



В.В. Иванов

Краткий обзор современного состояния изученности гидрометеорологических процессов в Арктике

*Девятая сессия Северо-Евразийского климатического форума стран СНГ по
сезонным прогнозам (СЕАКОФ-9)*

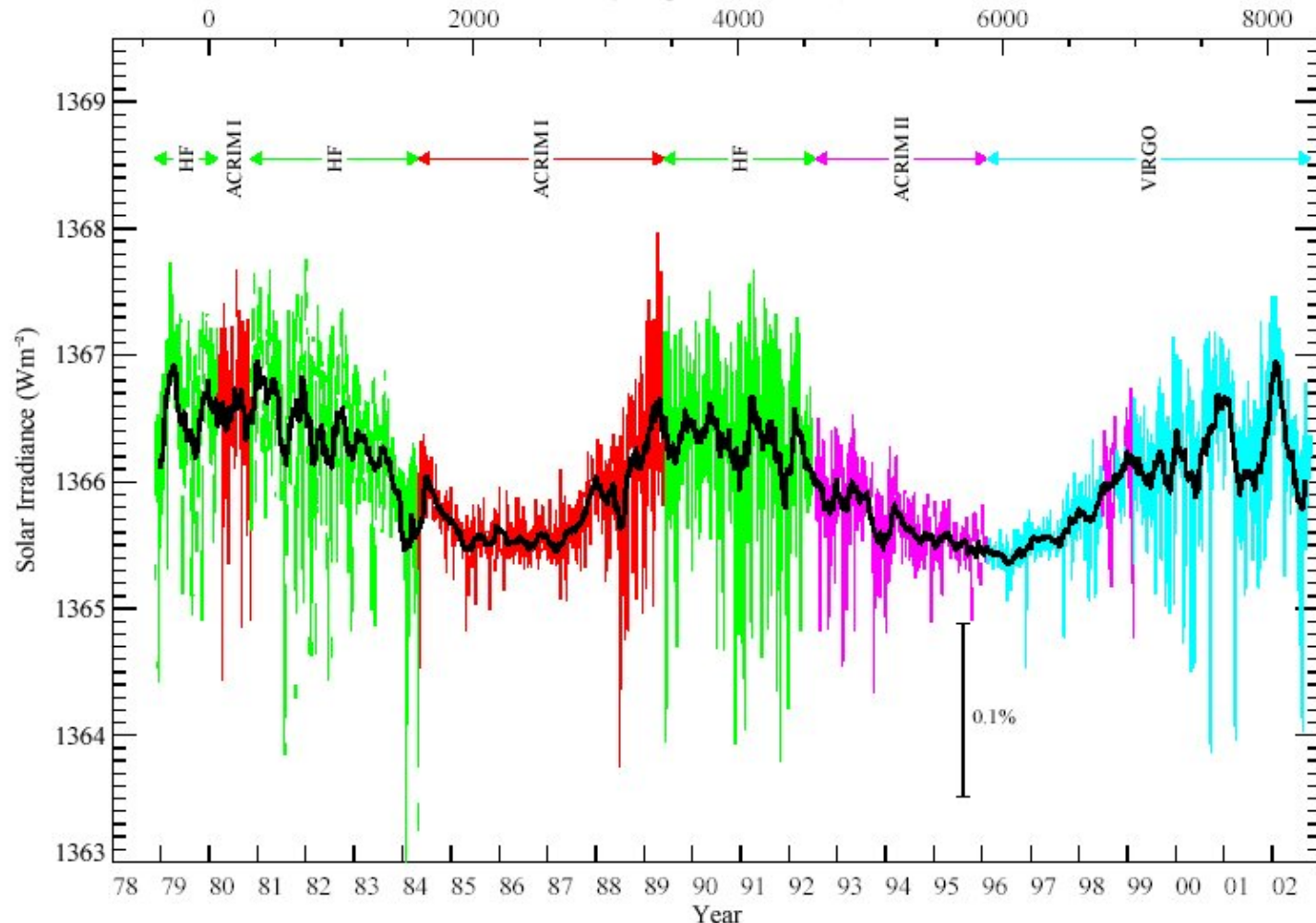
Содержание

- Основные факторы, определяющие особенности гидрометеорологических процессов в Арктике
- Роль арктического морского льда в климатической системе
- Вклад атмосферы и океана в формировании гидрометеорологического режима Арктики
- О важности учета обратных связей в системе «океан-морской лед - атмосфера»

Солнечная радиация – источник энергии всех процессов на Земле



Солнечная постоянная — суммарный поток солнечного излучения, проходящий за единицу времени через единичную площадку, ориентированную перпендикулярно потоку, на расстоянии одной астрономической единицы от Солнца вне земной атмосферы. По данным внеатмосферных измерений солнечная постоянная составляет 1366 Вт/м^2 , или $1,958 \text{ кал/см}^2 \cdot \text{мин}$.



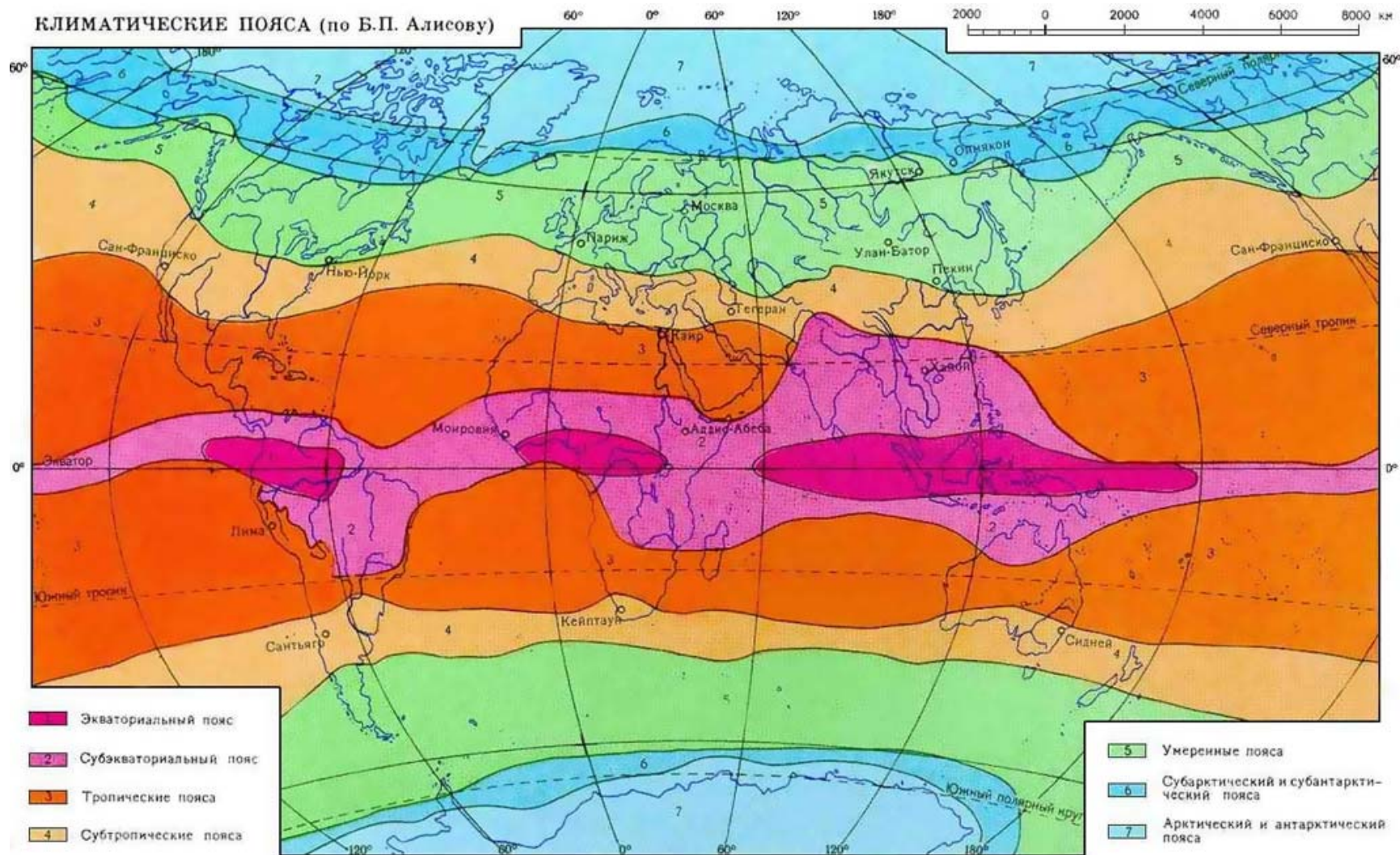
Данные прямых измерений солнечной постоянной 1978—2003 гг. Различные цвета соответствуют данным различных спутниковых экспериментов.

Особенности ГМ процессов в различных климатических зонах

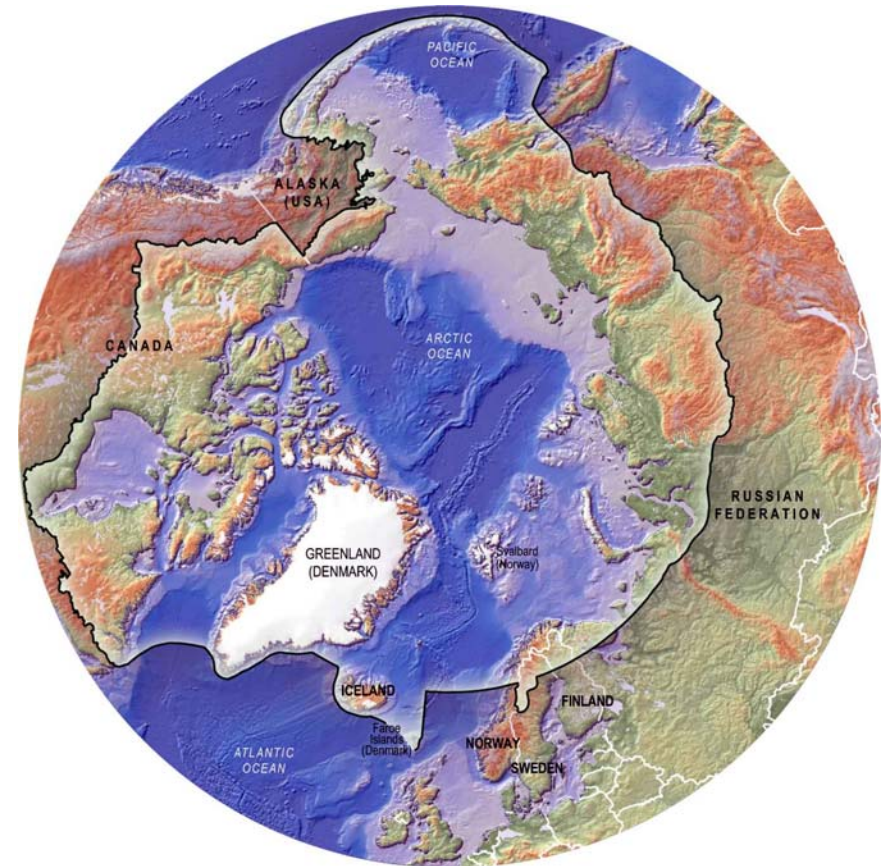
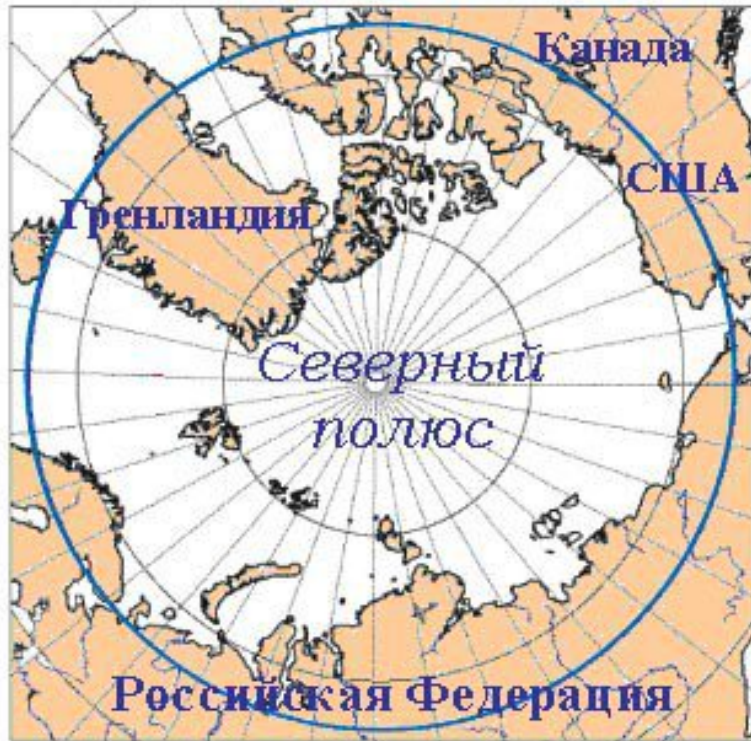


Широта места определяет зональность и сезонность распределения солнечной радиации. Зональный характер изменения солнечной радиации по земной поверхности обусловлен шарообразной формой нашей планеты. Понятие «климат» буквально означает **наклон**. Подразумевается наклон земной поверхности к солнечным лучам. От экватора к полюсам в целом наблюдается уменьшение угла падения солнечных лучей. Между углом падения солнечных лучей и количеством солнечной радиации, приходящей на земную поверхность, существует прямая зависимость. Поэтому от экватора к полюсам уменьшается величина солнечной радиации.

Границы климатических зон



Географические границы северной полярной области Земли (Арктики)



Сезонность поступления солнечной радиации в Арктике



Полярный день — период, когда Солнце не заходит за горизонт дольше 1 суток.

Полярная ночь — период, когда Солнце более 1 суток не появляется из-за горизонта.

Полярные день и ночь — следствие наклона плоскости экватора Земли к плоскости эклиптики, который составляет примерно $23^{\circ}26'$.



**Круглогодичность
снежного и ледяного
покрытия поверхности на
большой части Арктики**

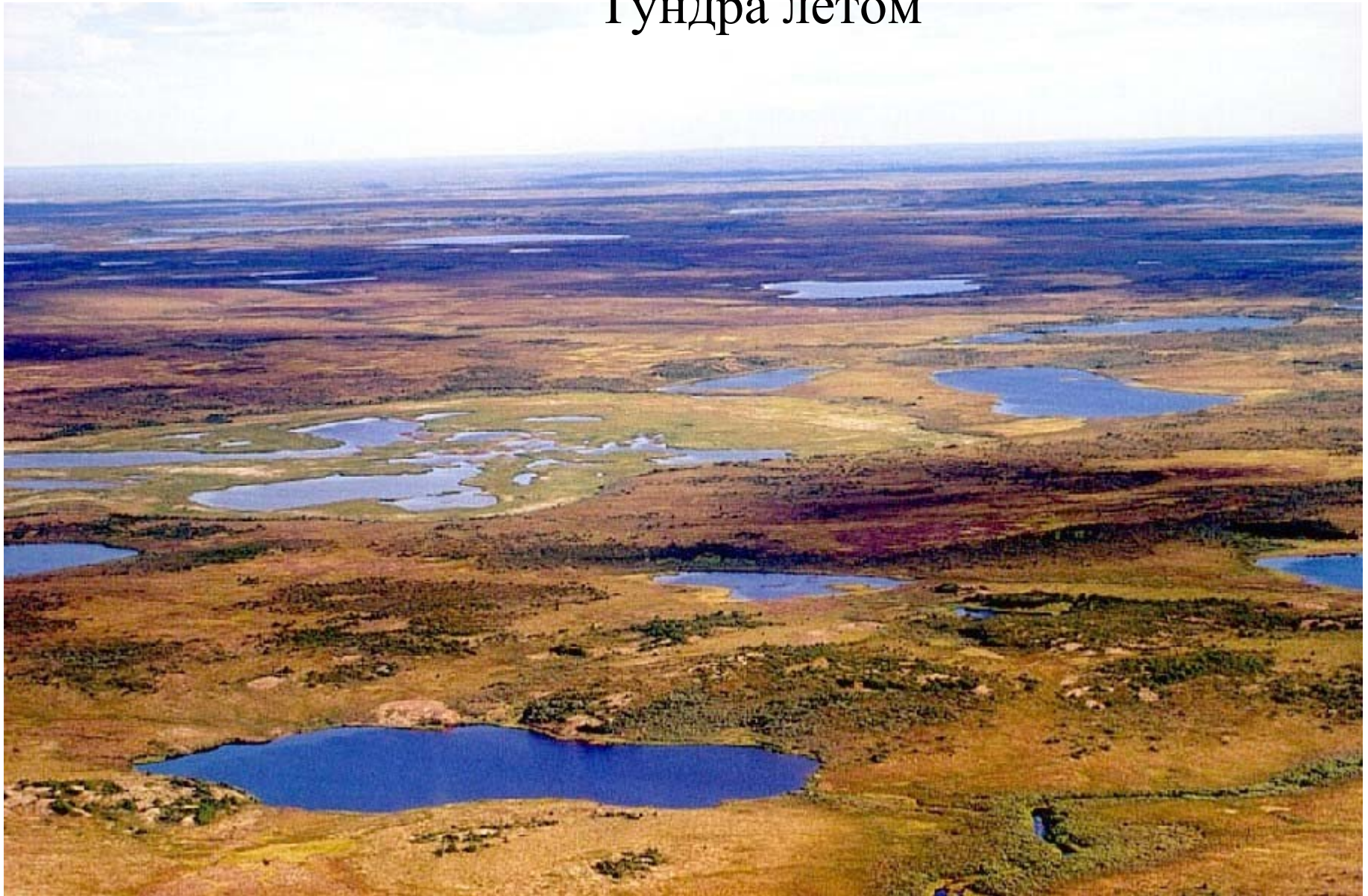


Ню-Олесун, Шпицберген



Арктический бассейн летом

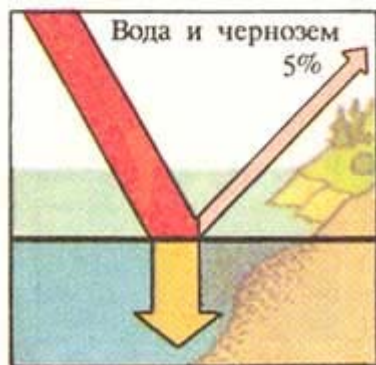
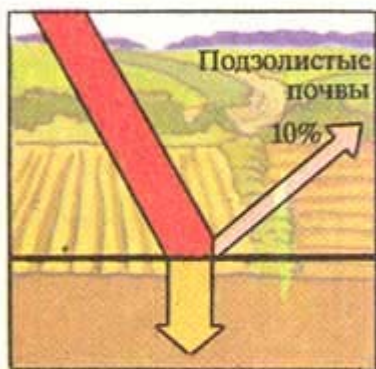
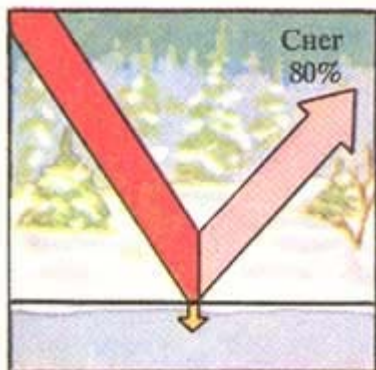
Тундра летом



Тундра зимой



Отражательная способность поверхности

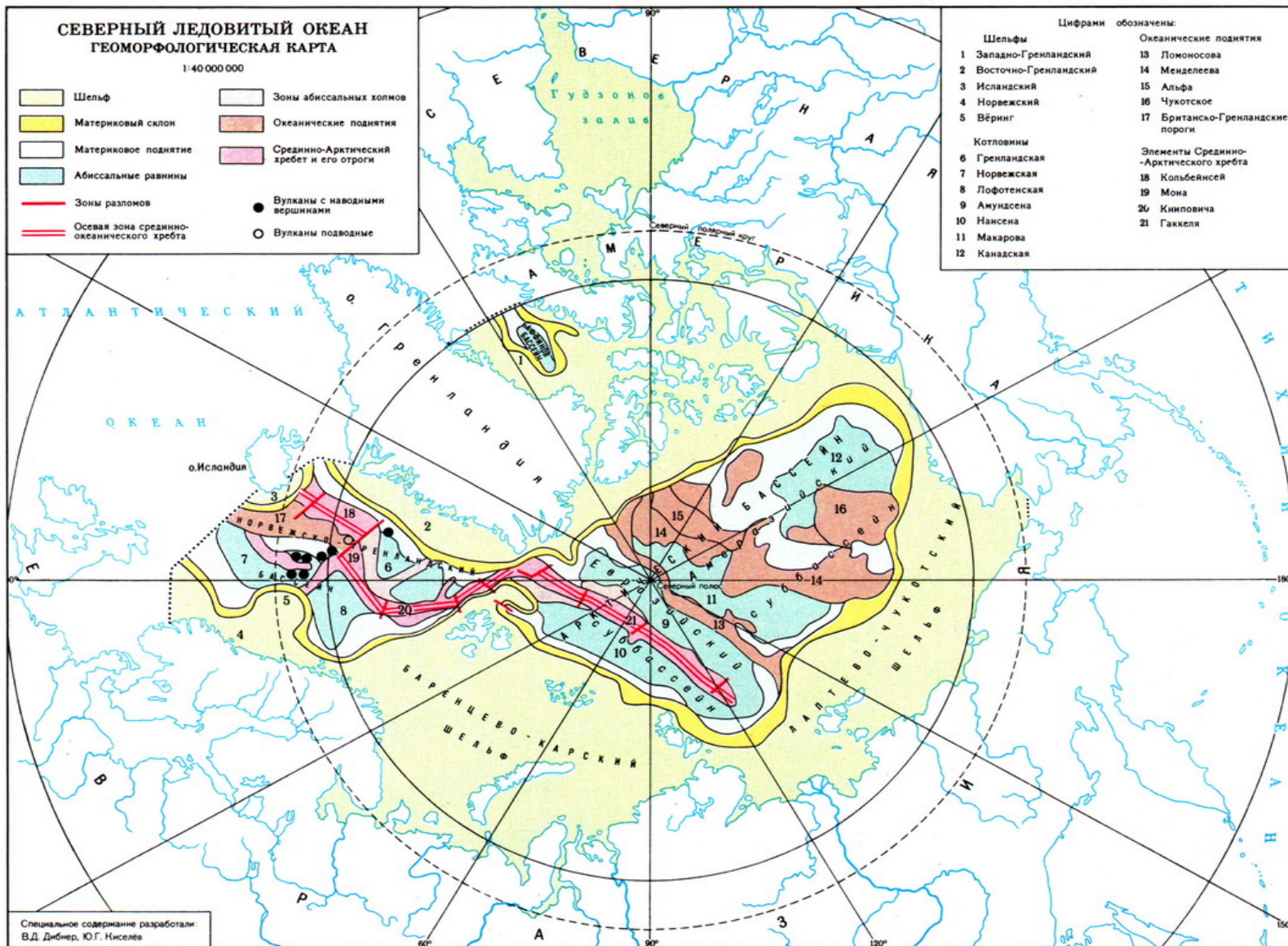


Отражательная способность поверхности — величина, характеризующая способность поверхности тела (границы раздела двух сред) отражать падающий на нее поток электромагнитного излучения.

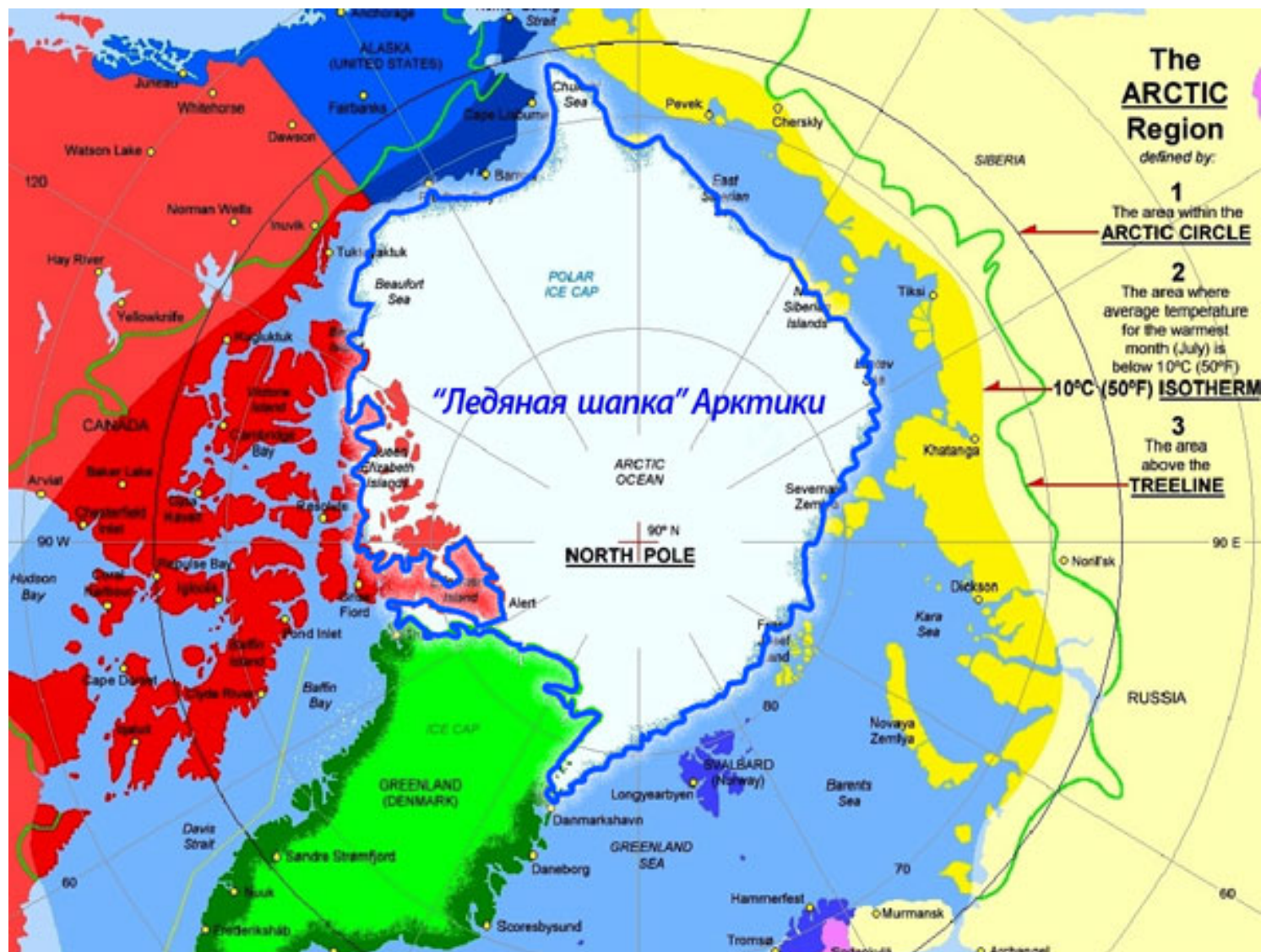
Альбедо (от лат. Albedo=белизна) — способность поверхности отражать солнечную радиацию.

Морфометрические особенности Арктики

Большая часть занята водой ($S_{tot}=21$ млн кв. км; $S_{сло}=14$ млн кв км; $S_{шельф}=6$ млн кв км)



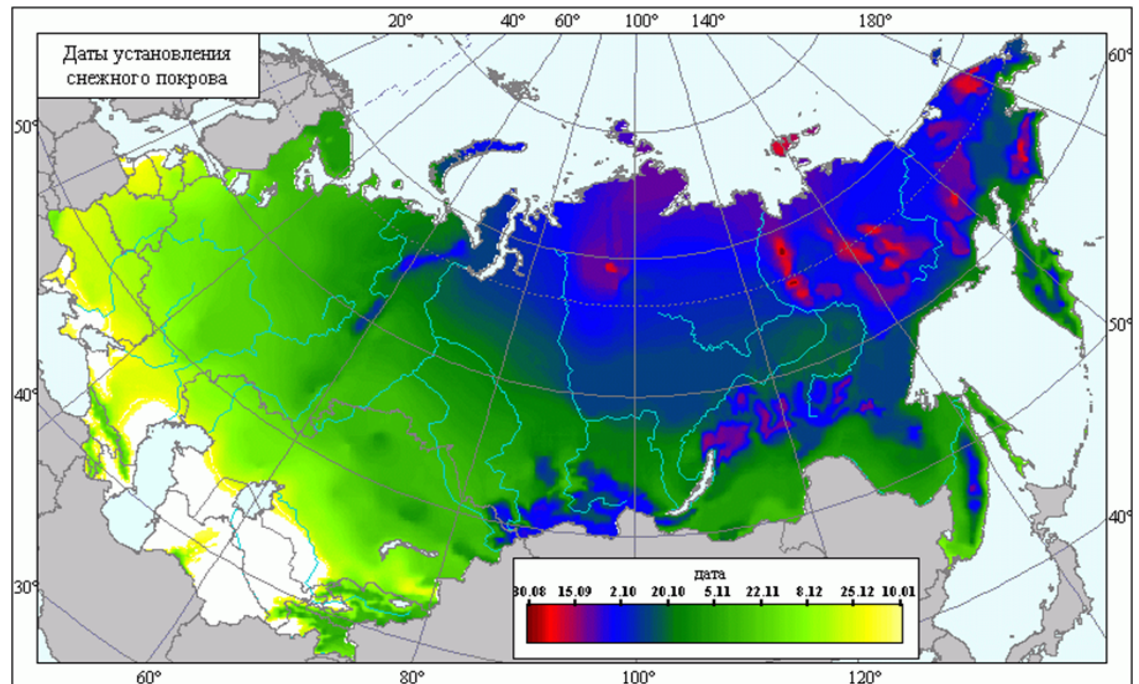
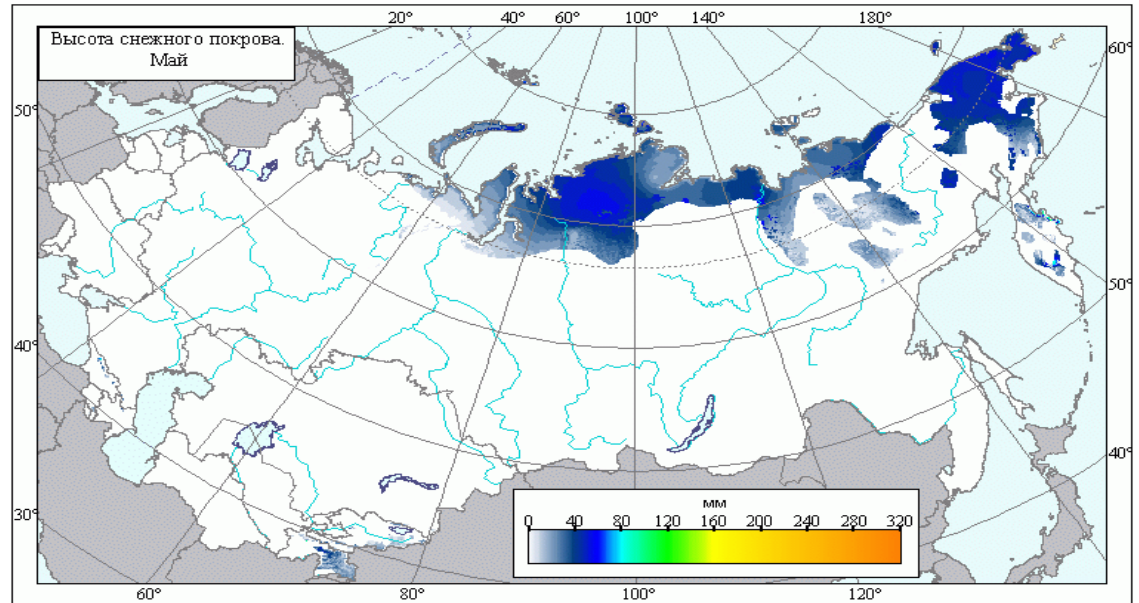
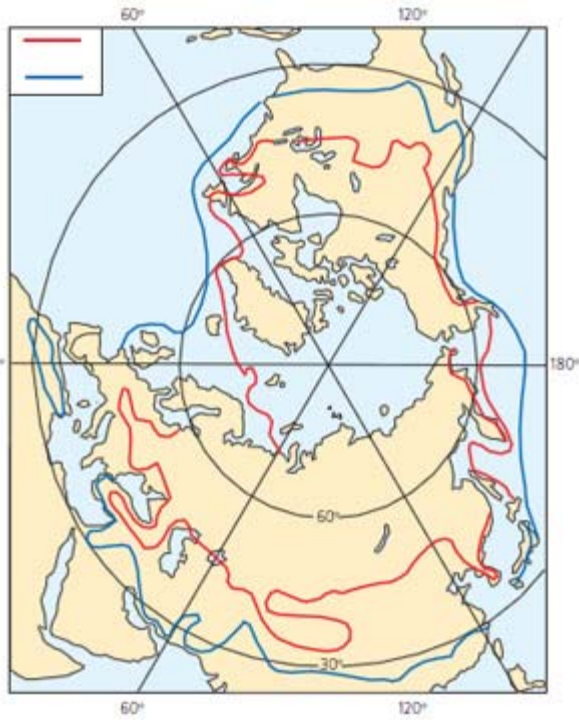
Приполюсный район Арктики – океан, круглогодично покрытый льдом



Окружающие районы суши и острова: тундра, ледники, вечная мерзлота. Отсутствие растительности (мхи, лишайники).



Снежный покров в Арктике сохраняется большую часть года (от 8 до 12 мес.).



Красная линия – средняя граница устойчивого сезонного снежного покрова в Северном полушарии;
Синяя линия – средняя граница осадков в виде снега в Северном полушарии.

Морской дрейфующий лед в СЛО

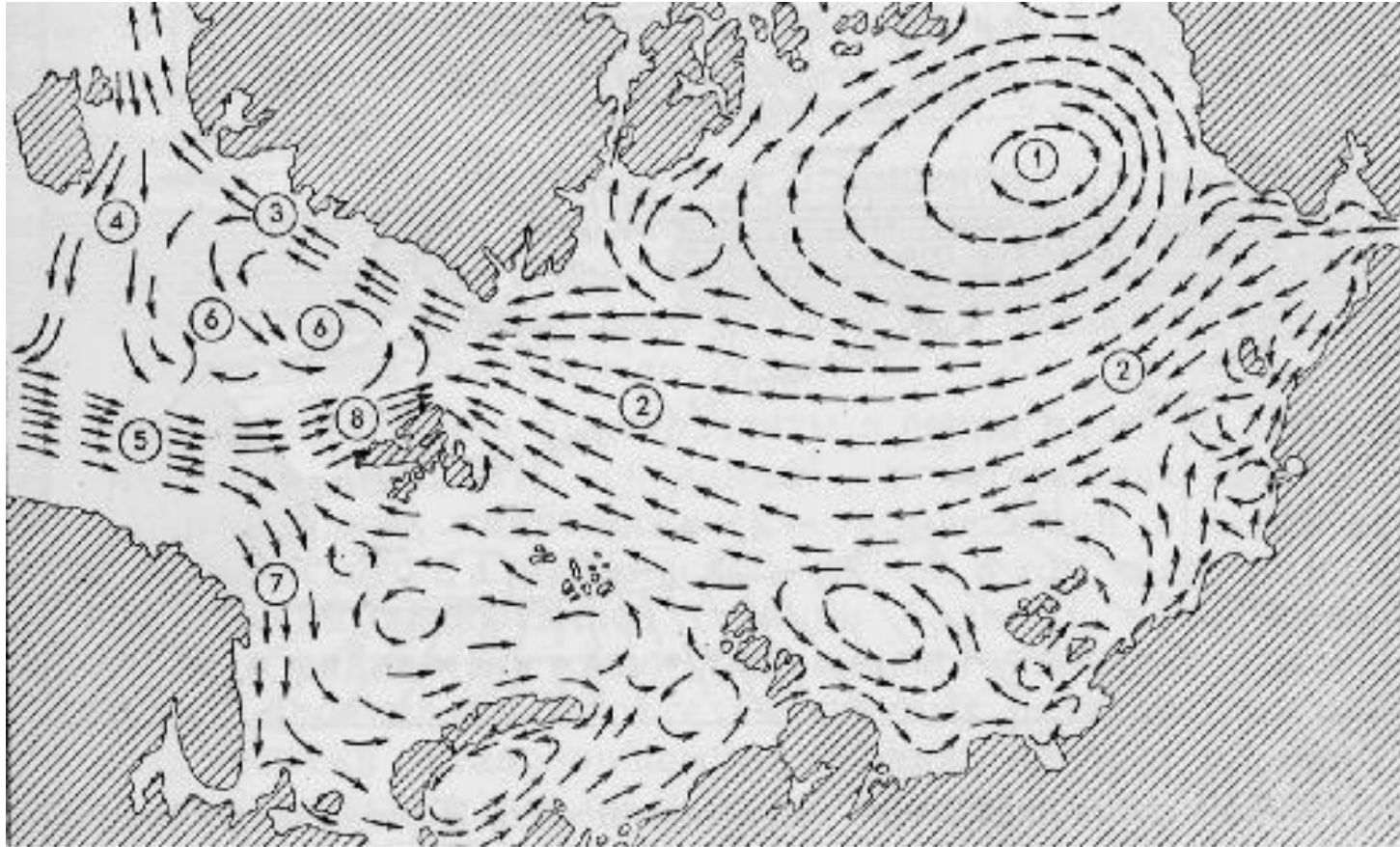
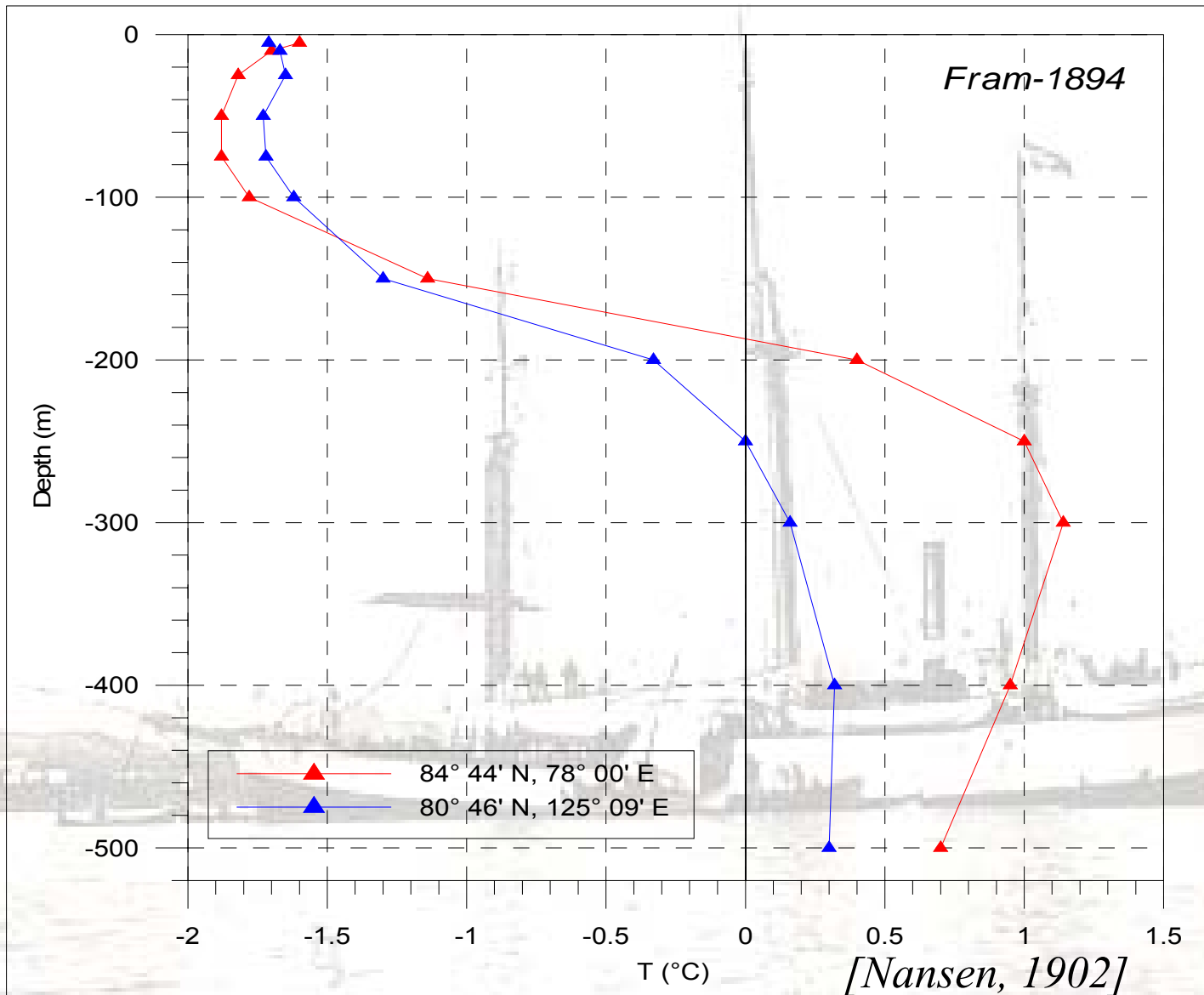


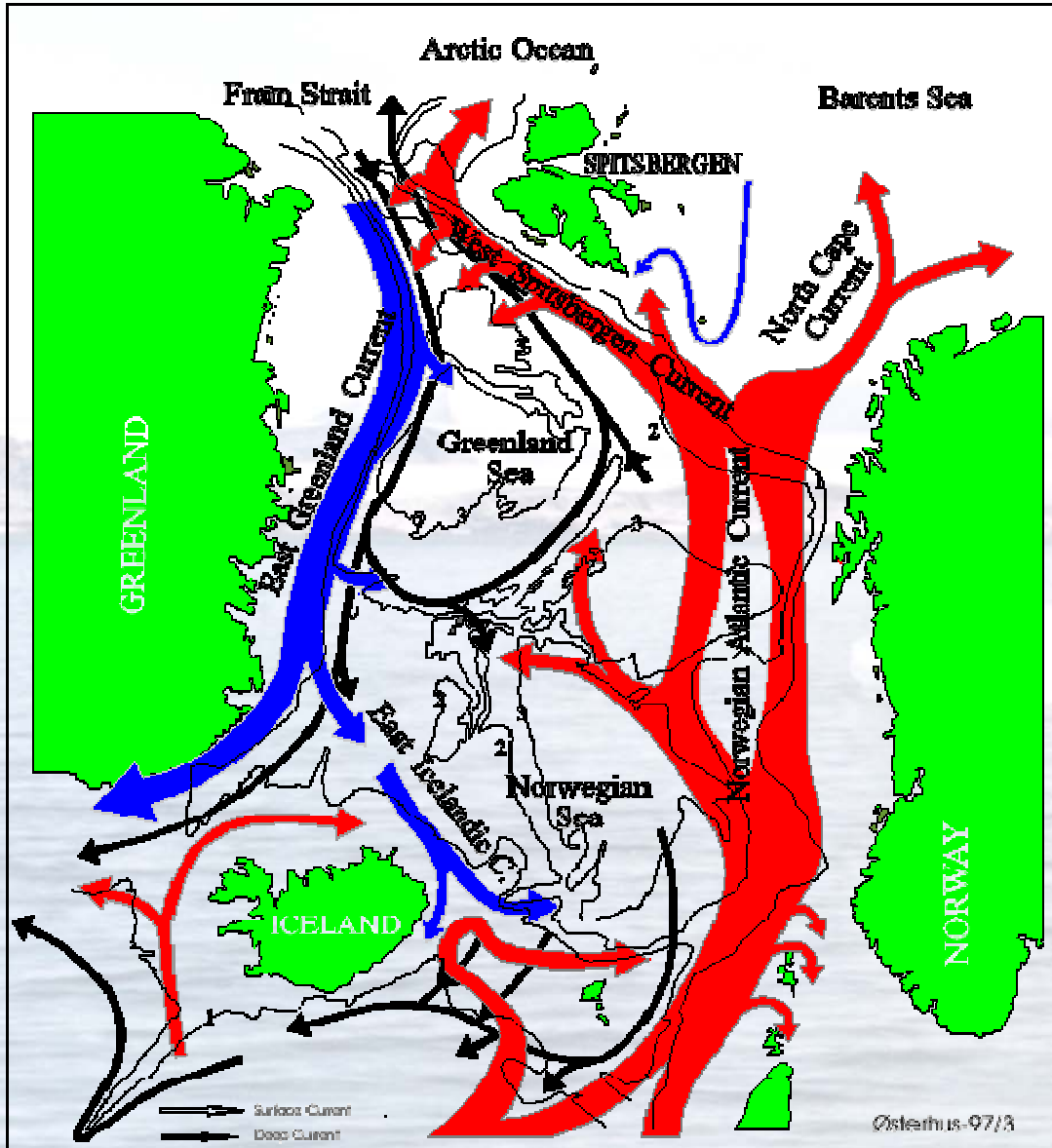
Схема поверхностных течений в СЛО (Никифоров и Шпайхер, 1980)

Теплые промежуточные воды в СЛО



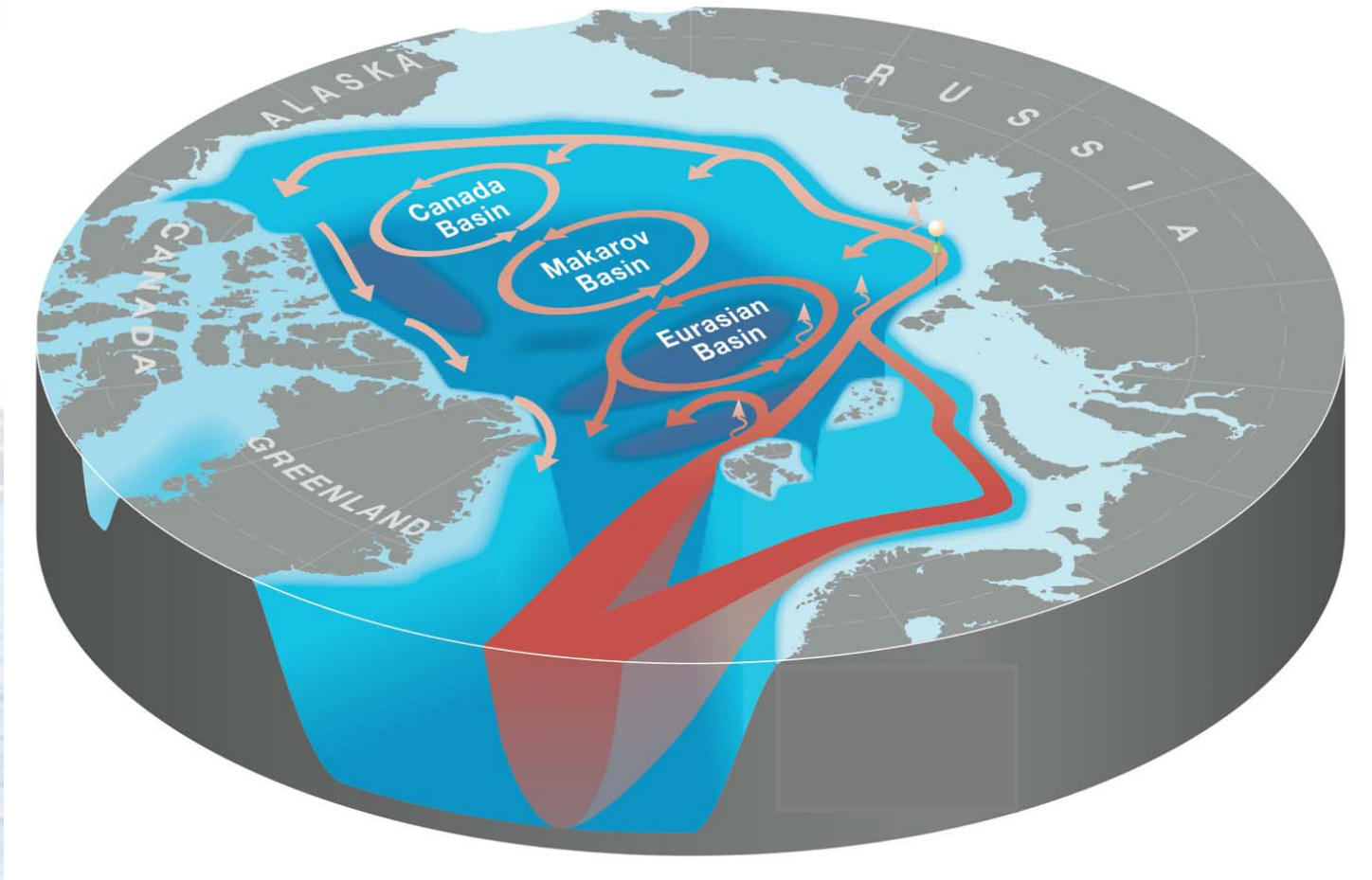
Вертикальные профили температуры воды, полученные в экспедиции в СЛО на «Фраме» 1893-1896

Поступление атлантической воды в СЛО



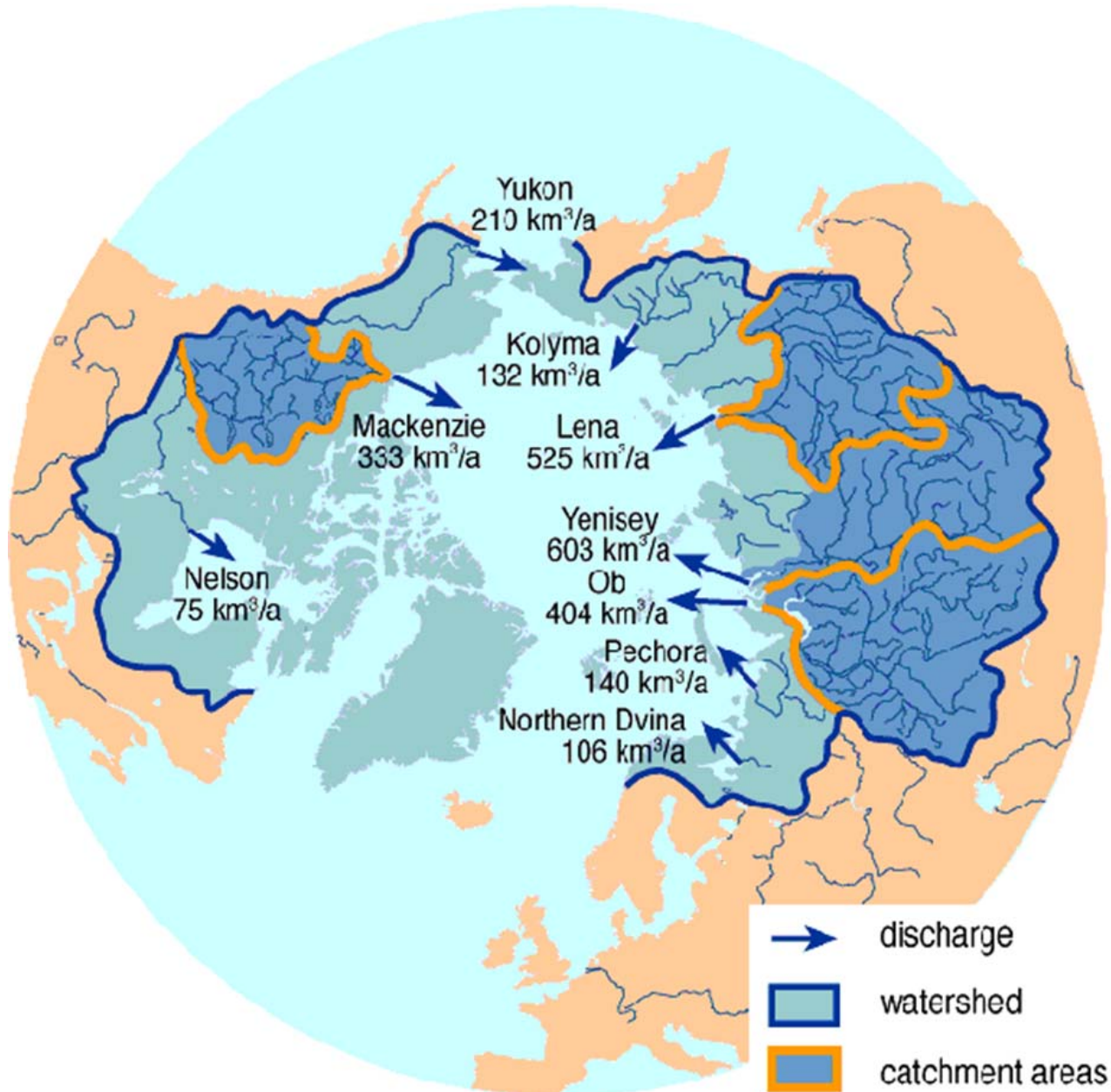
Атлантические воды, поступающие в Северо-Европейский бассейн из Северной Атлантики, разделяются на две ветви в северной части Норвежского моря: западная ветвь - Западно-Шпицбергенское течение) втекает в Арктический бассейн через пролив Фрама; восточная ветвь - Нордкапское течение втекает в Баренцево море.

Распространение теплой атлантической воды в СЛО



- *Two branches at the entrance: Fram Strait branch (FSBW) and Barents sea branch (BSBW).*
- *Three cyclonic gyres in deep basins*
- *Rim cyclonic current around the AO at the continental margin*

Пресноводный речной сток в СЛО



Основные факторы, определяющие особенности гидрометеорологических процессов в Арктике

- Большая часть Арктики (67%) занята водой
- Сезонность поступления солнечной радиации
- Постоянный ледяной покров
- Снежный покров 8-12 мес.
- Отсутствие значительной растительности
- На суше: вечная мерзлота
- В океане: теплые промежуточные воды
- Интенсивный пресноводный речной сток

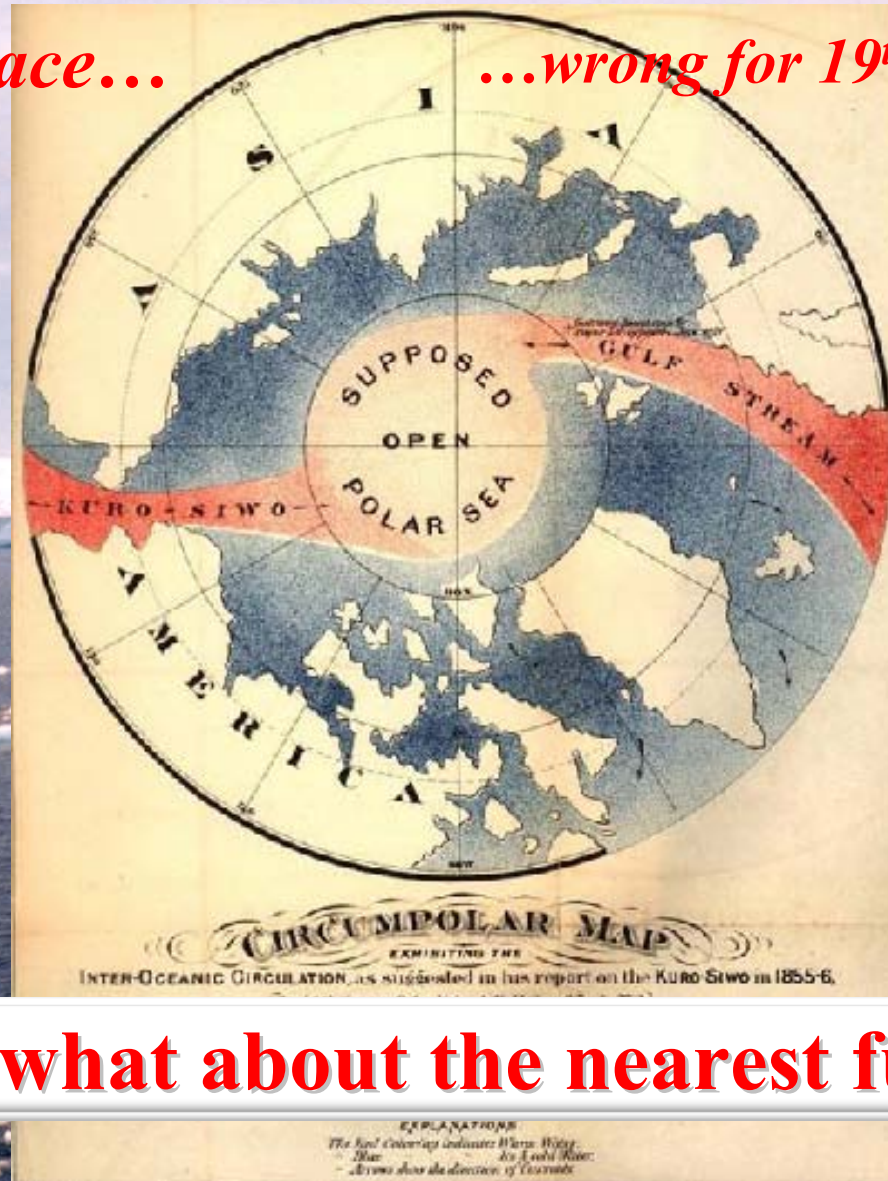
**Главной отличительной чертой СЛО,
определяющей его особое место в
климатической системе Земли, является
наличие постоянного ледяного покрова**



Circumpolar hydrographic map by Silas Bent (1872), suggesting the ice-free zone around the North Pole

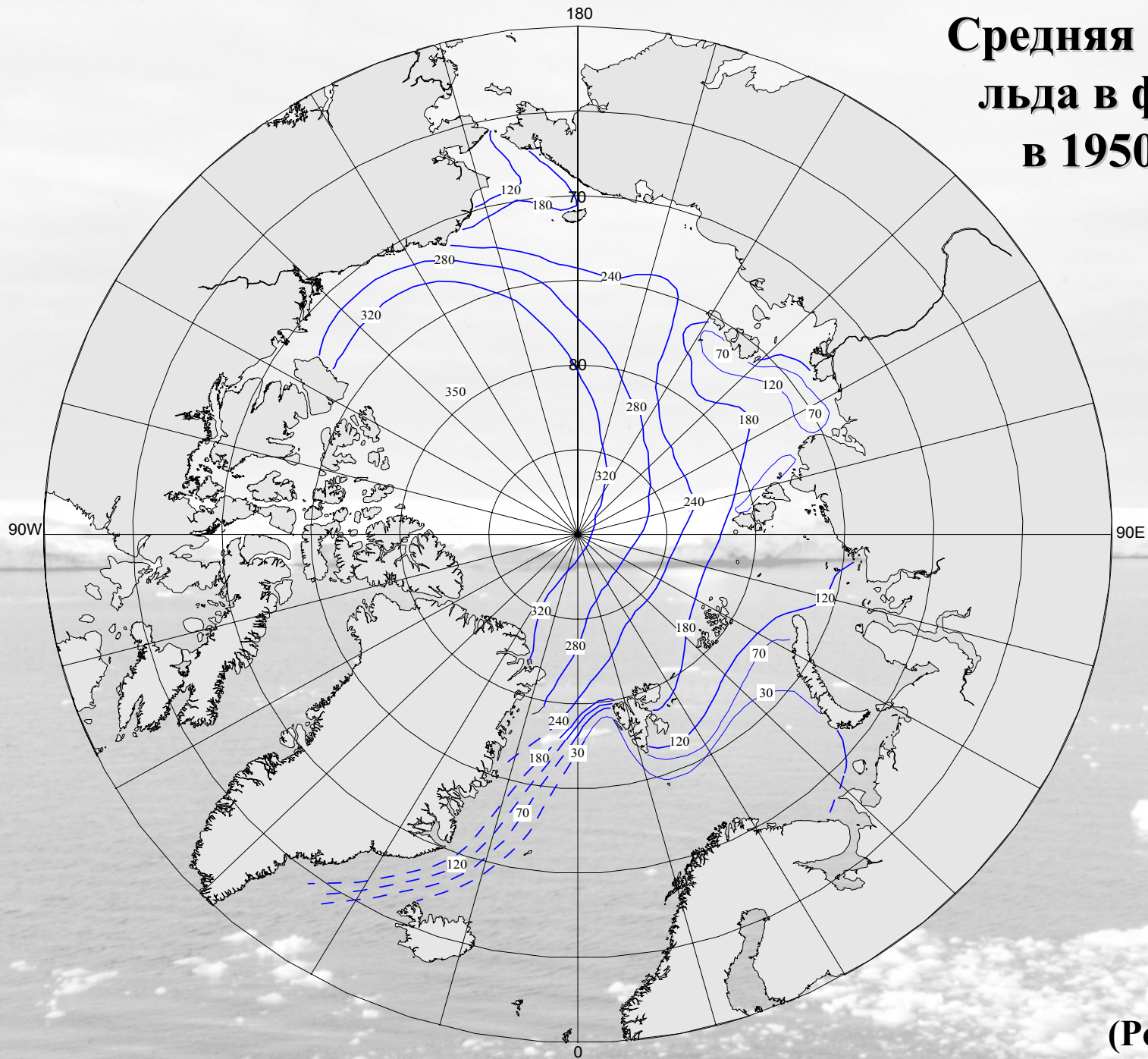
Forecast in space...

...wrong for 19th and 20th century



But what about the nearest future?

Средняя толщина льда в феврале в 1950-1990

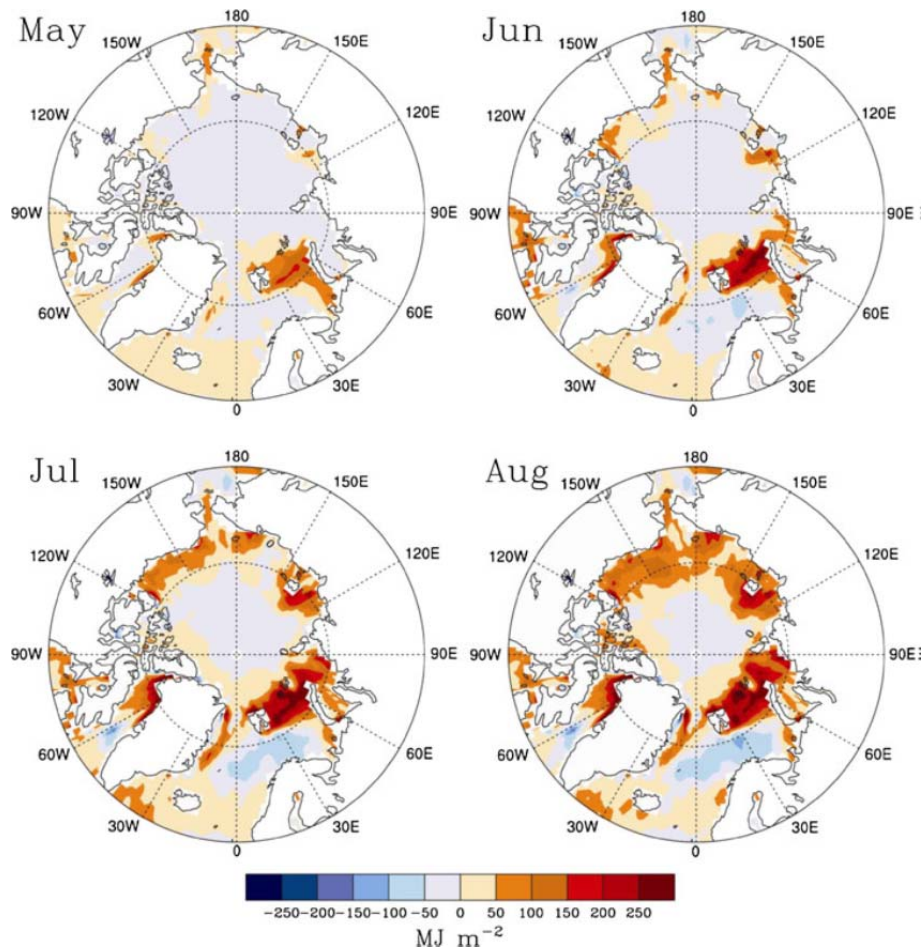


(Романов, 1992)

Почему в Арктическом Бассейне СЛО присутствует постоянный ледяной покров?

- ❑ Отрицательный радиационный баланс поверхности океана большую часть года
- ❑ Океанское тепло в основном сосредоточено на значительной глубине не оказывает заметного влияния на процессы ледообразования и таяния на поверхности океана
- ❑ Интенсивный речной сток создает «запирающий» высокоградиентный слой («холодный галоклин»), препятствующий глубокому проникновению зимней конвекции

Роль морского льда в климатической системе



Высокая отражательная
способность льда и снега

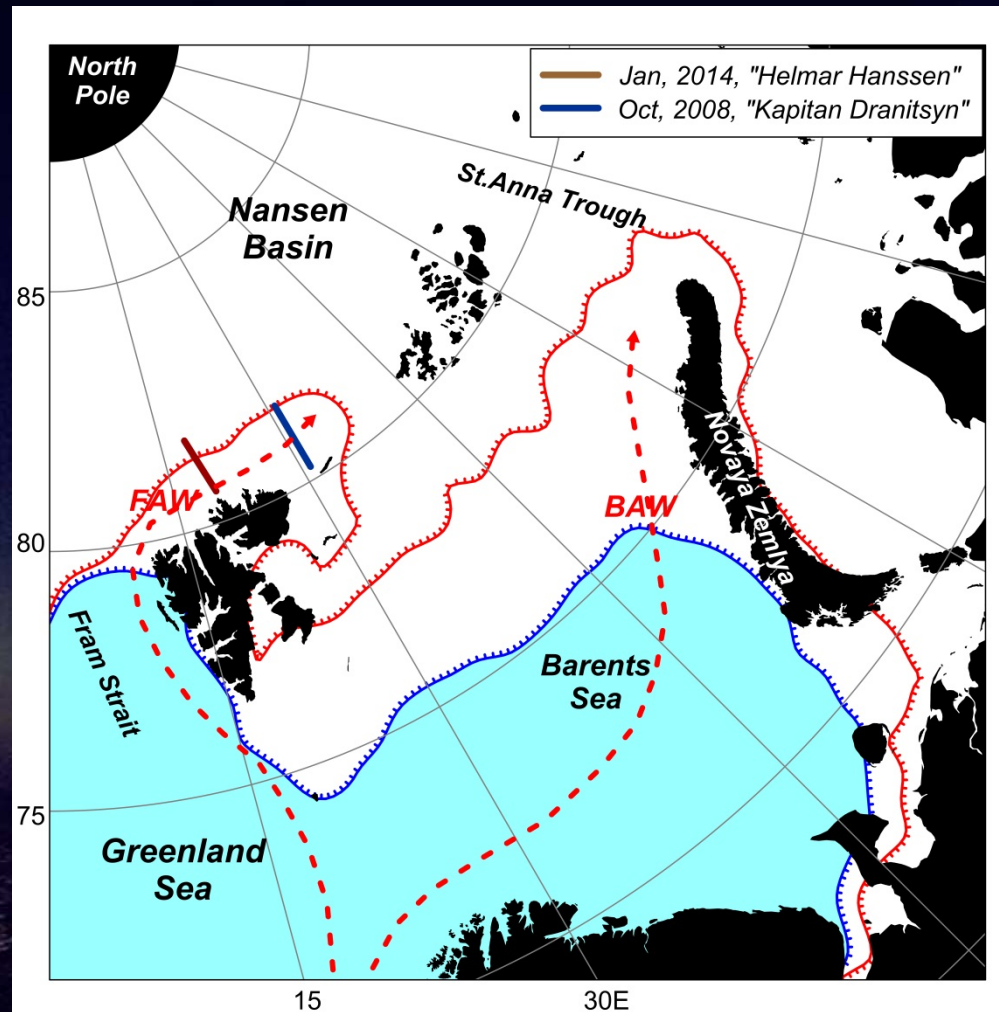


в летний сезон регулирование
количества поглощенной
коротковолновой радиации

**Аномалия суммарной солнечной радиации,
поглощенная океаном для мая, июня, июля и
августа, осредненная за 7 лет (2005-2010) на
основе ежемесячного реанализа JRA-25.
Аномалии (МДж*м⁻²) рассчитаны относительно
средних за период 1979–2010 (Strove et al., 2011)**

Роль морского льда в климатической системе

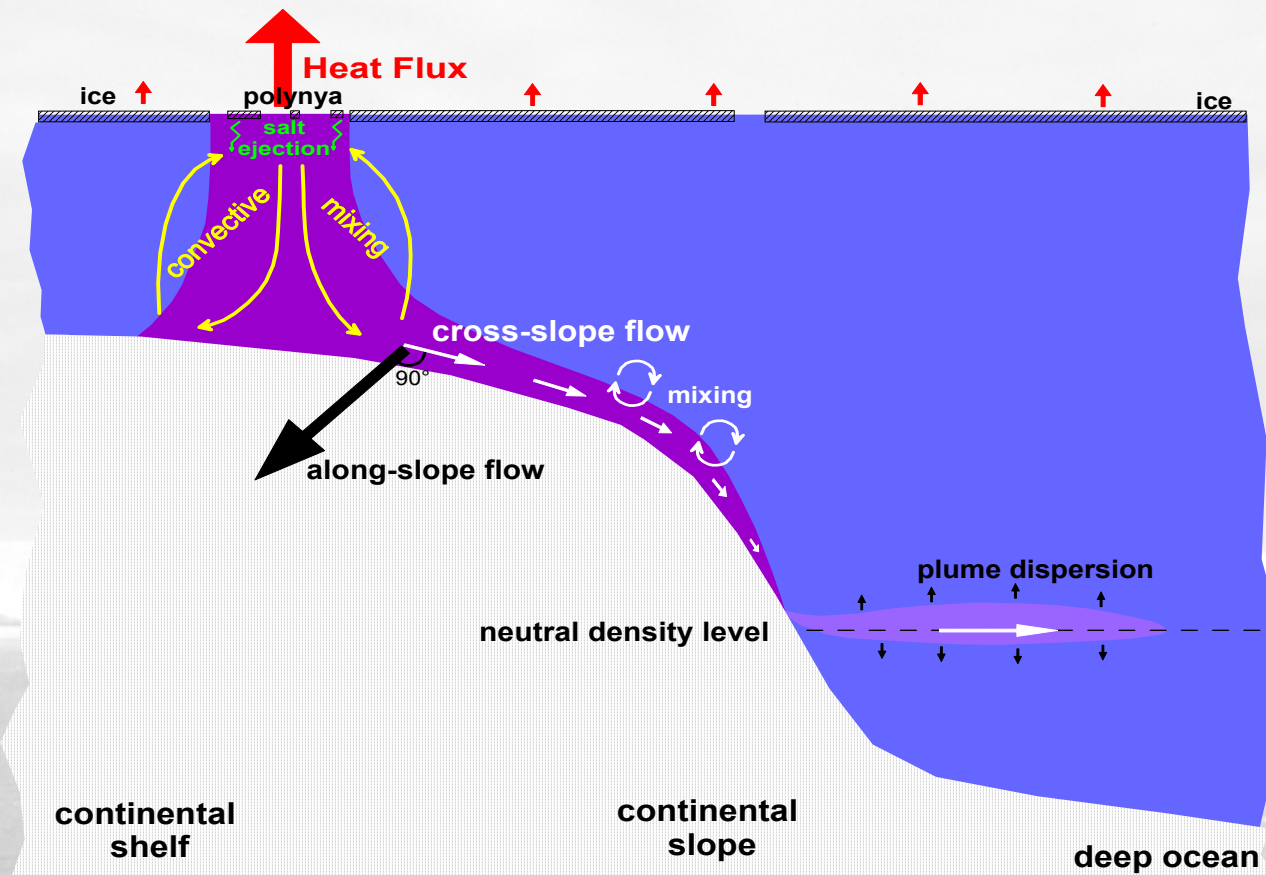
Значительная разница между температурой поверхности снежно-ледяного покрова и температурой открытой водной поверхности в зимний сезон
→
регулирование интенсивности энергообмена между океаном и атмосферой



Фотография автора:
Котловина Нансена, 82°с.ш.,
20°в.д., 14 января 2014 г.

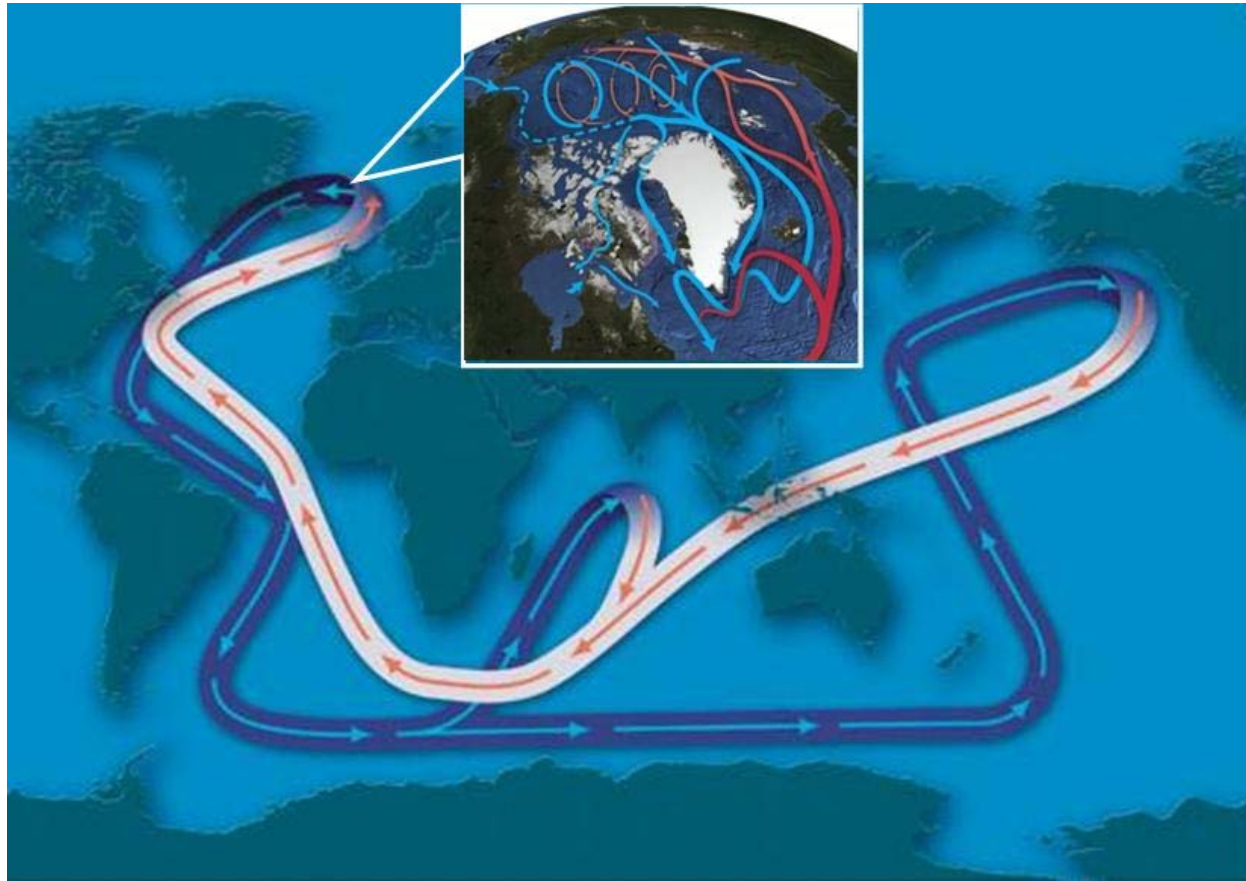
Среднее положение границы 50% ледяного покрова в в феврале 1979-2000 г. (синий цвет) и в феврале 2012-2014 г. (красный цвет)

Роль морского льда в климатической системе



Ледообразование → выделение в воду рассола → формирование уплотненных вод → стекание вдоль склона → перемешивание с промежуточными и глубинными водами бассейна → подпитка южной ветви глобальной термохалинной циркуляции

Глобальный термохалинный «конвейер» и его связь с СЛО

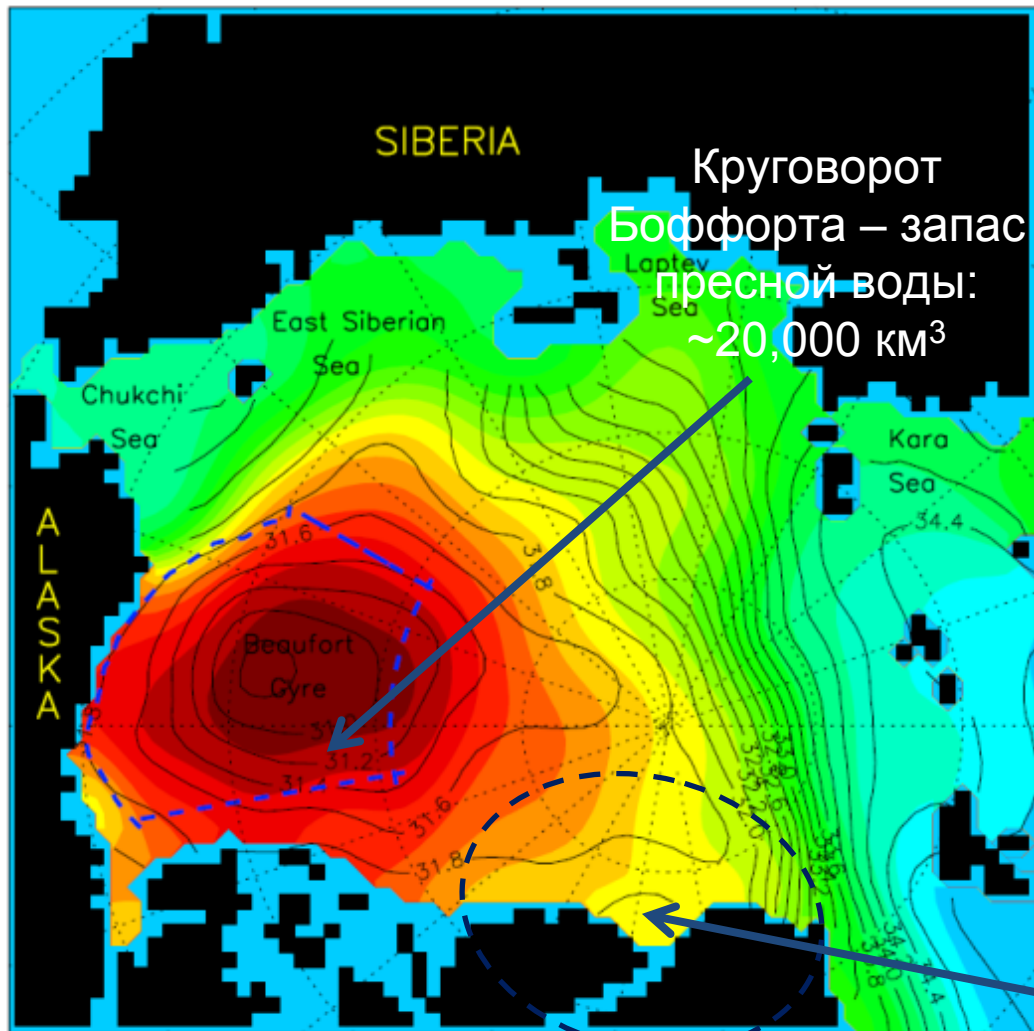


На планетарном масштабе выделяется так называемый «глобальный термохалинный конвейер» (ГТК), отдельные ветви которого переносят воду в меридиональном и зональном

Поддержание «глобального термохалинного конвейера»

Возрастание роли АБ, как источника более плотной воды для ^{климатическими зонами} Мирового океана, способно уменьшить отрицательный эффект блокирования меридионального переноса тепла вследствие таяния льдов и связанного с этим распреснения верхнего слоя океана в высоких широтах. В этом случае, так называемая «термохалинная катастрофа» (Broecker and Wallace, 1999), прогнозируемая рядом ученых, может иметь не столь драматические последствия для планетарного климата

Роль морского льда в климатической системе

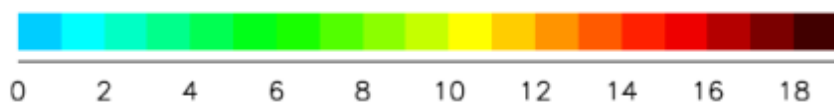


Круговорот
Бофорта – запас
пресной воды:
~20,000 км³

Таяние льда
→
распреснение в верхнем слое
→
сток в Северную Атлантику
→
формирование соленостных
аномалий (напр., ВСА-1970).
→
термохалинная катастрофа?

Район
аккумуляции
наиболее
толстых льдов -
запас пресной
воды: ~8,000
км³

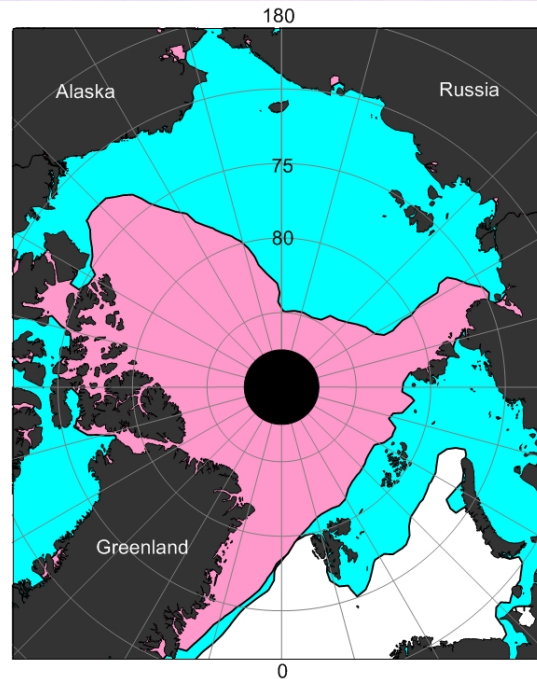
Freshwater content, meters



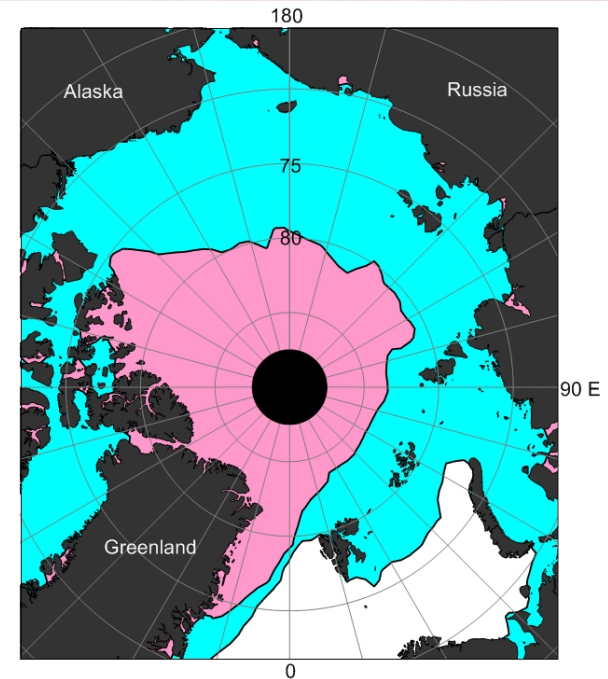
Seasonal changes of the Arctic sea ice extent



Mean 1978-2000



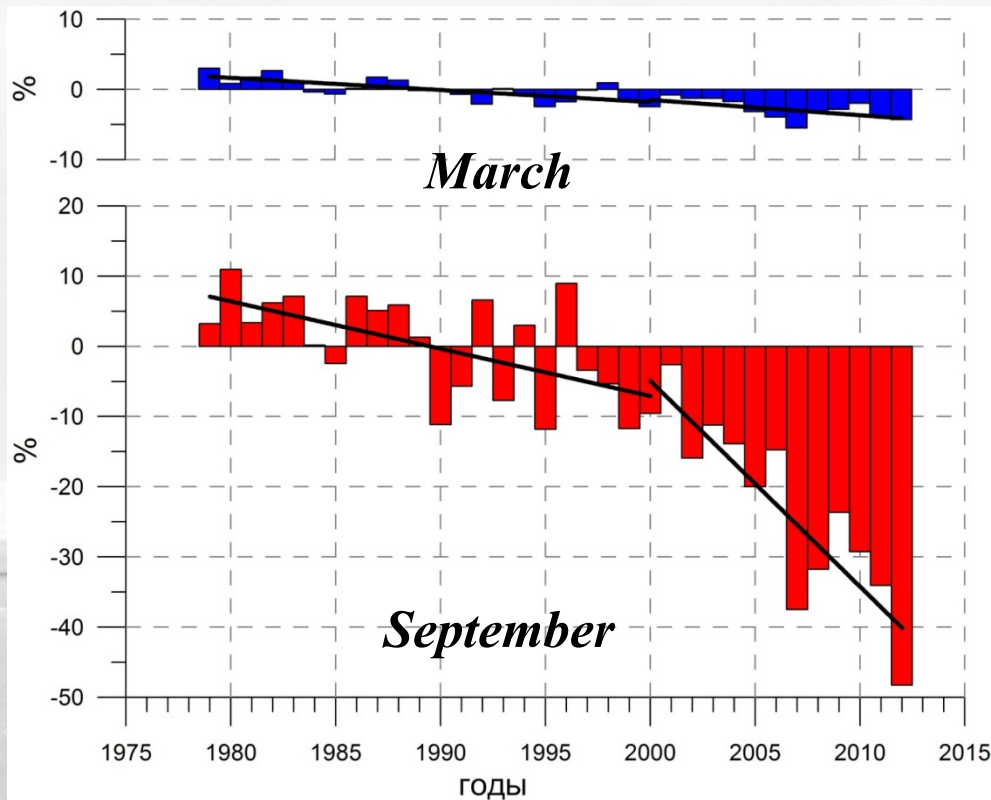
2007



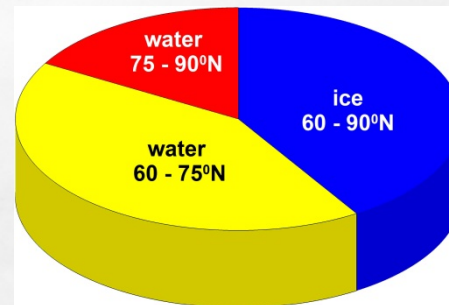
2012

Arctic sea ice extent in March and in September

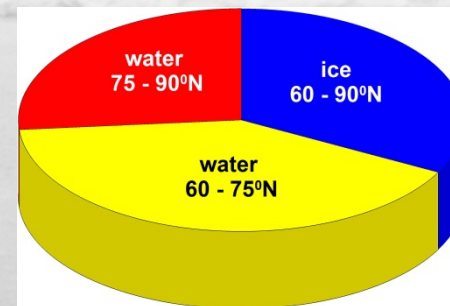
Ice extent anomaly in the Arctic Ocean



Relative areas of ice and water in September



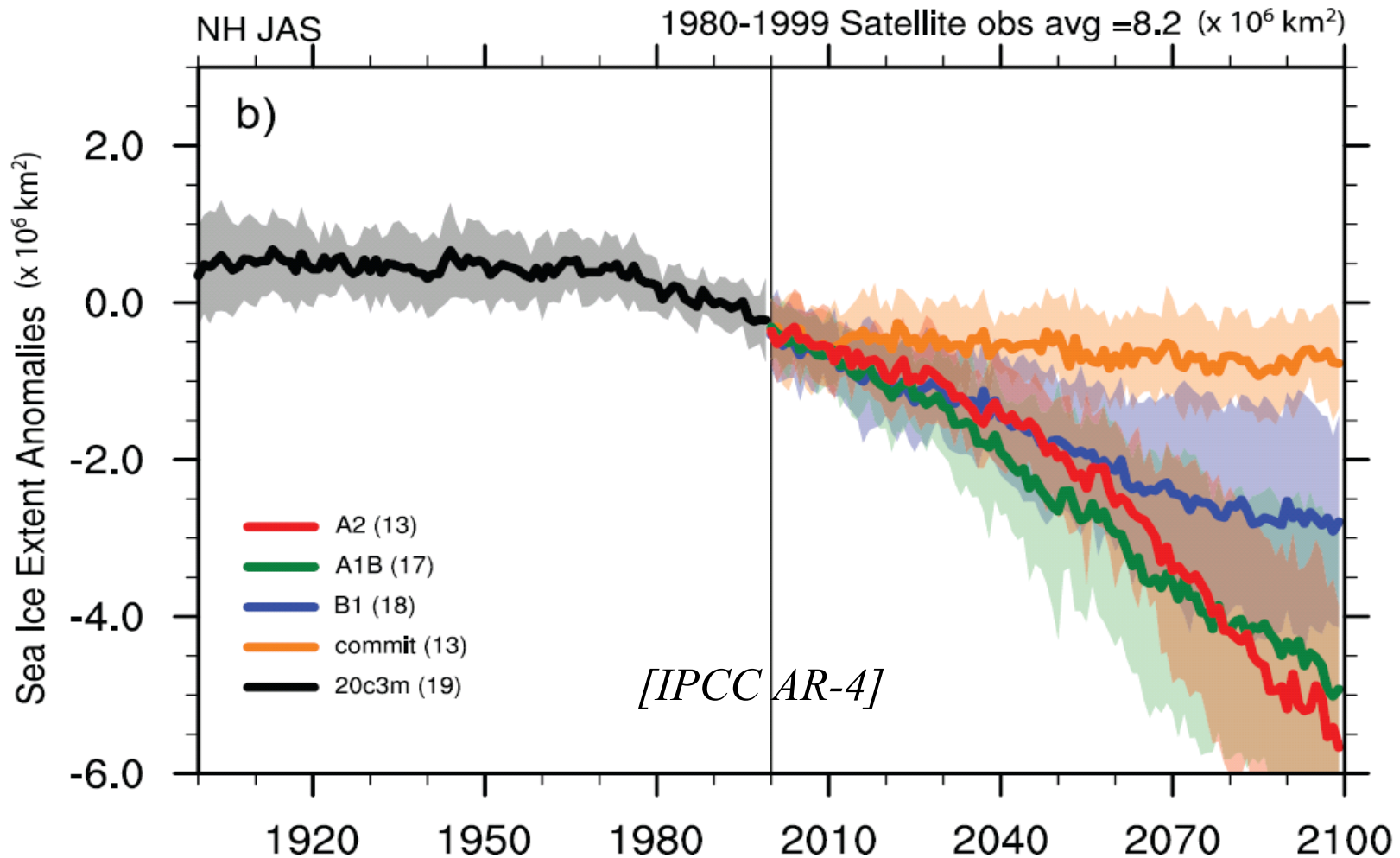
1979-2000



2007-2012

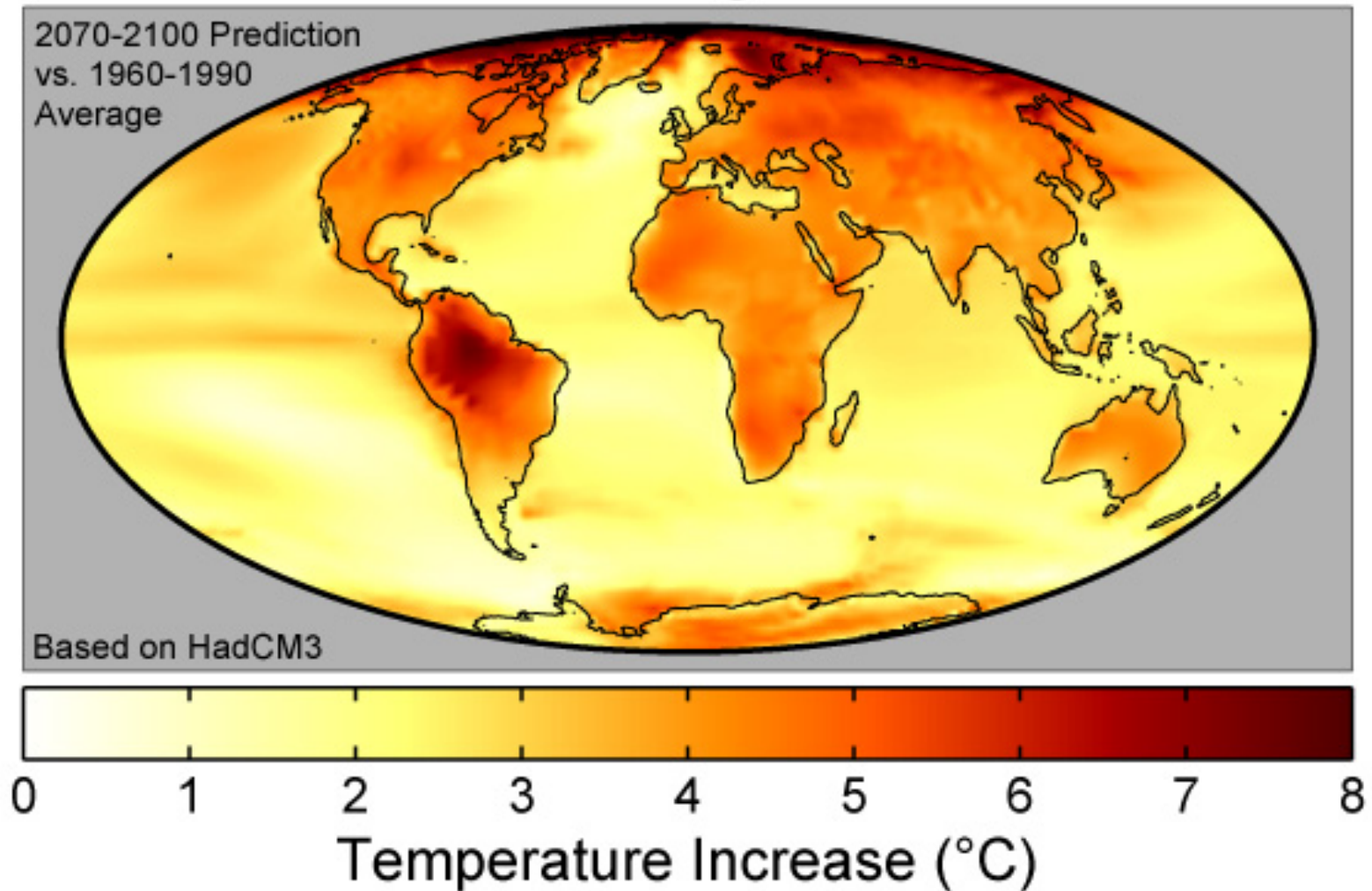
Data from: Nimbus-7 Scanning Multichannel Microwave Radiometer (SMMR) and the Defense Meteorological Satellite Program (DMSP) Special Sensor Microwave/Imager (SSM/I) Passive Microwave Data dataset.
(<http://nsidc.org/data/nsidc-0051.html>)

Модельные оценки изменения площади морского льда в СЛО



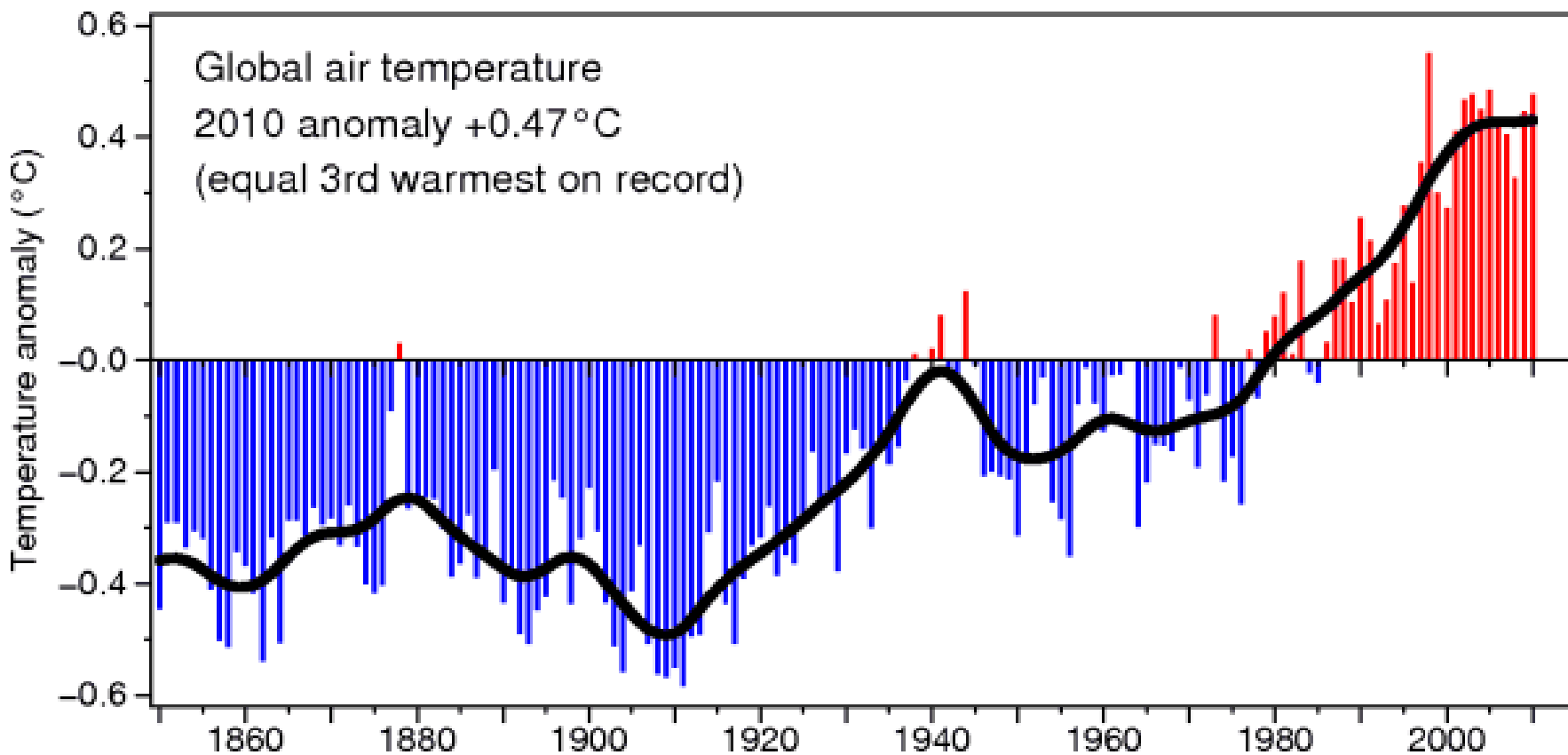
Согласно ГKM расчетам площадь морского льда будет уменьшаться в течение текущего столетия. К концу 21 века в СЛО прогнозируется сезонный ледовый покров.

Global Warming Predictions



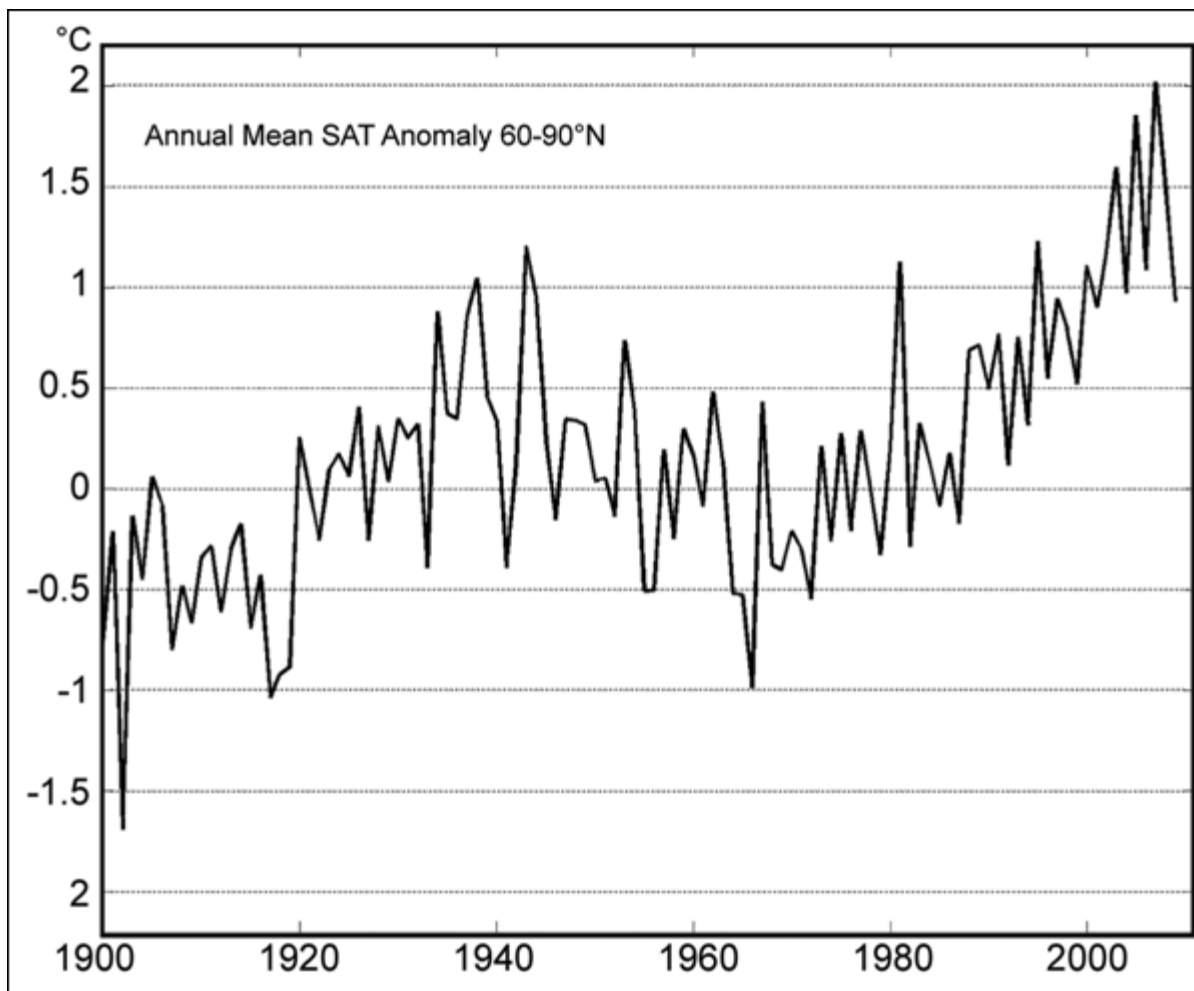
Features to note: 1) polar- and 2) continental amplification
(S. Arrhenius predicted PA in his 1896 article)

Увеличение средней приземной планетарной температуры



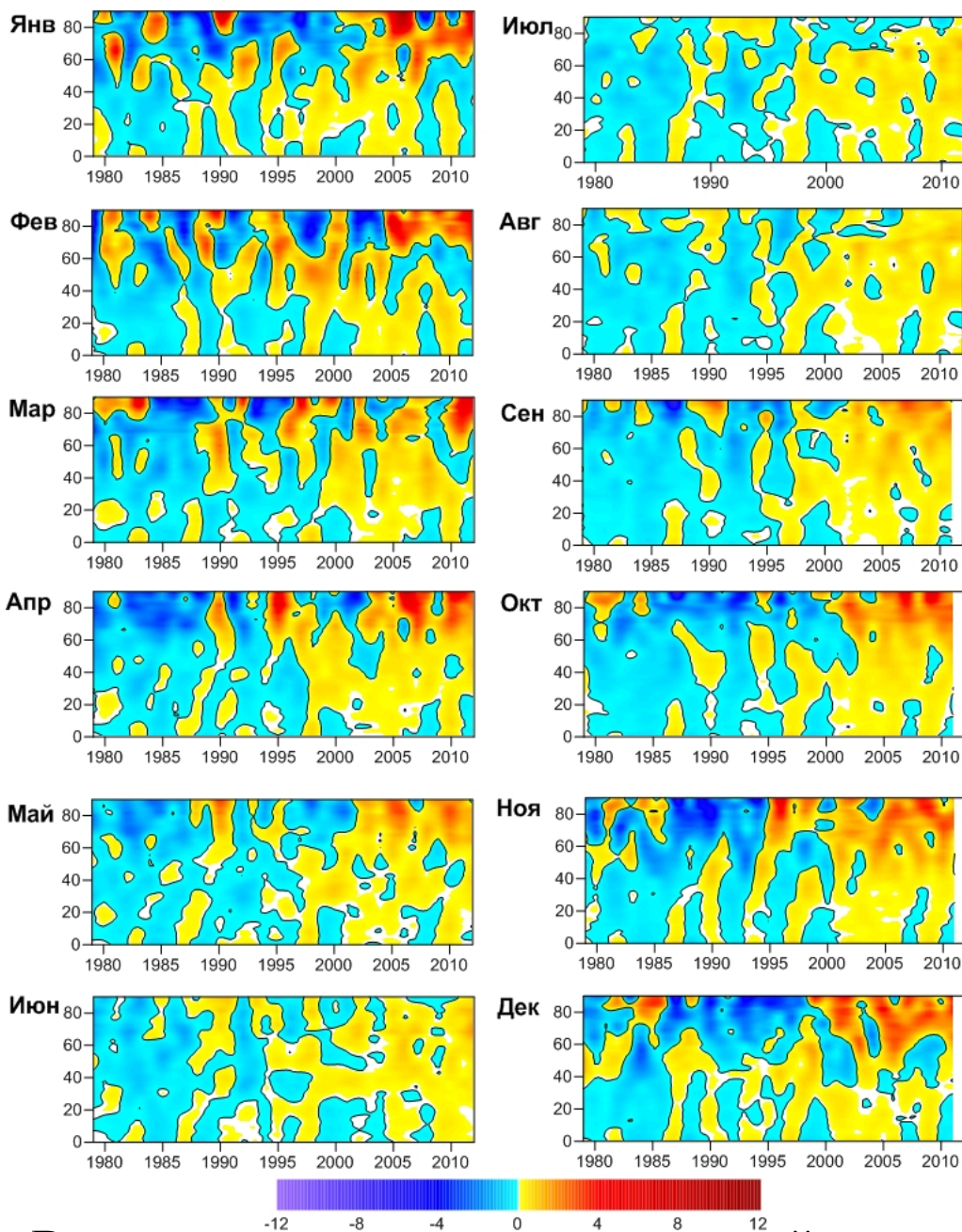
Несмотря на приостановку роста температуры с начала 2000 г. положительная аномалия (~ 0.47 °C) сохраняется. 2010 год был третьим по «аномальности» в имеющемся ряду наблюдений
[www.cru.uea.ac.uk/cru/data/temperature/]

Изменения приземной температуры воздуха в Арктике



Аномалии среднегодовой приземной температуры воздуха к северу от 60 град. с.ш. относительно средней температуры за период 1961-1990
[www.cru.uea.ac.uk/cru/data/temperature/]

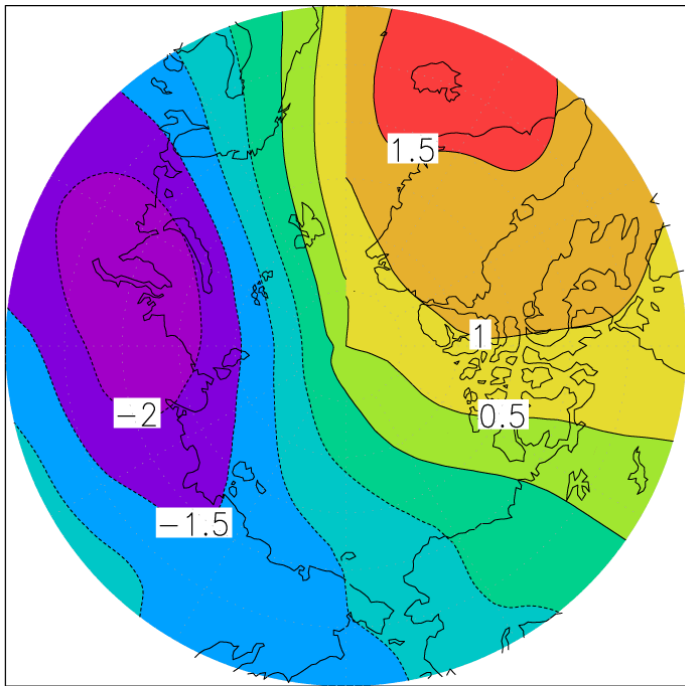
Термическая роль атмосферы



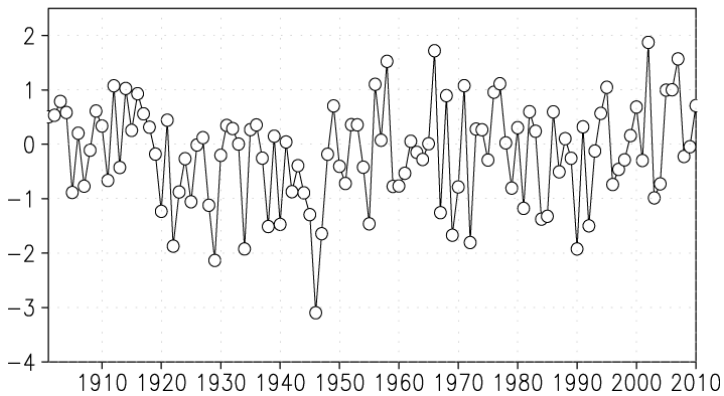
Более интенсивное (по сравнению с умеренными широтами) повышение приземной температуры воздуха Арктике в 2000-е годы («полярное усиление»)

Временное распределение аномалий приземной температуры воздуха ($^{\circ}\text{C}$), осредненных вдоль широтных кругов северного полушария

Динамическая роль атмосферы

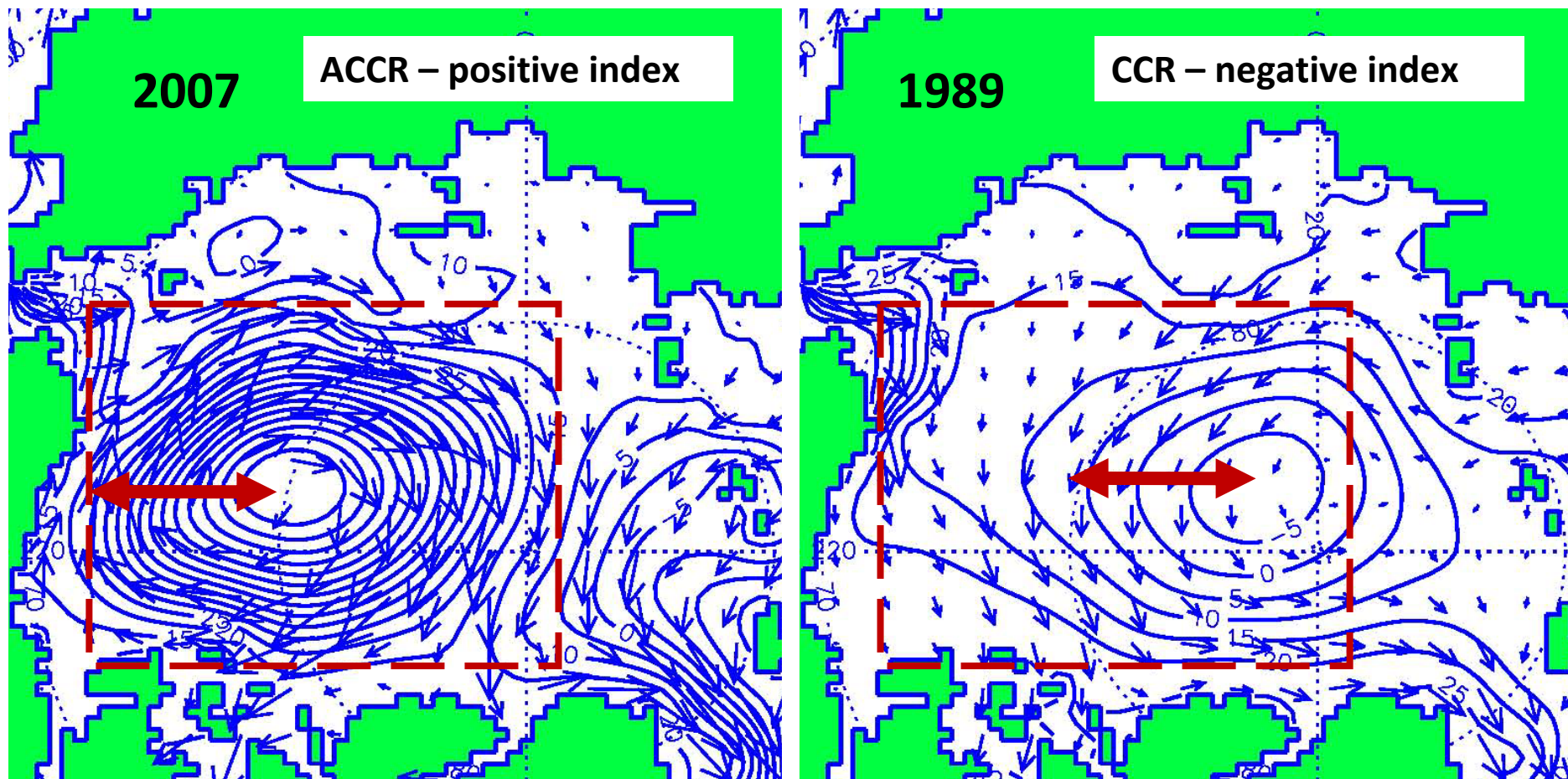


Существование над СЛО устойчивой структуры барического поля, обеспечивающей Трансдрифт - перенос льда в генеральном направлении к проливу Фрама. Эта структура характеризуется положительной аномалией давления над американской частью Арктики и отрицательной над Сибирью.



Распределение аномалий приземного давления, соответствующих моде, обеспечивающей усиление Трансдрифта (сверху), и временной ряд коэффициента Фурье этой моды с 1900 года (снизу).

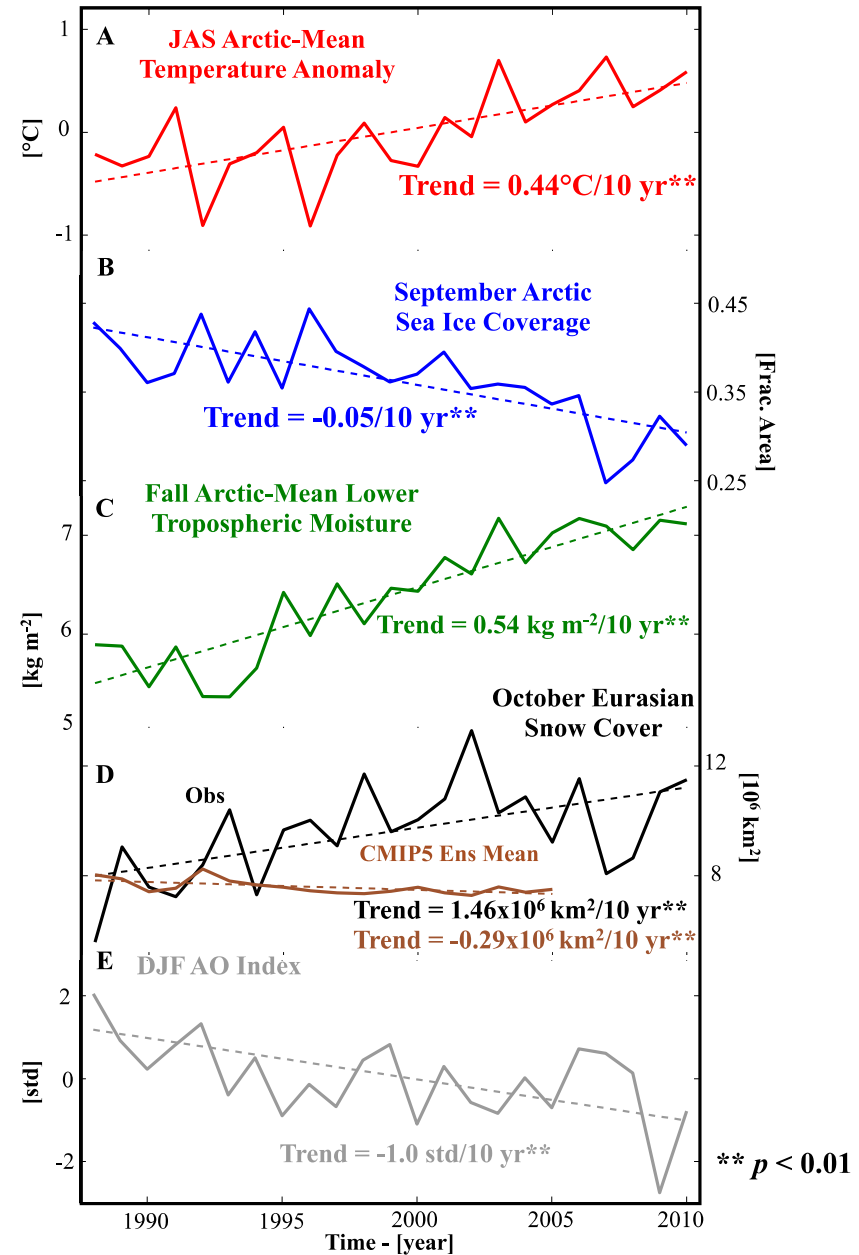
“**AOO index**” Arctic Ocean Oscillation– gradient of sea surface heights (in red box) characterizing intensity and sign of circulation in the Arctic



This method of index calculation is subjective but provides accurate information about sign of circulation and relative intensity

Arctic Trends 1988-2010

- ✓ Warming Arctic
- ✓ Less sea ice
- ✓ More atmospheric moisture
- ✓ Increasing snow cover
- ✓ Decreasing Arctic Oscillation trend



Важность учета активного взаимодействия между средами, в первую очередь в системе «океан - морской лед – атмосфера». Обратные связи и разрешение более мелких масштабов (либо обоснованная параметризация).

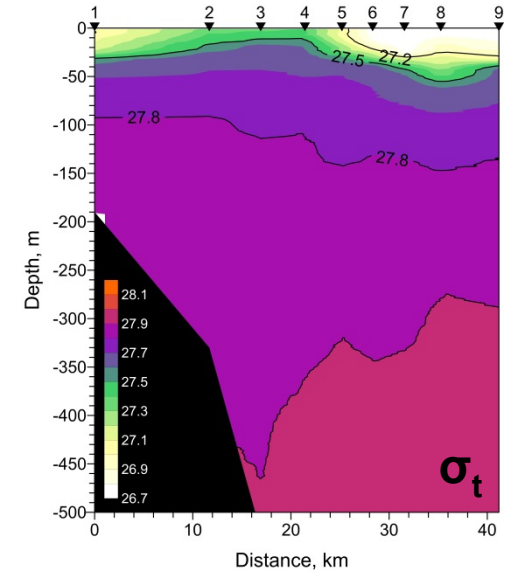
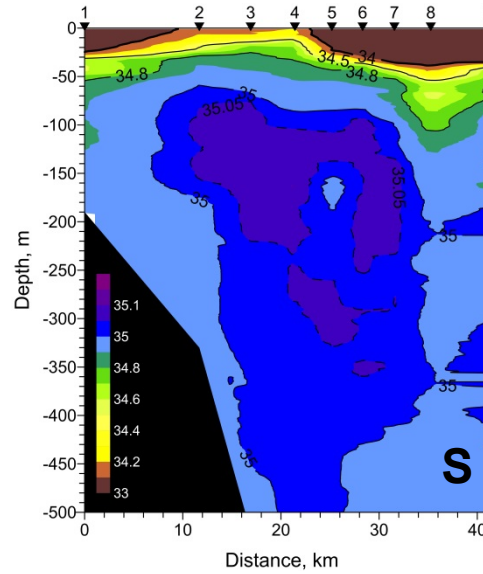
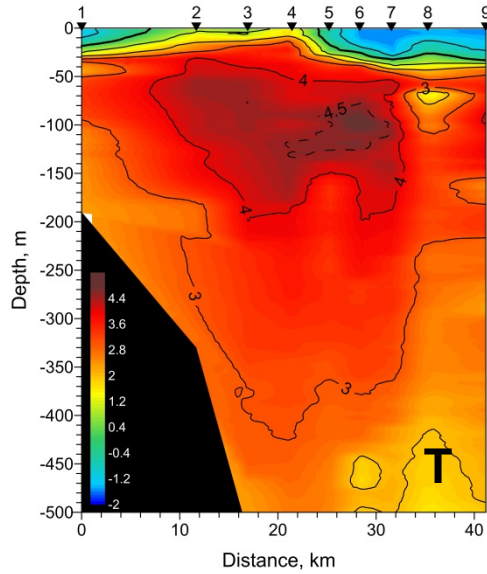
Проект WWRP по прогнозированию в полярных регионах (PPP) (<http://polarprediction.net>). Одним из основных направлений исследований в рамках этого проекта является разработка совместных моделей атмосферы, океана, морского льда, стока рек и деятельного слоя почвы, имеющих высокое разрешение.



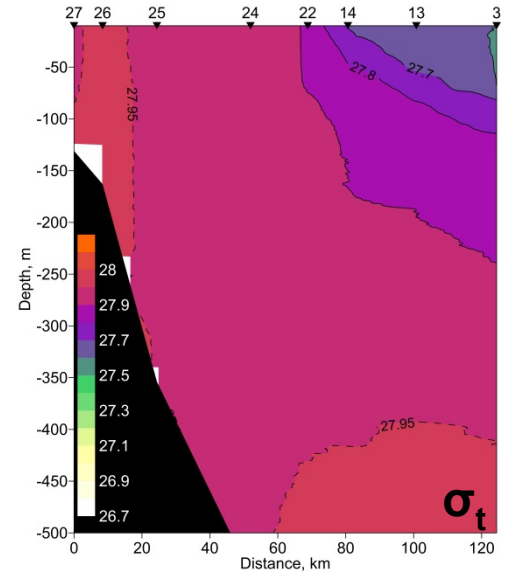
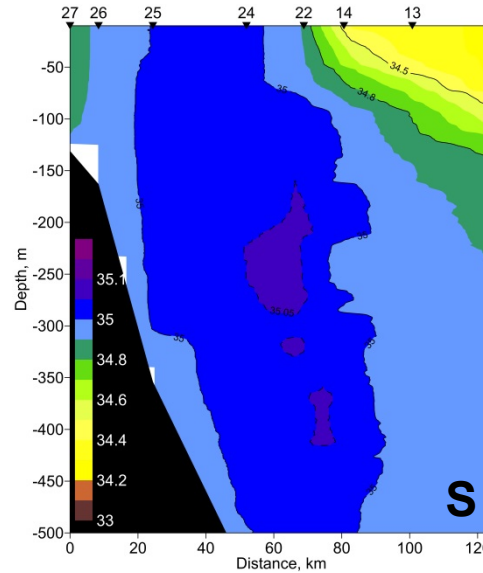
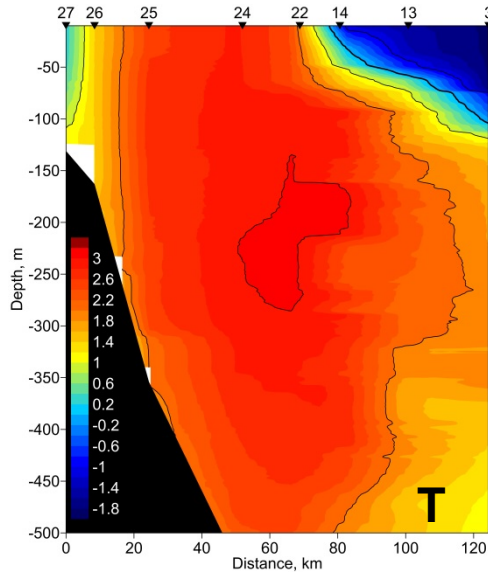
Схема положительной обратной связи в системе «атмосфера – морской лед – океан», иллюстрирующая ускоренная таяние льда в условиях снижения площади ледяного покрова

Вертикальные разрезы температуры, солёности и потенциальной плотности поперек континентального склона котловины Нансена

27 октября 2008 г. 31° в.д.



15 января 2014 г. 20° в.д.



Positive feedback in the “ice-ocean” system

Air temperature increase

Less ice in summer

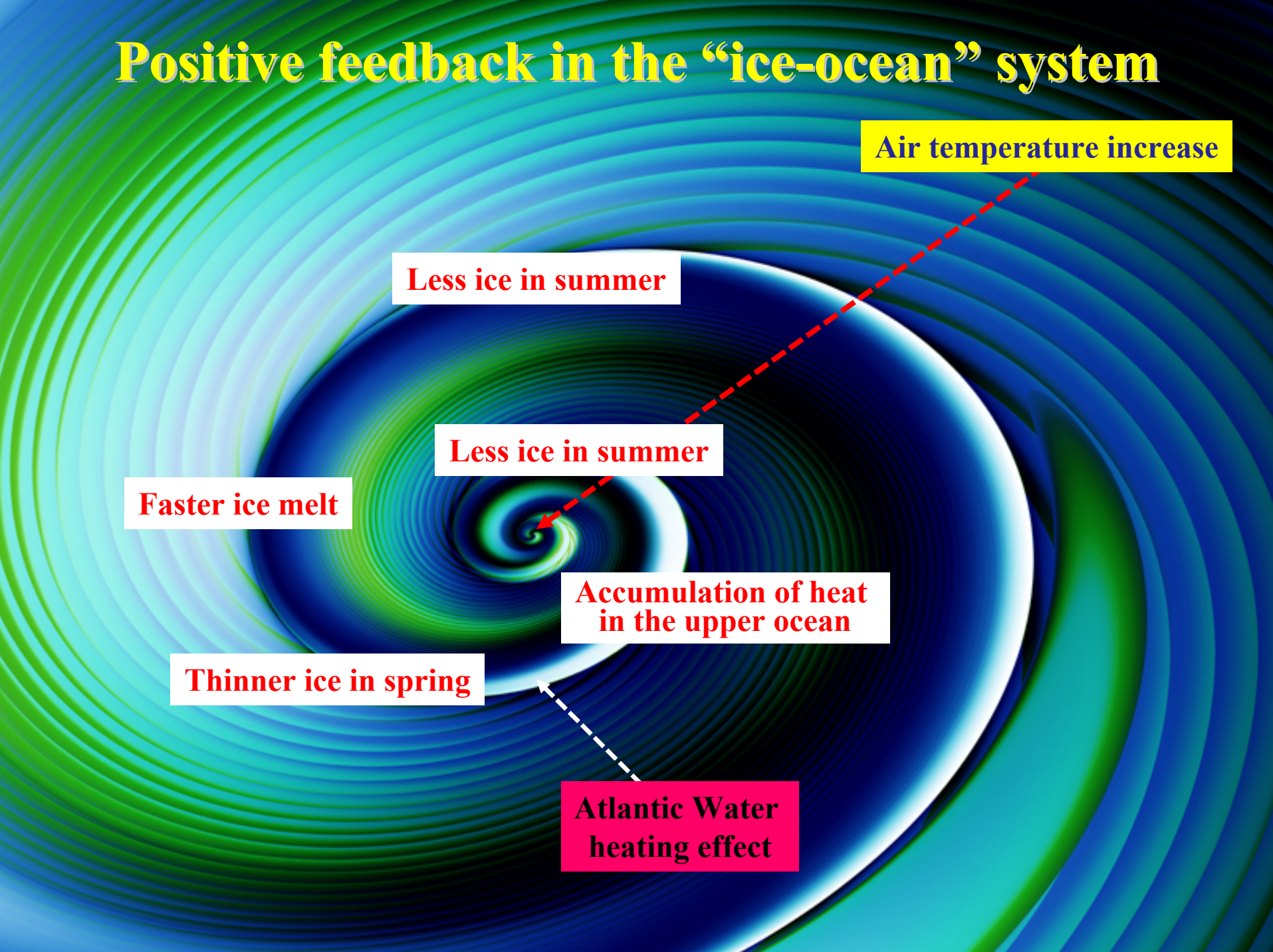
Less ice in summer

Faster ice melt

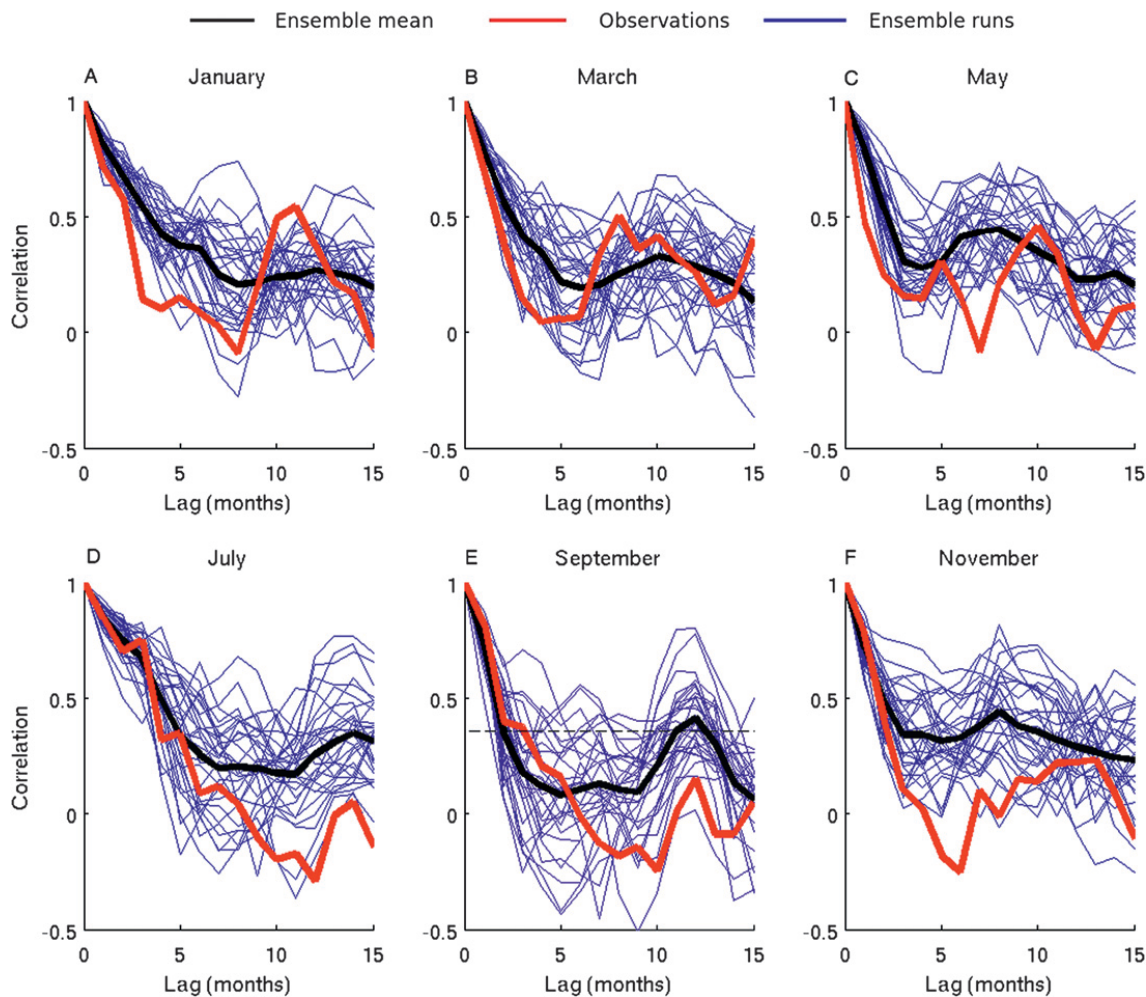
Accumulation of heat
in the upper ocean

Thinner ice in spring

Atlantic Water
heating effect



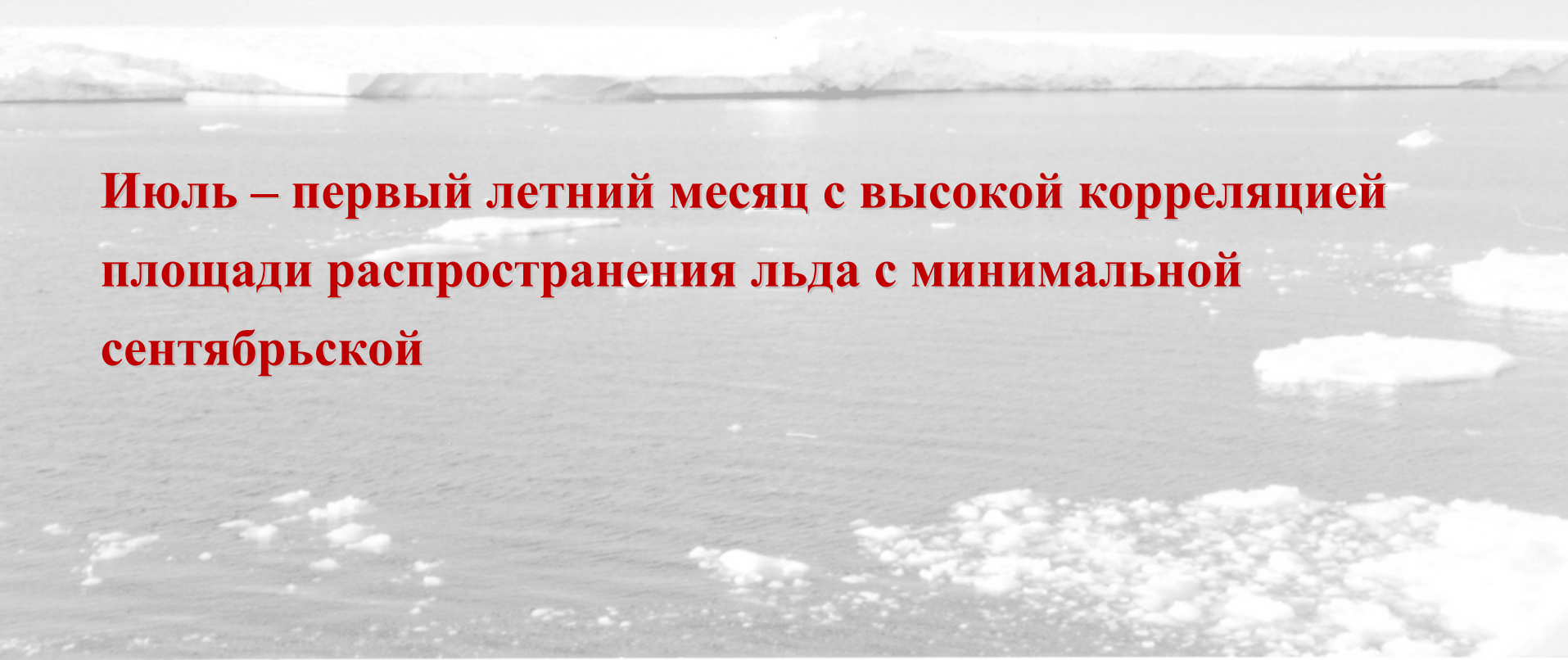
Существующие оценки предсказуемости параметров морского льда



Monthly lagged correlations of total sea ice area for every other month for the Northern Hemisphere in the observational record and CCSM ensemble. The ensemble mean (thick black curve) is the mean of the individual ensemble members (blue curves). The broken line in (e) indicates the 95% significance level for a single 30-yr run. (E. Blanchard-Wrigglesworth et al., 2010).

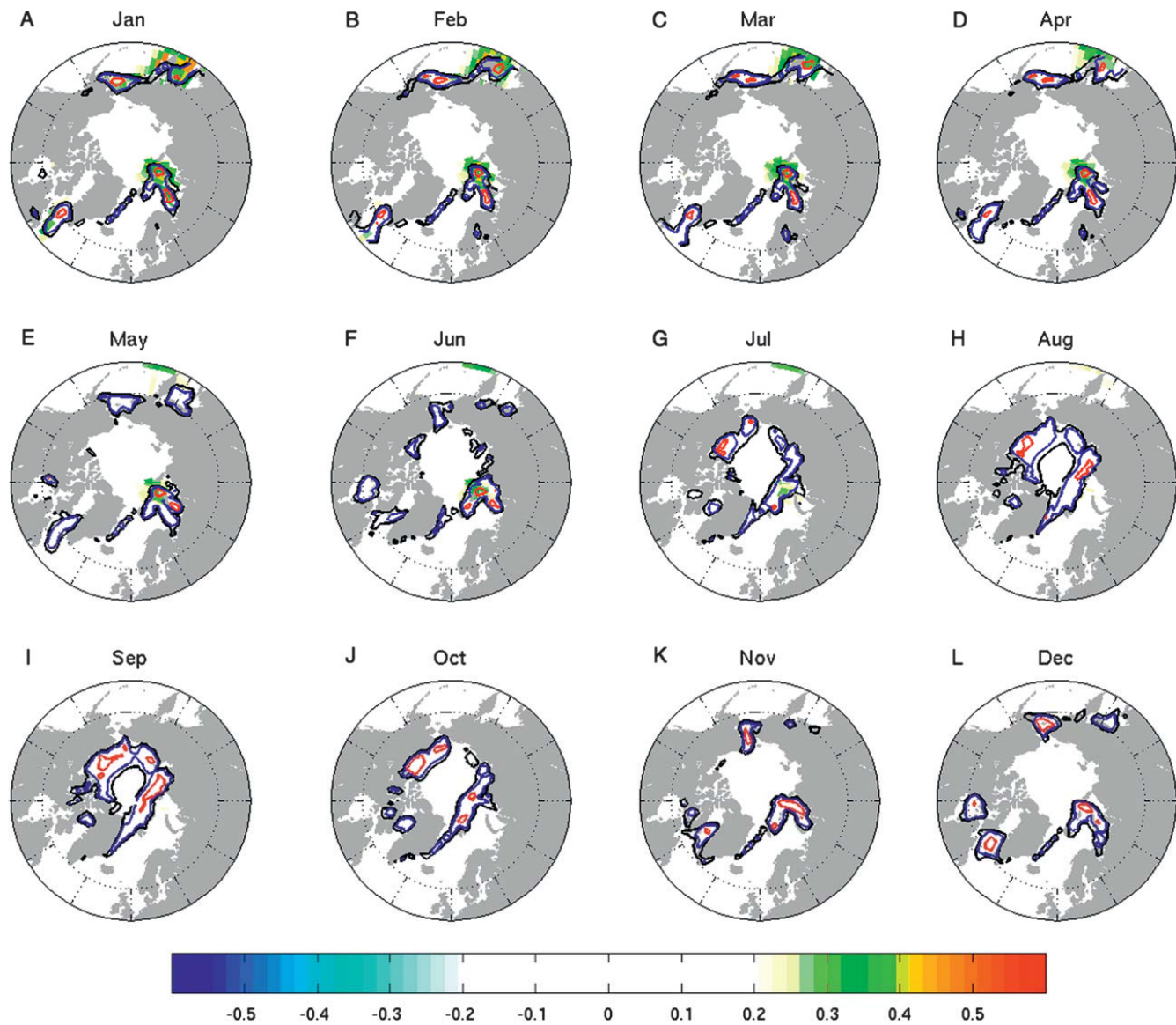
**Весенние и ранние летние аномалии (Май – Июнь)
площади распространения льда не коррелированы с
минимальной площадью распространения льда в
сентябре**

**Июль – первый летний месяц с высокой корреляцией
площади распространения льда с минимальной
сентябрьской**



Отрицательная (положительная) аномалия площади морского льда в заданном районе связана с положительной (отрицательной) аномалией температуры поверхности океана (ТПО) в этом же районе. Чем дольше сохраняется аномалия ТПО тем больше ее влияние на формирующийся в этом же районе лед.

Т.е. аномалия площади льда в мае в среднем проявляется в виде аномалии того же знака в сентябре. «Память» об аномальной температуре поверхности океана в конце осени может проявляться в аномальной весенней площади (толщине?) льда.

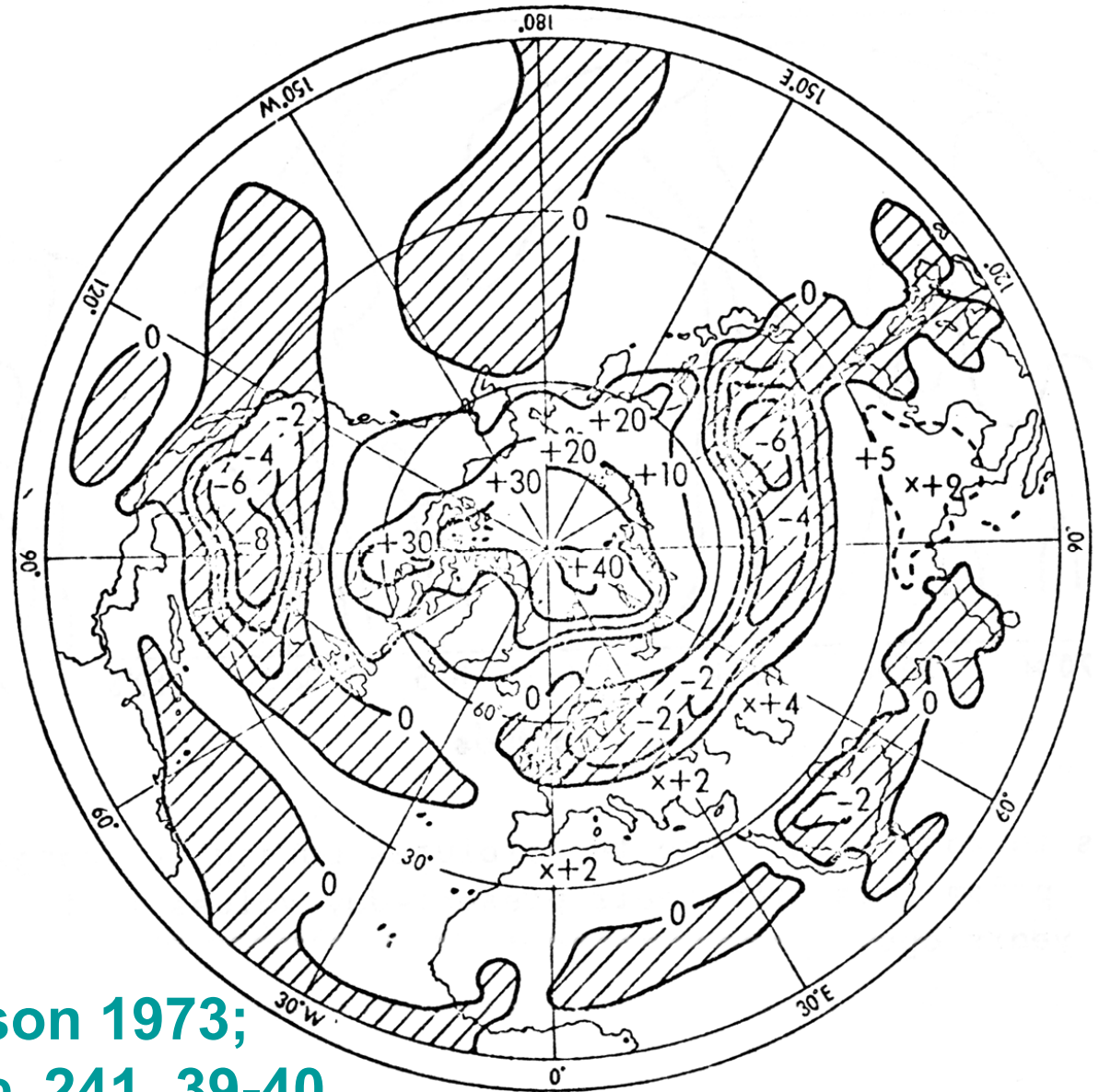


Correlation of anomalous total January sea ice area with sea ice thickness by grid cell in January–December

One of the first UCMO GCM sensitivity experiments with polar ice replaced by water at 0°C

Changes in
January surface
air temperature.
The Arctic
becomes warmer
by up to 40°C
but the latitudinal
belt south of
60°N over land
becomes colder
by up to 8°C.

Newson 1973;
Nature, 241, 39-40



Естественные ограничения при описании/прогнозировании гидрометеорологических процессов

«There are knowns, known unknowns, and unknown unknowns».

Есть то, что мы знаем (и можем объяснить)

Есть то, что мы знаем (но пока объяснить не можем)

Есть то, что мы вообще пока не знаем

Спасибо!

