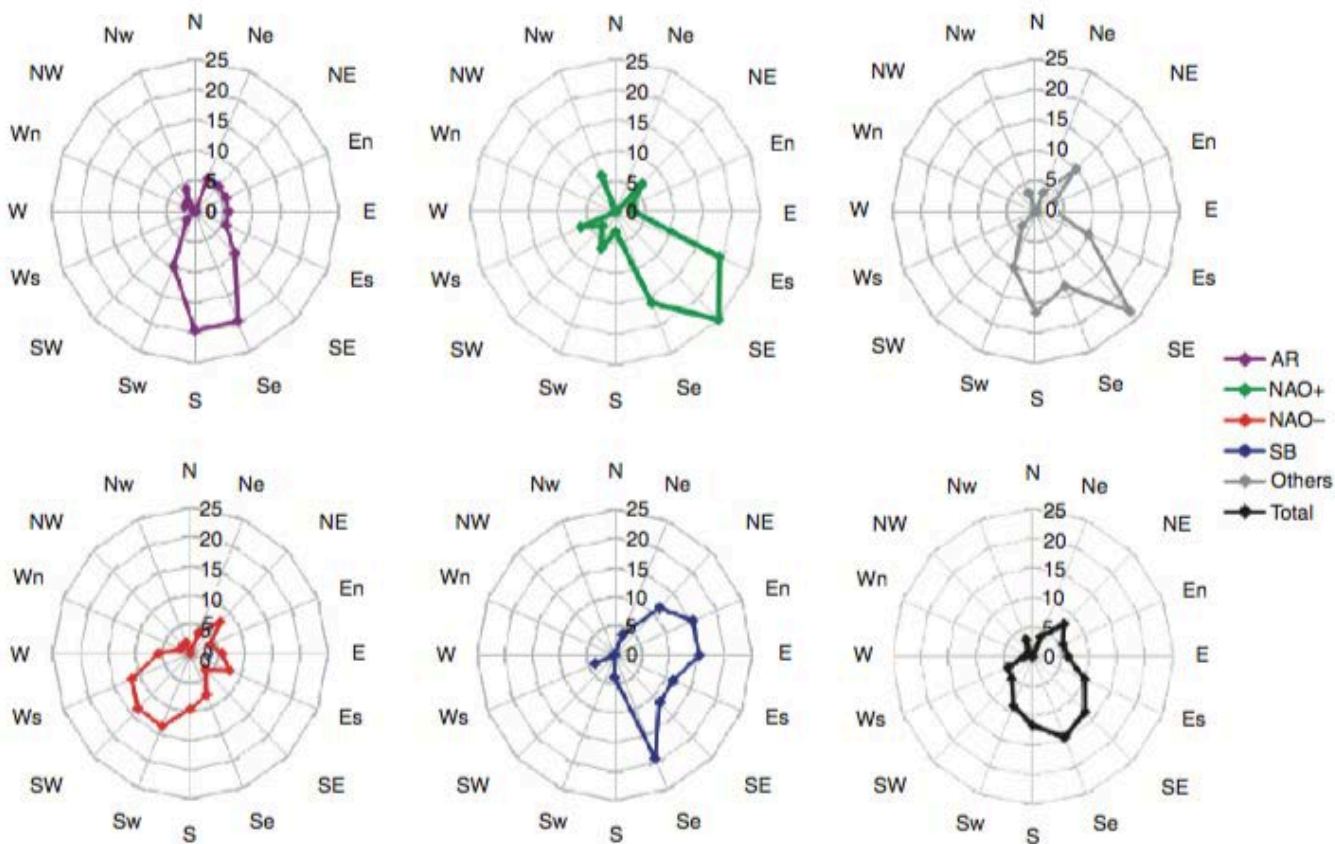
По данным снимков AVHRR (Rojo et al., 2015)



Места наиболее частого зарождения
ПЦ соответствуют зонам конвергенции
теплых течений

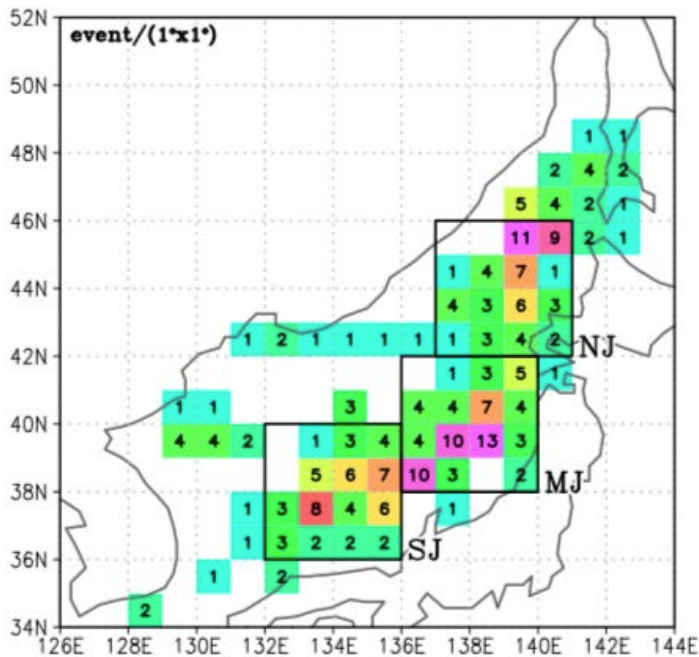
Климатология ПЦ в северной части Атлантики

По данным снимков AVHRR (Rojo et al., 2015)



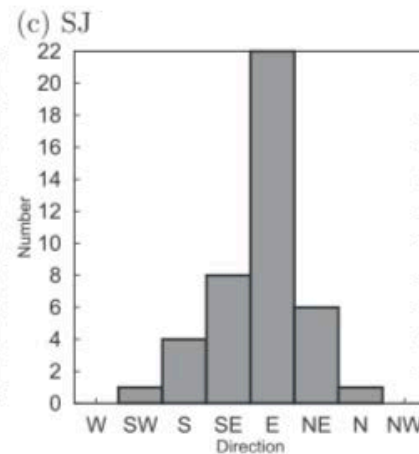
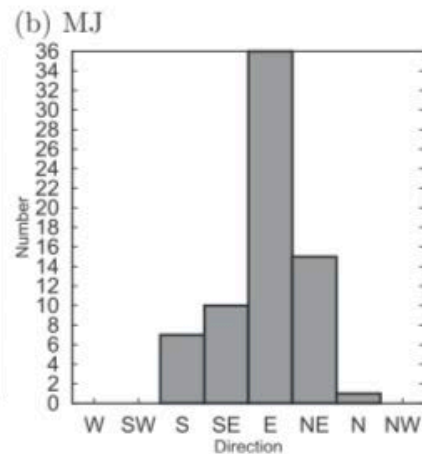
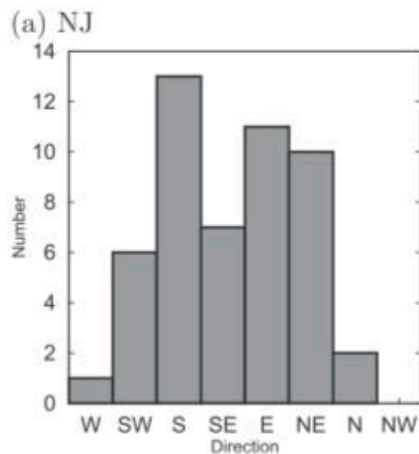
Направления движения ПЦ в зависимости от режима атмосферной циркуляции

Климатология ПЦ в Японском море



По данным реанализ JRA-55 (разрешение 60 км)
с 1979 по 2015 гг. (Janase et al., 2016)

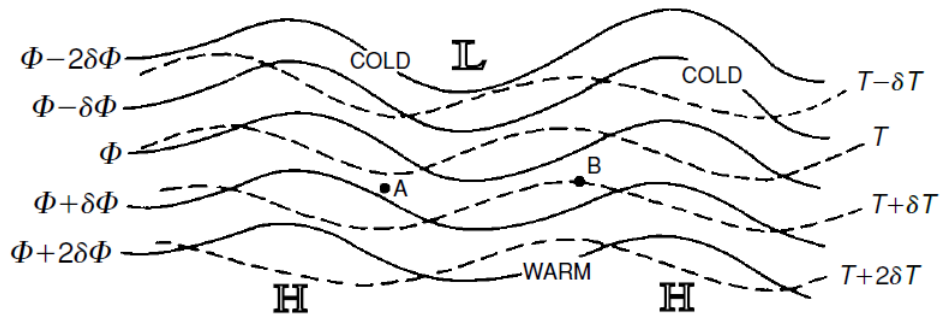
Количество ПЦ в момент их
максимального развития



Частота направления
движения ПЦ для
трех выделенных
районов

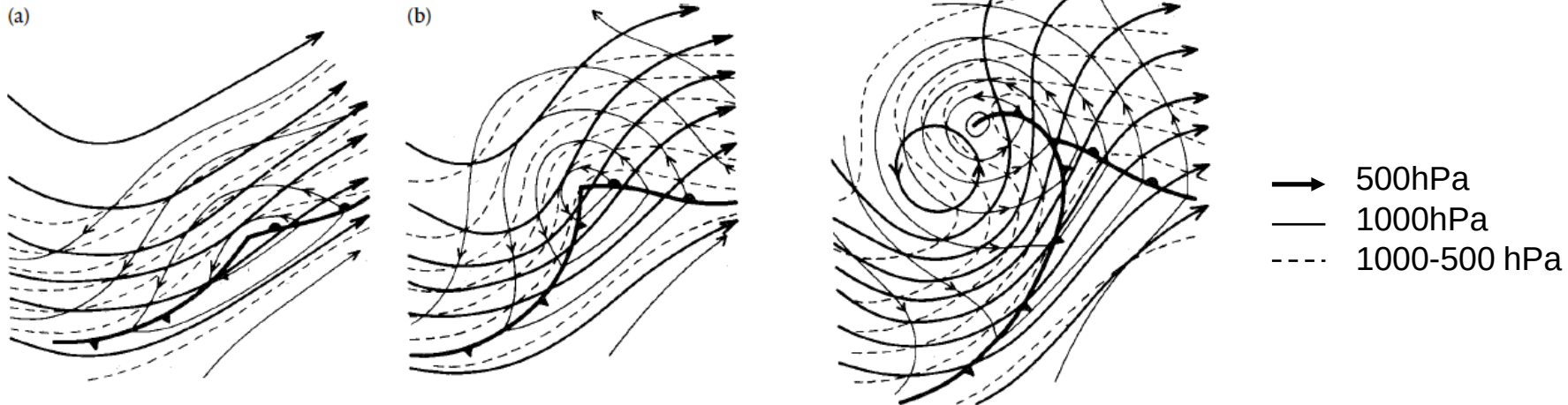
Образование внетропических циклонов

Развитие бароклинной волны



Адвекция тепла (холода) при волновом возмущении во фронтальной зоне

Стадии развития циклона



Приземная адвекция холода (тепла) к западу (востоку) от циклона приводит к усилению высотной ложбины и росту высотной (приземной) дивергенции (конвергенции) – положительная обратная связь между приземными и высотными потоками.

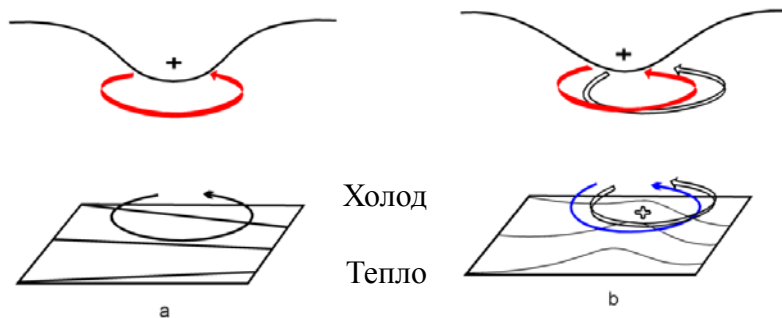
Типы образования циклонов

Тип А

Образование циклонов инициируется сильной приземной бароклинной неустойчивостью, которая ослабевает при окклюдирования

Тип В

Развитие циклонов инициируется высотной бароклинностью, обусловленной высотной коротковолновой ложбиной, которая движется над приземной зоной бароклинности



Аномалия высотного потенциального вихря скорости приводит к приземной адвекции тепла, что в свою очередь усиливает высотную аномалию

Образование мезоциклонов

Развитие мезоциклонов в полярных районах в результате **бароклинной волны небольшого радиуса** можно обосновать исходя из уравнения радиуса деформации Россби:

$$R = \frac{NH}{f}$$

H – высота слоя

N – частота Брента – Вейселя (статическая устойчивость атмосферы)

f – параметр Кориолиса

$$N^2 = \frac{g}{\theta} \frac{d\theta}{dz}$$

θ – потенциальная температура

Условия формирования ПЦ со значительно меньшими значениями R по сравнению с внетропическими циклонами обеспечиваются:

- ✓ Влажноадиабатической стратификацией атмосферы – малое N
- ✓ Широтой полярных районов – большое f
- ✓ Холодной воздушной массой – малое H

Быстрая скорость развития ~ значительному наклону изэнтропической

поверхности: $N \frac{g}{\theta_0} \frac{\partial \theta}{\partial y}$ при большом горизонтальном градиенте

Условия образования ПЦ

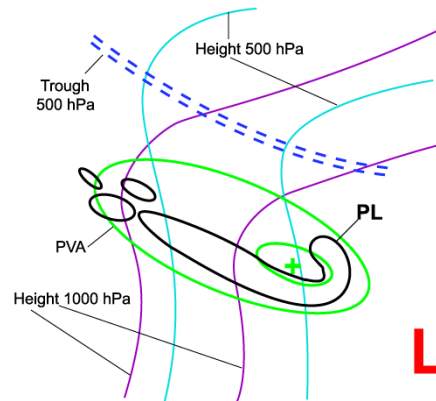
- Приземная зона бароклинности или близкое расположение к основной бароклинной зоне
- Поток холодной воздушной массы над теплой водной поверхностью
- Высотная холодная барическая ложбина или депрессия

Стадии развития ПЦ

- **Начальная** стадия развития:
 - Определяющая роль **бароклинной неустойчивости**
 - Адвекция высотного положительного вихря скорости
 - Адвекция аномалии высотного потенциального вихря скорости
- **Зрелая** стадия развития:
 - **Термическая неустойчивость** становится важным фактором
 - Условная неустойчивость второго рода
(CISK – Conditional instability of second kind)
 - Поверхностный ветровой теплообмен
(WISHE – Wind induced surface heat exchange)
- **Стадия разрушения:**
 - **Прохождение ПЦ над сушей** или ледовым покровом
 - Уменьшение испарения
 - Уменьшение потока явного тепла
 - Увеличение шероховатости поверхности

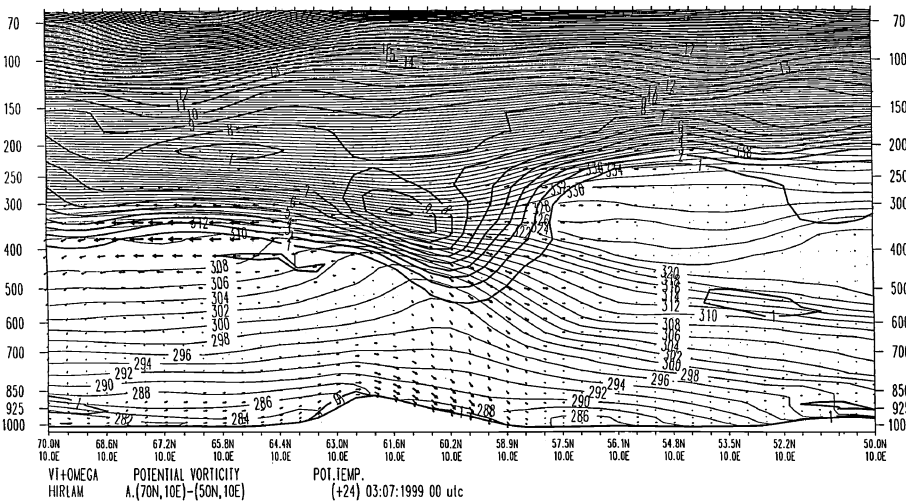
Бароклинная неустойчивость при развитии ПЦ

Адвекция положительного вихря скорости (АПВ)



Развитие ПЦ в пределах приземной ложбины и перед высотной ложбиной за холодным фронтом

Адвекция аномалии потенциального вихря скорости



$$PV = -g(\zeta_{\Theta} + f) \frac{\partial \Theta}{\partial p}$$

PV – потенциальный
вихрь скорости

f – параметр Кориолиса

ζ_{Θ} – относительный вихрь скорости

g – ускорение свободного падения

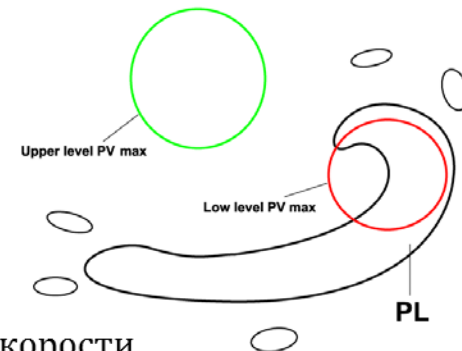
Θ – потенциальная температура

p – давление

$$10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \text{ K kg}^{-1} = 1 \text{ PVU}$$

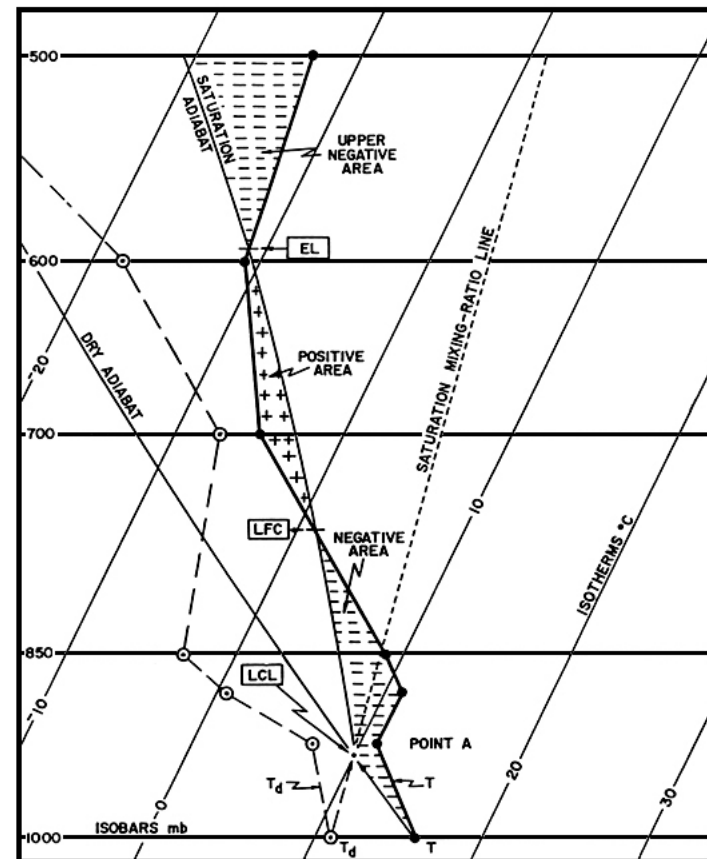
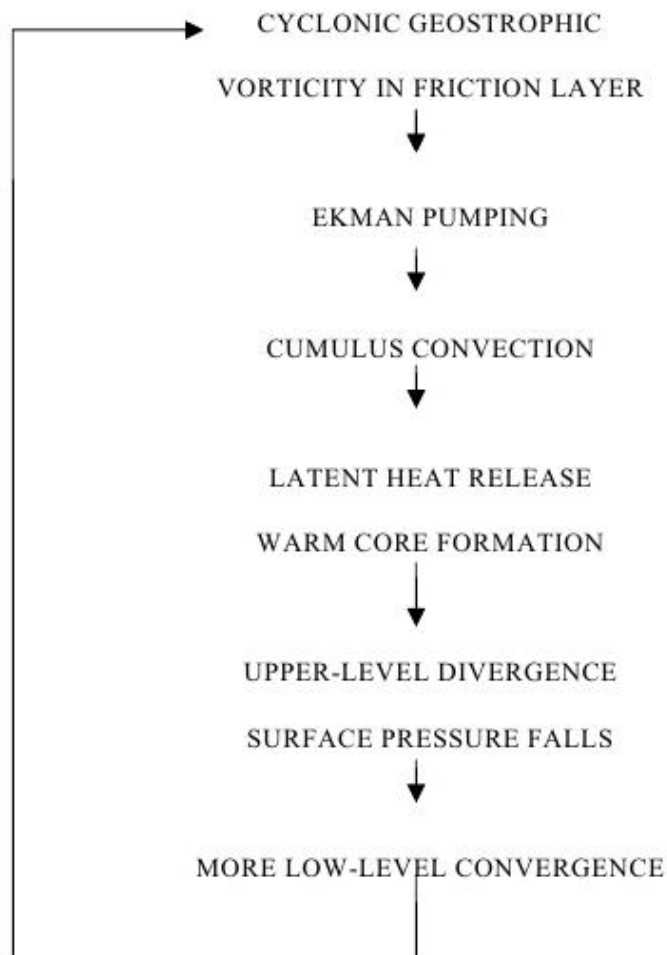
H – глубина проникновения Россби
обусловленного аномалией PV

L – размер вихря



$$H = \frac{fL}{N}$$

Термическая неустойчивость при развитии ЦЦ: CISK (Conditional instability of second kind)

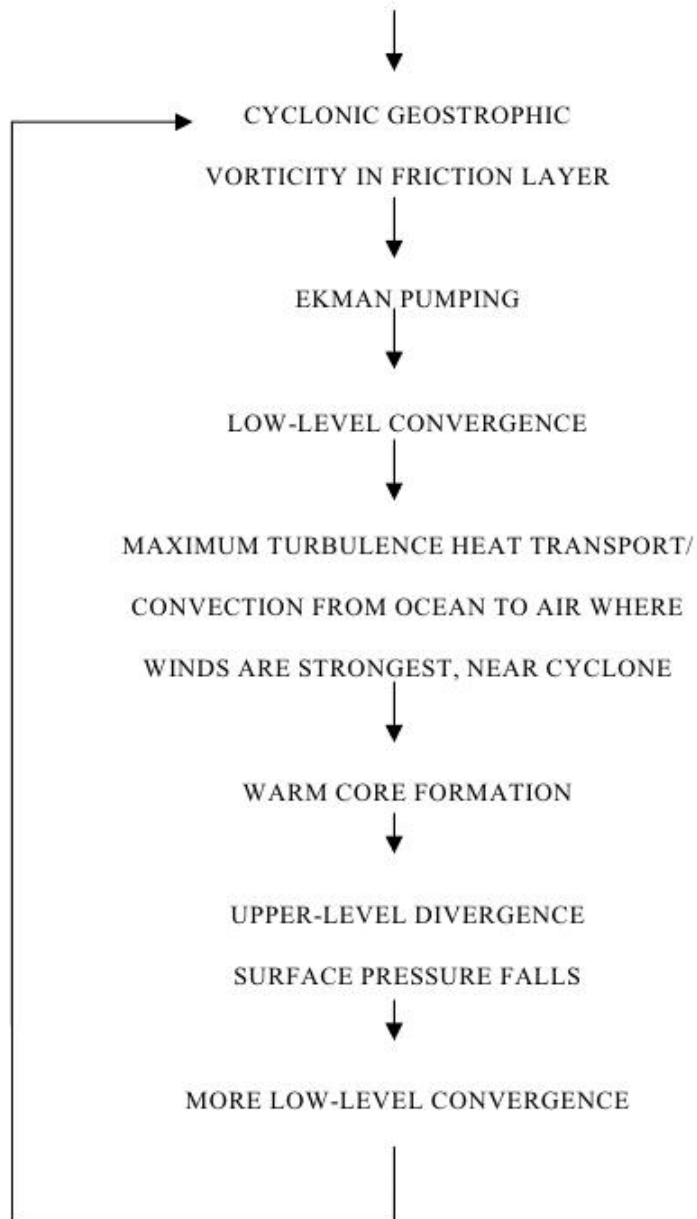


Поток скрытого тепла при конвекции в случае условно неустойчивой стратификации приводит к усилению циклонического вихря

$$CAPE = \int_{z_{fc}}^{z_{el}} g \frac{T_{vp} - T_v}{T_v} dz$$

Charney and Eliassen, 1964

Термическая неустойчивость при развитии ПЦ: WISHE (Wind induced surface heat exchange)



Приземная циркуляция увеличивает потоки от морской поверхности в центральной части циклона с высокими скоростями ветра. Формируется теплое ядро при конвекции явного и скрытого тепла. Условие влажноадиабатической стратификации предполагает незначительную CAPE.

Механизмы образования Ц

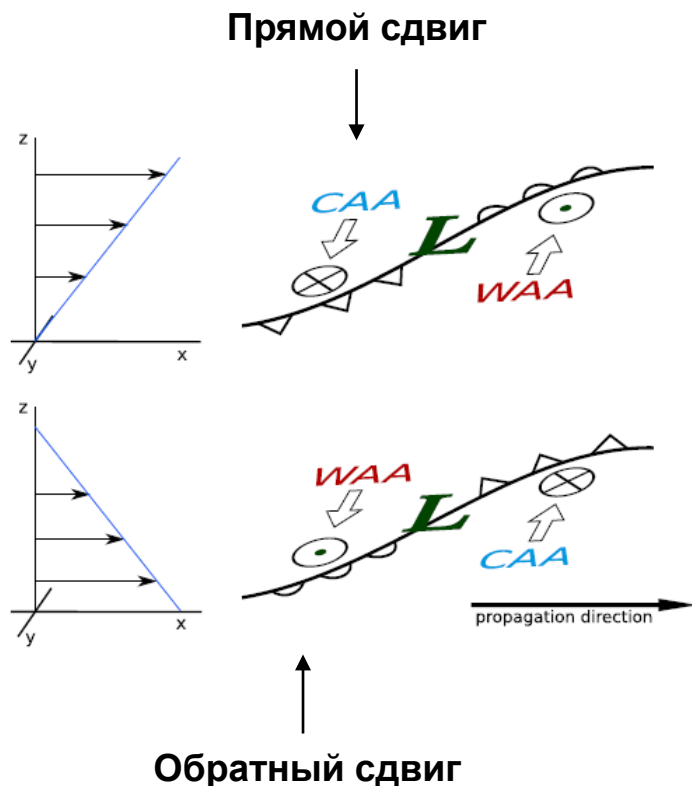
Businger and Reed, 1989

- ✓ Коротковолновый / струйный тип
 - глубокая бароклинность
 - высотная АПВ
- ✓ Тип Арктического фронта
 - приземная бароклинность
 - интенсивные поверхностные потоки
- ✓ Тип холодных барических депрессий
 - приземная бароклинность
 - интенсивные поверхностные потоки
 - глубокая конвекция

Rasmussen and Turner, 2003

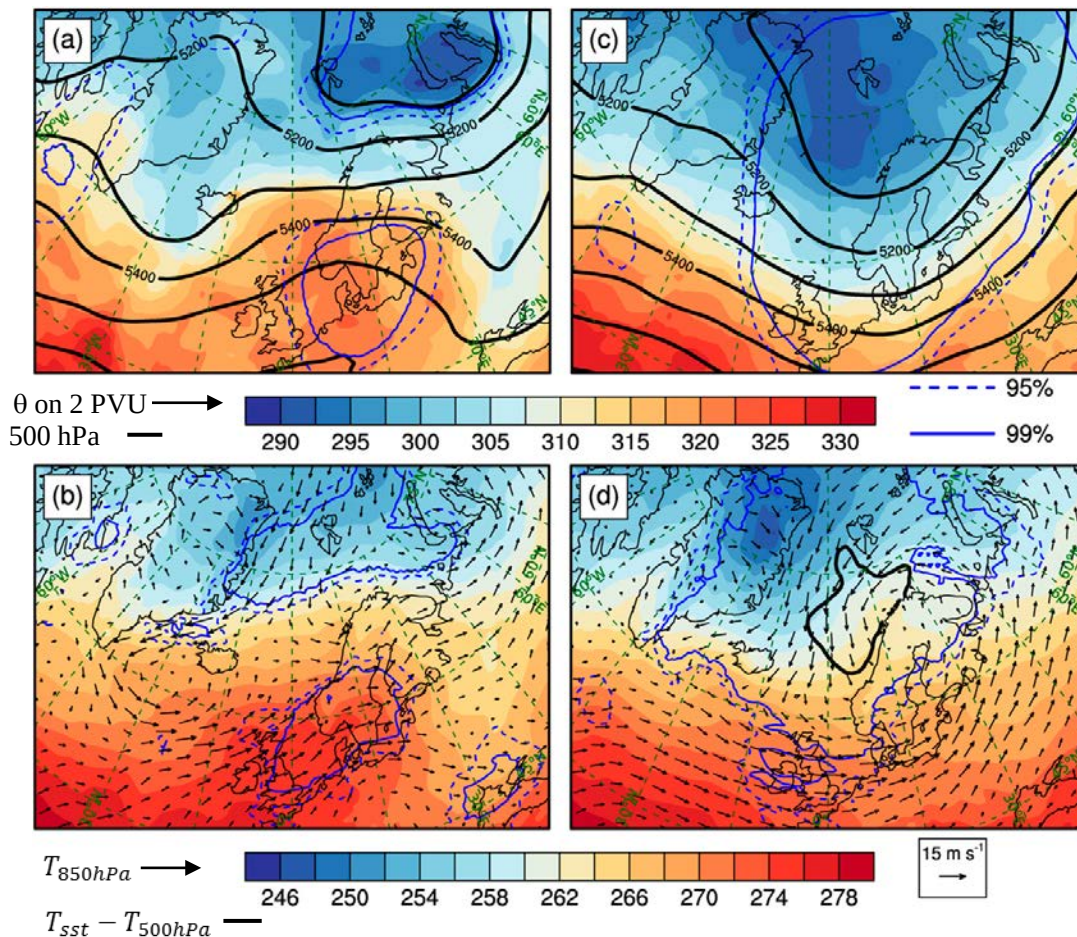
- ✓ Системы барических ложбин
 - высотная АПВ
 - глубокая конвекция
- ✓ Облачные запятые
 - глубокая бароклинность
 - высотная АПВ
 - глубокая конвекция
- ✓ Бароклинные волны
(системы прямого/обратного сдвига)
 - глубокая/приземная бароклинность
- ✓ Системы обратного сдвига
 - приземная бароклинность
 - глубокая конвекция (при развитии)
- ✓ Фронтальный тип пограничного слоя
 - приземная бароклинность
 - высотная АПВ
- ✓ Холодные барические депрессии
 - приземная бароклинность
 - глубокая конвекция
 - возможна высотная АПВ
- ✓ Орографические полярные циклоны
 - подветренная сторона

Условия образования систем прямого и обратного сдвига



Прямой сдвиг

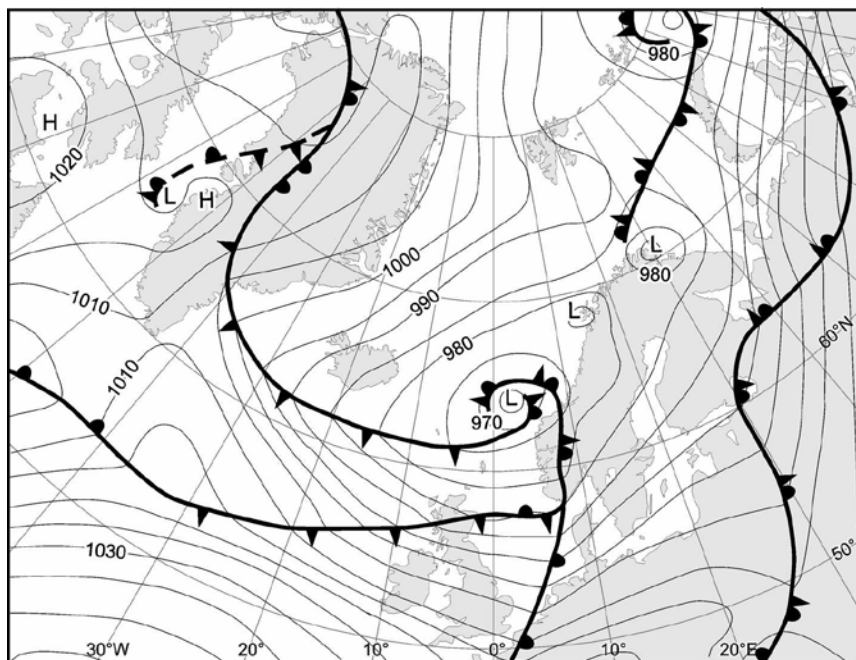
Обратный сдвиг



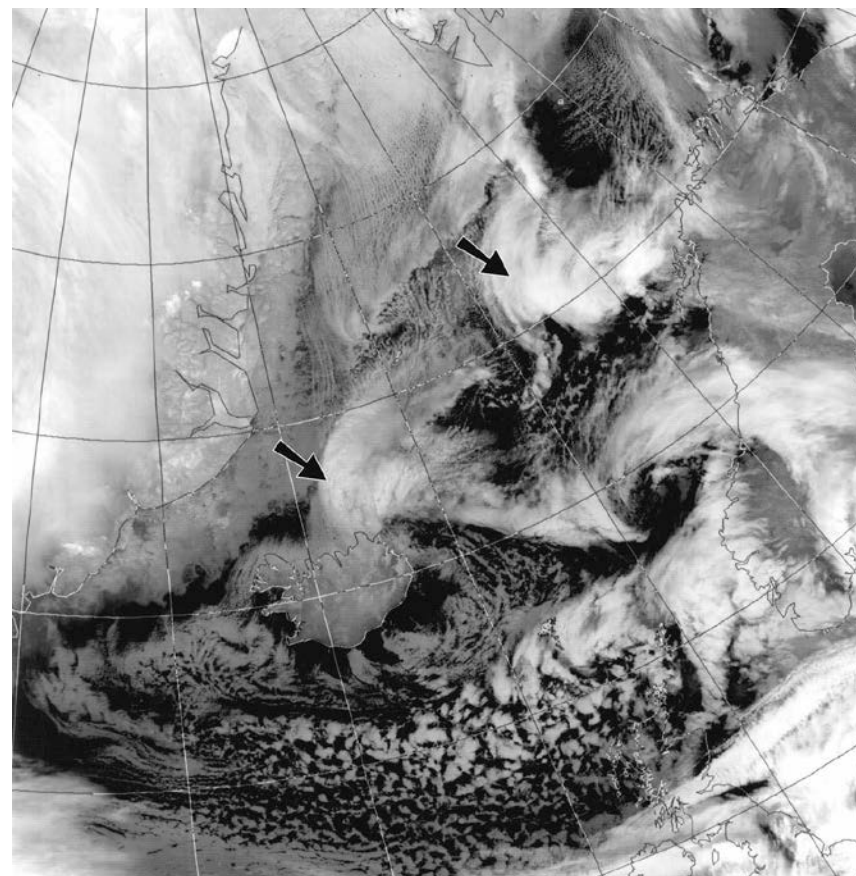
Зонально ориентированная бароклинная зона в районе Норвежского и Баренцева морей на всех высотах в тропосфере

Приземная бароклинная зона в восточной части района вторжений холодного воздуха и почти баротропная вышележащая тропосфера

Облачные системы обратного сдвига

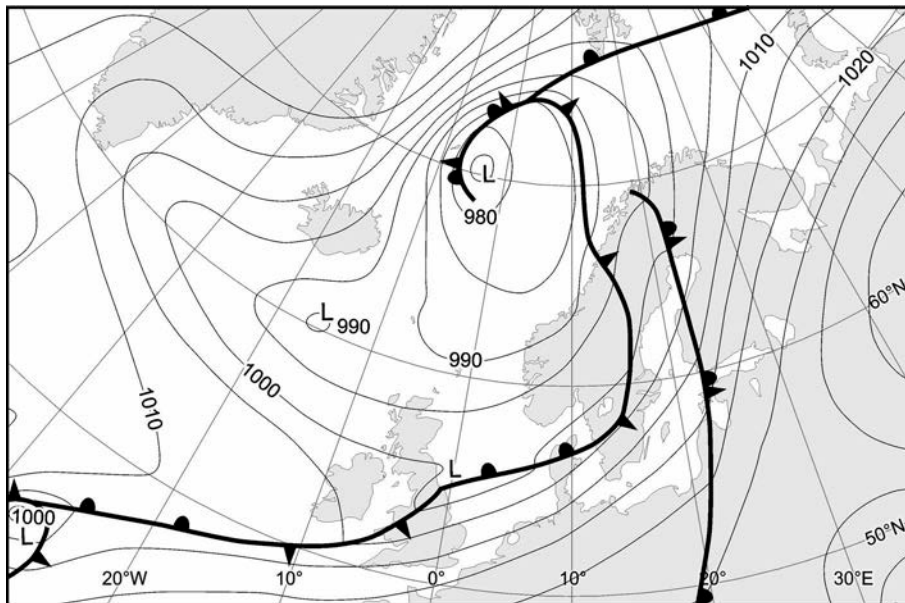


06:00 GMT 14 января 1981

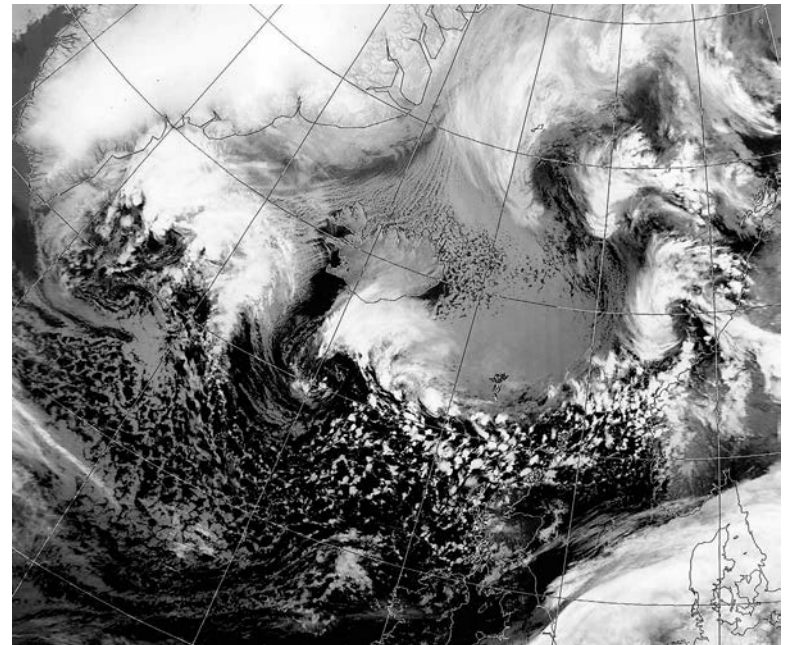


09:35 GMT 14 января 1981

Системы барических ложбин

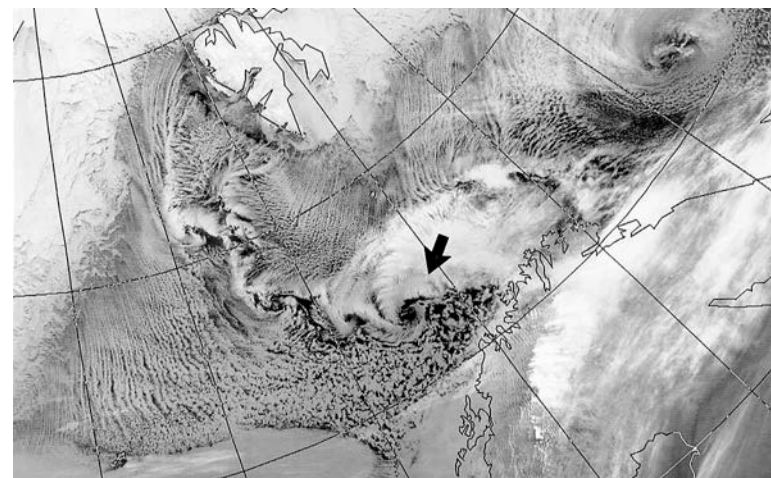
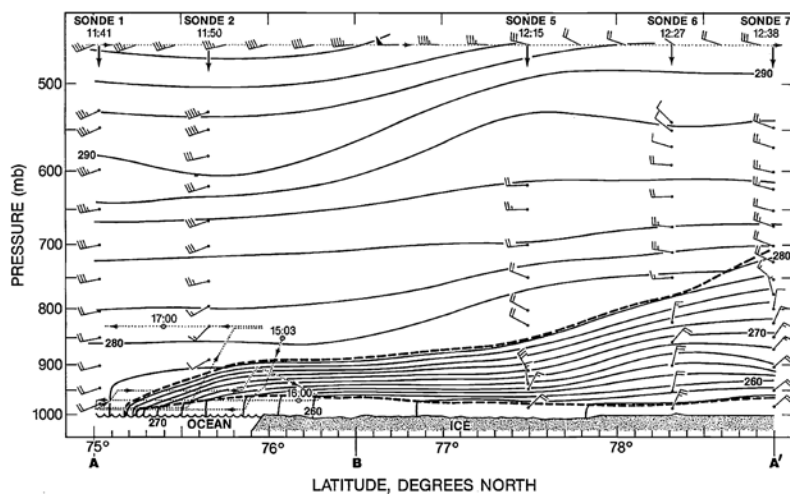


0600 GMT 15 October 1980

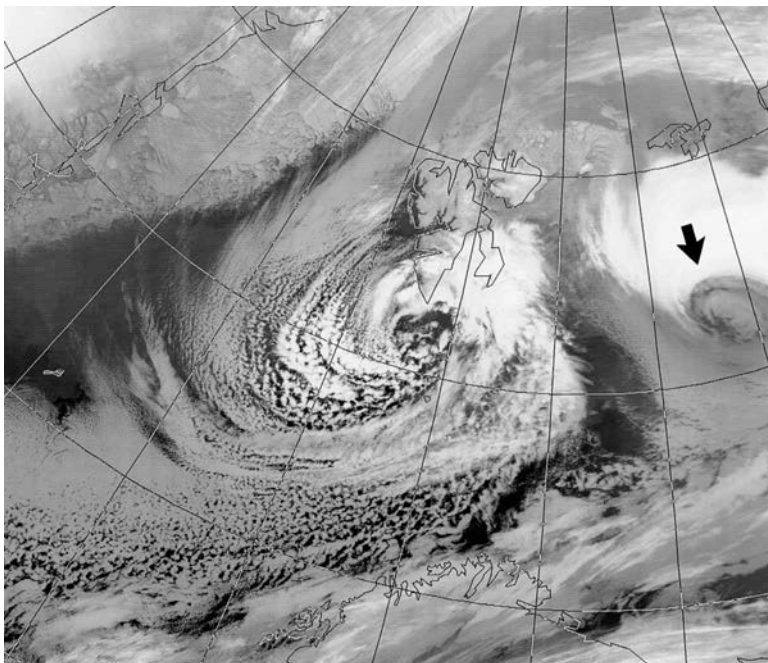


333 GMT 15 October 1980

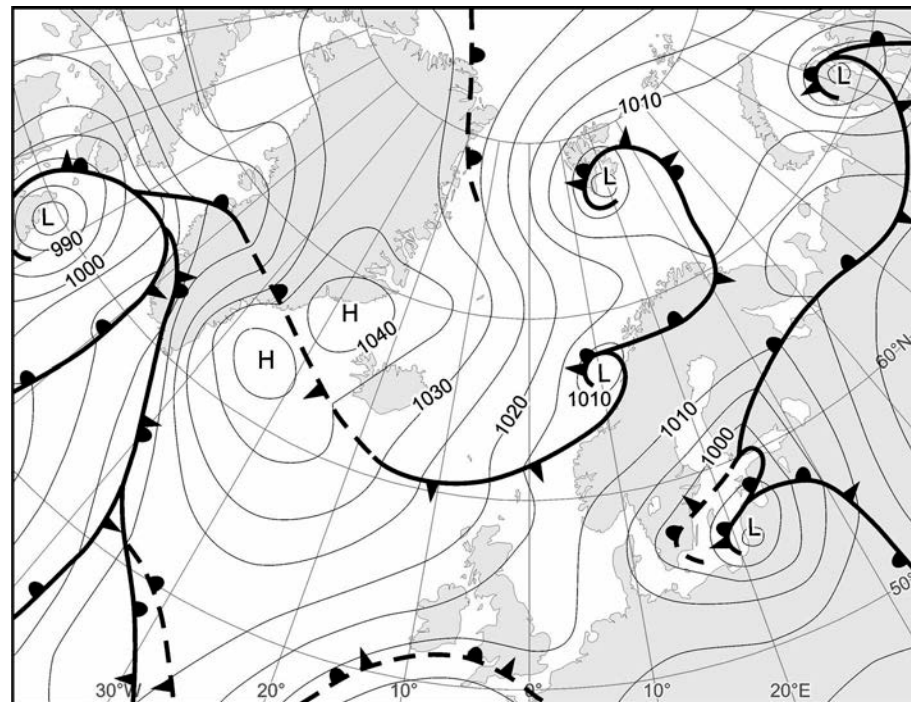
Фронтальный тип пограничного слоя



Тип холодной барической депрессии



13:33 GMT 15 октября 1980



06:00 GMT 15 октября 1980

Орографические полярные циклоны

