

CONFERENCES“ENVIROMIS-2018” , July 5-7, Tomsk
([HTTP://WWW.SCERT.RU/EN/CONFERENCES/](http://www.scert.ru/en/conferences/))

**«О взаимодействии динамики атмосферы Арктики и
средних широт при изменении климата ».**

Крупчатников В.Н.(1,3,4), Платов Г.А.(3,4), Ю.В. Мартынова (1,2), И.В. Боровко (3)
(1СибНИГМИ Росгидромета, 2ИМКЭС СО РАН, 3 ИВММГ СО РАН, 4 НГУ, 5 ГМЦ Росгидромета)

e-mail: vkрупчатников@yandex.ru

Содержание

- 1. Полярный Вихрь, погодные режимы и полярные циклоны в Арктике**
- 2. Оценка влияния циркуляции атмосферы на динамику морского льда**
- 3. Новая версия Модели Земной Системы PlaSim-ICMMG-1.0**
- 4. Заключение**

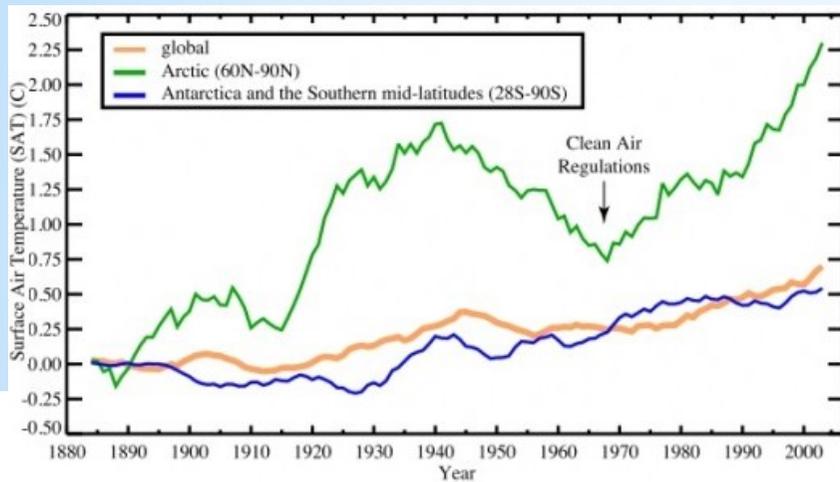
Аннотация

В докладе обсуждаются некоторые проблемы исследования взаимодействия динамики атмосферы в Арктике и средних широт в условиях изменения глобального климата и быстрого потепления в Арктике в нижнем слое тропосферы (за счет механизма положительных обратных связей, усиления атмосферных потоков тепла и влаги в Арктику и перенос тепла течениями в океане).

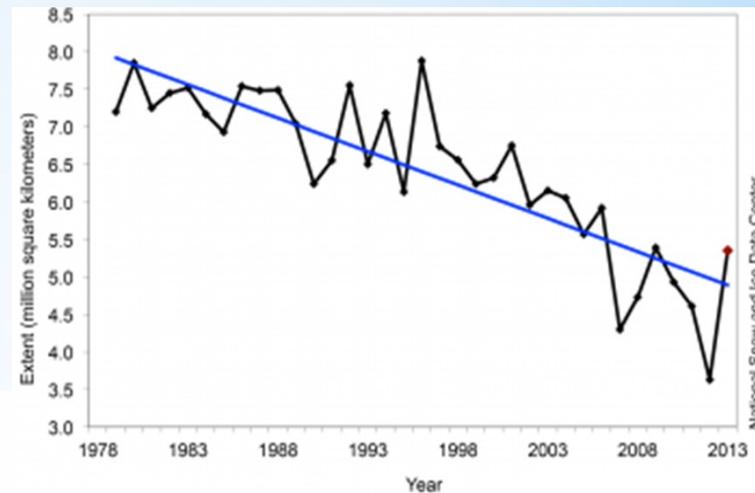
Это сложная задача, учитывая относительно короткий период наблюдения этого явления. До сих пор нет единого мнения относительно теоретических концепций и методов решения этой проблемы

Работа поддержана РФФИ (гранты № 16-05-00558 и 17-05-00382).

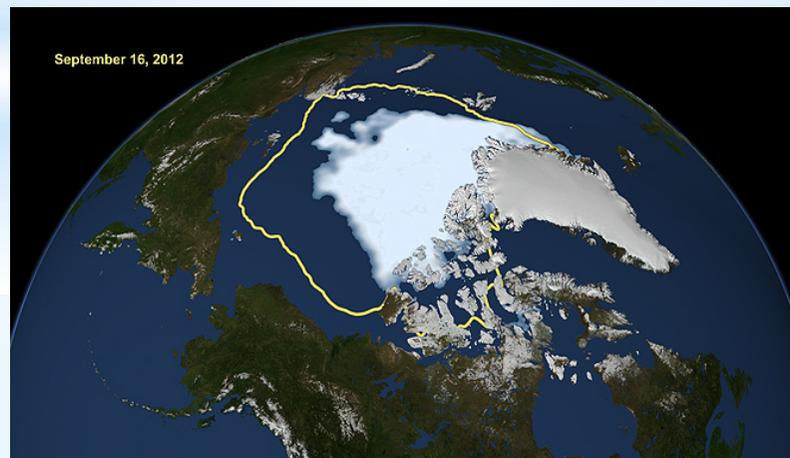
Изменение приземной температуры воздуха в течение столетия



Изменение площади арктических льдов с 1978 по 2013



Минимальная площадь арктических льдов – 2012 г



NASA's Nimbus-7 satellite, NASA/Goddard Scientific Visualization Studio

Несмотря на глобальное потепление, в последнее время, зимы на северо-востоке Северной Америки, в Европе и Азии были **аномально холодными**.

В ряде регионов, в центральной Азии и восточной Сибири, **даже наблюдается падение температуры зимой в последние несколько десятилетий** (Cohen et al. 2014a; McCusker et al. 2016).

1. Погодные режимы и полярные циклоны в Арктике

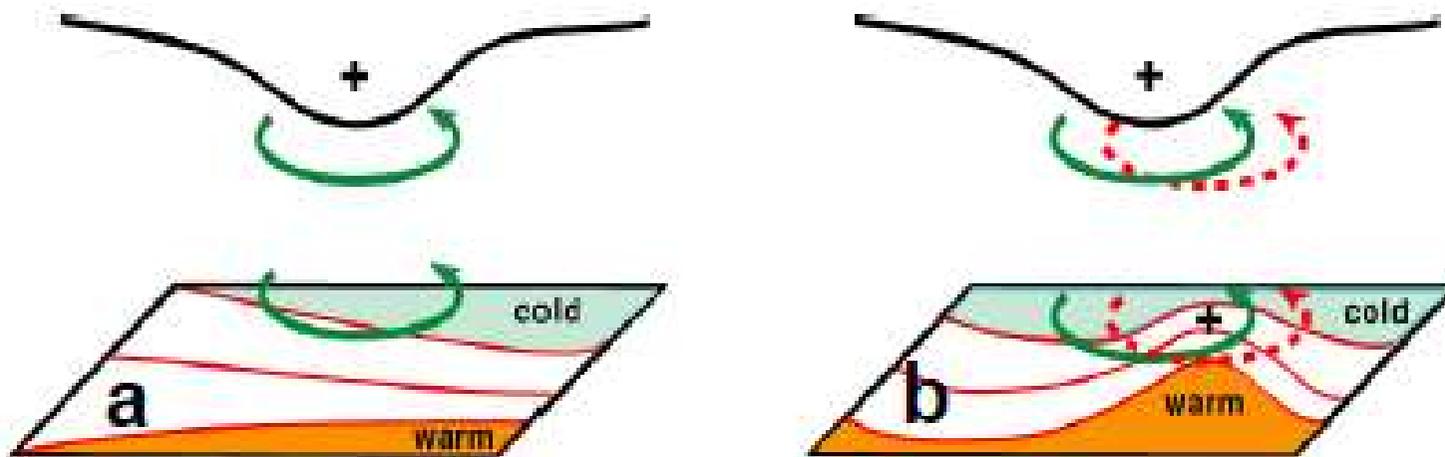
Цель - На основе результатов численных экспериментов с глобальной моделью климатической системы сделать анализ динамики климата Арктики и средних широт при различных сценариях, делая акцент, в том числе, на **климатологию полярных мезомасштабных циклонов (polar lows, ПЦ) и потенциального вихря верхних слоев;**

С 1990-х, на основе данные наблюдений и численного моделирования полярных ПЦ (*Rasmussen et al. 1992; Nordeng and Rasmussen 1992; Grønås and Kvamstø 1995; Guo et al. 2007*), считается, что развитие ПЦ, обычно инициируется аномалией потенциального вихря на верхних уровнях (PV) при взаимодействии с сильной бароклинностью у поверхности, усиливаясь глубокой влажной конвекцией и потоками скрытого и явного тепла от океана.

Развитие циклона, связанного с аномалией положительной завихренности над бароклинной областью:

(а) циклонический вихрь на нижнем уровне, вызванный аномалией вихря наверху, адвекция потенциальной температуры приводит к аномалии тепла к востоку от аномалии вихря верхнего уровня, это вызывает циклоническую циркуляцию в (б).

Вызванная этим циркуляция будет усиливать исходную аномалию вихря и может приводить к усилению возмущения



(Из Hoskins et al, 1985)

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} = f\bar{v} - \frac{\partial}{\partial y} (\overline{u'v'}) - \alpha \bar{u}$$

Уравнение баланса импульса

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial y} (\overline{u'v'}) = \overline{v'\xi'}$$

$$\bar{U} = - \frac{1}{2\beta_{av}} \overline{\xi'^2}$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} \overline{\xi'^2} \right) + \beta_{av} \overline{v'\xi'} = \overline{F'\xi'}$$

Уравнение энтропии

$$\beta^* = \beta - \bar{u}_{yy}$$

Смена знака градиента абсолютного Вихря β^* - необходимое условие баротропной неустойчивости

$$-\bar{u}_{yy} < 0$$



$$-\bar{u}_{yy} < 0$$

Баротропная неустойчивость → увеличение ширины струи

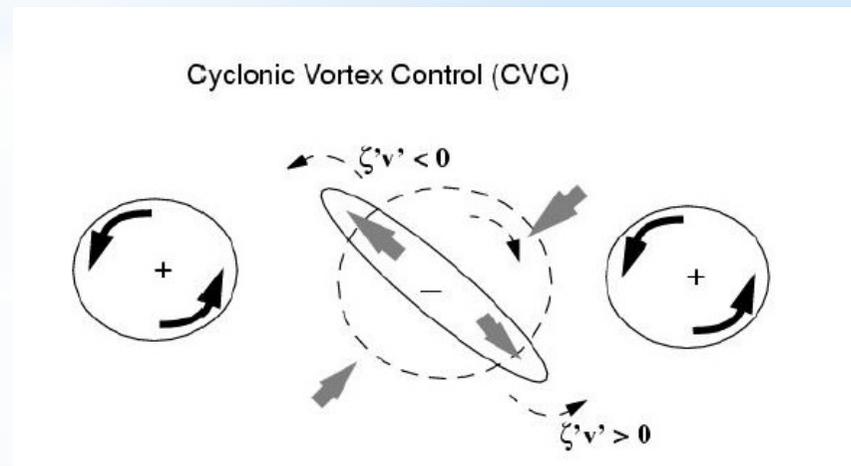
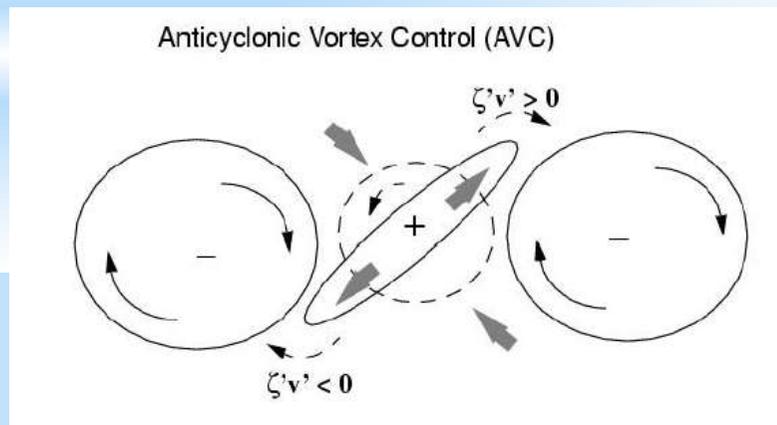
$$-\frac{d}{dy} (\overline{uv}) = - \frac{kc_i}{2} |A|^2 \chi^2 \frac{\beta - \bar{U}_{yy}}{|\bar{U} - c|^2} e^{2kc_it}$$

$$\frac{\partial \bar{U}}{\partial t} = - \frac{d}{dy} (\overline{uv}) = - \frac{kc_i}{2} |A|^2 \chi^2 \frac{\beta - \bar{U}_{yy}}{|\bar{U} - c|^2} e^{2kc_it}$$

(J. Pedlosky, 1979)

Интенсивность бароклинности в нижней тропосфере является определяющим фактором обрушения волны на верхнем уровне

- При слабой бароклинности и бета-эффекте (сферичность Земли) происходит антициклоническое обрушение волн и сдвиг зональной струи к полюсу
- При увеличении бароклинного форсинга циклонические центры становятся более интенсивными чем антициклоны и способны деформировать их, сдвигая струю к экватору. Этот переходный процесс очень быстрый, при достижении критического значения происходит бифуркация в циклонический тип обрушения волны

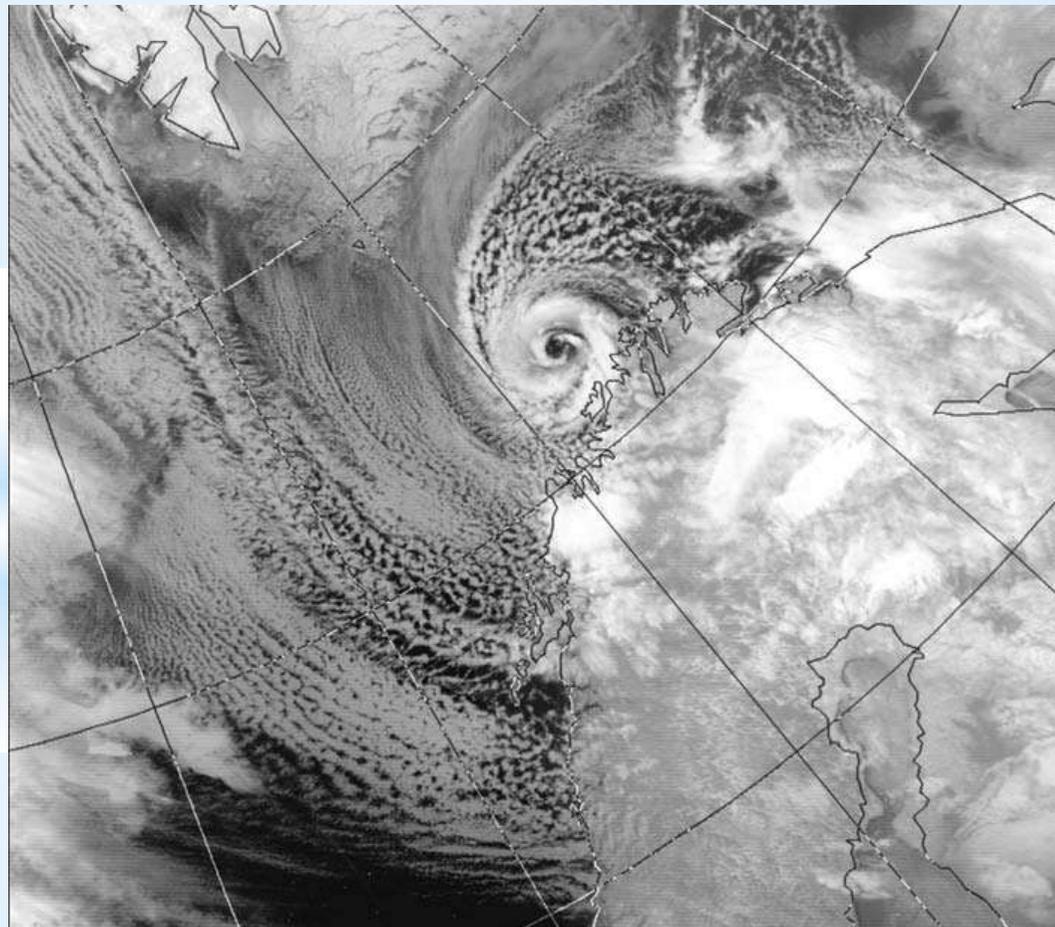


Thorncroft, C.D., Hoskins, B.J., and McIntyre, M.E., 1993; Orlanski, I., and B. D. Gross, 2000

Полярные мезомасштабные циклоны (polar lows, ПЦ) возникают во время вторжений холодного арктического воздуха над относительно теплым морем **внутри бароклинных возмущений** в нижнем потенциально неустойчивом слое полярной тропосферы (радиус деформации Россби $= NH/f$ определяет нижнюю границу масштаба устойчивых возмущений)

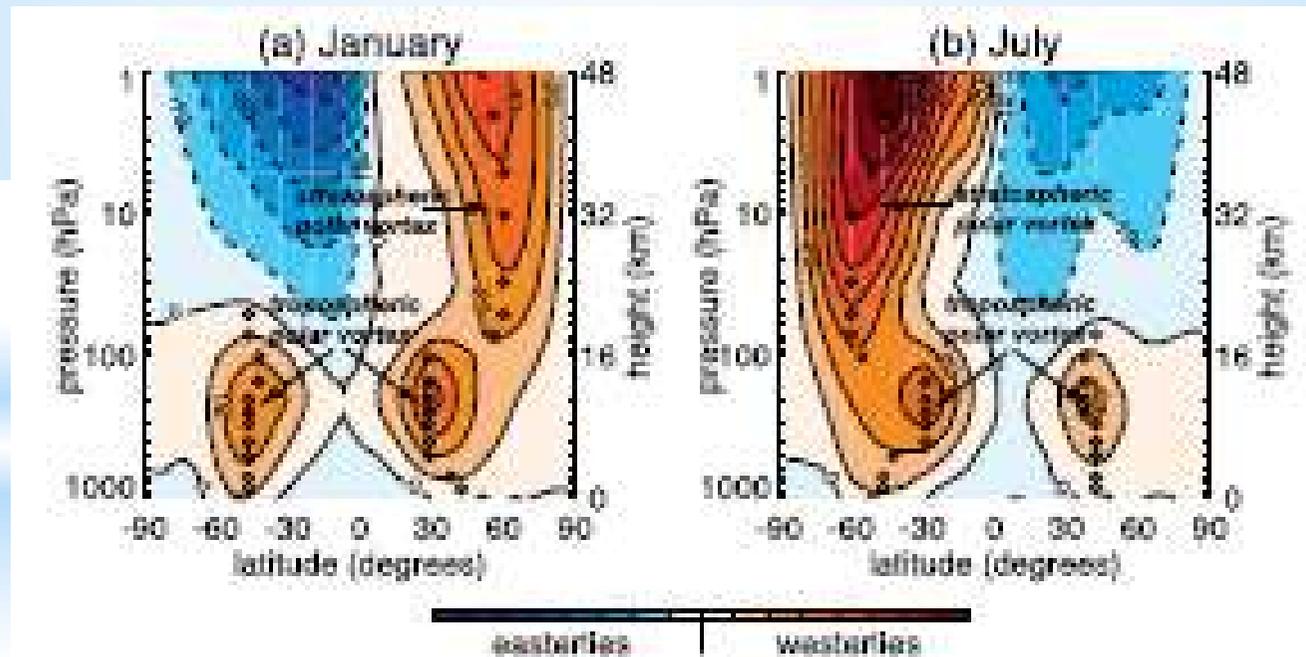
- 
- оценить частоту холодных вторжений и появления благоприятных условий генерации **ПЦ**, включая планетарные волны и связанные с ними распространение энергии в стратосферу, их взаимодействие с **полярным вихрем**,
 - главные моды низкочастотных колебаний САК/АК,
 - струйное течение в тропосфере.

NOAA-9 снимок (февраль 27, 1987) **Polar Low** (University of Dundee, <http://www.sat.dundee.ac.uk/>).



ПОЛЯРНЫЙ ВИХРЬ

(D. W. Waugh, A. H. Sobel, and L. M. Polvani, 2017)



Стратосферный Полярный Вихрь (СПВ)

Сильный циркумполярный западный поток определяет СПВ в окрестности 60 с.ш. над тропопаузой от (~100 мб) до мезосферы (~ 1 мб). СПВ может быть определен областью низких значений геопотенциала, которая ограничена западным потоком.

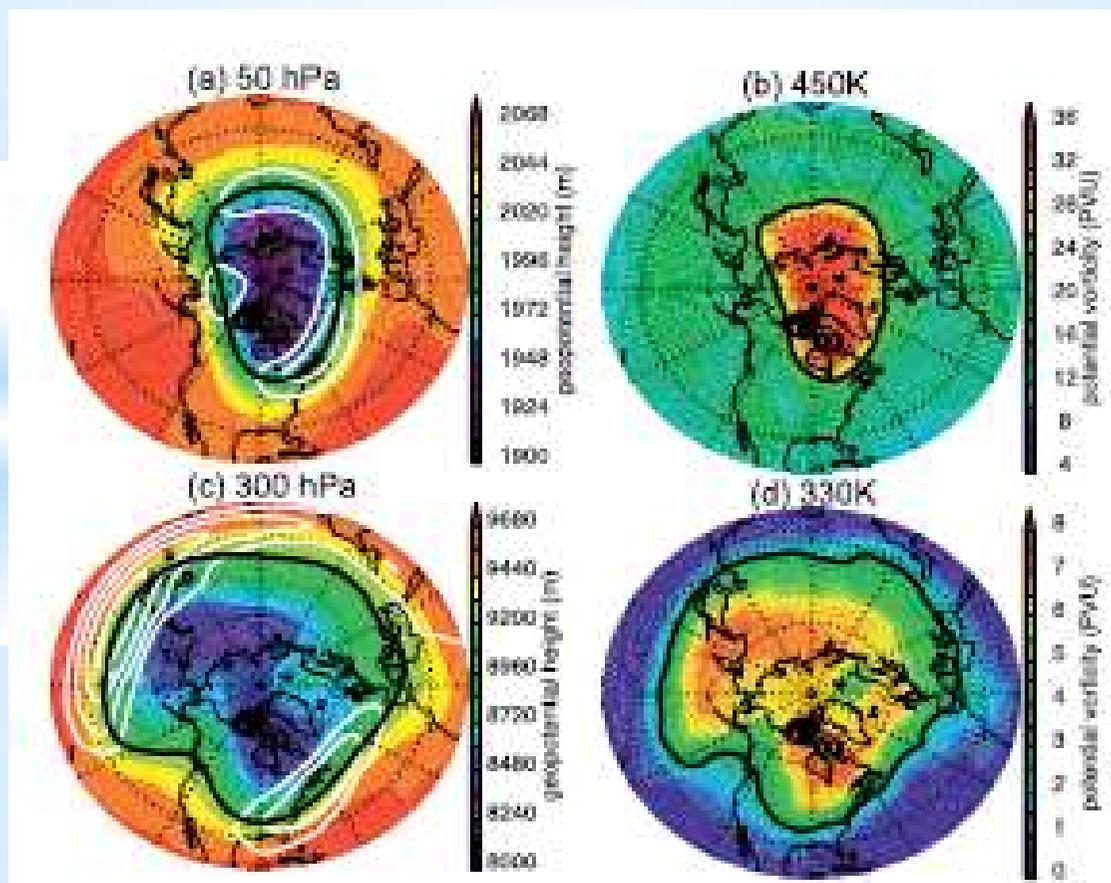
В большинстве работ этот вихрь определяется областью больших значений потенциального вихря - PV.

PV имеет ряд полезных свойств для понимания динамики вихря (e.g., Hoskins et al. 1985)

Исследования показывают, что слабый (СПВ) (**stratospheric polar vortex**) может оказывать влияние на погоду в нижней тропосфере через нисходящее влияние планетарных волн, что приводит к вторжениям холодного воздуха и отрицательной фазе Арктических Осцилляций (Cohen et al. 2013; Kolstad et al. 2010; Butler et al. 2014; Kretschmer et al. 2016).

Тропосферный Полярный Вихрь

Граница этого вихря часто определяется контурами геопотенциала на 300 или 500 мб, которые обычно лежат внутри ядра западного потока

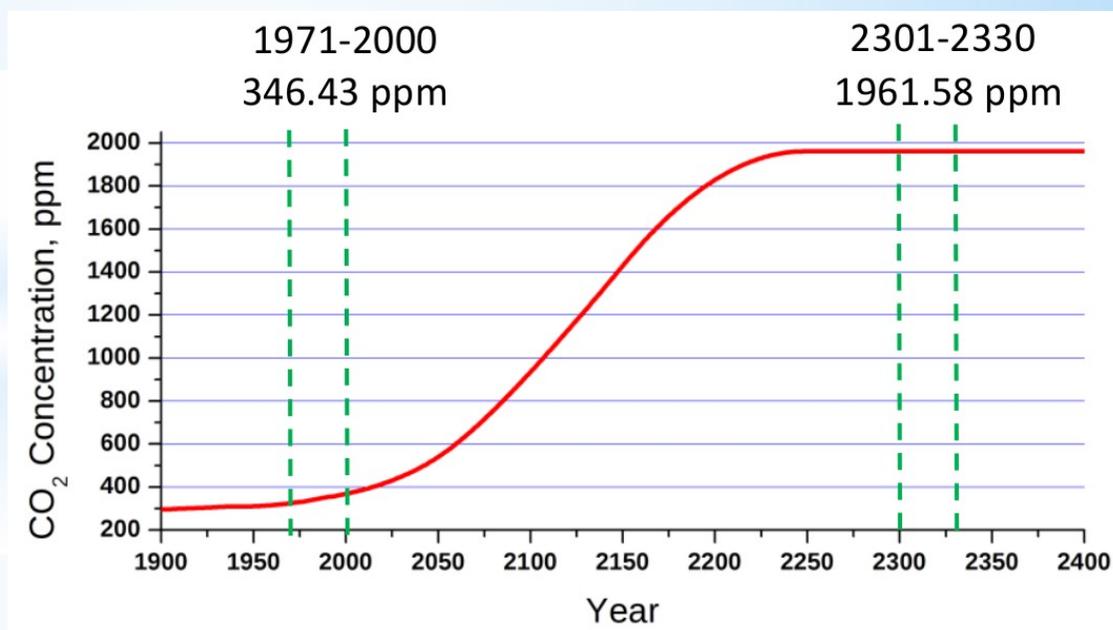


Можно выделить следующие динамические механизмы, связывающие БПА с динамикой погоды в высоких и средних широтах:

- динамика шторм-треков;
- струйные течения;
- планетарные волны и связанные с ними распространение энергии в **стратосферу**, их **взаимодействие с полярным вихрем**, главные моды низкочастотных колебаний САК/АО.

* Эксперимент

- * **PLASIM**
- * (*Fraedrich et al. 2005*)
- * глобальная крупномасштабная модель промежуточной сложности
- * (атмосфера, океан, морской лед, суша, биосфера)
- * горизонтальное разрешение: $2.8^\circ \times 2.8^\circ$
- * Вертикальное разрешение:
 - 10 σ -уровней в атмосфере
 - 5 уровней в почве

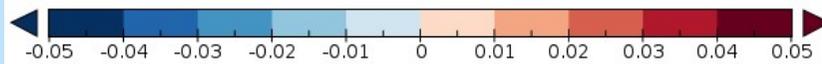
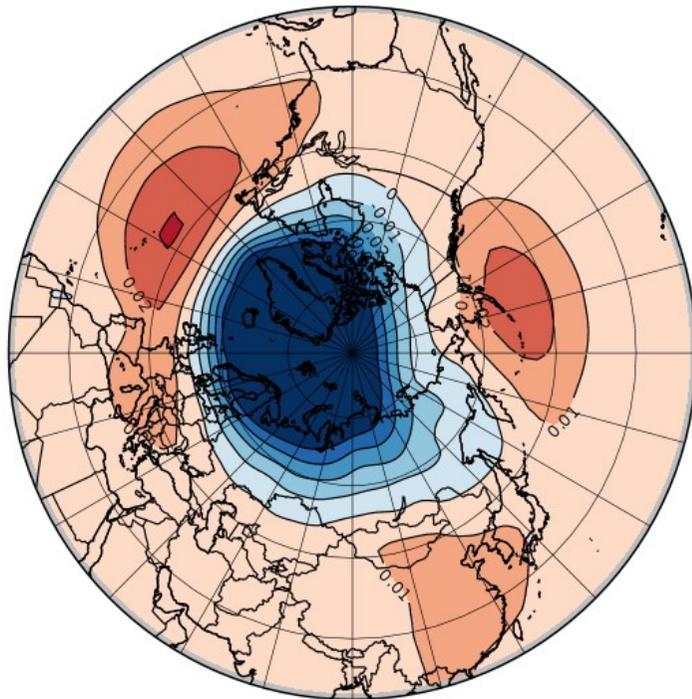


Концентрация углекислого газа в атмосфере,
RCP 8.5

* Главная мода

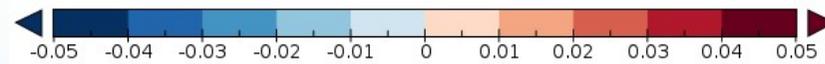
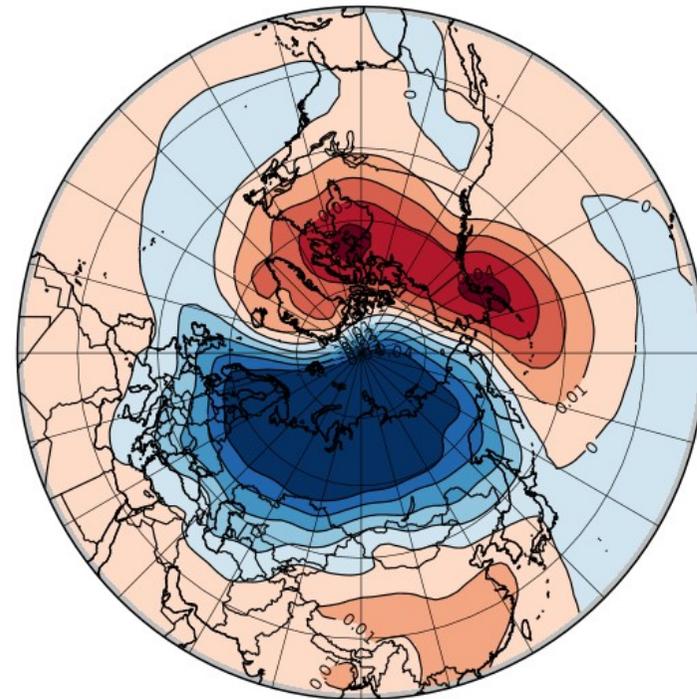
EOF1 высоты геопотенциала на 1000 гПа

1971-2000 гг. (346.4 ppm)

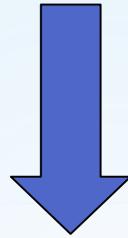


Data Min = -0.092, Max = 0.03

2301-2330 гг. (1961.6 ppm)

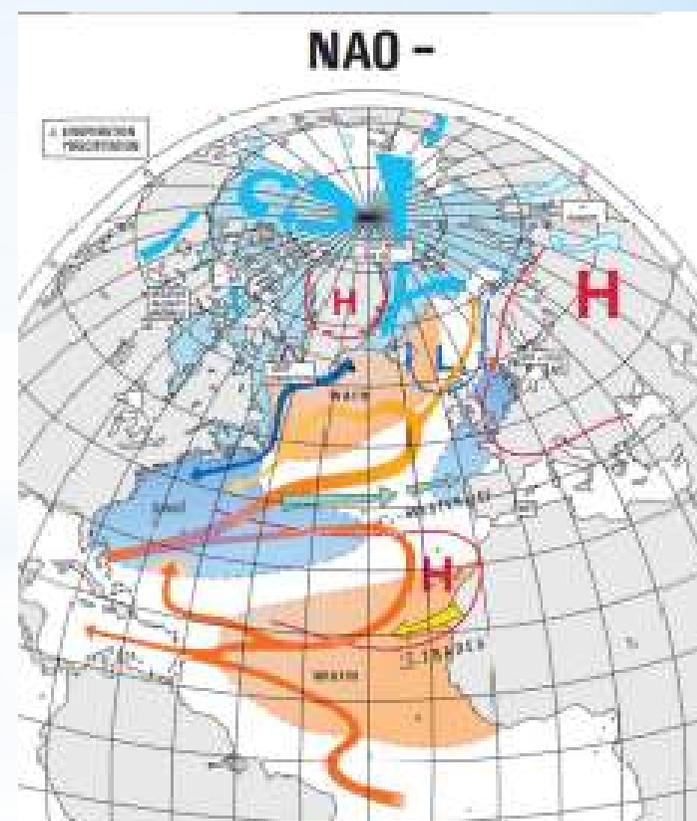
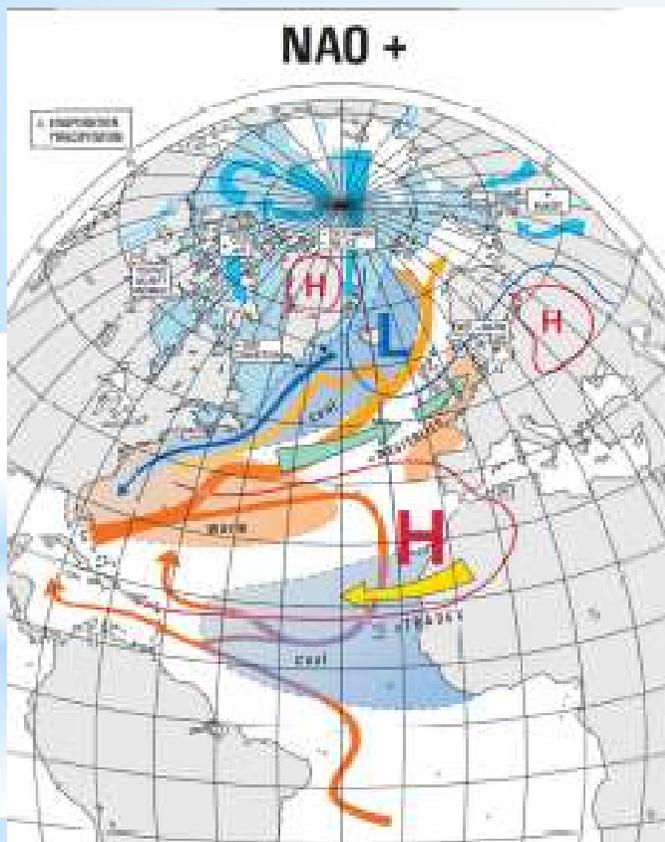


Data Min = -0.088, Max = 0.044



Два режима циркуляции, структуры
которых представляют две фазы Северо-
атлантических Колебаний

NAO+ и NAO-,



(Wanner, H., et al, 2001)

Изменяя распределение температурных полей и т. д., **NAO** влияет на распределение морского льда.

Распределение морского льда различно между фазами **NAO** (Рис).

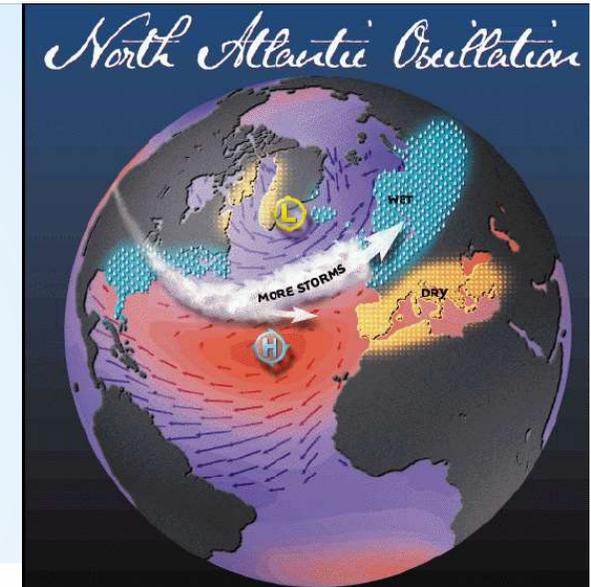
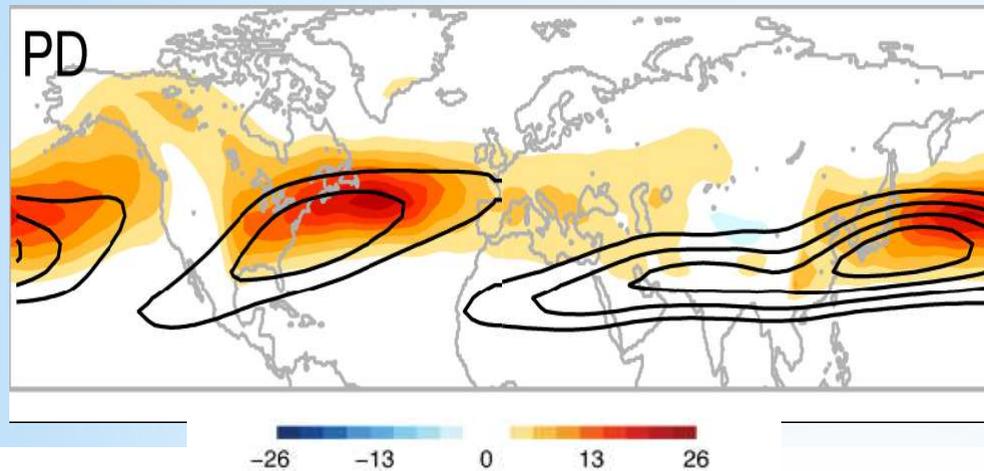
Зимы в режиме положительной фазы **NAO(+)** более холодные в Канаде, чем обычно, в то время как в Сибири они более теплые.

Это означает тенденцию распространения к югу морского льда в Канадском бассейне, и к северу у берегов Сибири.

Для зим с отрицательной фазой **NAO(-)** распространение морского льда в Канадском бассейне сокращается и сдвигается к северу. В Сибирской Арктике морской лед смещается скорее к югу.

Вариации морского льда в период положительной фазы **NAO(+)** оказывает влияние на соленость морской воды. Больше морского льда означает более высокую соленость морской воды со стороны Канады. Это, в свою очередь, оказывает влияние на термохалинную циркуляцию. Более холодная вода формирует холодный пул глубокой воды, который противодействует термохалинной циркуляции.

poleward heat flux 850mb (Km/s)



Positive Phase NAO

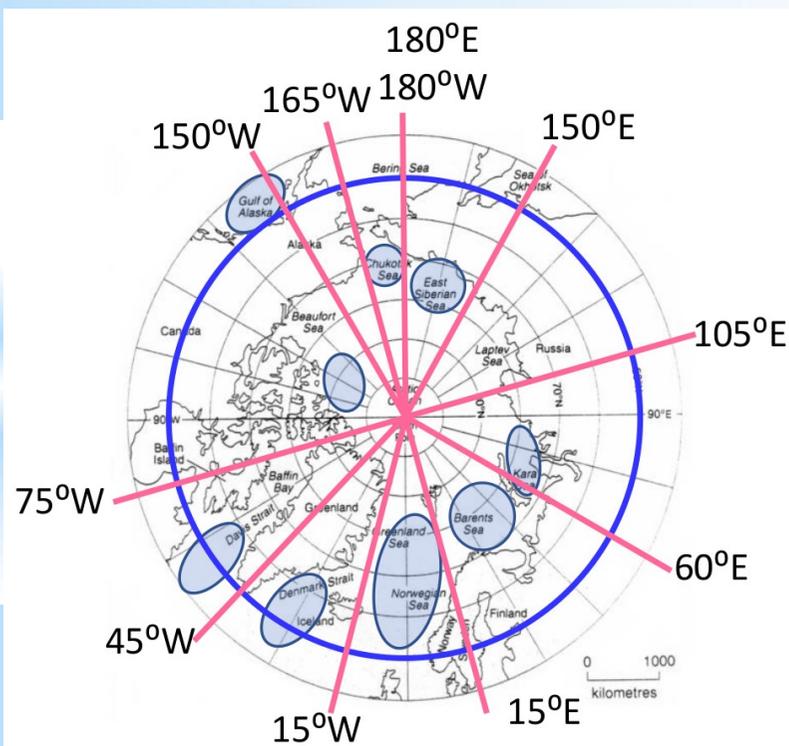
Climate variability associated with storm tracks

- 1) In the midlatitudes, climate variability is due to storm-track dynamics that are intrinsic to the atmosphere
- 2) The dynamical time scale associated with these modes is ~ 5 days, and is set by the interactions between the storms and the jets that form them
- 3) Key patterns of climate variability (the 'modes') are co-located with the jets, which are determined by rotation rate, orography, gross land-sea contrasts, etc.

These modes include:

- The North Atlantic Oscillation (NAO)
- The North Pacific Oscillation (NPO)
- The Northern Annular Mode (NAM / AO)

* Полярные Циклоны. Области формирования ПЦ в СП



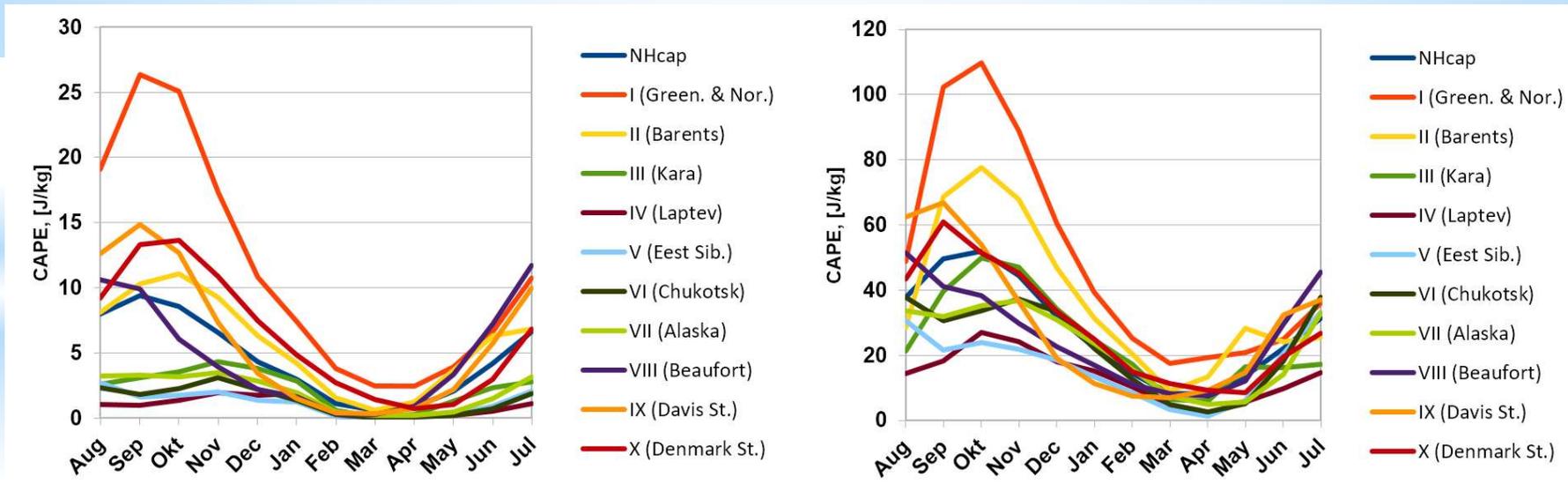
(Rasmussen and Turner, 2003; Луценко и Лагут, 2010)

№ п/п	Область	Долготы
I	Гренландское море, Норвежское море	15° з.д. - 15° в.д.
II	Баренцево море	15° в.д. - 60° в.д.
III	Карское море	60° в.д. - 105° в.д.
IV	Море Лаптевых (нет формирования ПЦ)	105° в.д. - 150° в.д.
V	Восточно-Сибирское море	150° в.д. - 180° в.д.
VI	Чукотское море	165° з.д. - 180° з.д.
VII	Аляска (нет формирования ПЦ)	150° з.д. - 165° з.д.
VIII	Море Бофорта	75° з.д. - 150° з.д.
IX	Пролив Дэвиса	45° з.д. - 75° з.д.
X	Датский пролив	15° з.д. - 45° з.д.

* Конвективная доступная потенциальная энергия (CAPE)

1971-2000 гг. (346.4 ppm)

2301-2330 гг. (1961.6 ppm)

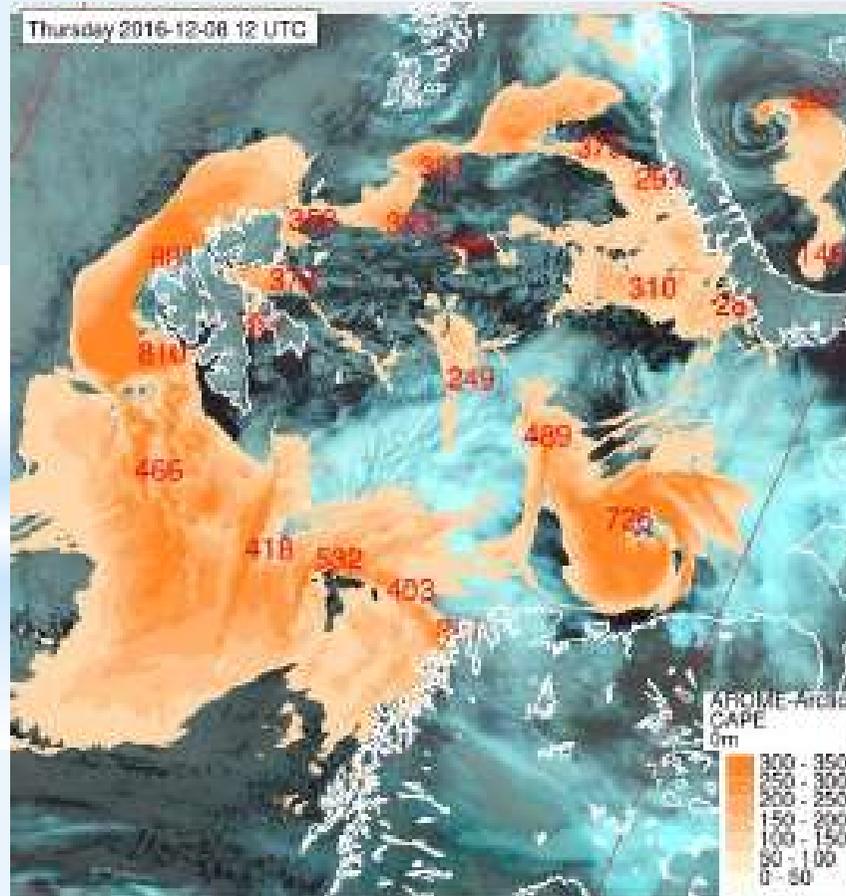


Средние многолетние значения CAPE для каждого месяца

$$CAPE = \int_{LFC}^{LNB} R_d (T_{vp} - T_{ve}) d \ln(p)$$

здесь LFC – уровень свободной конвекции, LNB – уровень нейтральной плавучести, R_d – газовая постоянная для сухого воздуха, T_{vp} – виртуальная температура частицы, T_{ve} – виртуальная температура окружающей атмосферы, p – давление

The CAPE on the polar lows:

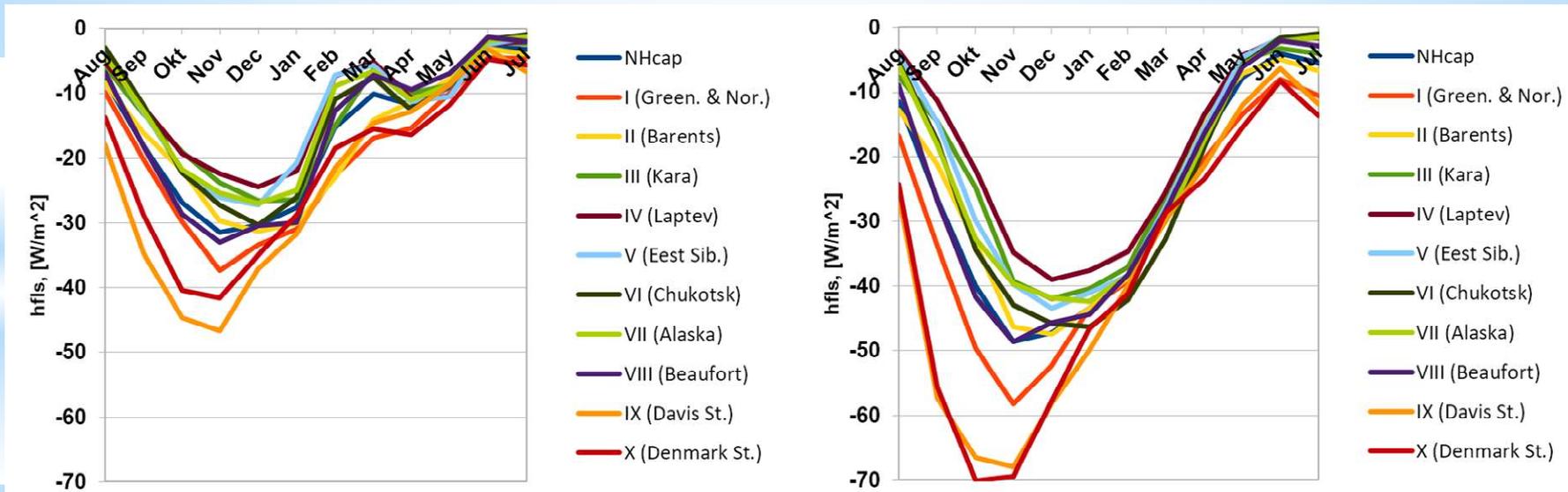


Winter Arctic Maritime: max values of 500 - 1000 J/kg
(G. Noer, 2016)

*Турбулентный поток скрытого тепла

1971-2000 гг. (346.4 ppm)

2301-2330 гг. (1961.6 ppm)



Средние многолетние значения турбулентного потока скрытого тепла для каждого месяца

$$Q_e = \rho L C_E (q_{sfc} - q) V$$

здесь $(q_{sfc} - q)$ — разница между удельной влажностью поверхности и самым нижним уровнем атмосферы, L — теплота испарения, V — скорость ветра, C_E — число Дальтона, ρ — плотность

* Результаты сценарного моделирования:

- существенное изменение пространственной структуры EOF1;
- увеличение (в 4 раза) значений CAPE для всех выделенных секторов СП;
- существенное увеличение (в ~2 раза) значений турбулентного потока скрытого тепла.
- * При росте концентрации CO₂ в атмосфере получено:

с одной стороны, условия для поддержания ПЦ становятся более благоприятными;

с другой стороны, существенное сокращение площади льдов в Арктике выступает в качестве сдерживающего фактора (ослабление бароклинности).

Холодные вторжений и благоприятные условия генерации полярных циклонов

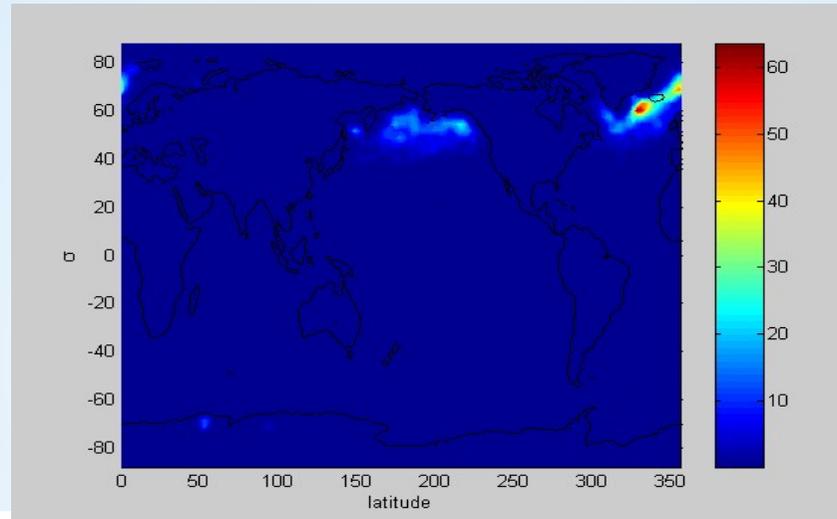
На основе данных моделирования, было посчитано число случаев, когда относительный вихрь превышал

$\xi_0 = 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ и дана оценка характерного радиуса деформации для

вихревых структур: $R = NH/f$, радиус деформации имеет порядок 200 км, что соответствует размерам полярных мезоциклонов (ПЦ).

В Северной Атлантике максимум циклонической активности приходится на период с ноября по декабрь. По сравнению с реальными данными модельная область циклонической активности смещена на запад. На севере Тихого океана частота циклонов примерно одинаковая весь холодный период

$$\xi > \xi_0 = 10^{-4}$$

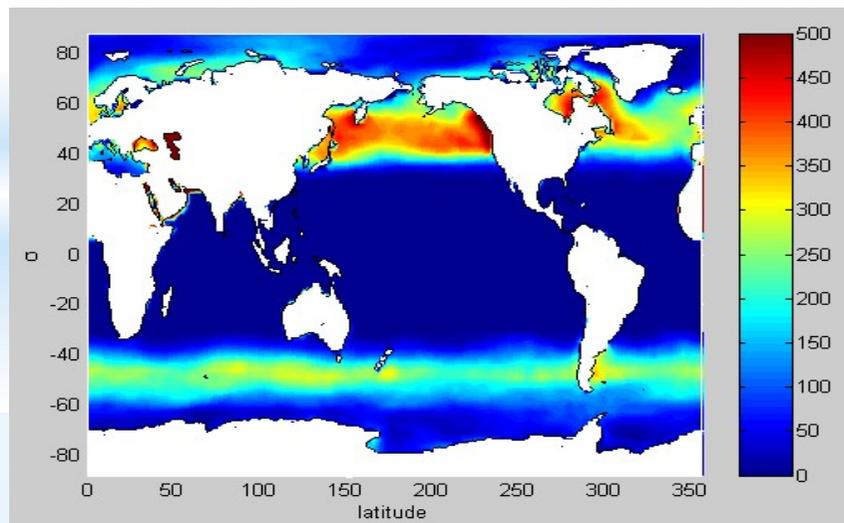


Число случаев с относительным вихрем больше 10^{-4} /с

MCAO (marine cold air outbreak).

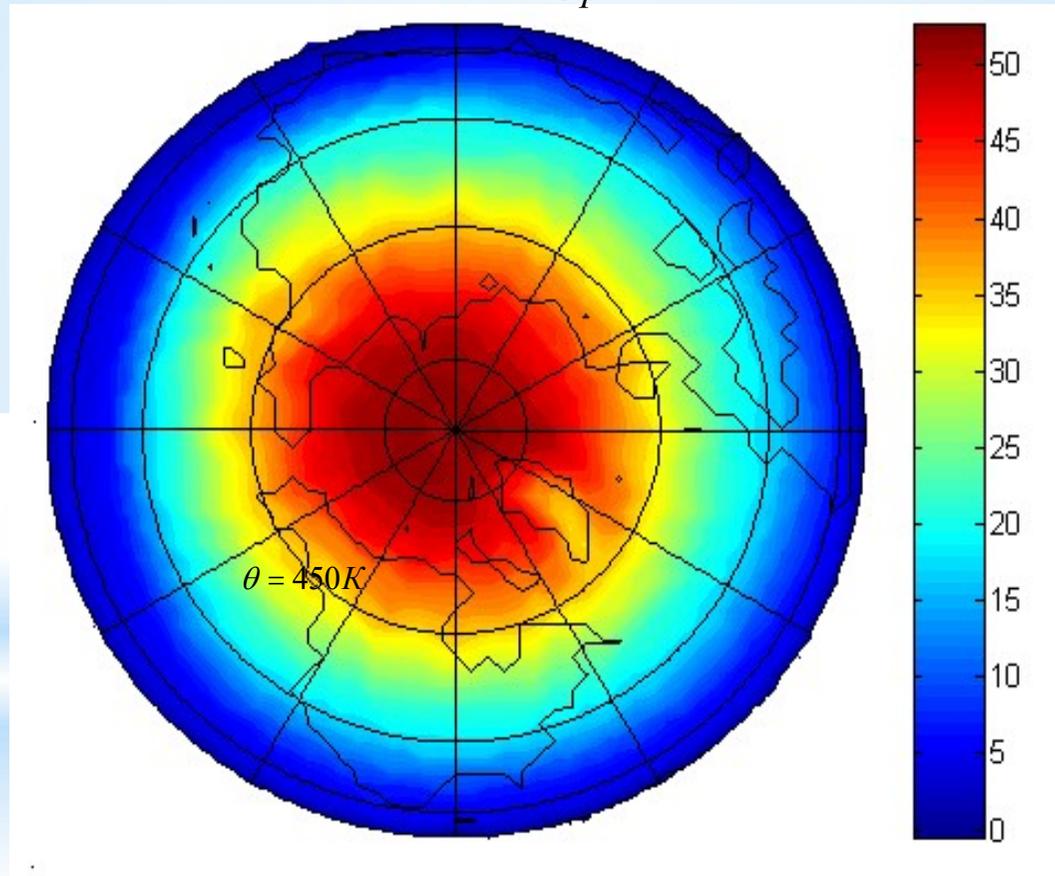
$$\theta_{70\text{гПА}} - SST < 2,9K$$

(Kolstad E.W. T. J. Bracegirdle, 2008)



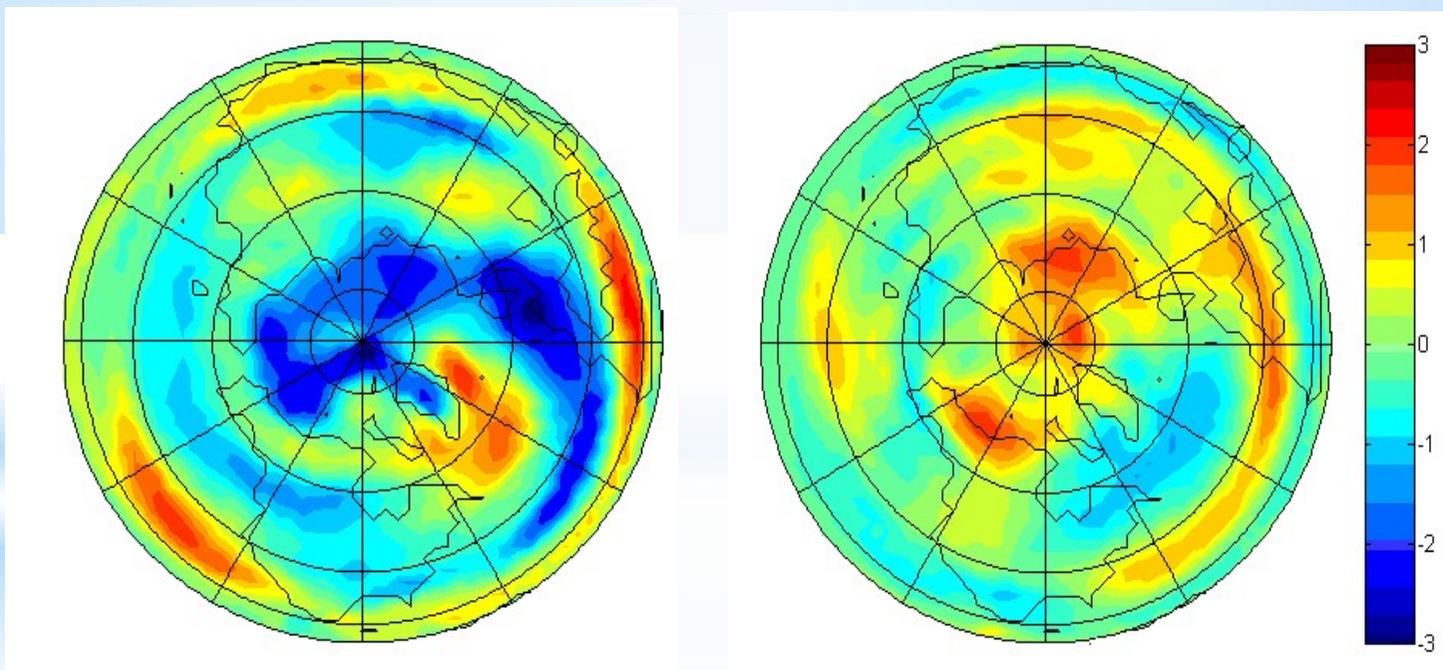
Число выносов холодного воздуха на морскую поверхность

$$Q = -g(\xi_p + f) \frac{\partial \theta}{\partial p}$$



. Потенциальный вихрь на поверхности $\theta = 450\text{ K}$

(декабрь - февраль)



а)

б)

Композитные аномалии потенциального вихря (PV)

а) - при мезоциклонах в Северной Атлантике б) - при мезоциклонах в Тихом океане

Оставшиеся вопросы:

1. Каким будет климатическое распределение и частота ПЦ в будущем?
2. Как конвекция влияет на углубление ПЦ?
3. Можем ли мы дать рекомендации для улучшения прогноза ПЦ?

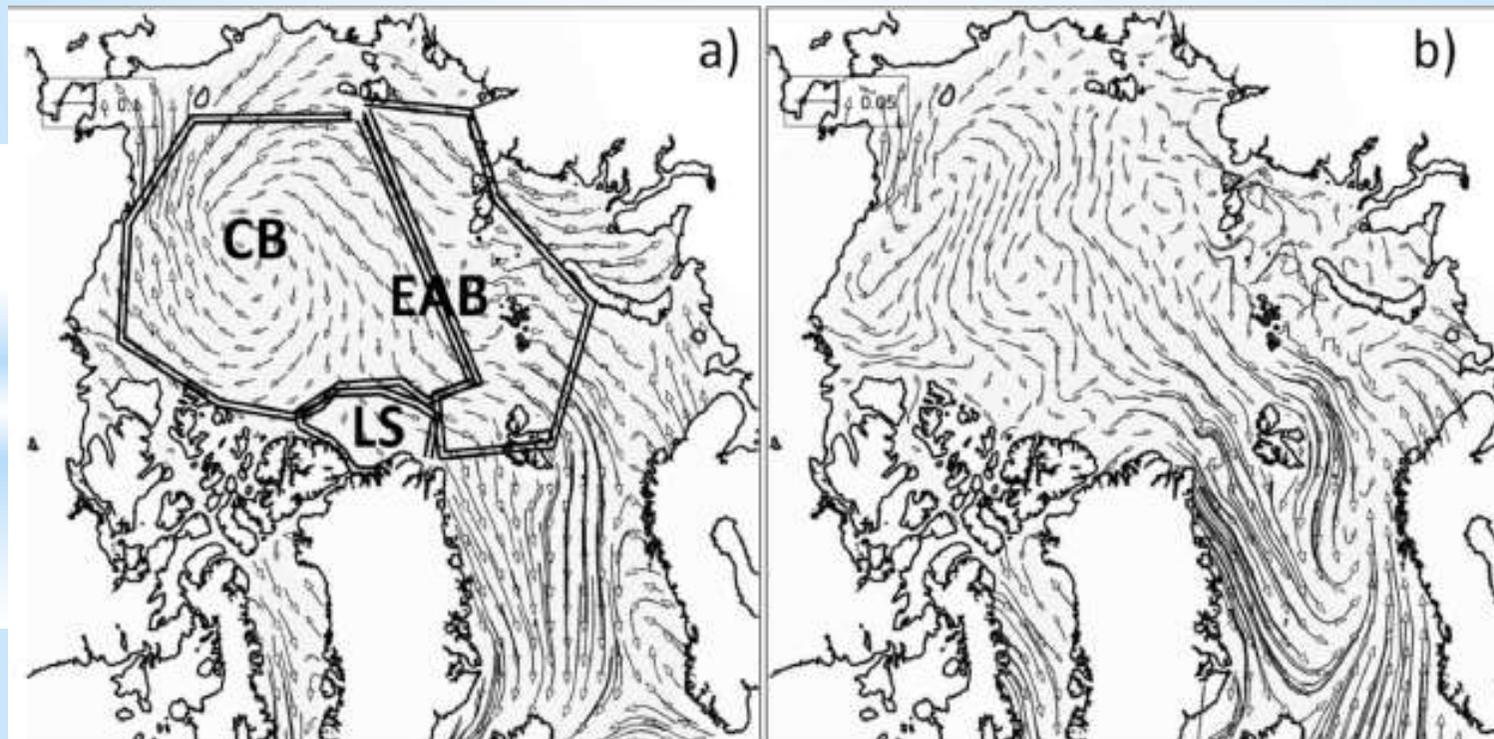
2. Оценка влияния циркуляции атмосферы на динамику морского льда

Исследование чувствительности состояния Северного Ледовитого Океана и динамики морского льда к изменчивости циркуляции атмосферы с учетом динамики САК/АК (NAO).

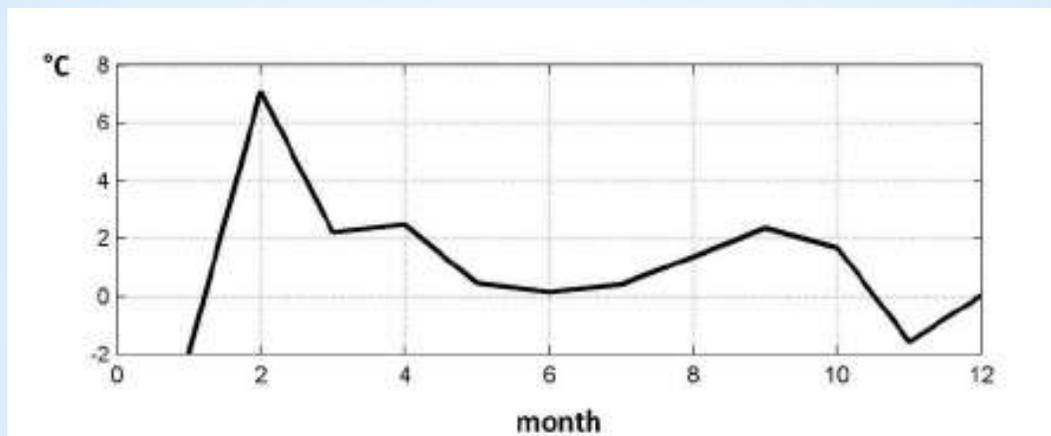
На основе численного моделирования была проведена оценка чувствительности изменчивости состояния ледового покрова к изменчивости атмосферной циркуляции. Отдельное внимание уделено циркуляции над Норвежским и Гренландским морями как областью формирования начальной траектории распространения атлантических вод в Северном Ледовитом океане (СЛО).

Для проведения исследования использовалась численная модель океан-лед, разработанная в ИВМиМГ СО РАН. Океаническая часть подробно представлена в работах [Golubeva, 2007, Голубева, 2008]. В качестве ледовой составляющей применена ледовая модель CICE [<http://oceans11.lanl.gov/trac/CICE>].

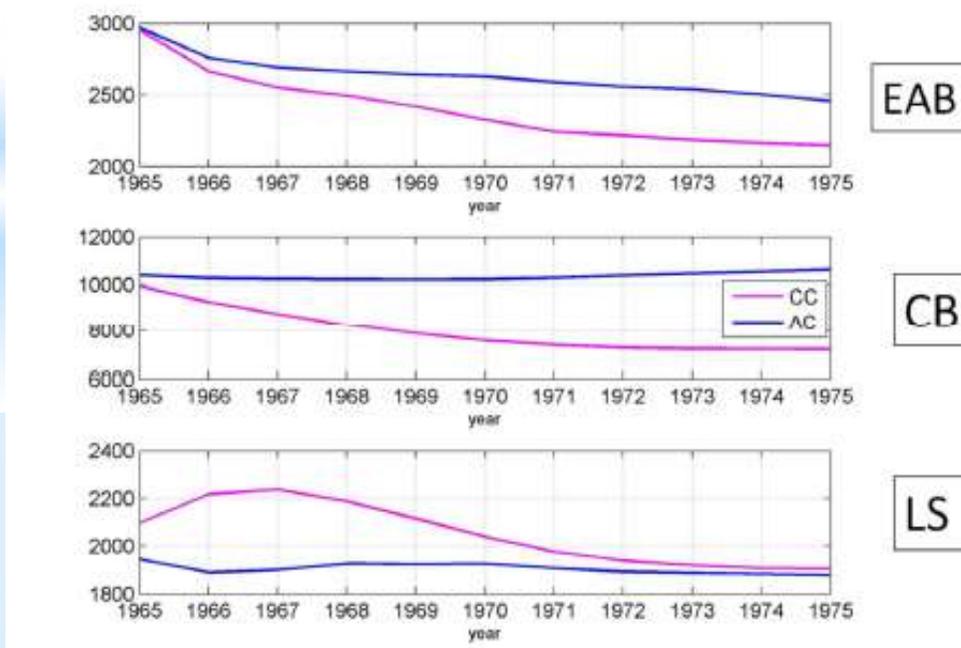
Оценка влияния двух состояний атмосферы на ледовый покров в Арктике. Для этого мы использовали данные реанализа атмосферы NCEP/NCAR для 1960 (NAO(-)) и 1989 NAO(+) годов. В течение 1960 года ветровая циркуляция над СЛО была преимущественно антициклонической (АС), а в течение 1989 – циклонической (СС)



Среднегодовые поля атмосферной циркуляции в СЛО для 1960 года и 1989 года. В 1960 году направление циркуляции в центральной Арктике антициклоническое, в 1989 году – циклоническое



Разница в T_a между данными реанализа NCEP/NCAR в СЛО. $T_a(1989)$ минус $T_a(1960)$.



Объем льда в регионах СЛО

4. Новая версия Модели Земной Системы PlaSim-ICMMG-1.0

Модель PlaSim содержит модули океана и морского льда, качество которых не соответствует сложности решаемых задач и требует их замены модулями, которые являются физически более строгими

В 2017 году была завершена разработка первой версии Модели Земной Системы PlaSim-ICMMG-1.0 (G Platov, V Krupchatnikov, Yu Martynova, I Borovko and E Golubeva, 2017), модульная структура которой позволяет создавать спектр моделей земной системы промежуточной сложности, выбирая различные варианты компонентов климатической системы и углеродного цикла.

Модель PlaSim-INMMG-v.1.0 способна моделировать ключевые многомасштабные пространственно-временные процессы климатической системы. Структура была разработана для модульной работы, чтобы облегчить включение более сложных составных модулей по мере увеличения вычислительной мощности.

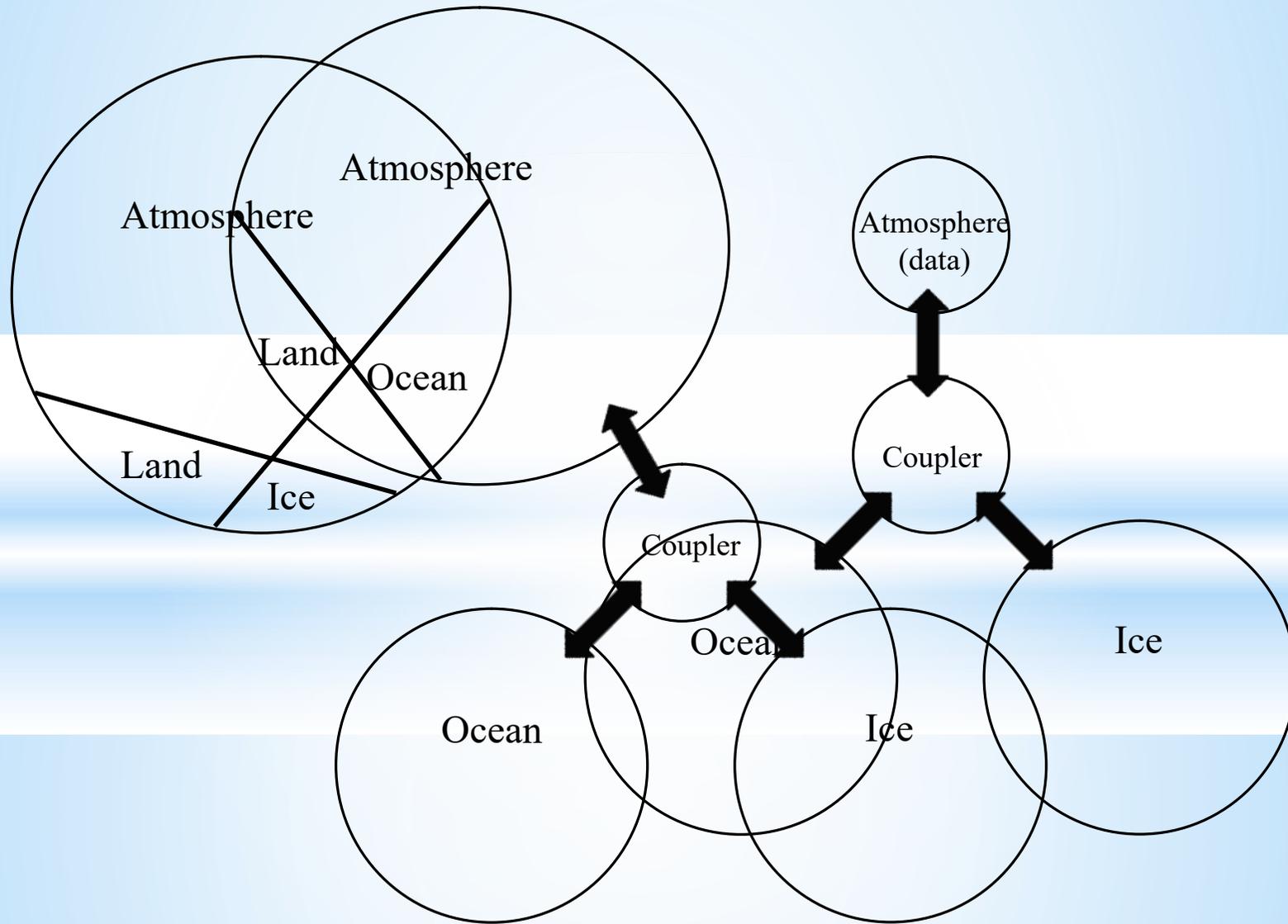


Принцип организации взаимодействия блоков модели климатической системы

PlaSim

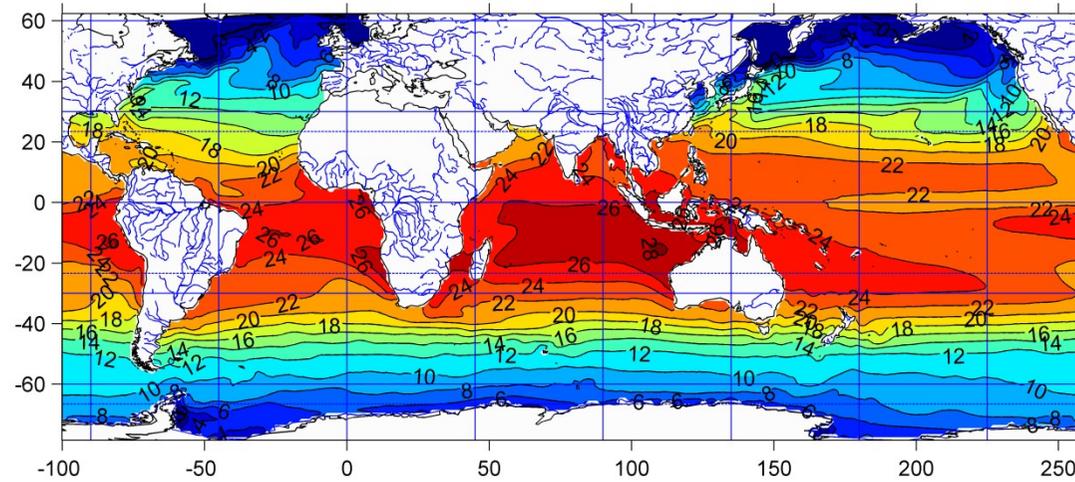
PlaSim-ICMMG

ICMMG

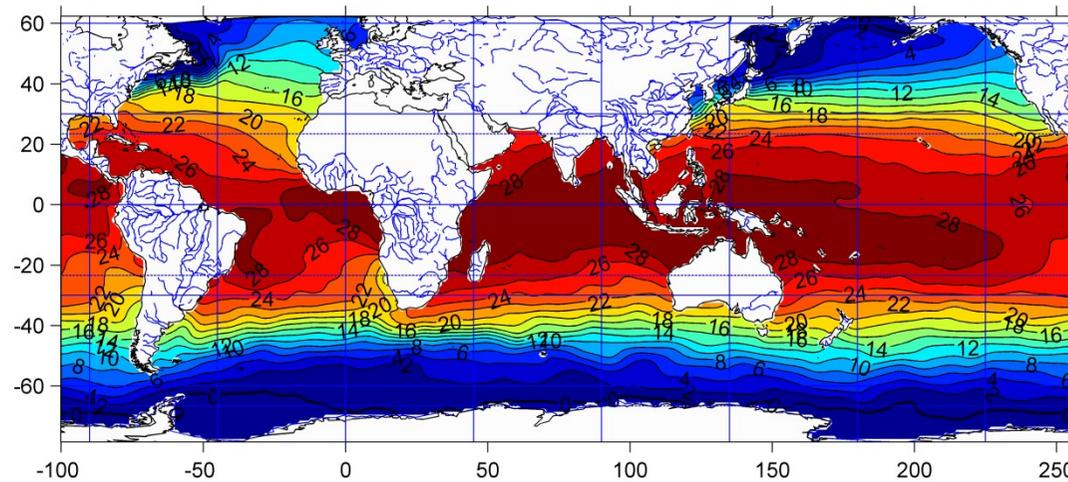


* ТПО – март

PlaSim-ICMMG

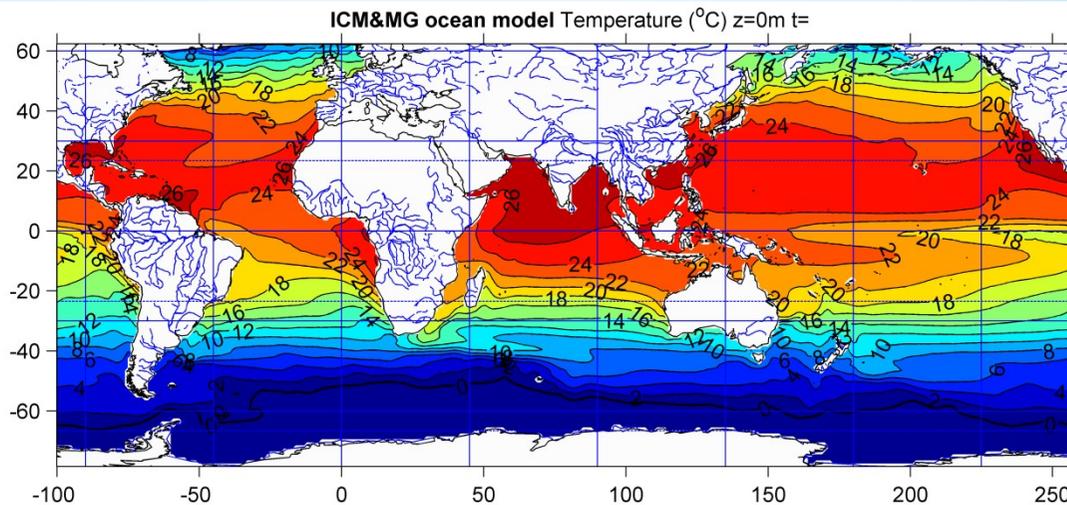


PHC-3.0

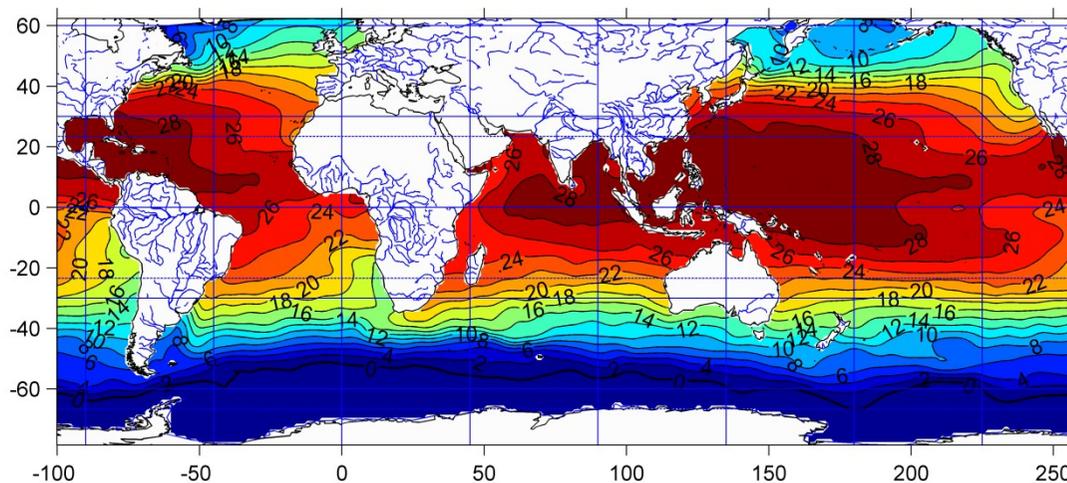


* ТПО – сентябрь

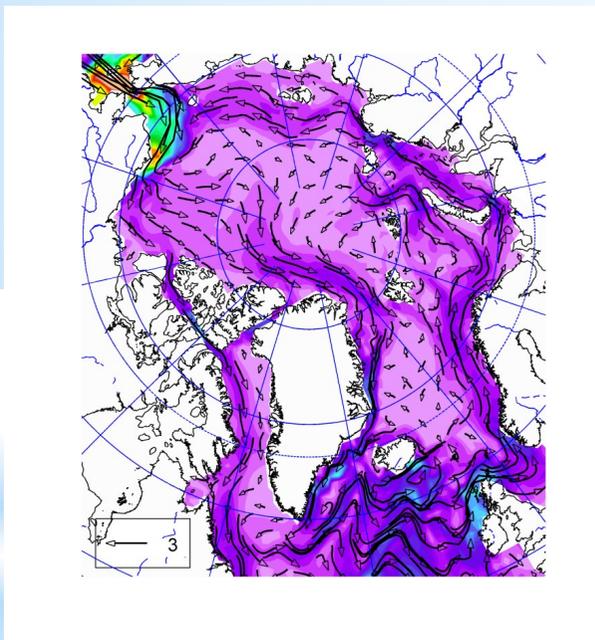
PlaSim-ICMMG



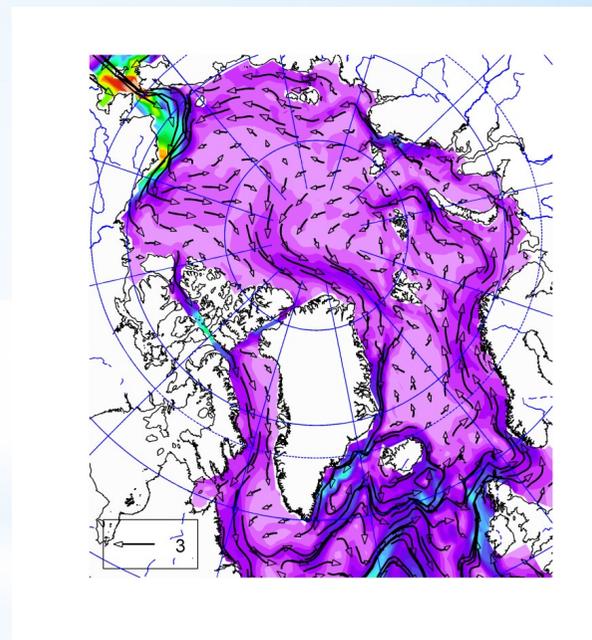
PHC-3.0



* **Осредненная поверхностная циркуляция
СЛО**

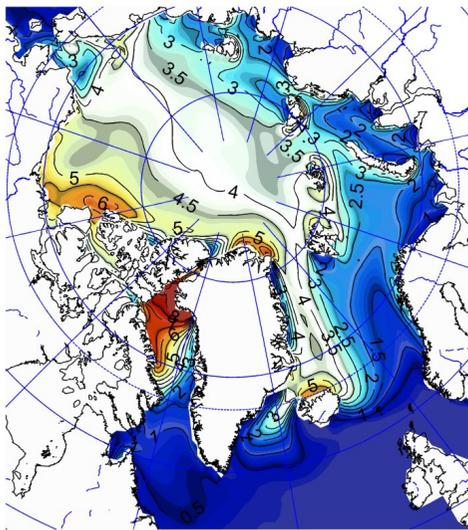


Март

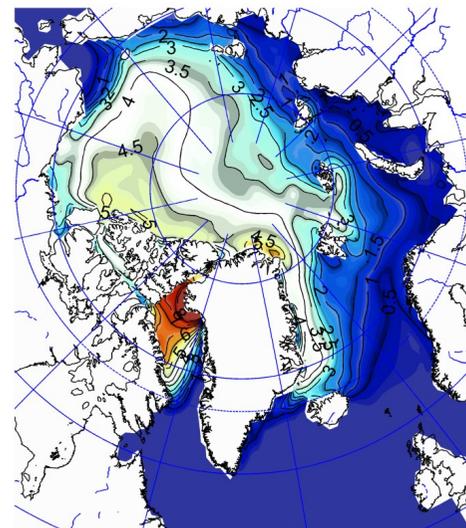


Сентябрь

* Средняя толщина льда – Арктика

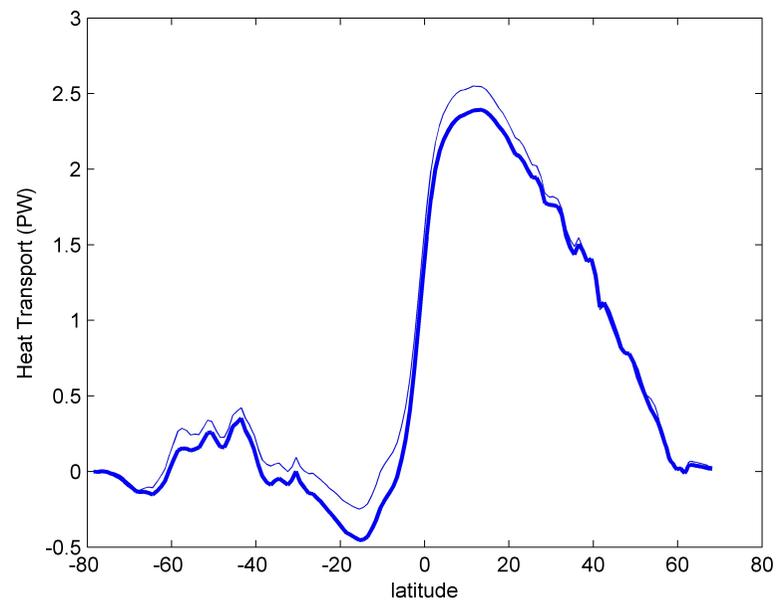


Март



Сентябрь

* **Меридиональный перенос тепла в океане**



Заключение

1. Одной из особенностей динамики атмосферы Арктики являются мезомасштабные полярные циклоны. Концепция конвективной доступной потенциальной энергии (**CAPE**) как мера благоприятного состояния атмосферы для генерации полярных циклонов морской поверхностью в Арктике. Это приводит к предположению, что условная неустойчивость второго рода (CISK) может служить одним из механизмов развития полярных циклонов (ПЦ). Несмотря на то, что полярная атмосфера значительно более устойчива, чем тропики, **вторжения холодного воздуха с континента или с поверхности океана покрытой льдом на открытый океан может привести к значительной условной неустойчивости и развитию полярных циклонов (ПЦ).**

Другой важный механизм, который можно рассматривать как механизм поддержания ПЦ, - **WISHE** (wind- induced surface heat exchange).

Бароклинная неустойчивость играет ключевую роль в генерации ПЦ.

Результаты сценарных экспериментов, показали, что изменения климата, связанные с потеплением за счет роста концентрации CO_2 в атмосфере, могут способствовать развитию более глубокой конвекции и станут более благоприятными для развития ПЦ. Однако, при таком сценарии происходит существенное сокращение площади льдов в Арктике, что, напротив, является неблагоприятным фактором для генерации ПЦ.

2. На основе численного моделирования была проведена оценка чувствительности изменчивости состояния ледового покрова к изменчивости атмосферной циркуляции. Отдельное внимание уделено циркуляции над Норвежским и Гренландским морями как областью формирования начальной траектории распространения атлантических вод в Северном Ледовитом океане (СЛО).

Среди факторов оказывающих влияние на состояние ледового покрова в СЛО. важнейшее место занимают атмосферные процессы:

- **Во-первых**, это температура атмосферы, сохраняющей в последние десятилетия устойчивый тренд на повышение.
- **Во-вторых**, это изменчивость циркуляции атмосферы, которая оказывает влияние на крупномасштабную циркуляцию в океане.

3. Для решения задач, была разработана новая модель климатической системы PlaSim-ICMMG-v.01 на основе атмосферного ядра модели климатической системы промежуточной сложности PlaSim и новой модели океана ИВМиМГ СО РАН с моделью морского льда CICE-3.1.

Сравнение результатов моделирования текущего климата, как на основе новой модели, так и на основе модели PlaSim, с данными реанализа, показало улучшение качества моделирования текущего климата в пользу новой модели.

Спасибо за внимание!!!