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

Хворостовский К.С.

*Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург*

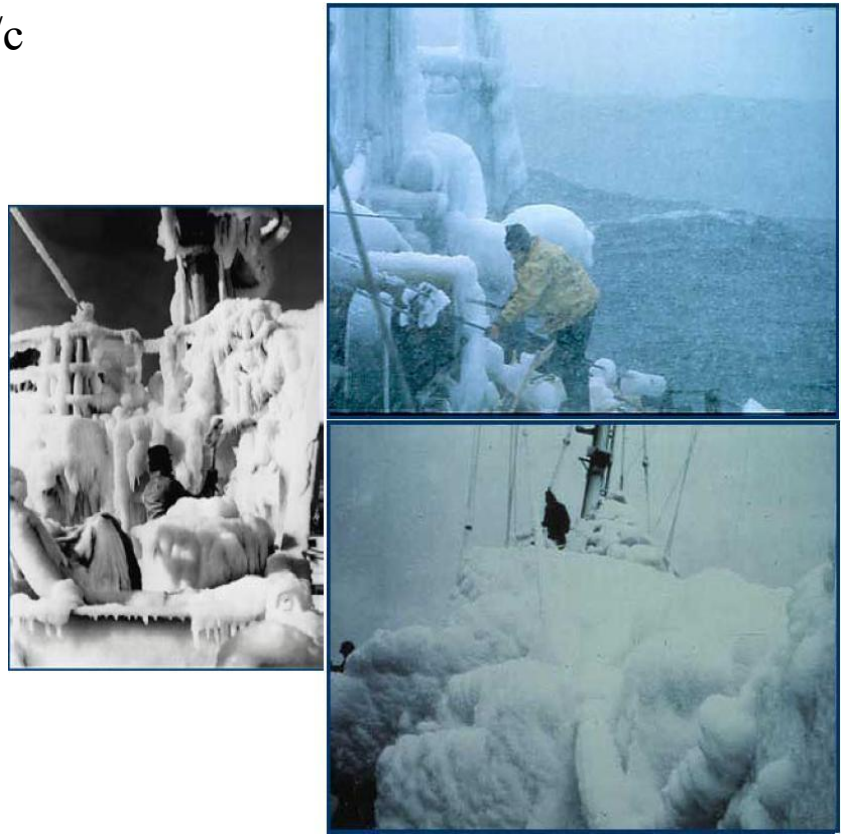
# Актуальность изучения ПЦ

Полярные циклоны (ПЦ) – непродолжительные интенсивные мезомасштабные циклоны, возникающие над морской поверхностью вне основных бароклинных 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



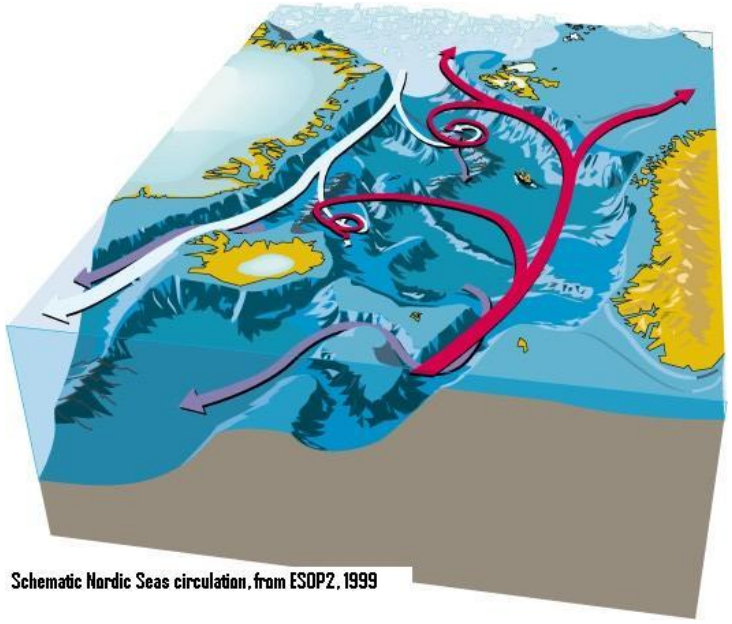
# Актуальность изучения ПЦ

Полярные циклоны (ПЦ) – непродолжительные интенсивные мезомасштабные циклоны, возникающие над морской поверхностью вне основных бароклинных 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 (Condron 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*)

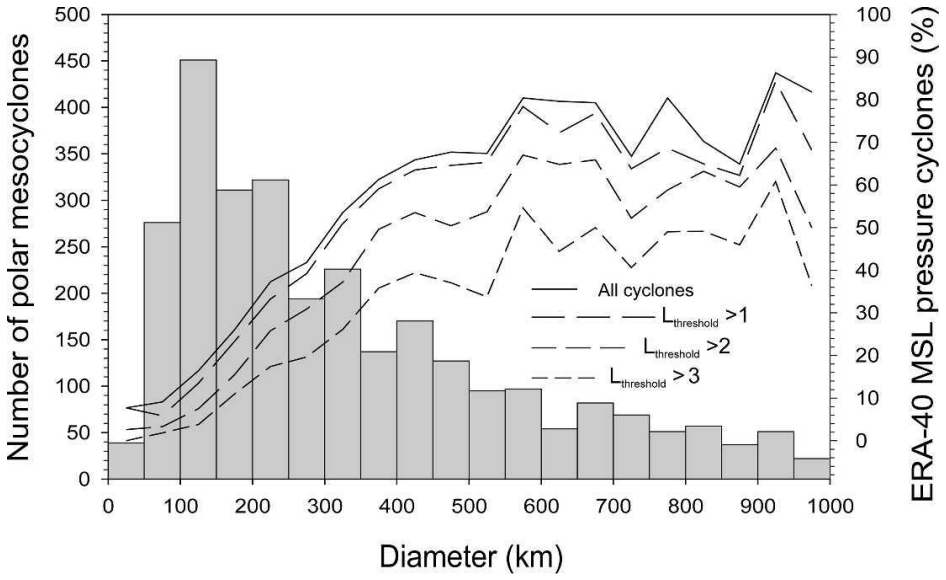


# Сложности при исследовании полярных циклонов

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

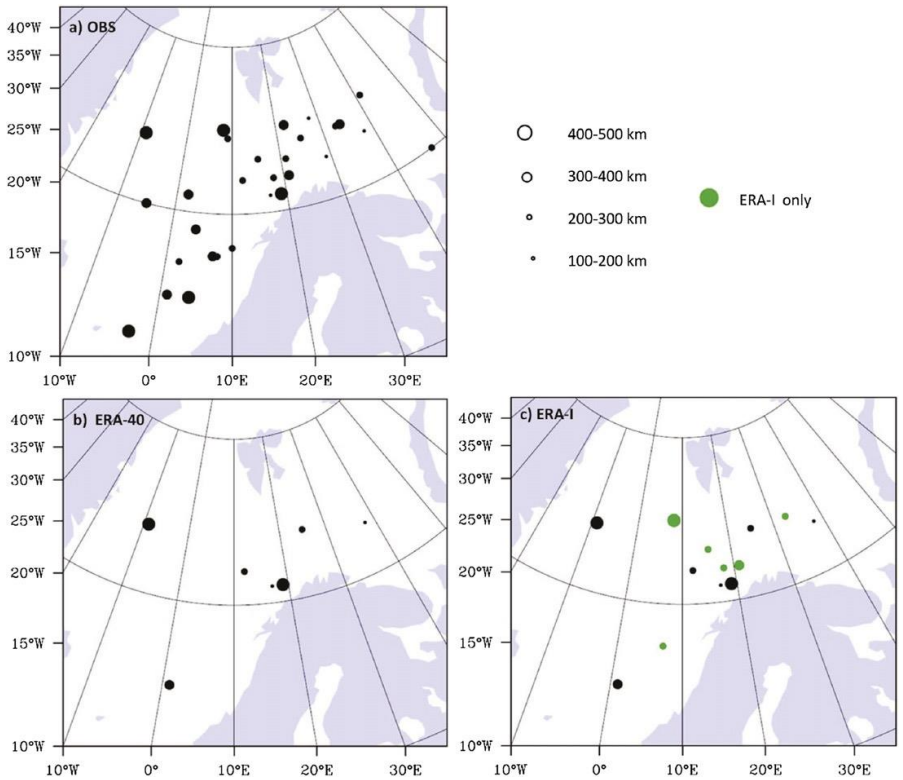
(Condron, et al., 2006, *MWR*)



# 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 обеспечивают регулярной  в полярных районах позволяющий проводить мониторинг ПЦ, 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

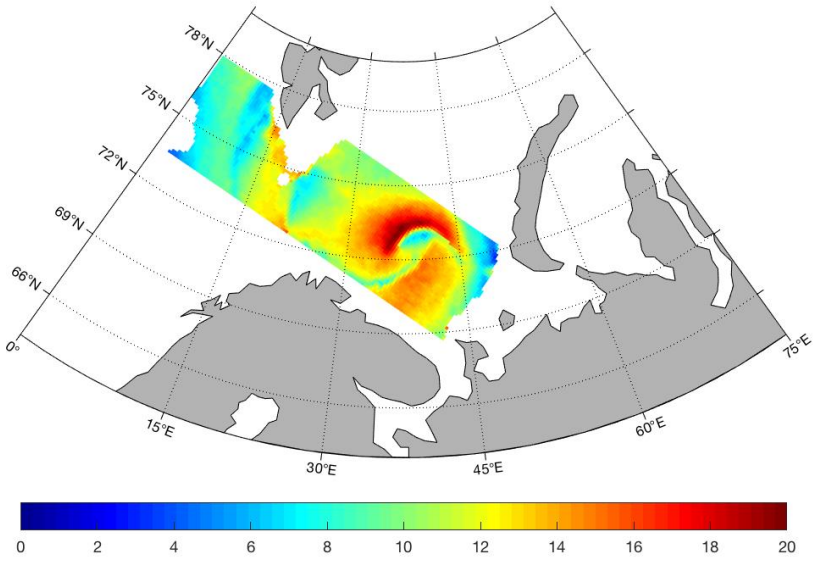
# Спутниковые снимки в ИК и видимом диапазонах

- ✓ 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

# Скаттерометры

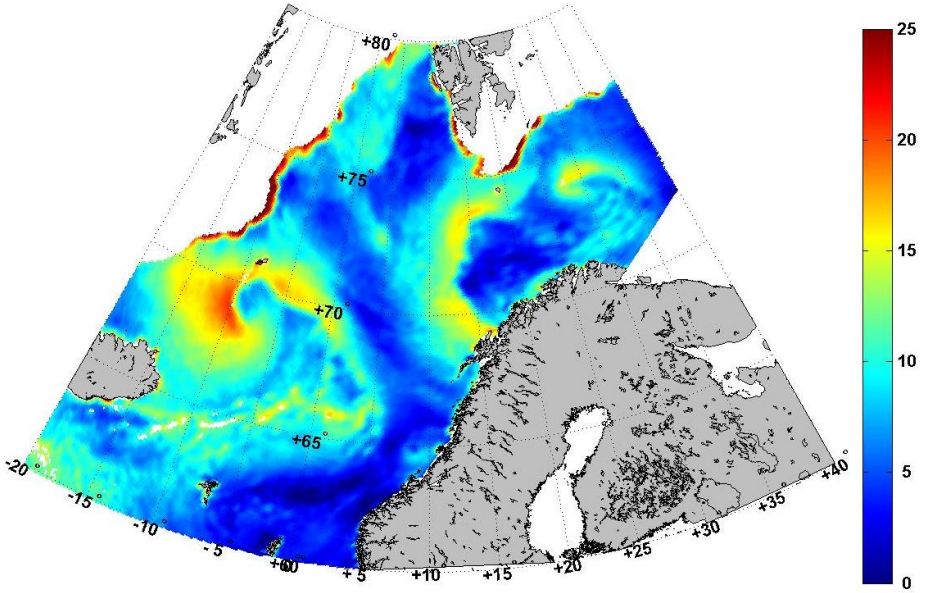
- ✓ Сенсор: микроволновый радар (ASCAT)
- ✓ Обеспечивает регулярные измерения полей скорости и направления ветра включая полярные районы
- ✓ Измерения проводятся независимо от наличия облачности и времени суток
- ✓ *Сигнал насыщается в случае сильных ветров, что занижает значения скорости ветра >15 м/с*




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

# Микроволновые радиометеры

- ✓ Сенсор: пассивный микроволновый радиометр (SSMIS, AMSR-2)
- ✓ Обеспечивает регулярные измерения полей скорости ветра 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

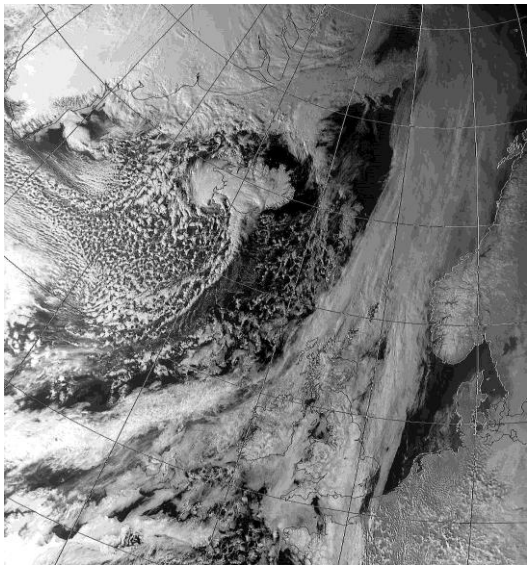
- ✓ Сенсор: активный радиолокатор с синтезированной апертурой (Sentinel-1, Radarsat-2)
- ✓ Измерения проводятся независимо от наличия облачности и времени суток
- ✓ Обеспечивает измерения полей ветра включая полярные районы, в том числе вблизи кромки льда

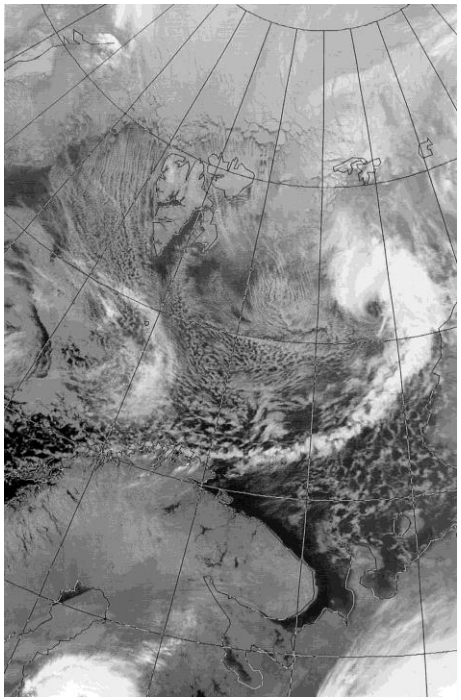
Северная часть моря Лабрадор
29 December 1997, 21:00 UTC

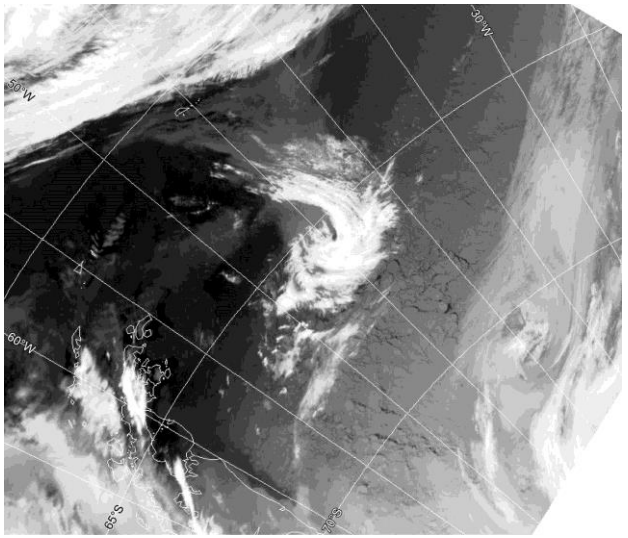
# Структура облачного покрова ПЦ на спутниковых снимках

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

# Облачная запятая

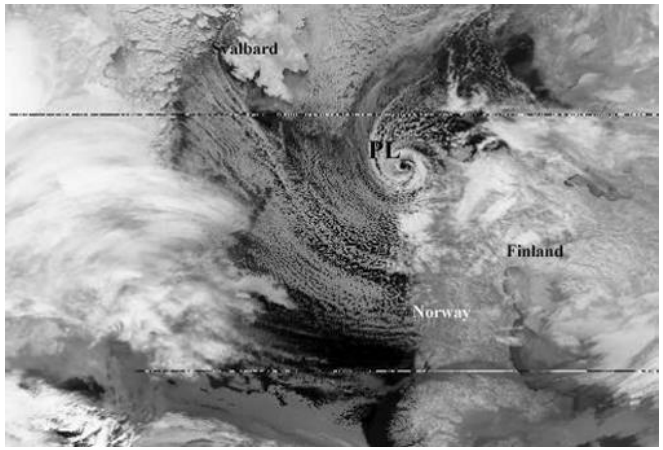


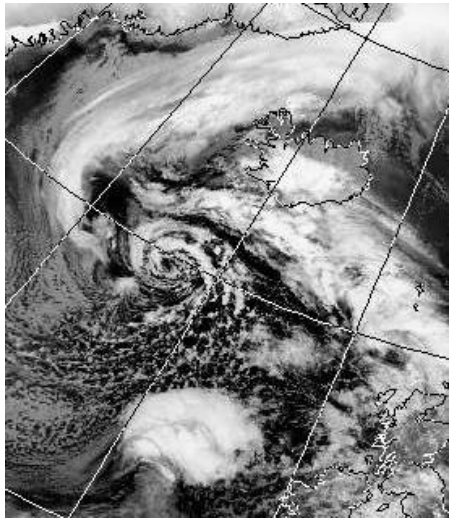


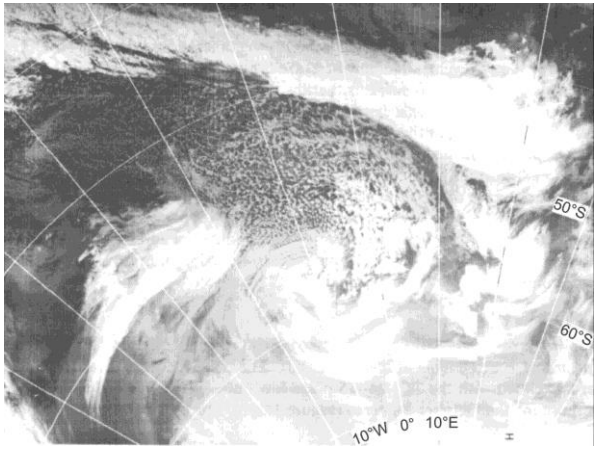


- ПЦ располагаются на холодной стороне основной бароклинной зоны: полярного или арктического/антарктического фронта
- Хвостовая часть ПЦ соответствует ложбине давления и является передней границей вторжения холодной воздушной массы

# Спиралевидный вихрь

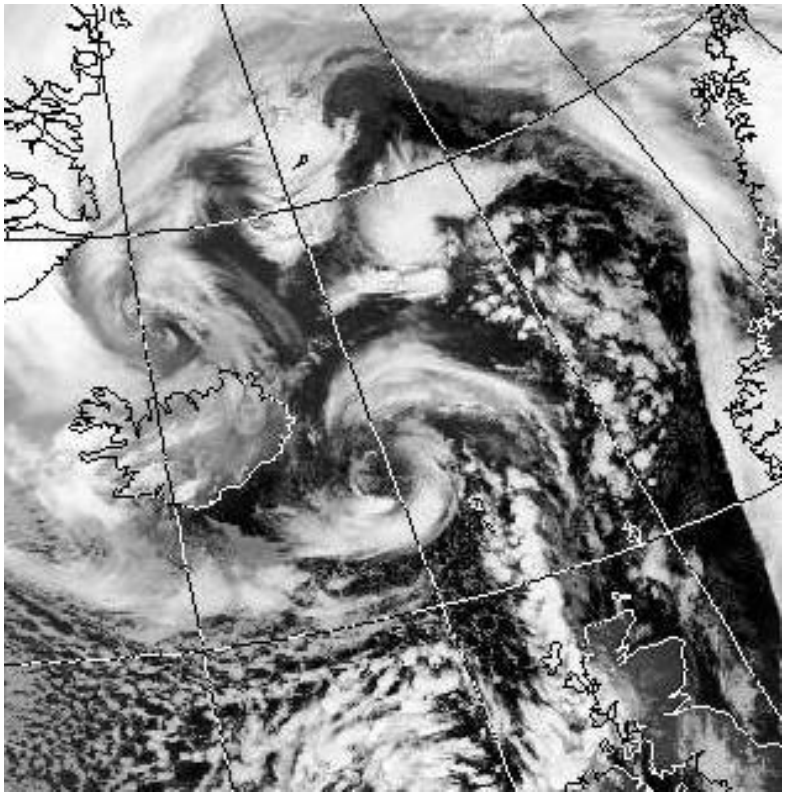


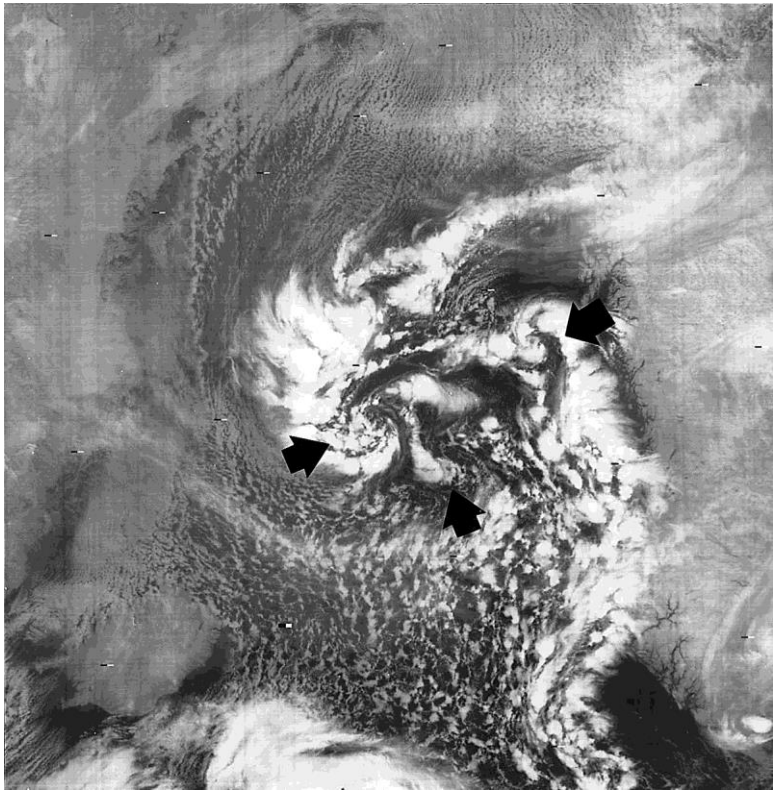






- Основным фактором образования является глубокая конвекция, возникающей при наличии высотной холодной депрессии
- Структура имеет сходство с фронтальной структурой внетропических циклонов

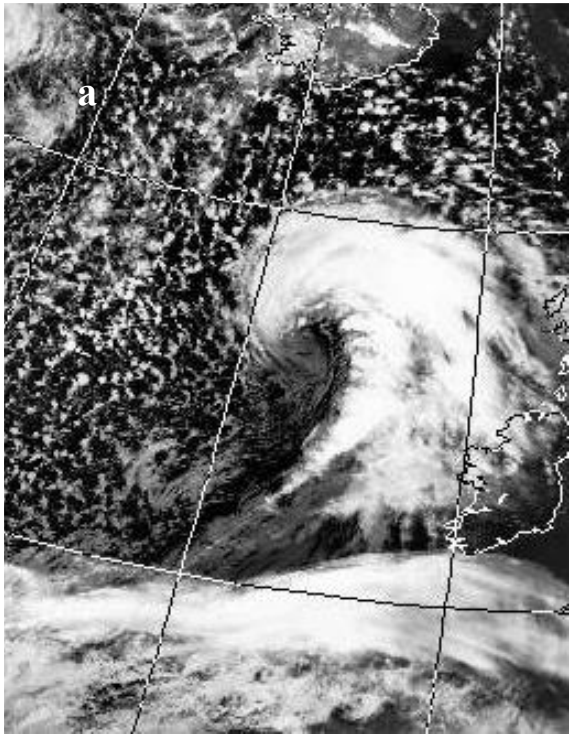
# Сигнатура карусель



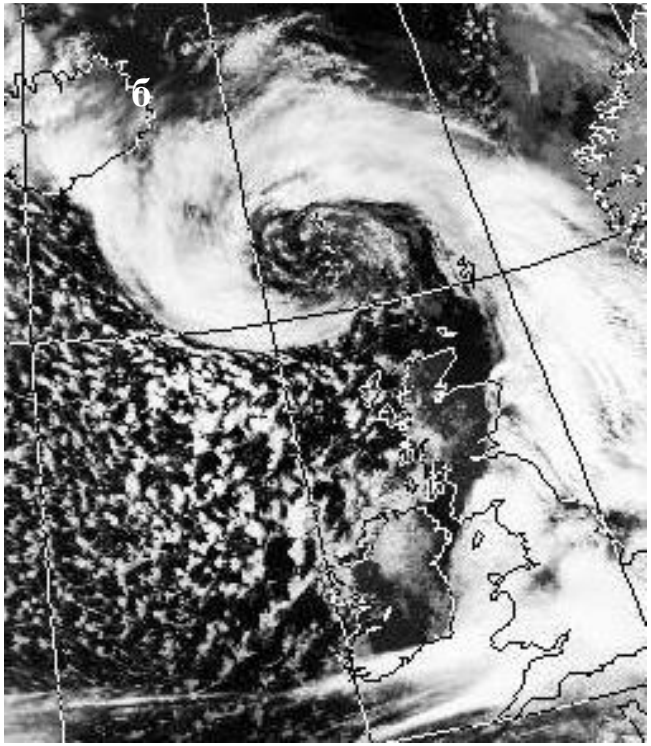


Как и для спирали основным фактором образования является наличие высотной холодной депрессии

# Мгновенные окклюзии



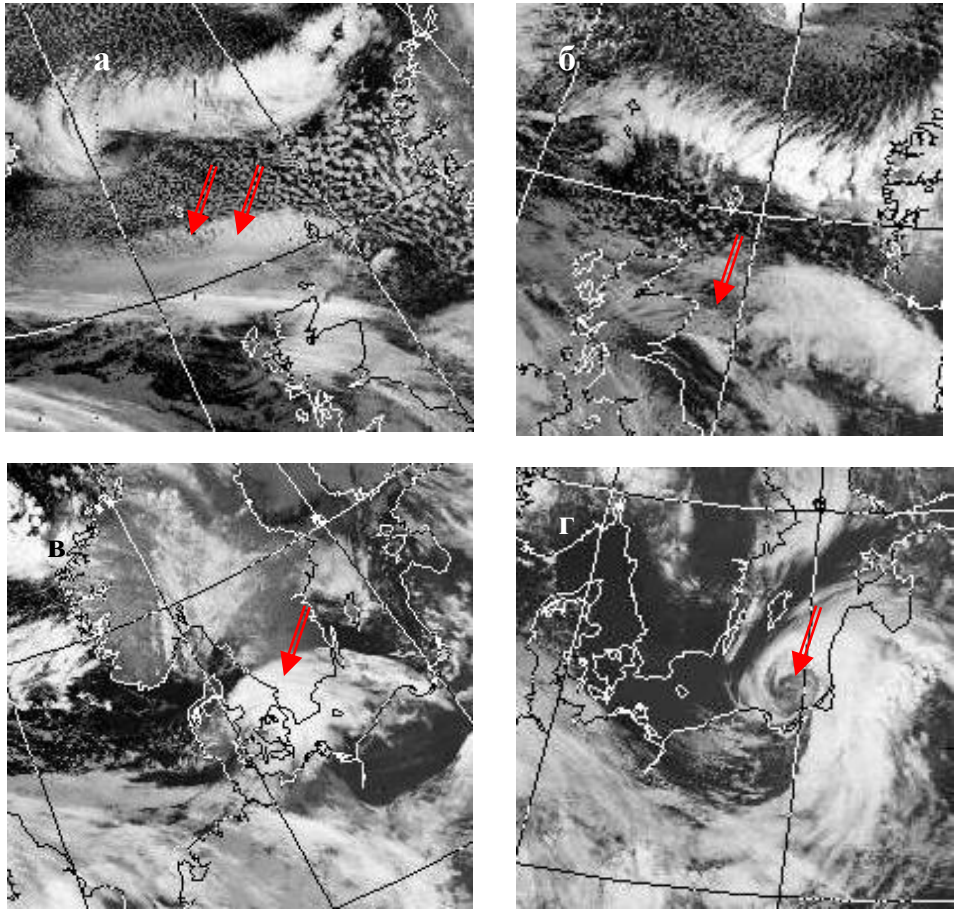

17:21 GMT 2 марта 1994




05:34 GMT 3 марта 1994

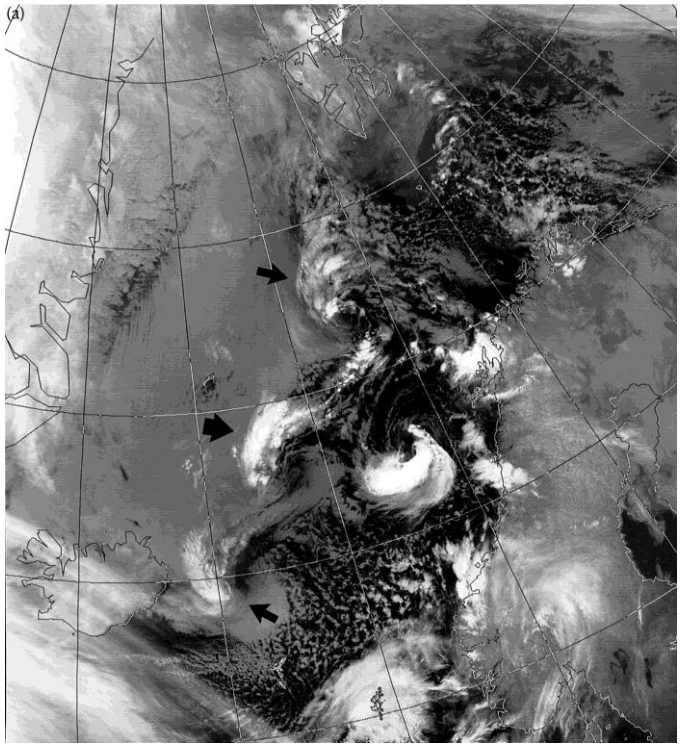
Образуется при взаимодействии ПЦ в форме облачной запятой с полярным фронтом; на фронте возникает волна, которая сразу переходит в стадию окклюзии

# Бароклинные волны




Глубокая бароклинность

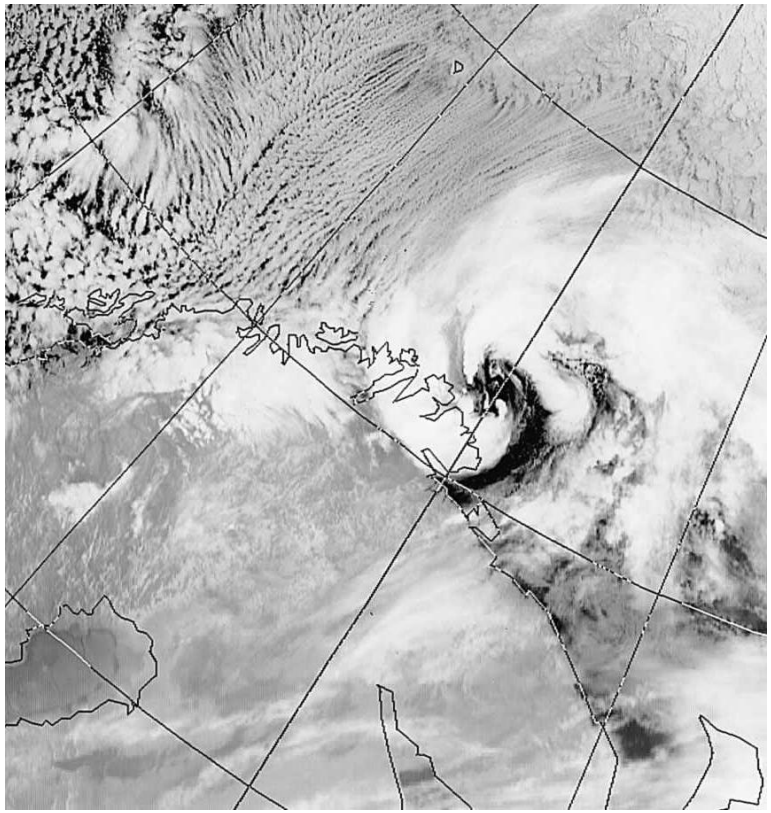
ПЦ развивается на вторичном фронте к северу от полярного фронта



Неглубокая бароклинность

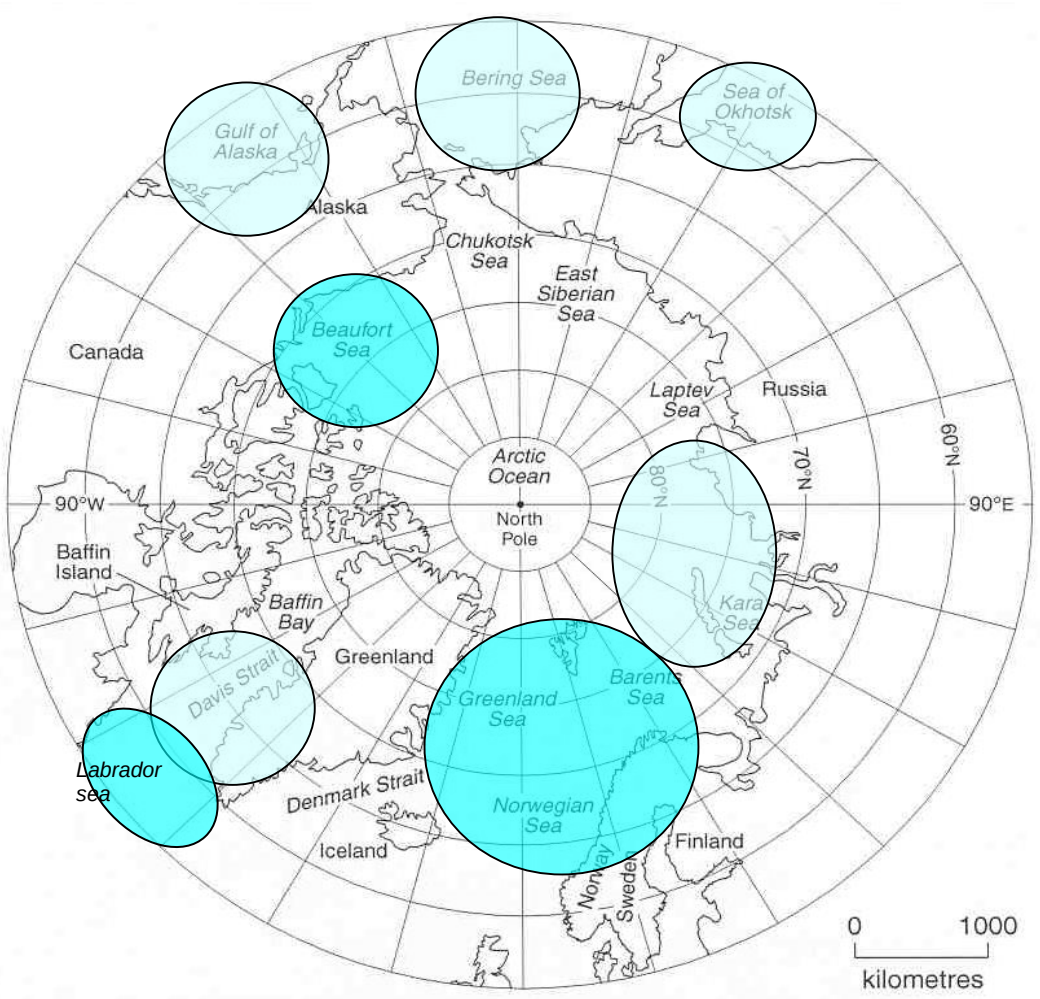
Серия ПЦ развивается на границе между холодной воздушной массы к западу и теплой морской к востоку

# Системы с теплым ядром



Выделение скрытого тепла при интенсивной конвекции может привести к формированию 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

⬇

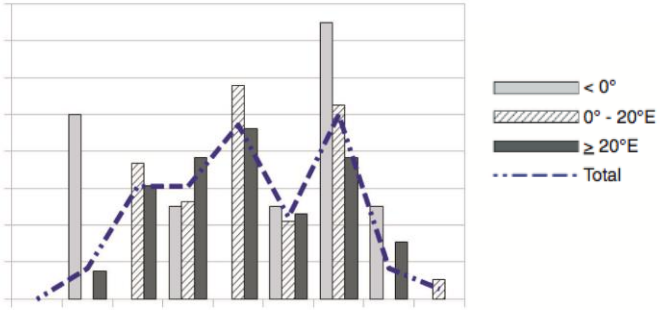
Большой градиент температуры между
холодным подинверсионным воздухом и
теплым морским

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

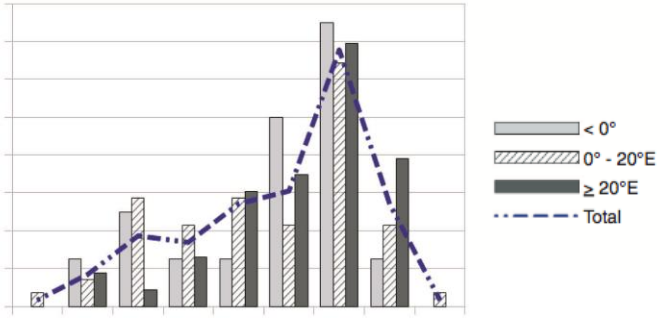
# Климатология ПЦ в северной части Атлантики

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

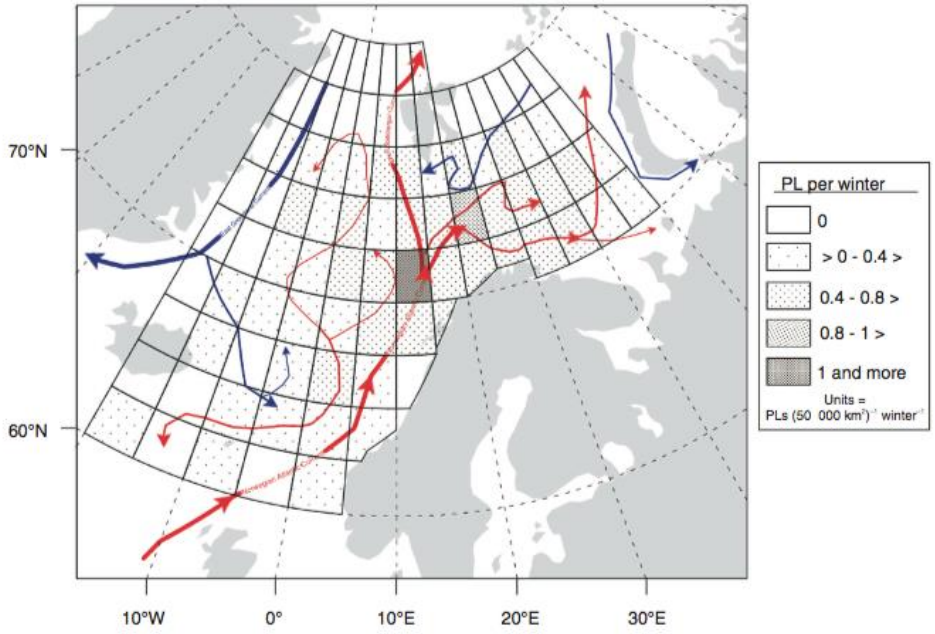
1999/2000 - 2005/2006




2006/2007 - 2012/2013



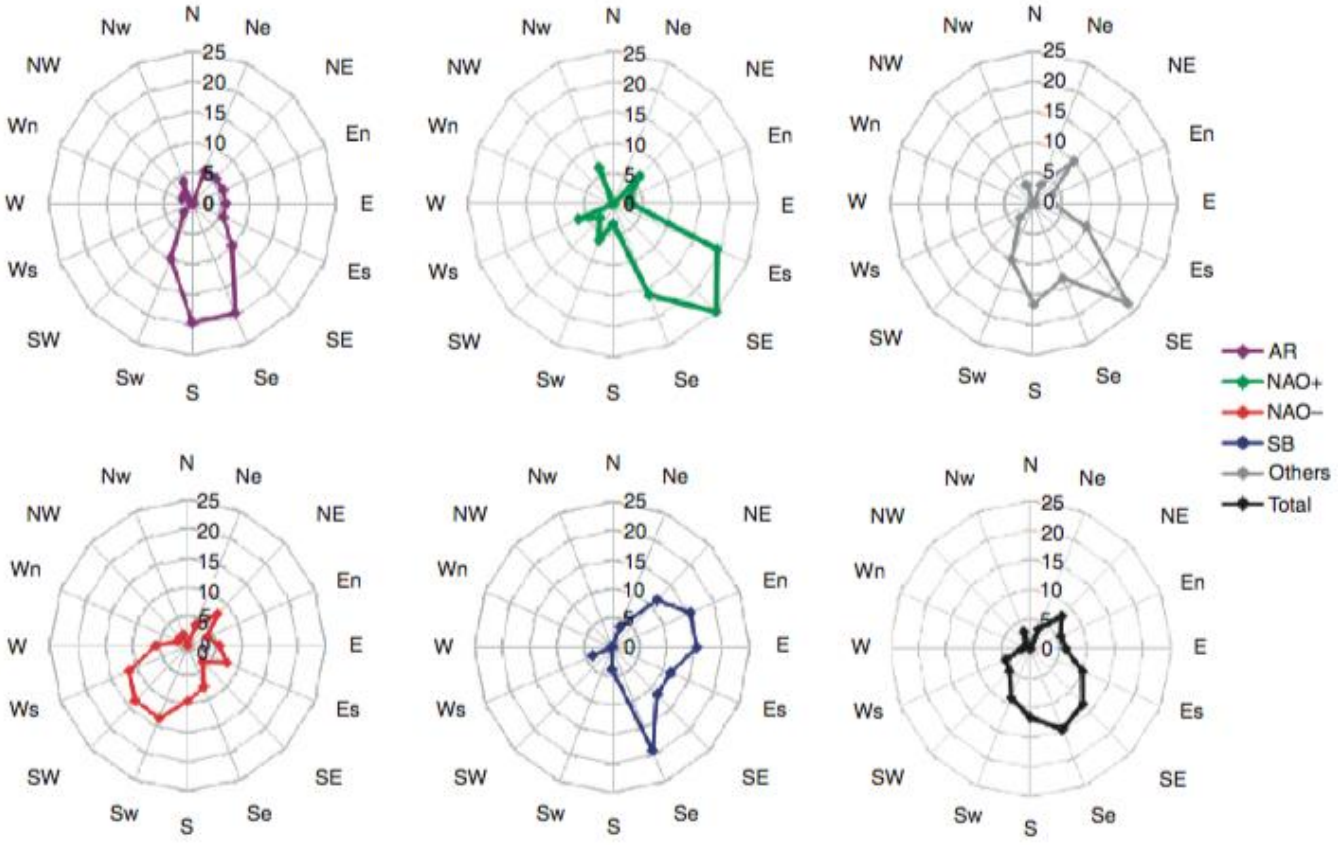

Изменение сезонного распределения ПЦ с северной Атлантике




Места наиболее частого зарождения ПЦ соответствуют зонам конвергенции теплых течений

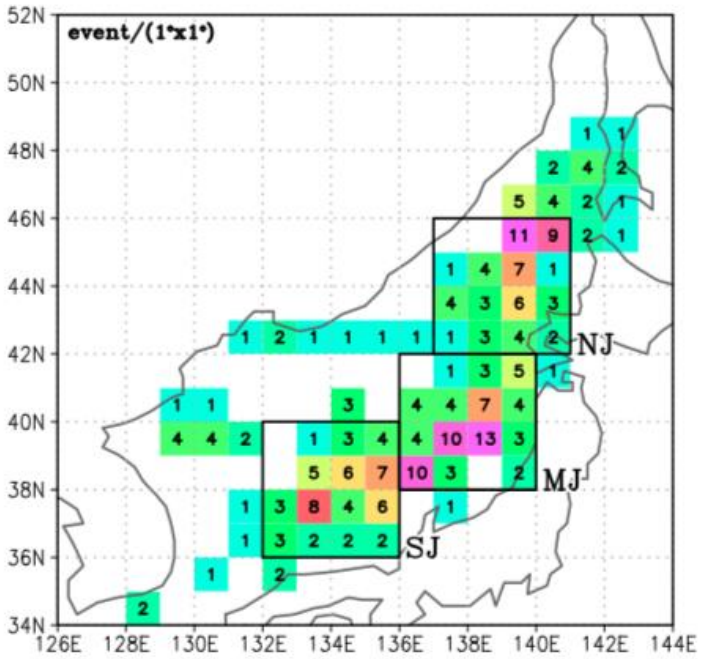
# Климатология ПЦ в северной части Атлантики

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



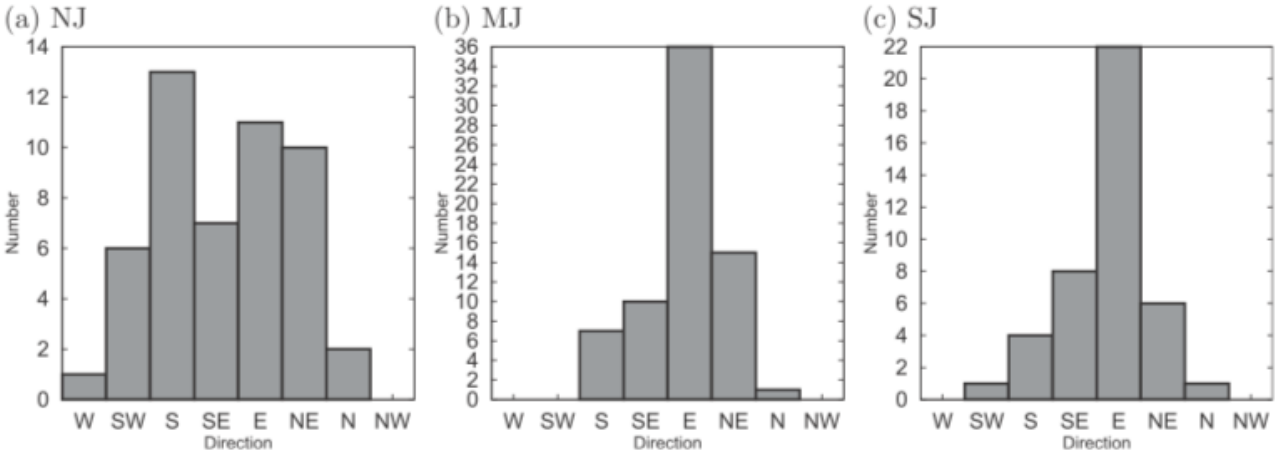

Направления движения ПЦ в зависимости от режима атмосферной циркуляции

# Климатология ПЦ в Японском море




По данным реанализ JRA-55 (разрешение 60 км
(Janase et al., 2016)

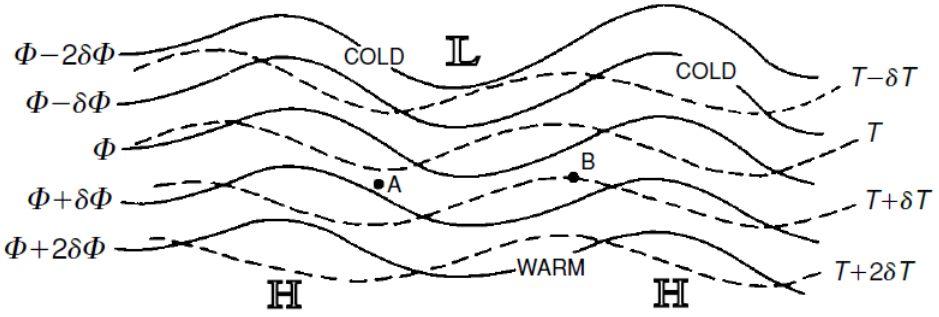
Количество ПЦ в момент их максимального развития




Частота направления движения ПЦ для трех выделенных районов

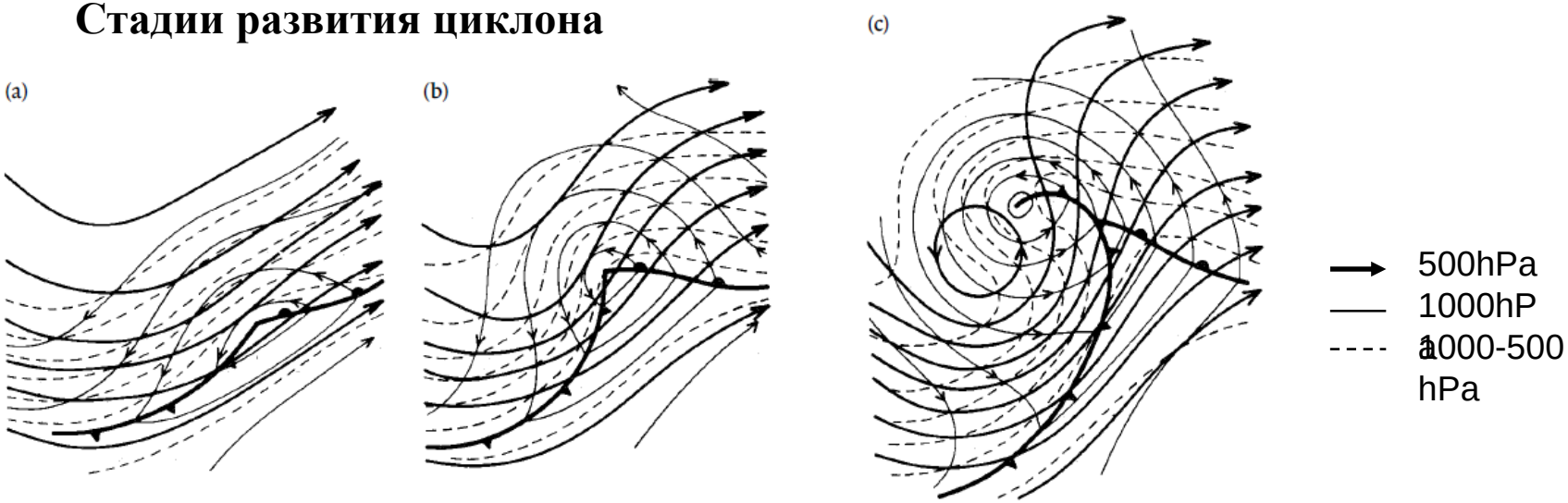
# Образование внетропических циклонов

## 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.

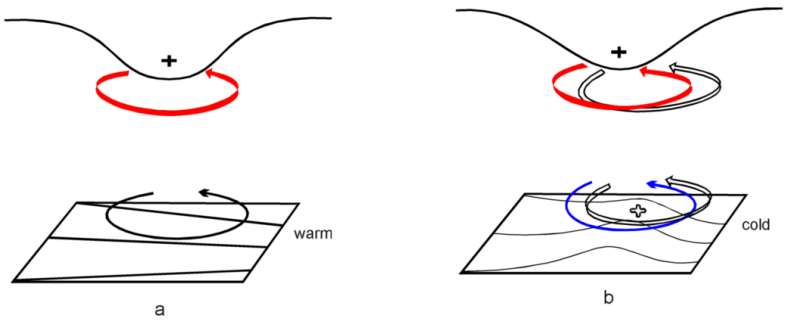
# Типы образования циклонов

**Тип А**

Образование циклонов инициируется сильной приземной бароклинной неустойчивостью. Ослабление – в следствие окклюдирования

**Тип В**

Развитие циклонов инициируется высотной бароклинностью, обусловленной высотной коротковолновой ложбиной, которая двигается над приземной фронтальной зоной




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 – Вяйсяля (статическая устойчивость атмосферы)
$f$ – параметр Кориолиса

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

$\theta$ – потенциальная температура

Условия формирования ПЦ со значительно меньшими значениями $R$ по сравнению с внетропичесими 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

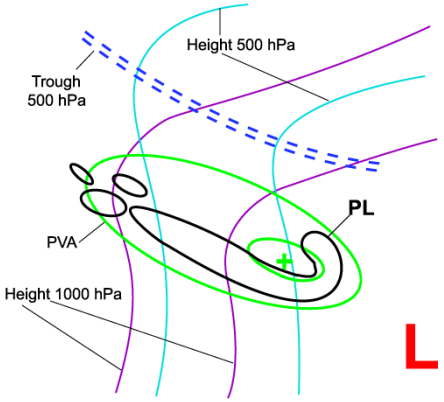
- Приземная зона бароклинности или близкое расположение к основной бароклинной зоне
- Поток холодной воздушной массы над теплой водной поверхностью
- Высотная холодная барическая ложбина или депрессия

# 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

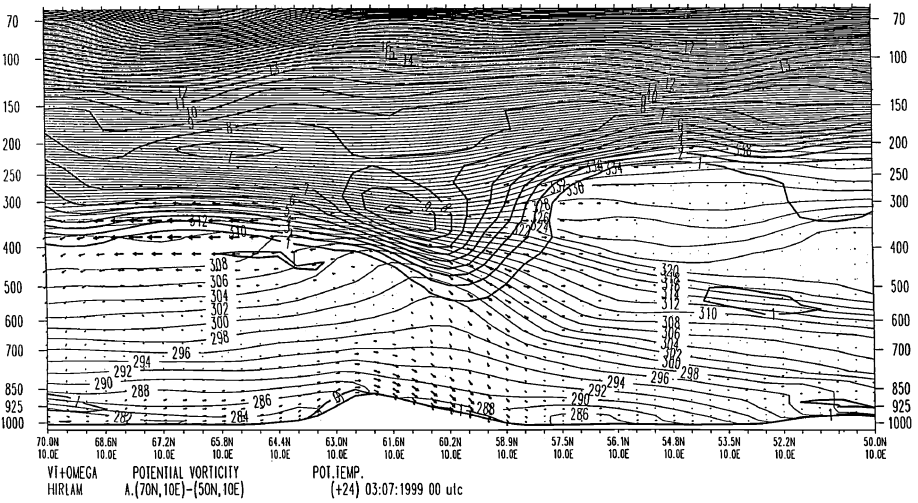
# Бароклинная неустойчивость при развитии ПЦ

**Адвекция положительного вихря скорости**

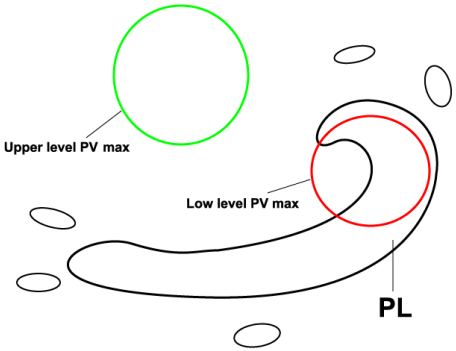



Развитие ПЦ в пределах приземной ложбины и перед высотной ложбиной за холодным фронтом

**Адвекция аномалии потенциального вихря скорости**




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




$PV$ – потенциальный вихрь скорости

$f$ – параметр Кориолиса

$\zeta_\Theta$ - относительный вихрь скорости

$g$ – ускорение свободного падения

$\Theta$ – потенциальная температура

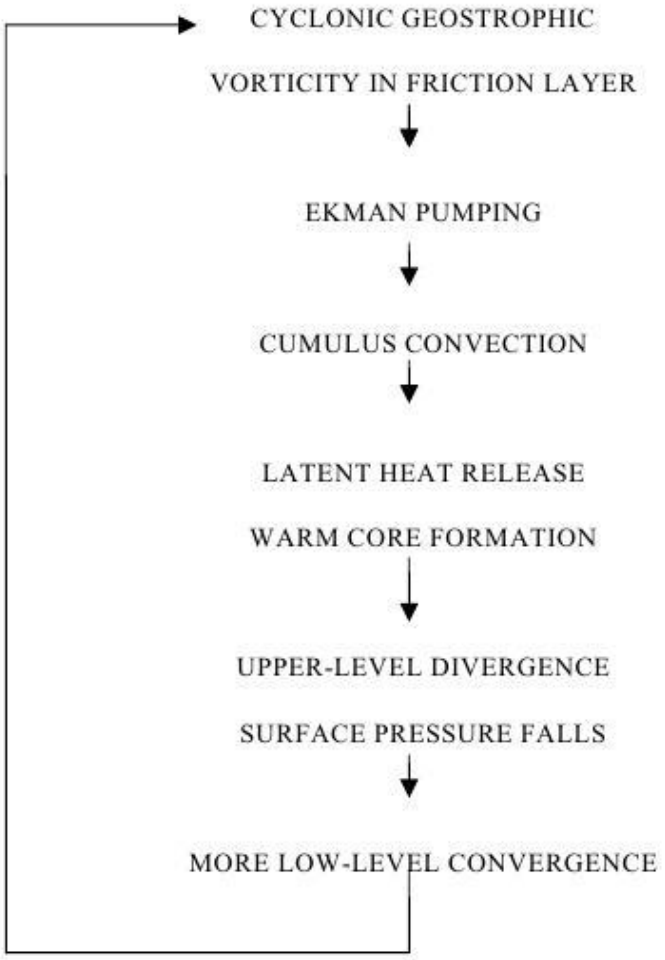
$p$ – давление

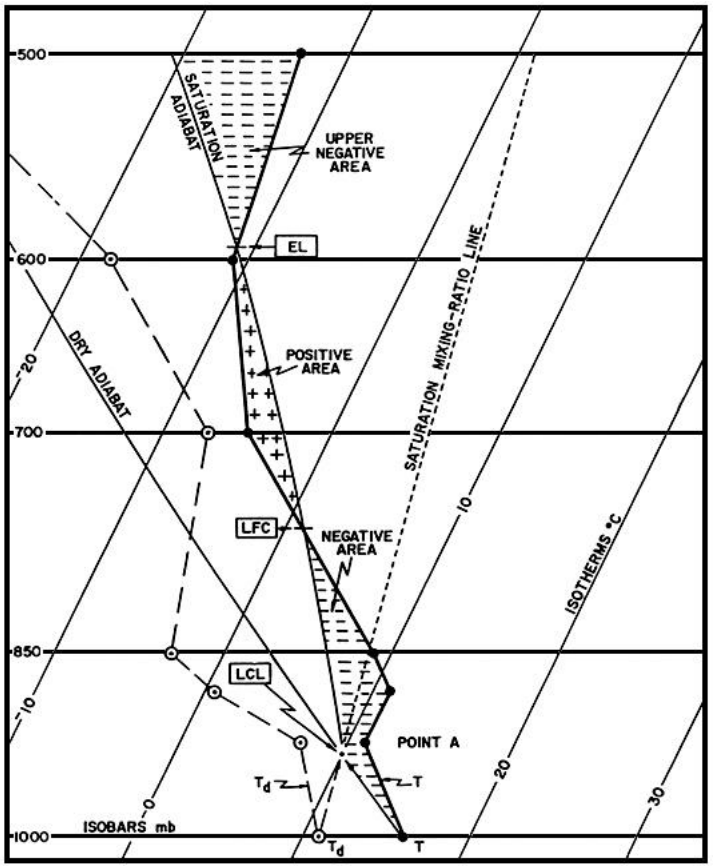
$10^{-6}\ m^2\ s^{-1}\ K\ kg^{-1} = 1$ PVU

Глубина $H$ проникновения поля ветра обусловленного аномалией $PV$

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

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



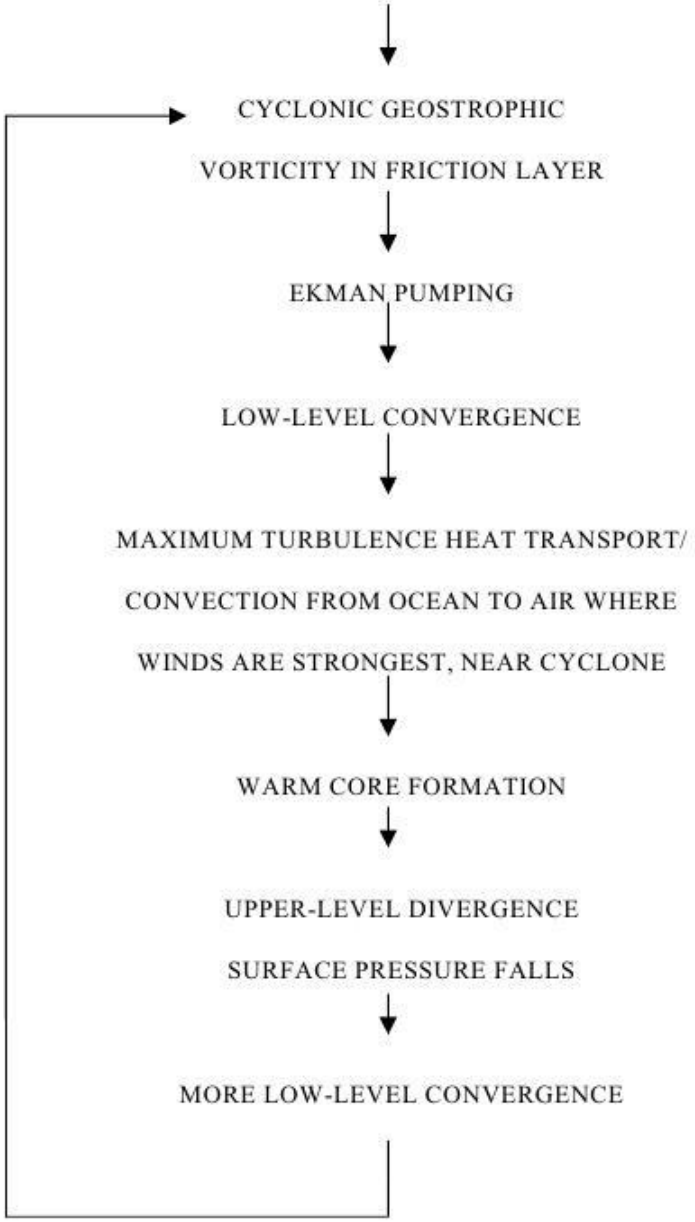




$$CAPE = \int_{z_{fc}}^{z_{el}} g \frac{T_{vp} - T_v}{T_v} dz$$

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

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.

Emanuel and Rotunno, 1989

# Механизмы образования ПЦ

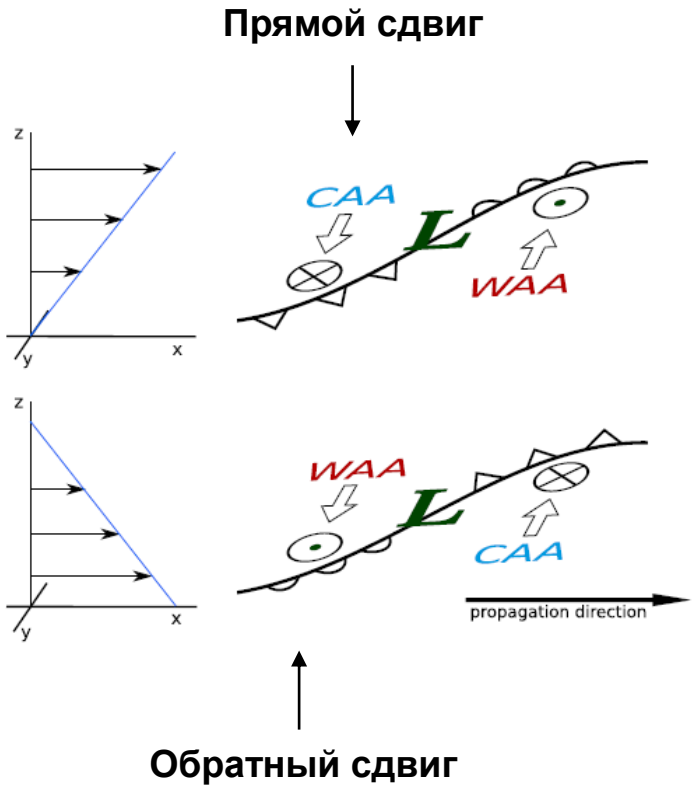
## Businger and Reed, 1989

- ✓ Коротковолновый / струйный тип
  - глубокая бароклинность
  - высотная положительная адвекция вихря скорости
- ✓ Тип Арктического фронта
  - приземная бароклинность
  - интенсивные поверхностные потоки
- ✓ Тип холодных барических депрессий
  - высотная холодная депрессия
  - глубокая конвекция

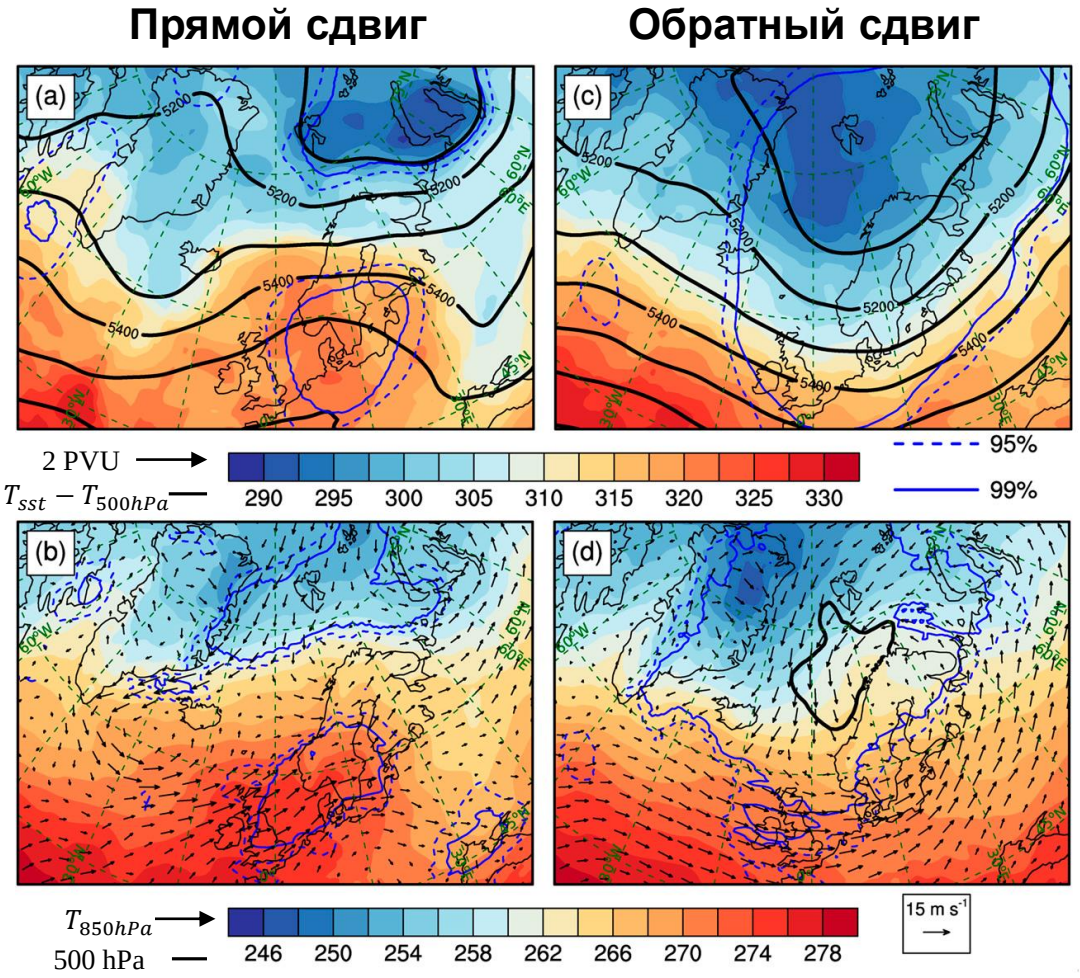
## Rasmussen and Turner, 2003

- ✓ Системы обратного сдвига
- ✓ Системы барических ложбин
  - + глубокая конвекция
- ✓ Фронтальный тип пограничного слоя
- ✓ Холодные барические депрессии
- ✓ Облачные запятые
- ✓ Бароклинные волны – системы прямого сдвига
- ✓ Орографические полярные циклоны

# Условия образования систем прямого и обратного сдвига



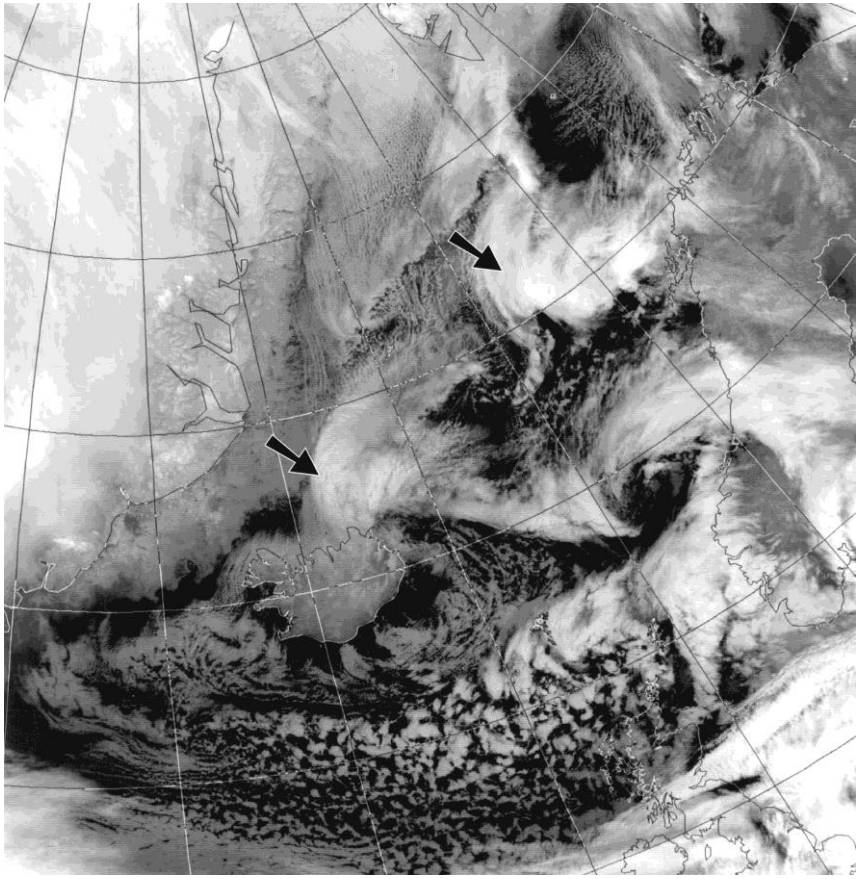

Terpstra et al., 2016



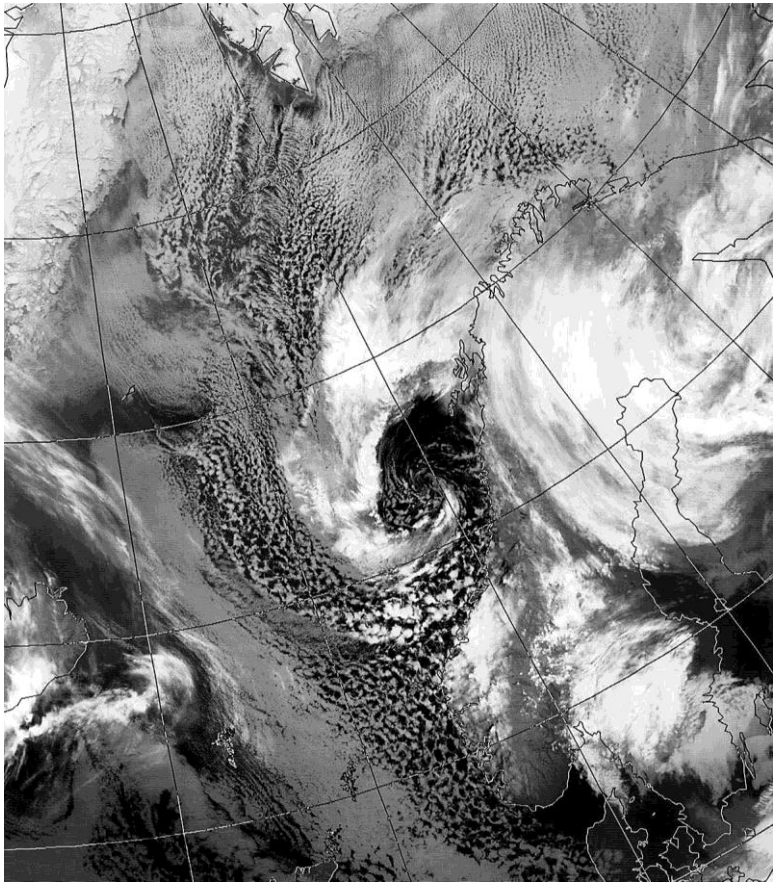

Зонально ориентированная бароклинная зона в районе Норвежского и Баренцева морей на всех высотах в тропосфере

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

# Облачные системы обратного сдвига

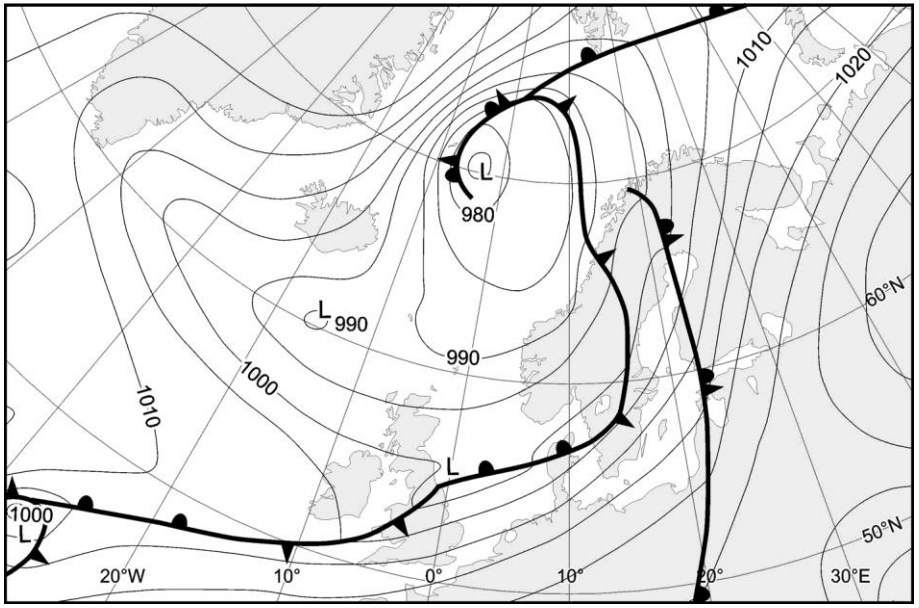


0935 GMT 14 January 1981

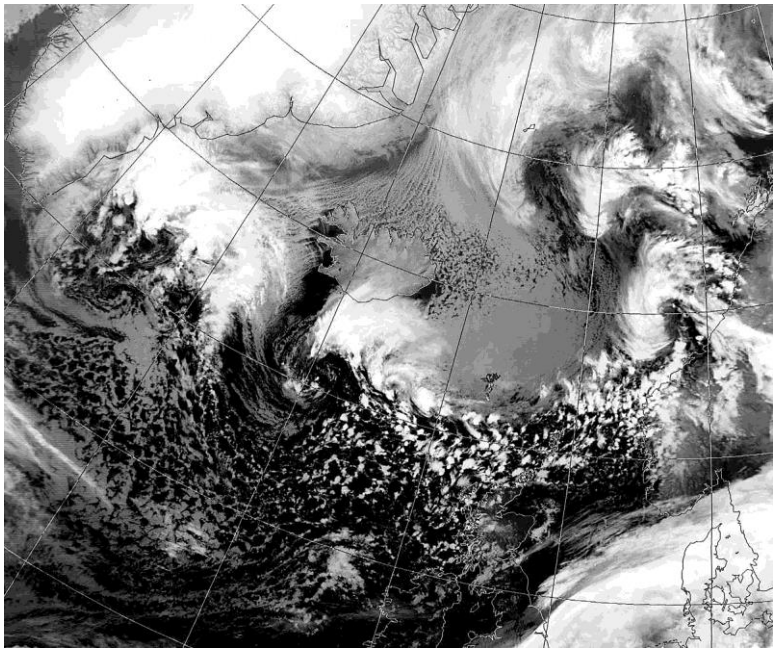


0841 GMT 4 December 1981

# Системы барических ложбин

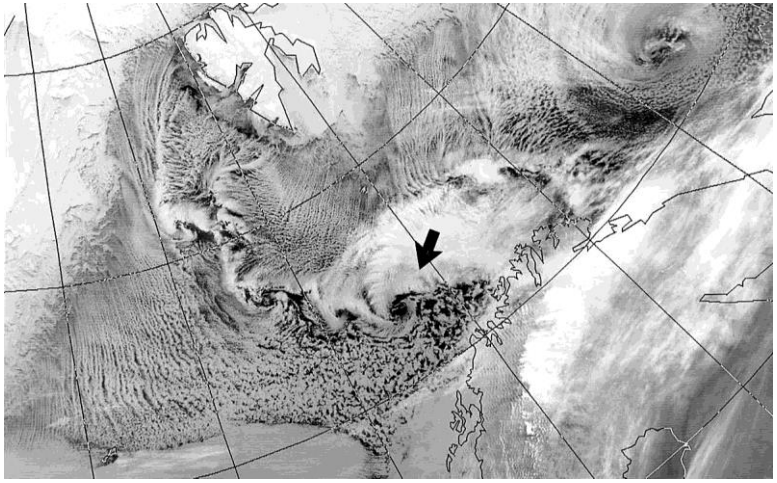


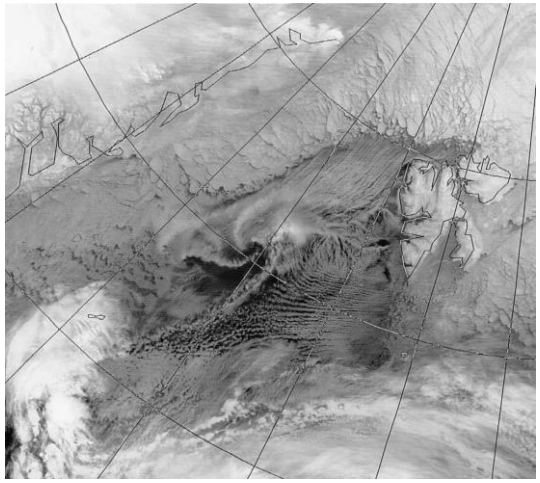

0600 GMT 15 October 1980

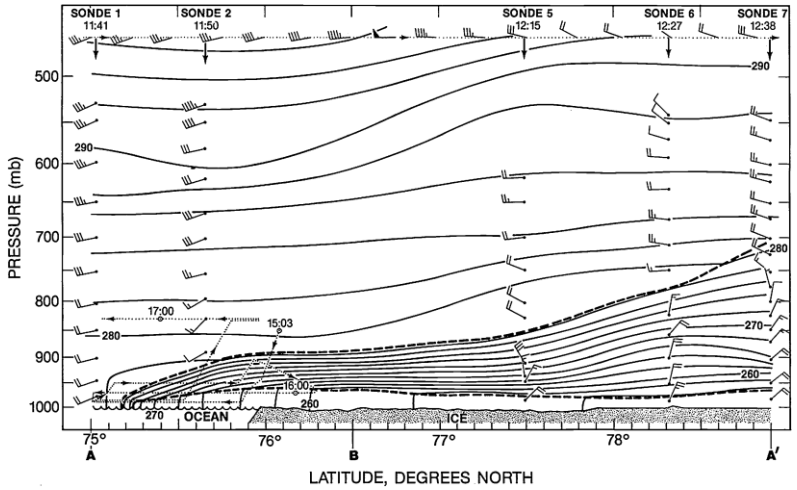


333 GMT 15 October 1980

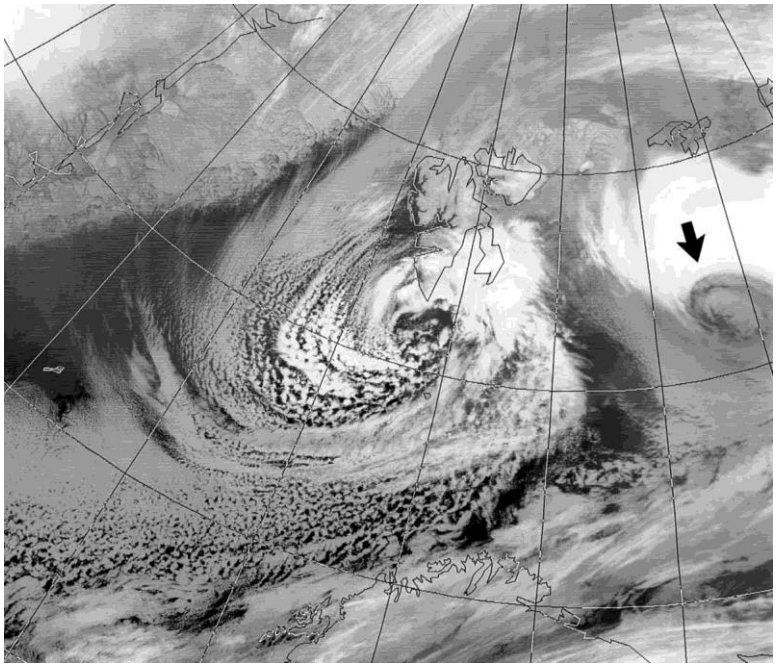
# Фронтальный тип пограничного слоя



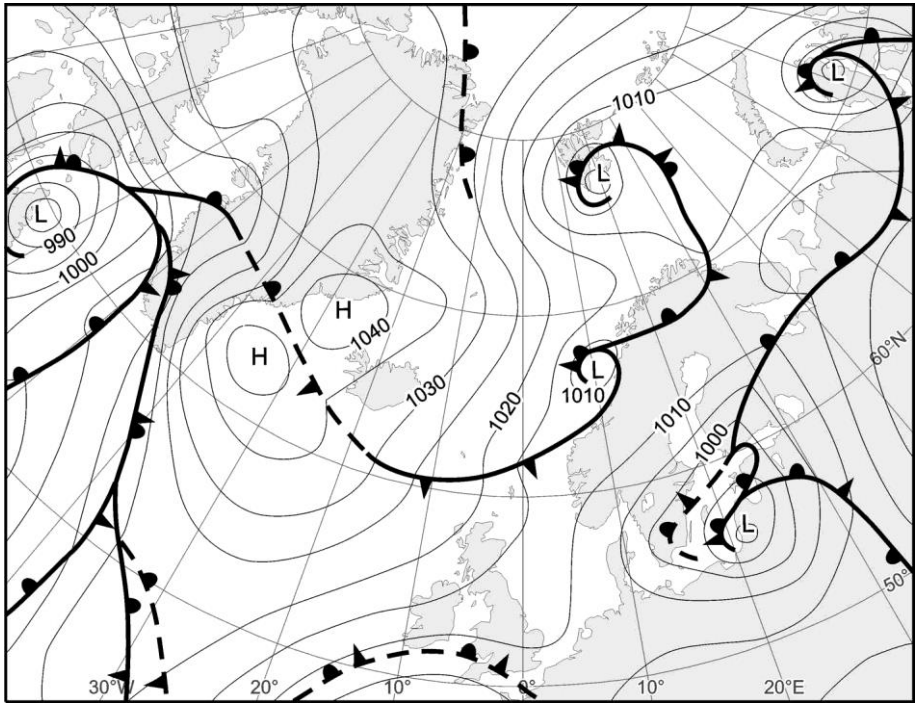


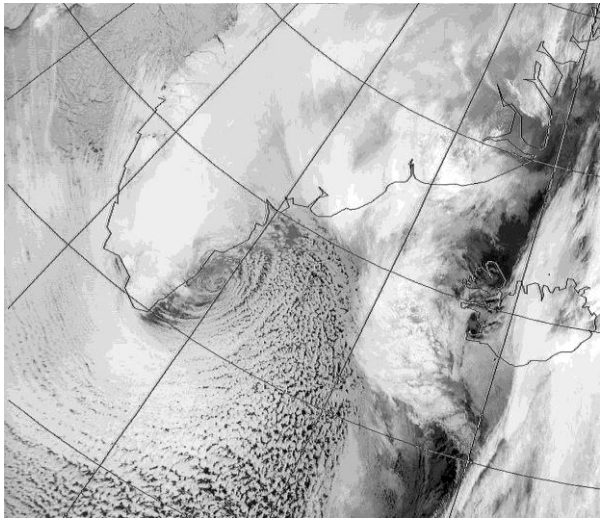
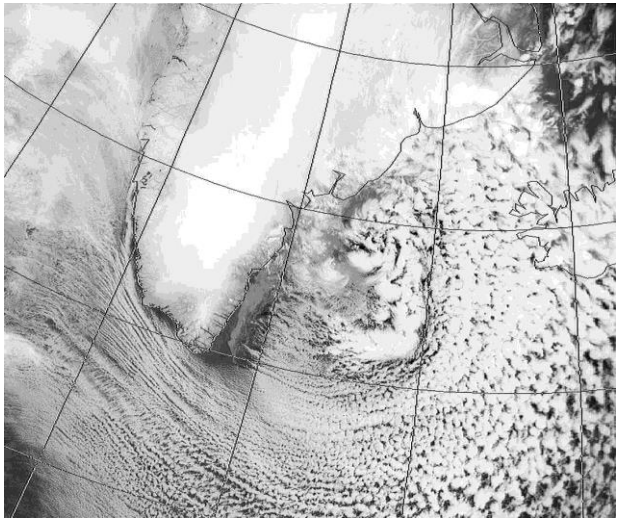
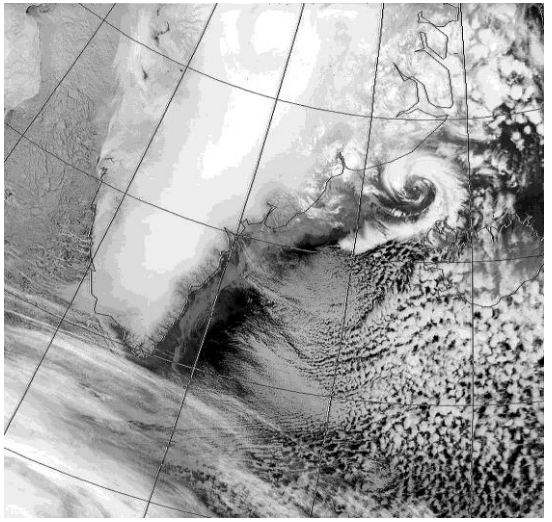


# Тип холодной барической депрессии



1333 GMT 15 October 1980




0600 GMT 15 October 1980

# Орографические полярные циклоны