

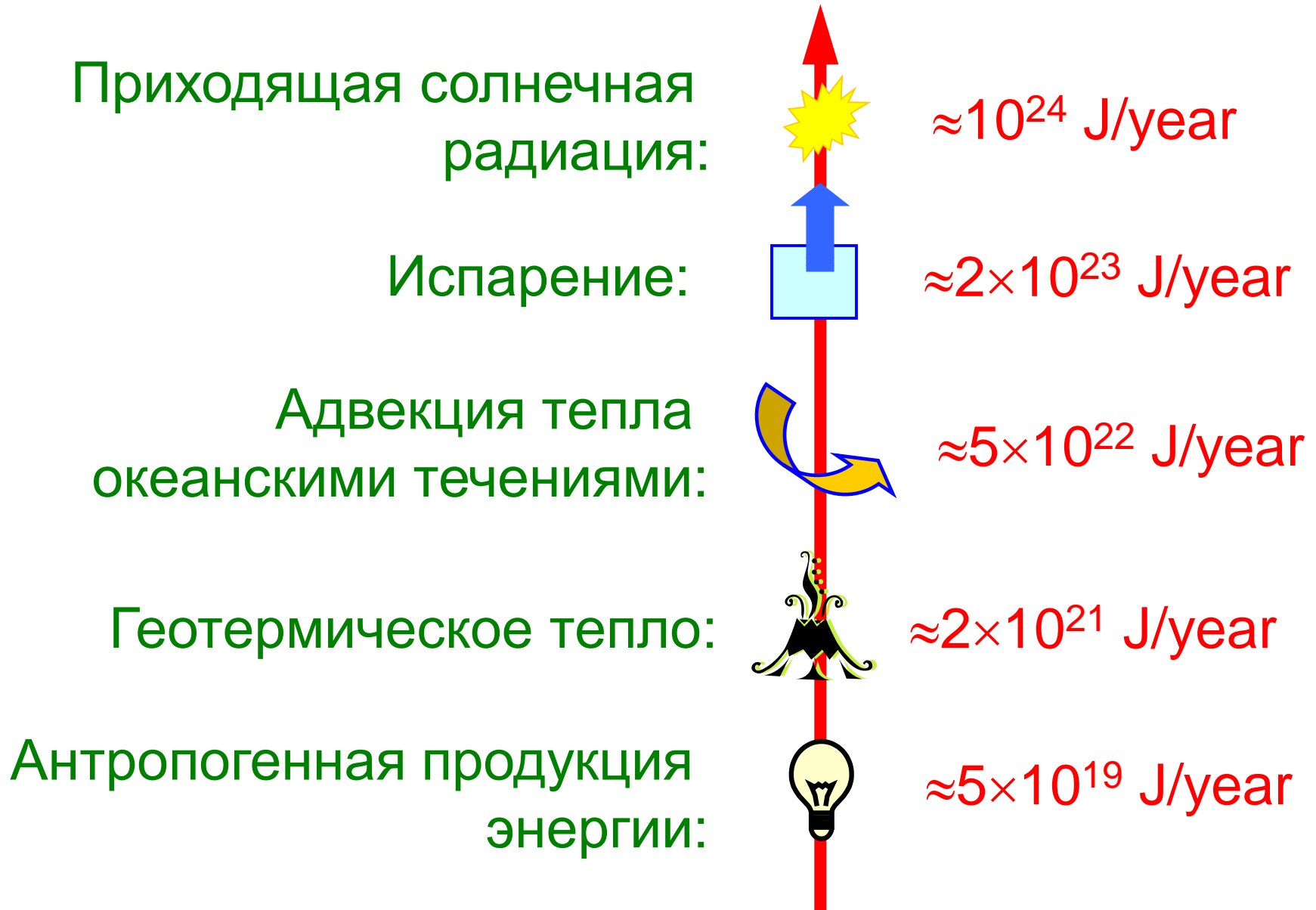
Океан и изменения климата

Сергей Анатольевич Добролюбов

*МГУ имени М.В.Ломоносова
Декан географического факультета
Зав. кафедрой океанологии*

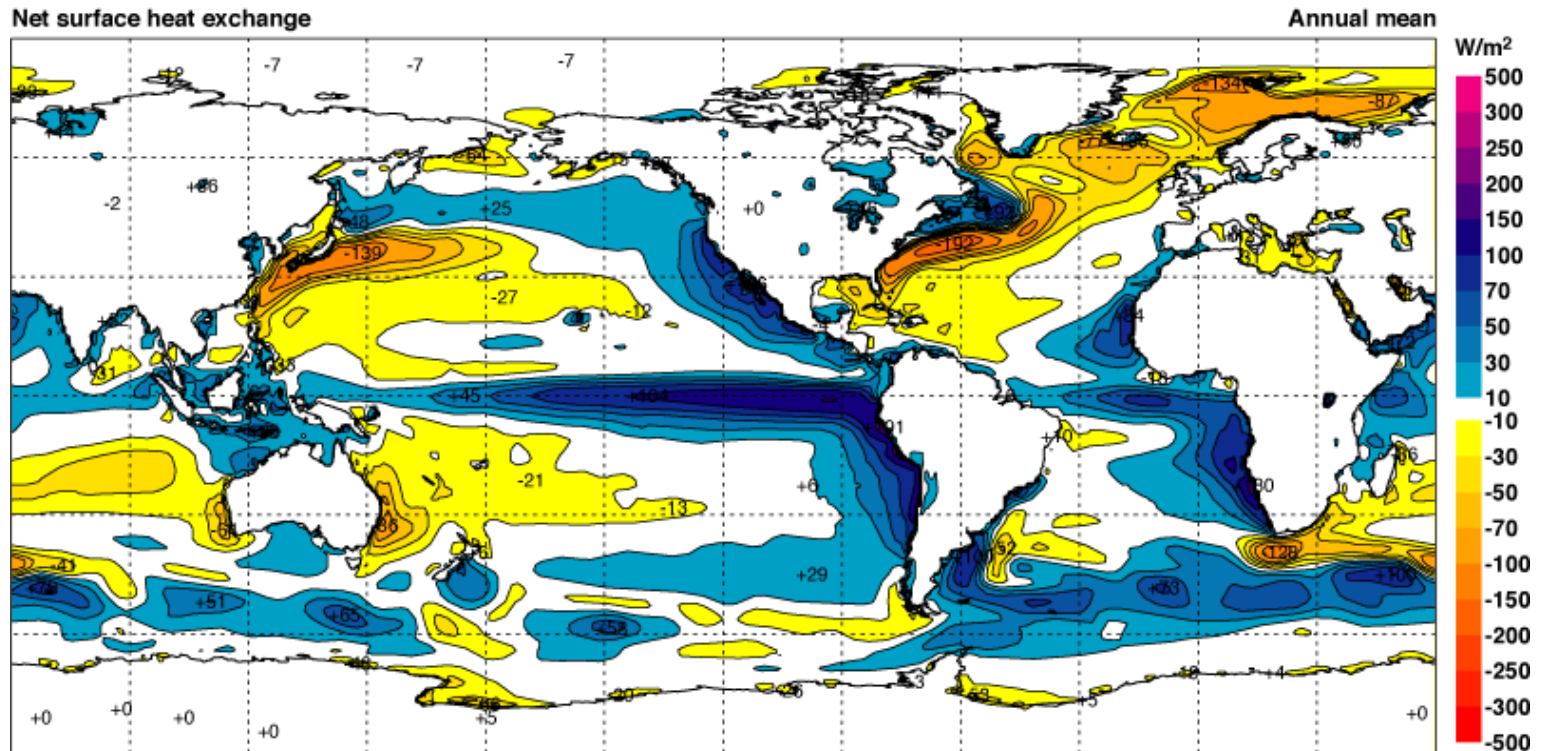
- **Потоки тепла и влаги на поверхности океана.**
- **Океанское звено энергетического и гидрологического циклов.**
- **Как океан влияет на климат?**
- **Глобальная циркуляция океанов и ее устойчивость.**
- **Современные глобальные изменения в океане.**

Энергетические источники в климатической системе



Баланс тепла на поверхности океана:

$$H = \begin{array}{l} \text{Коротковолновая} \\ \text{радиация} \\ \mathbf{SW\downarrow} \\ \mathbf{100} \end{array} - \begin{array}{l} \text{Длинноволновая} \\ \text{радиация} \\ \mathbf{LW\uparrow} \\ \mathbf{65} \end{array} - \begin{array}{l} \text{Контактный} \\ \text{теплообмен} \\ \text{Явное тепло} \\ \mathbf{Qh\uparrow} \\ \mathbf{8} \end{array} - \begin{array}{l} \text{Испарение,} \\ \text{Скрытое тепло} \\ \mathbf{Qe\uparrow} \\ \mathbf{27} \end{array}$$



Kallberg et al 2005

Морская вода и атмосферный воздух

параметр	Морская вода	Воздух
Плотность	1025 кг/м ³	1.2 кг/м ³
Удельная теплоемкость	4.2×10 ³ Дж/(кг К)	1×10 ³ Дж/(кг К)

Отношение масс А:О 1: 262

Отношение теплоемкостей – 1:1096.

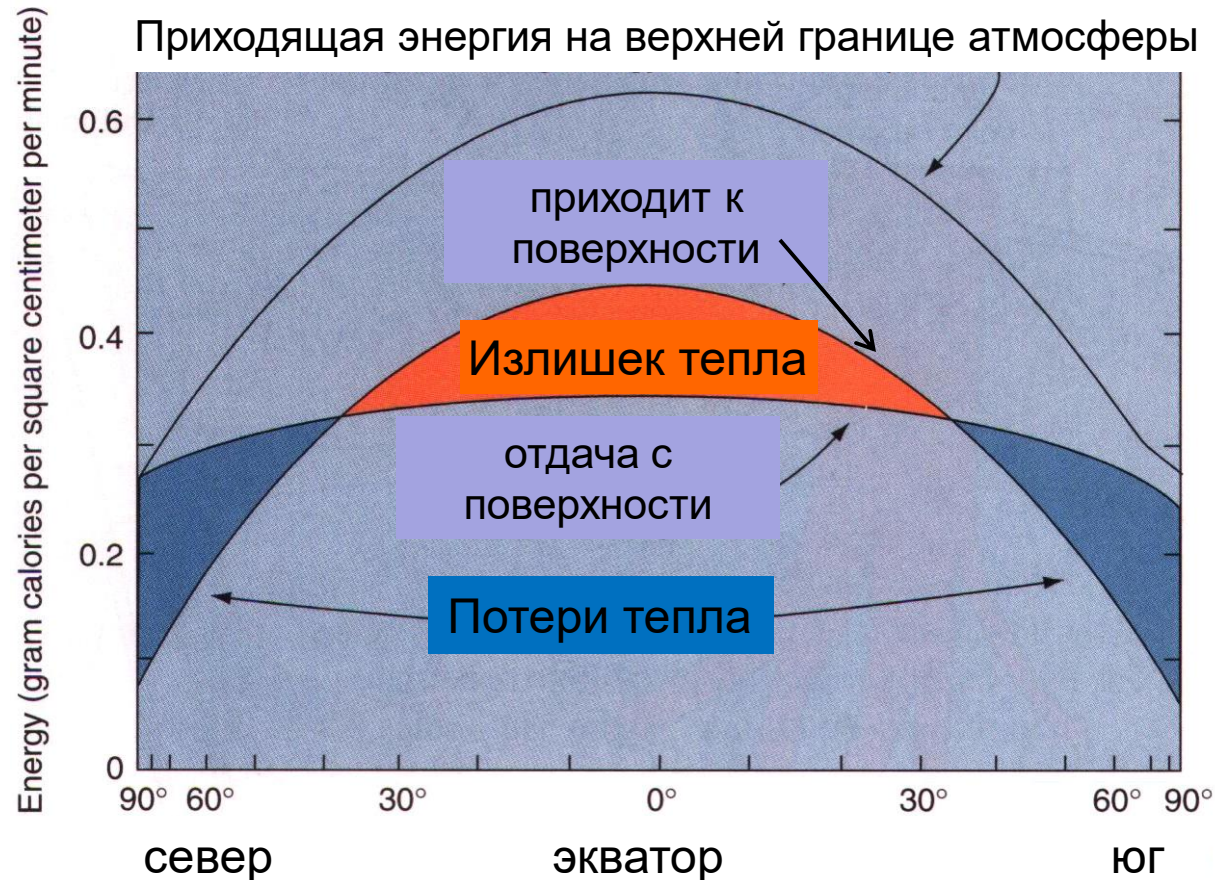
При средней глубине океана 3700 м теплоемкость всей атмосферы равна теплоемкости трехметрового слоя океана!

Причины меридионального переноса тепла в океане

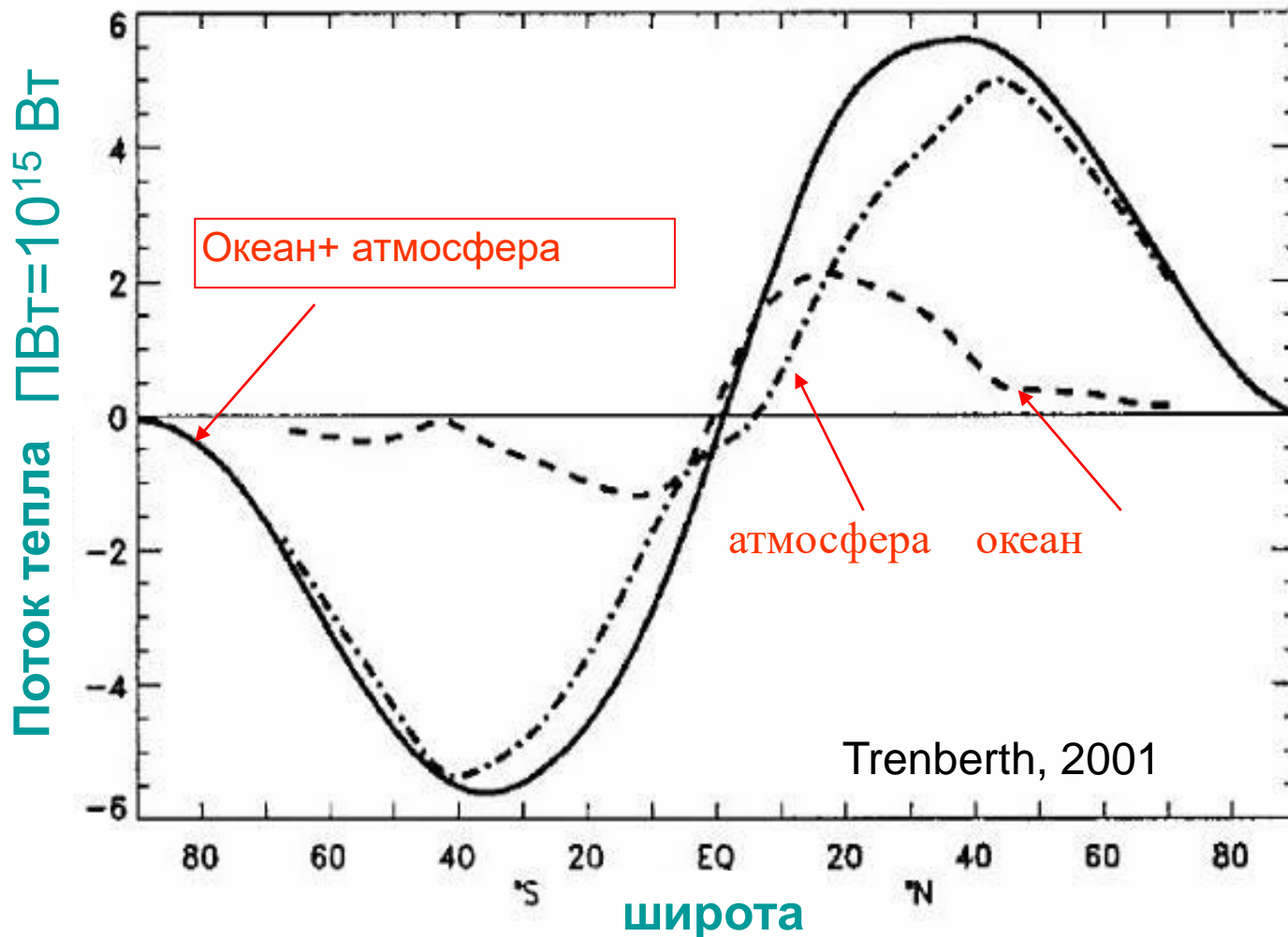
Широтные различия теплового баланса

Температурный контраст между высокими и низкими широтами

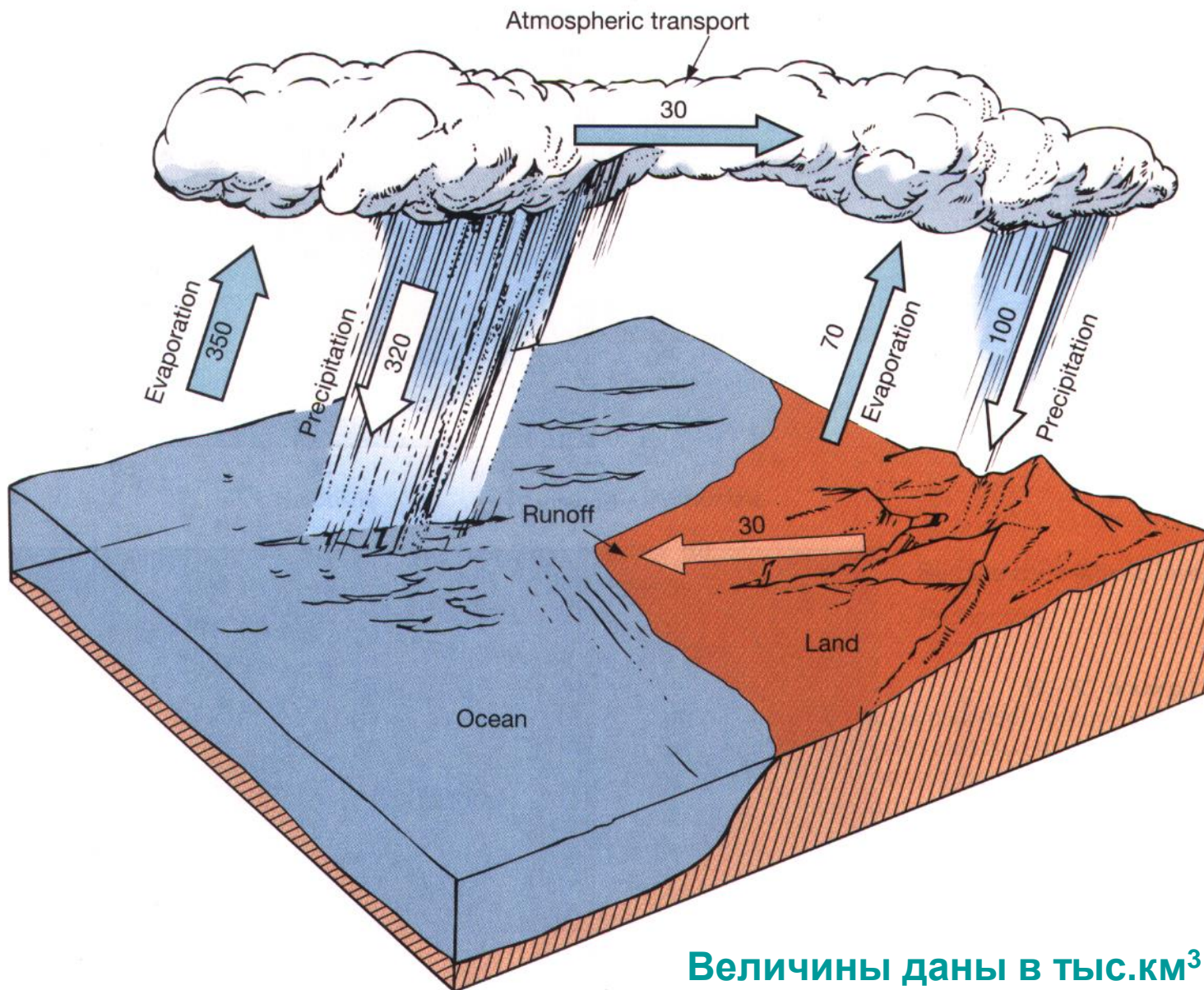
Для поддержания баланса необходимо межширотное перераспределение получаемой энергии в атмосфере и в океане.



Меридиональный перенос энергии в океане и атмосфере (положительное направление – на север)

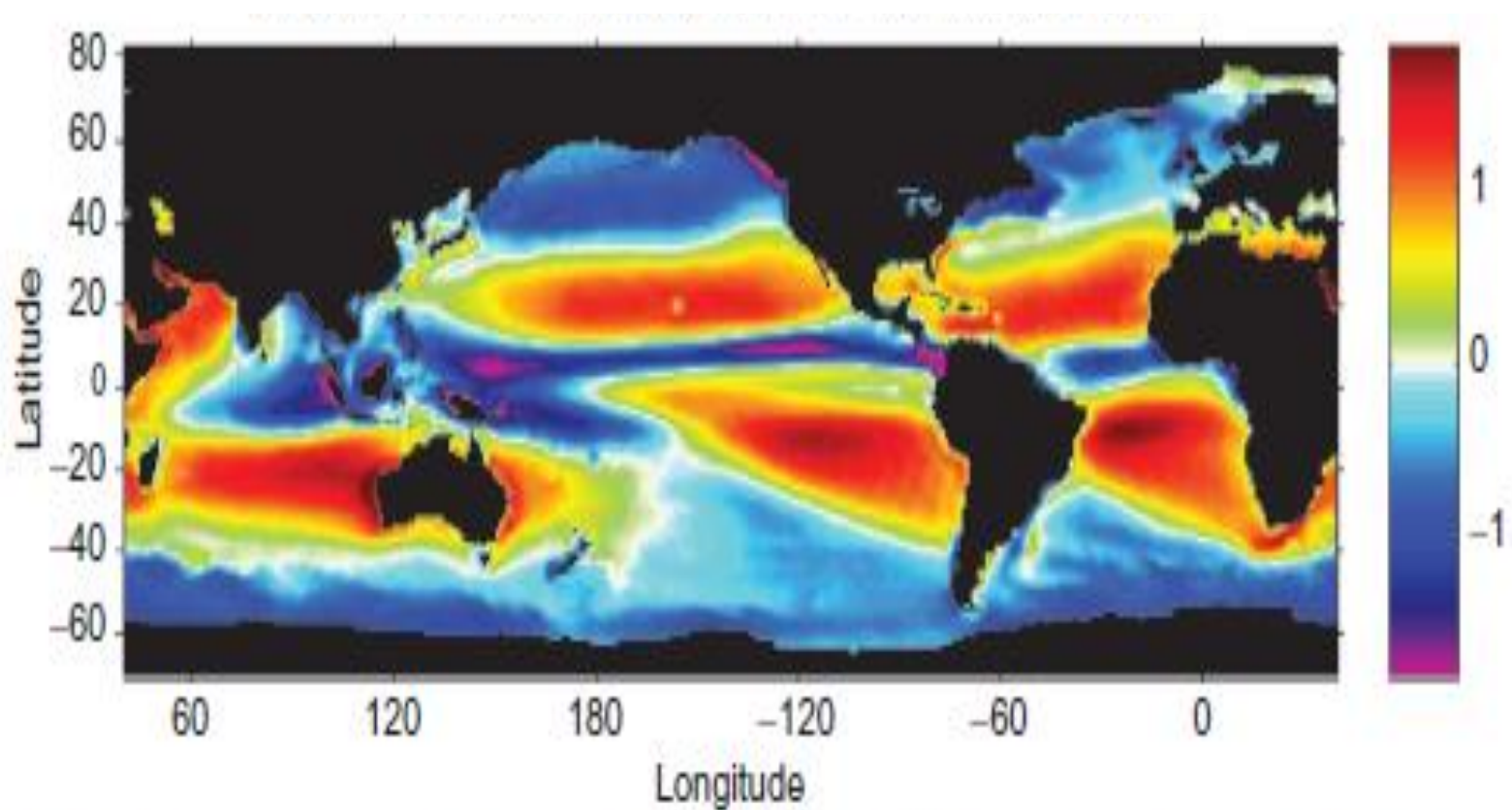


Глобальный гидрологический цикл

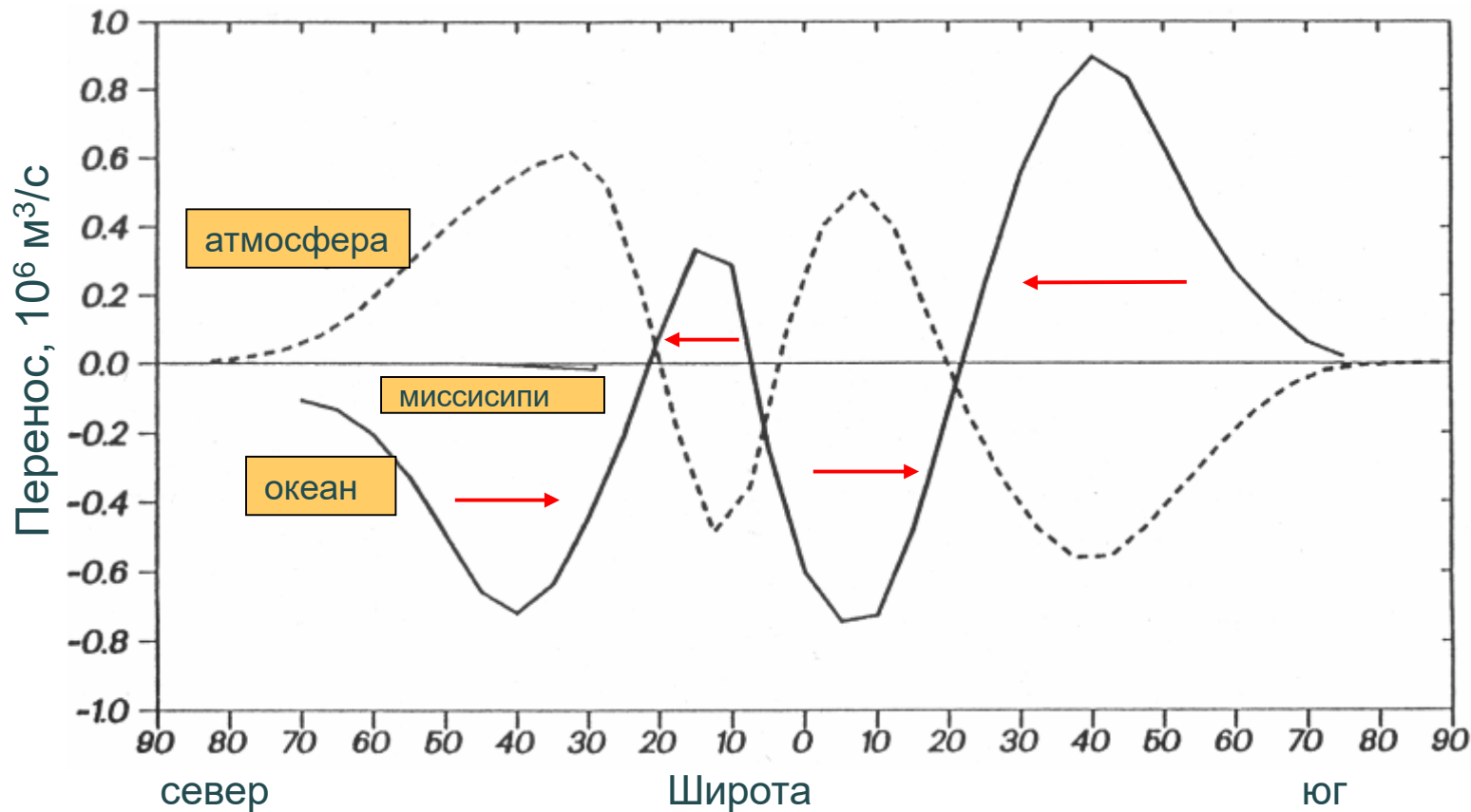


Величины даны в тыс.км³ в год.

Разница испарение – осадки, м/год



Океанское звено гидрологического цикла должно перераспределять пресную воду от высоких широт и экватора к тропикам

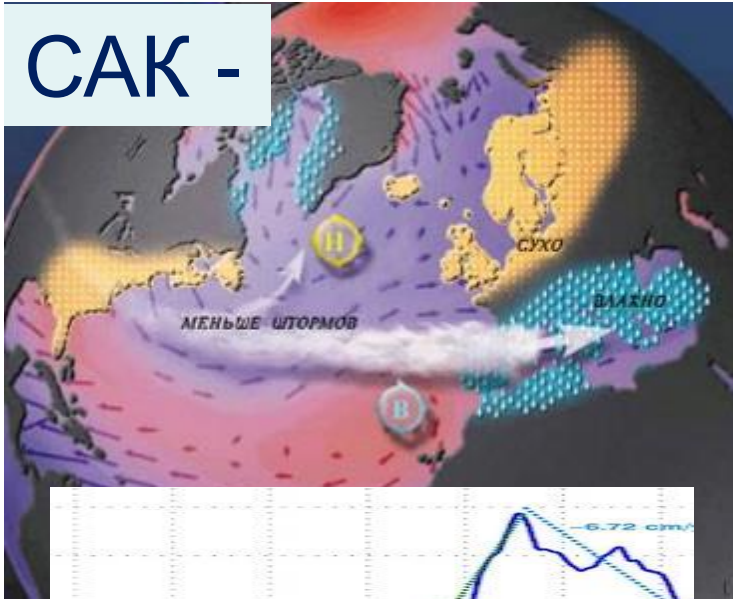


Меридиональный перенос влаги в глобальном гидрологическом цикле, $10^6 \text{ м}^3/\text{с}$, положительное направление — на север

(Wijffels, 1992)

Природные климатические вариации

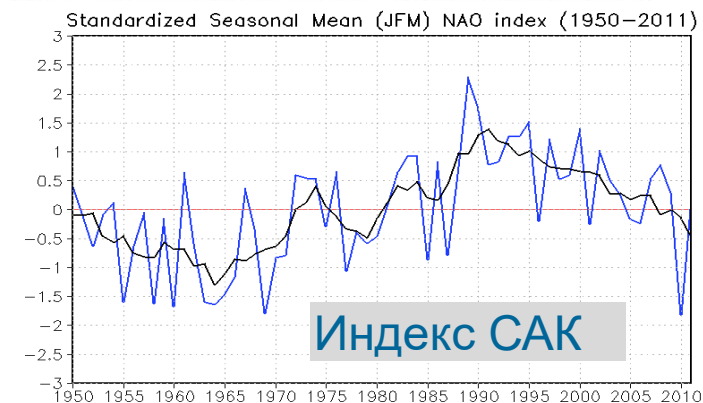
САК -



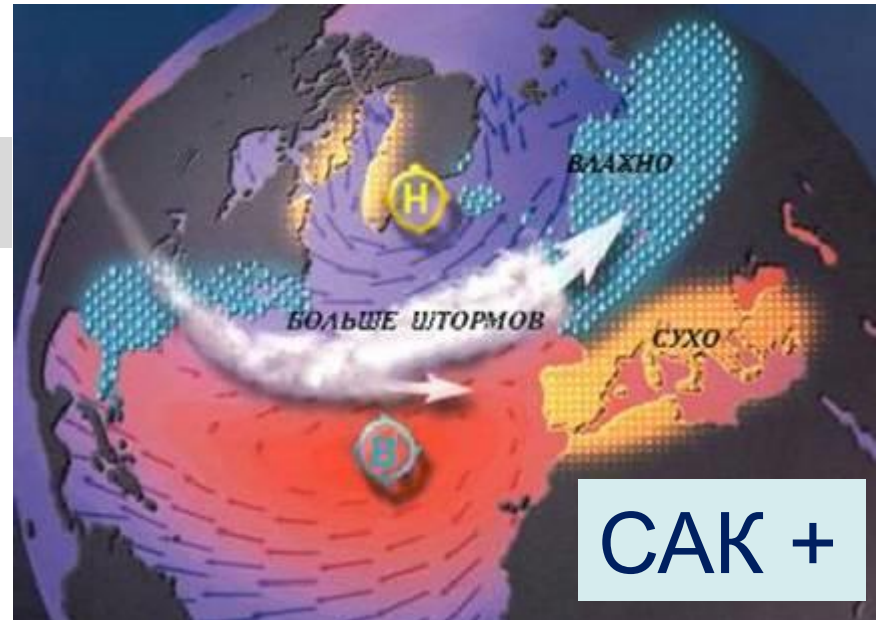
Северо-Атлантическое колебание (САК) - определяет пути циклонов и увлажнение в Европе



Уровень Каспийского моря



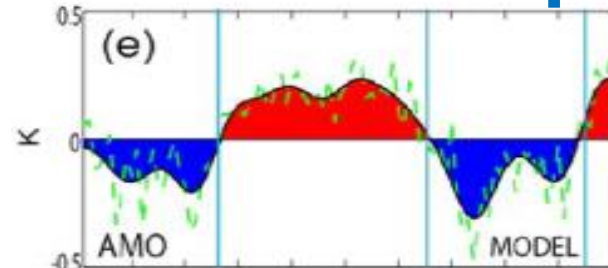
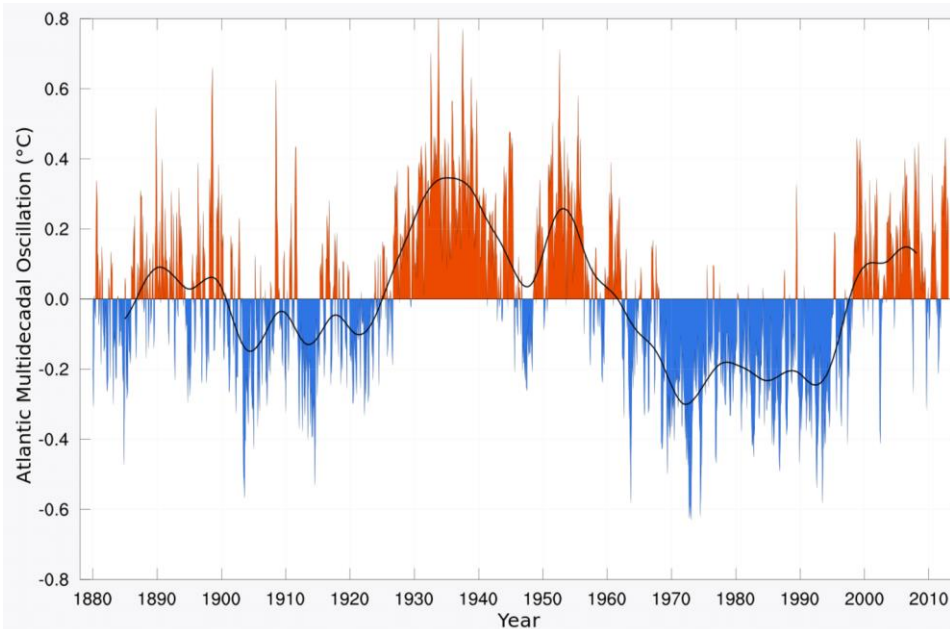
Индекс САК



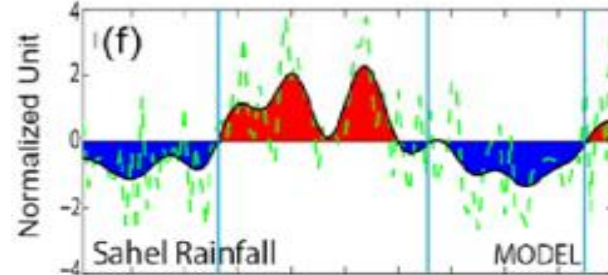
САК +

Природные климатические вариации

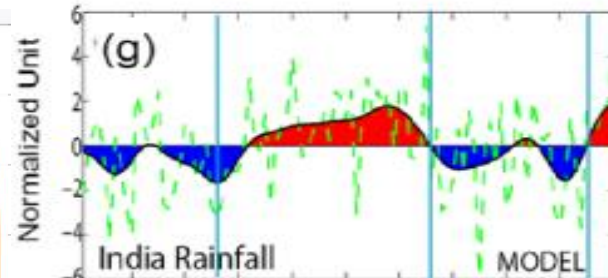
**Атлантическая
мультидекадная осцилляция**
– аномалия температуры
воздуха в атлантическом
секторе Северного
полушария с периодом ~ 80
лет



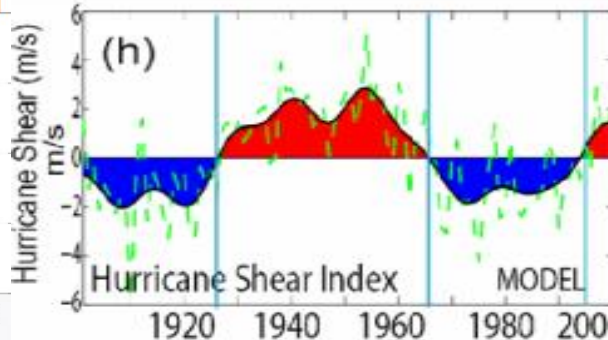
Индекс
АМО



Осадки к
югу от
Сахары



Осадки в
Индии



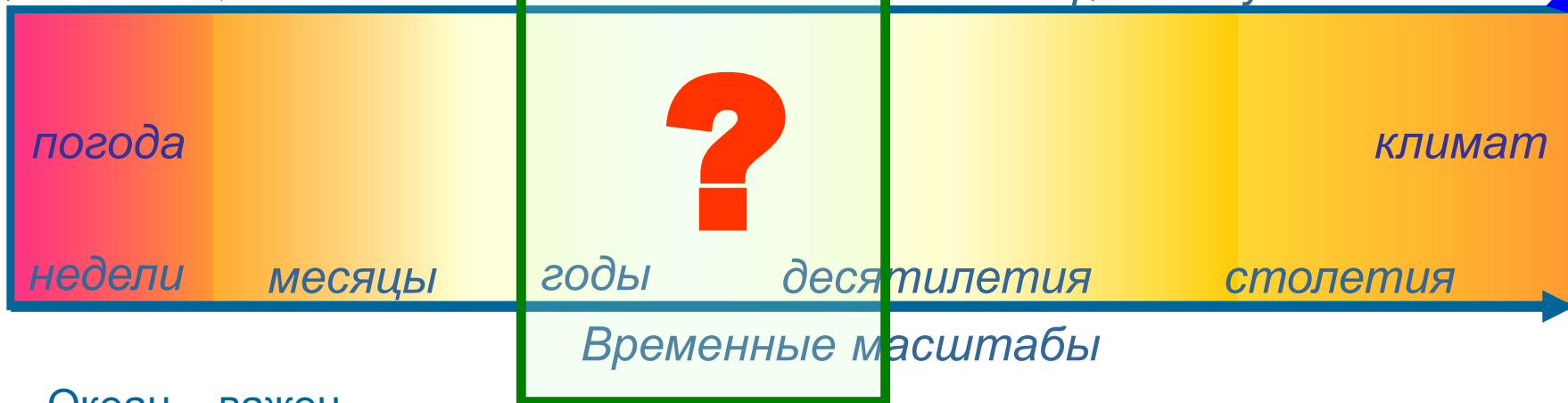
Интенсив-
ность
ураганов
В США

На каких масштабах роль океана важна для климата?

Предсказуемость
первого рода –
начальные условия

Предсказуемость
второго рода –
граничные условия

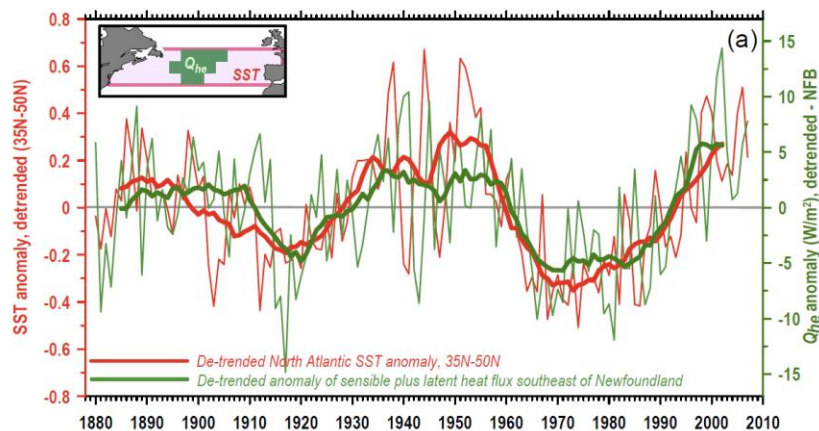
Степень нашего понимания механизмов предсказуемости



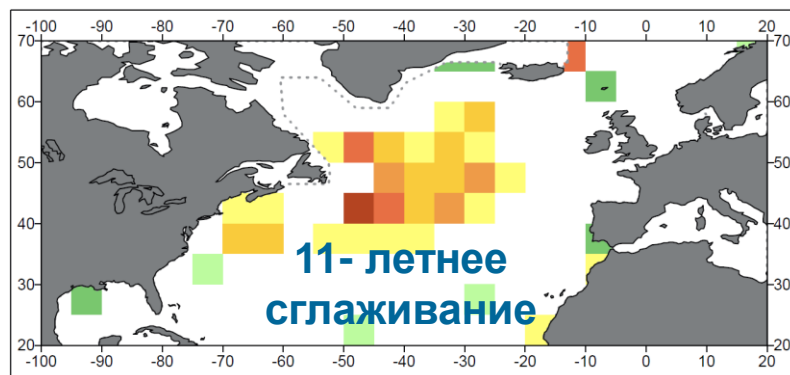
Океан – важен,
но его роль
пассивна

Активная роль
океана

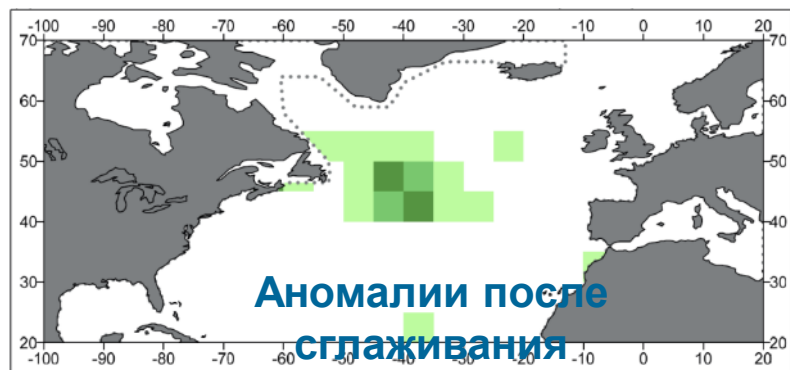
На каких временных масштабах влияние океана на атмосферную циркуляцию становится определяющим?



Аномалия температуры поверхности Атлантики (красная линия) и потока скрытого тепла (зеленая) в полосе 35 с.ш. – 50 с.ш.



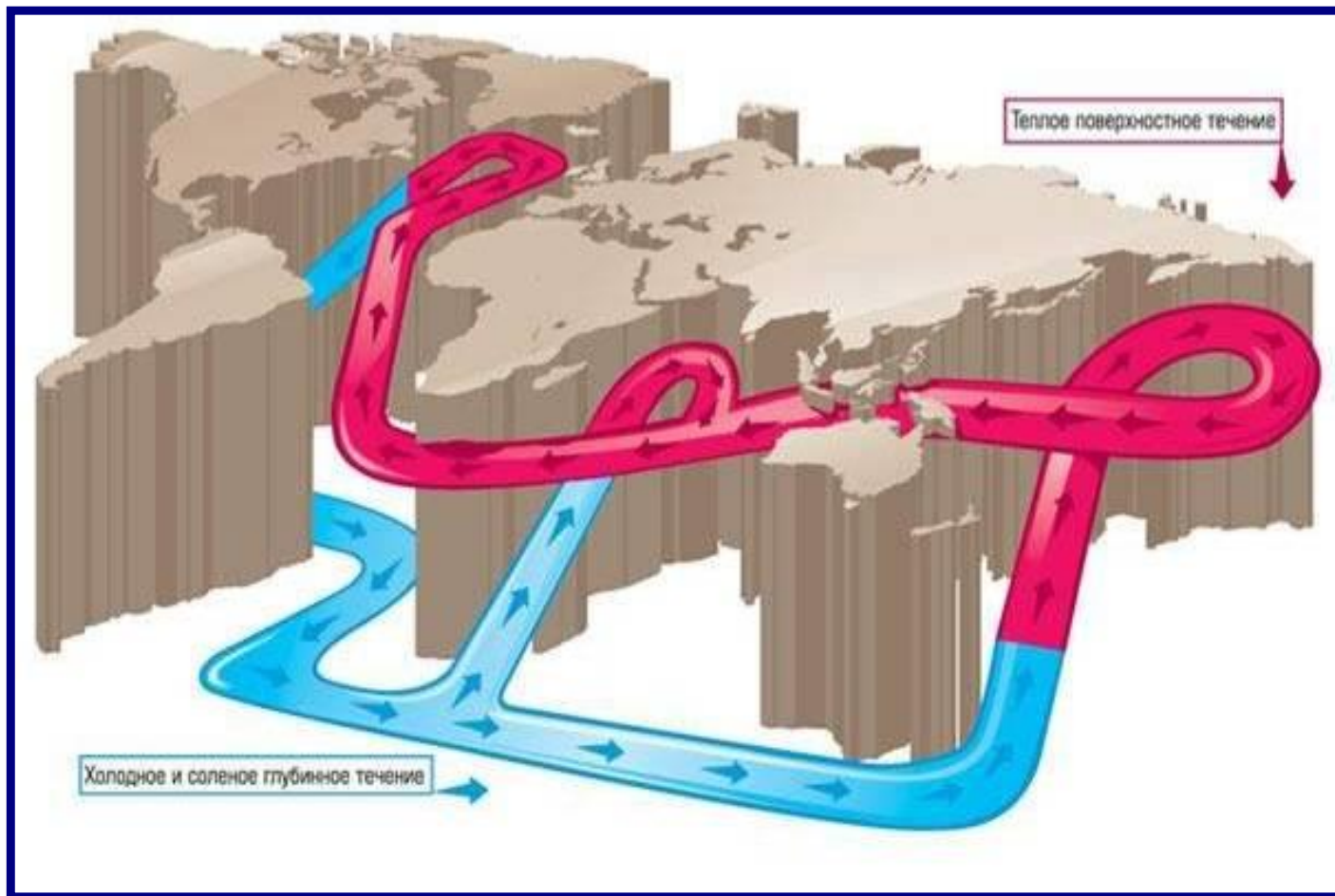
б), (в) Корреляция между индексом мультideкадной Атлантической осцилляции в ТПО и потоками явного и скрытого тепла на междекадном масштабе времени (б) и на межгодовом масштабе (в).



Среднеширотная Атлантика определяет атмосферные процессы на масштабах более 10 лет

(Gulev et al., Nature, 2013)

Глобальная меж океанская циркуляция



Э.Х.Ленц (1804-1865)

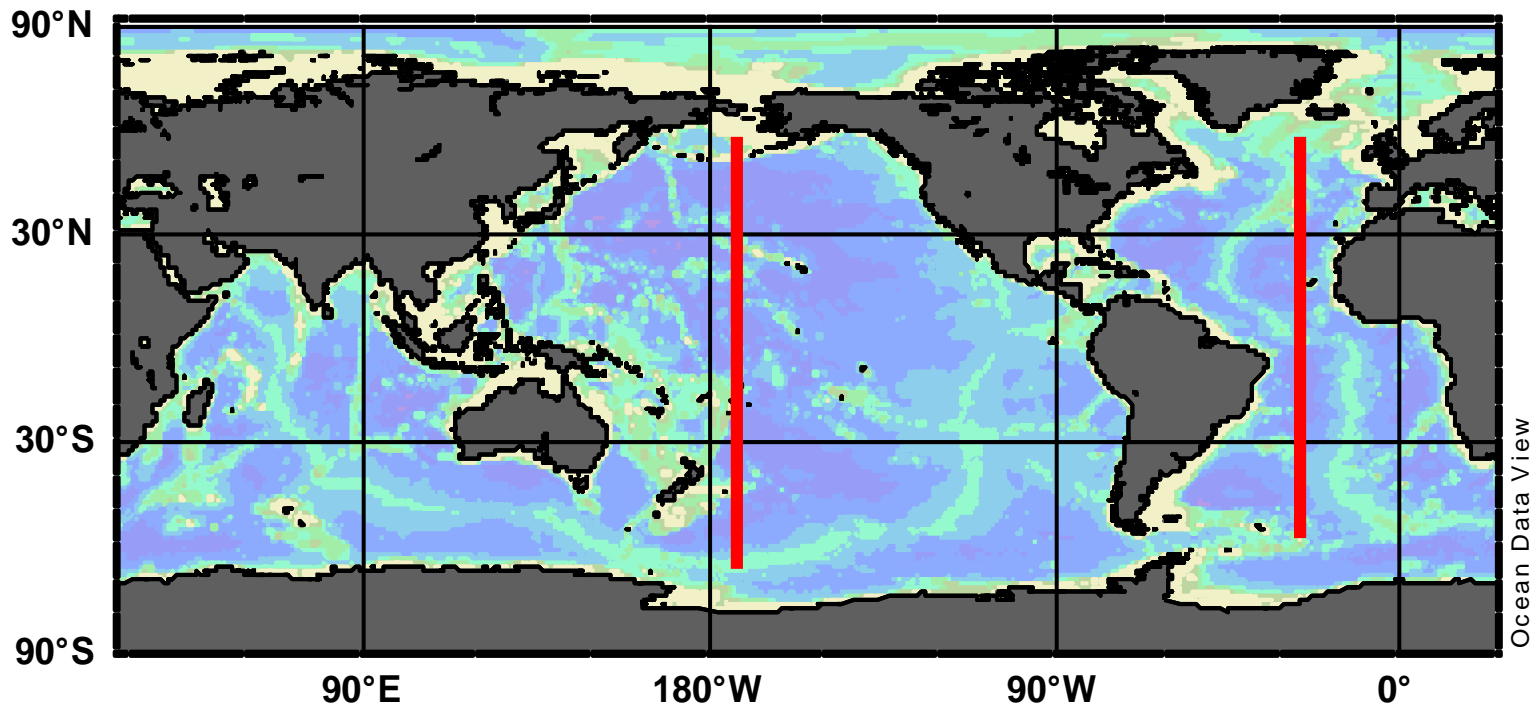


С.С.Лаппо (1938-2006)



У. Броккер (1932-2019)

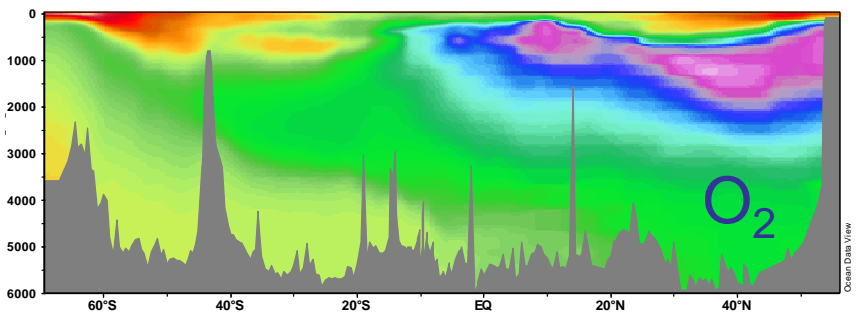
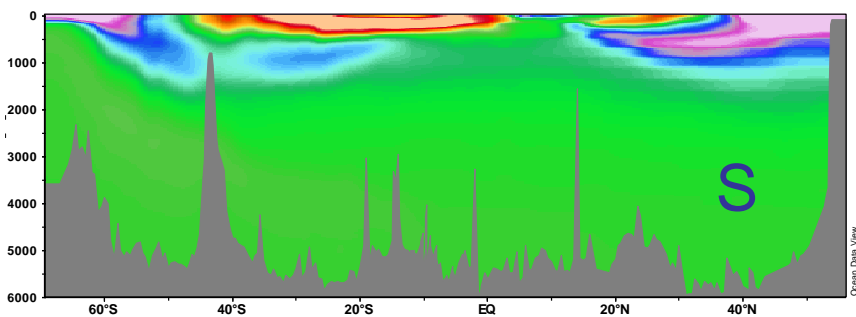
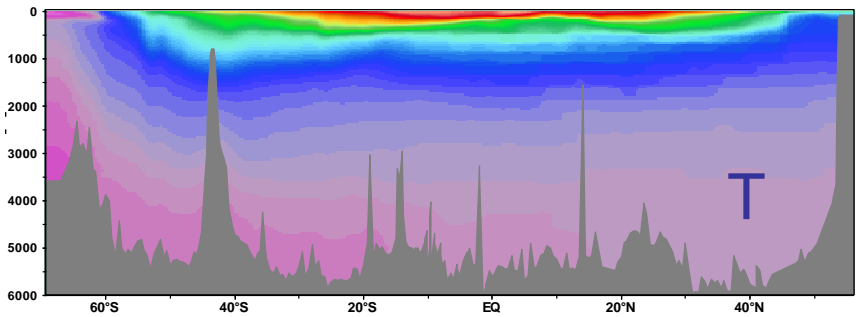
Атлантический и Тихий: сравнение свойств



WOCE P15

WOCE A16

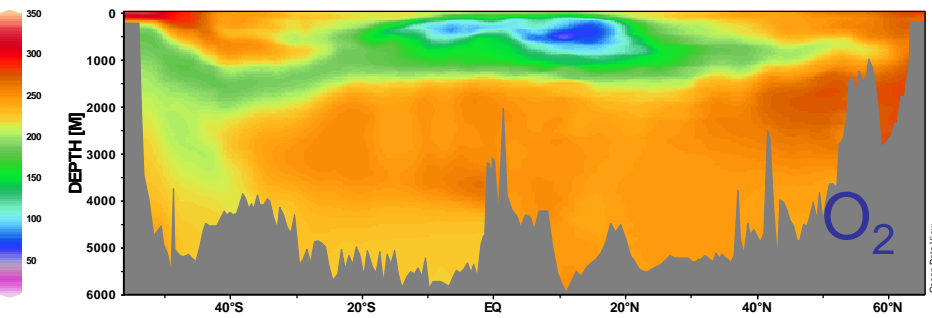
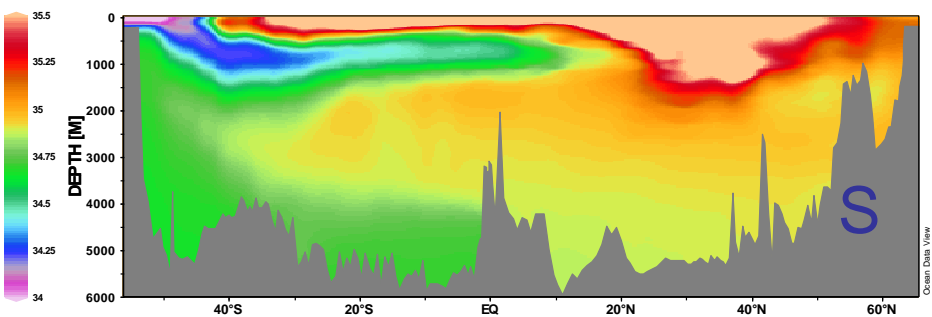
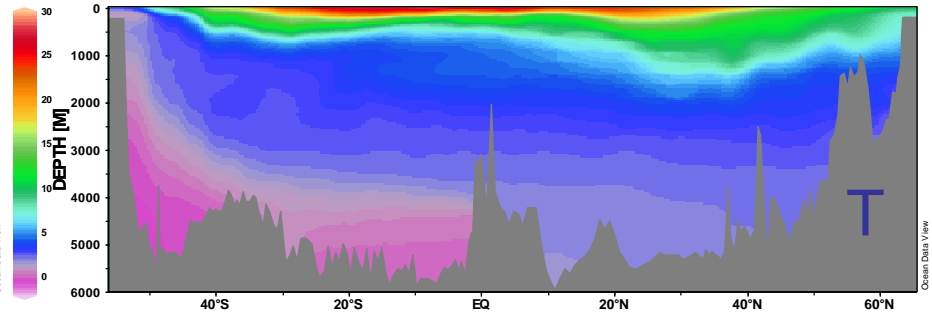
Тихий



ЮГ

север

Атлантический



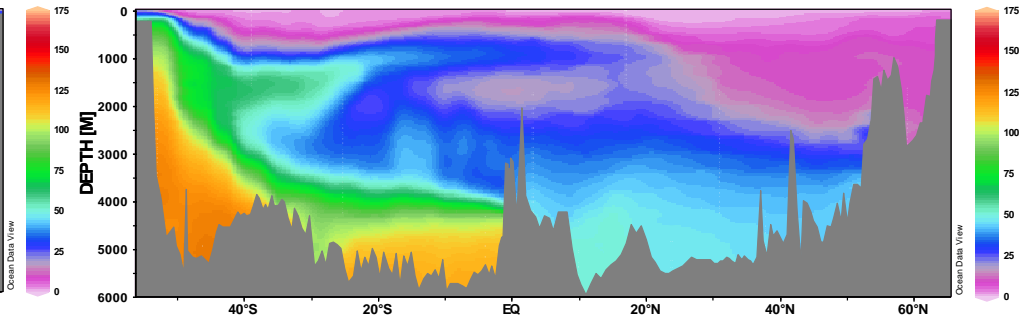
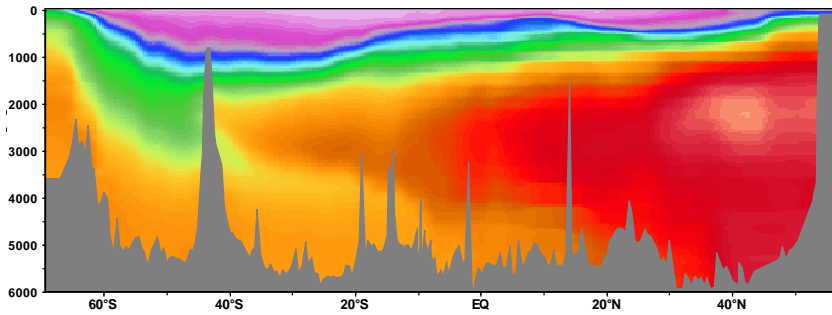
ЮГ

север

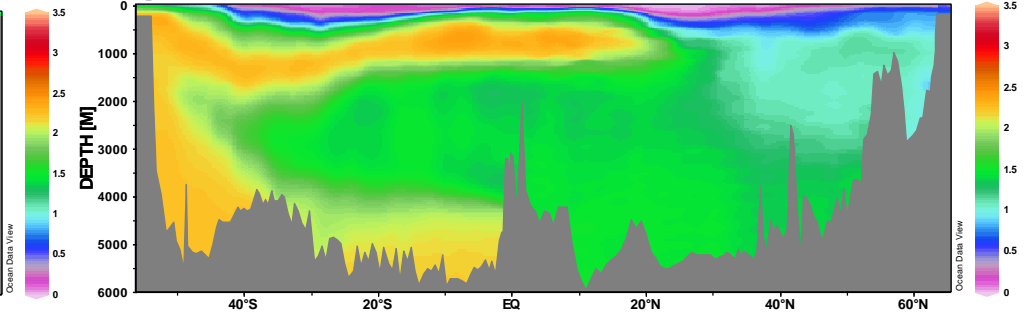
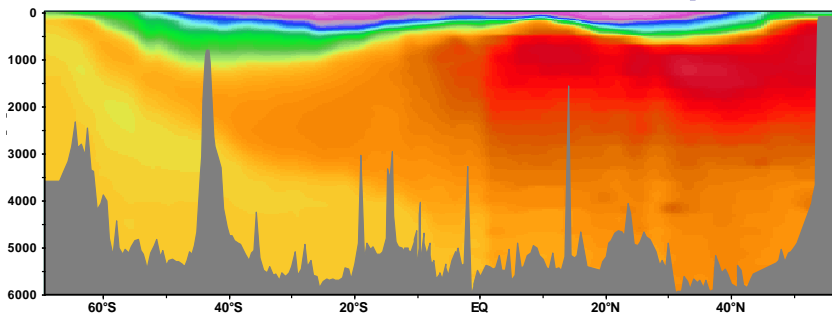
Тихий

Атлантический

Силикаты, микромоль/кг



Фосфаты, микромоль/кг



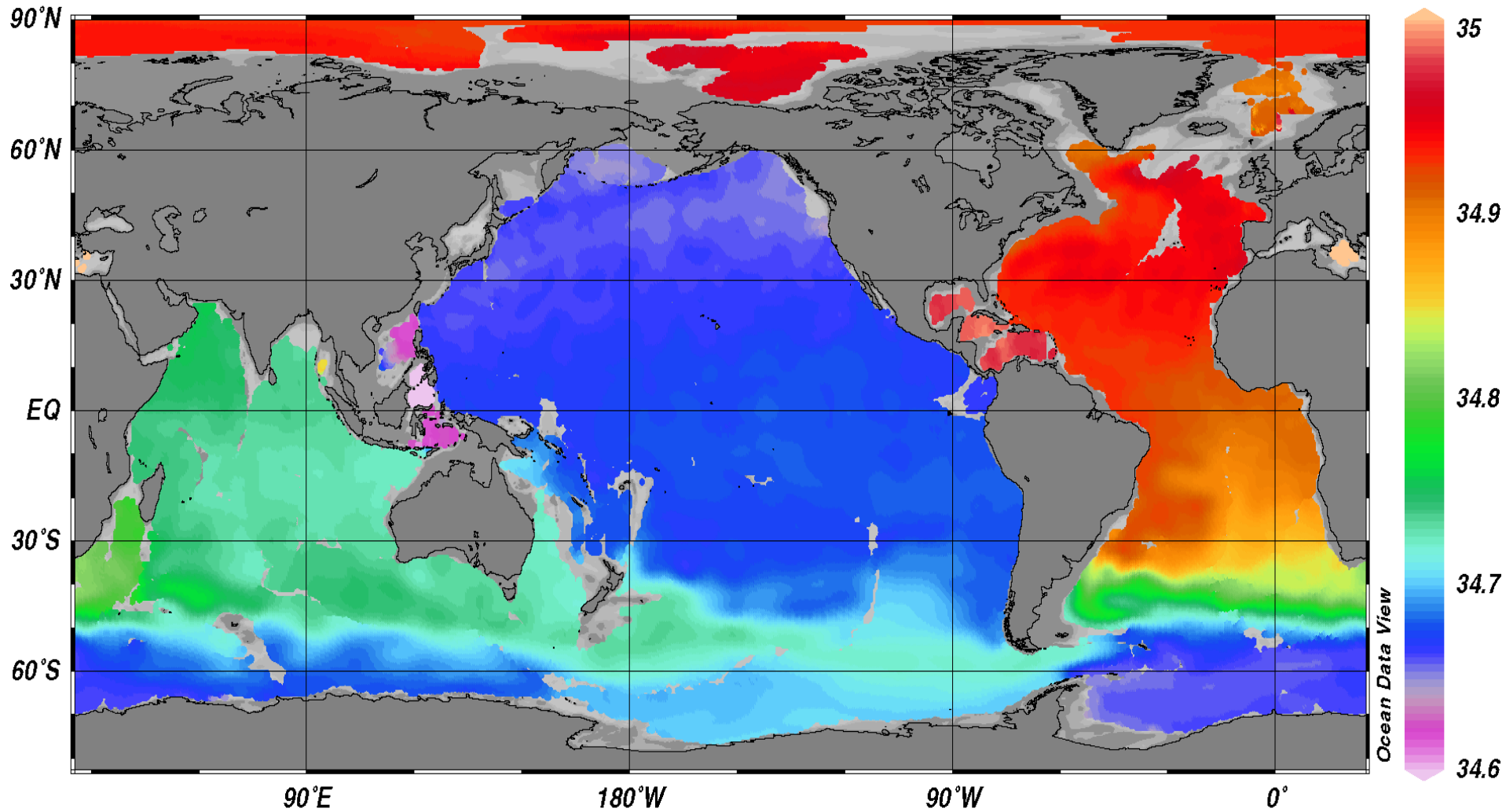
ЮГ

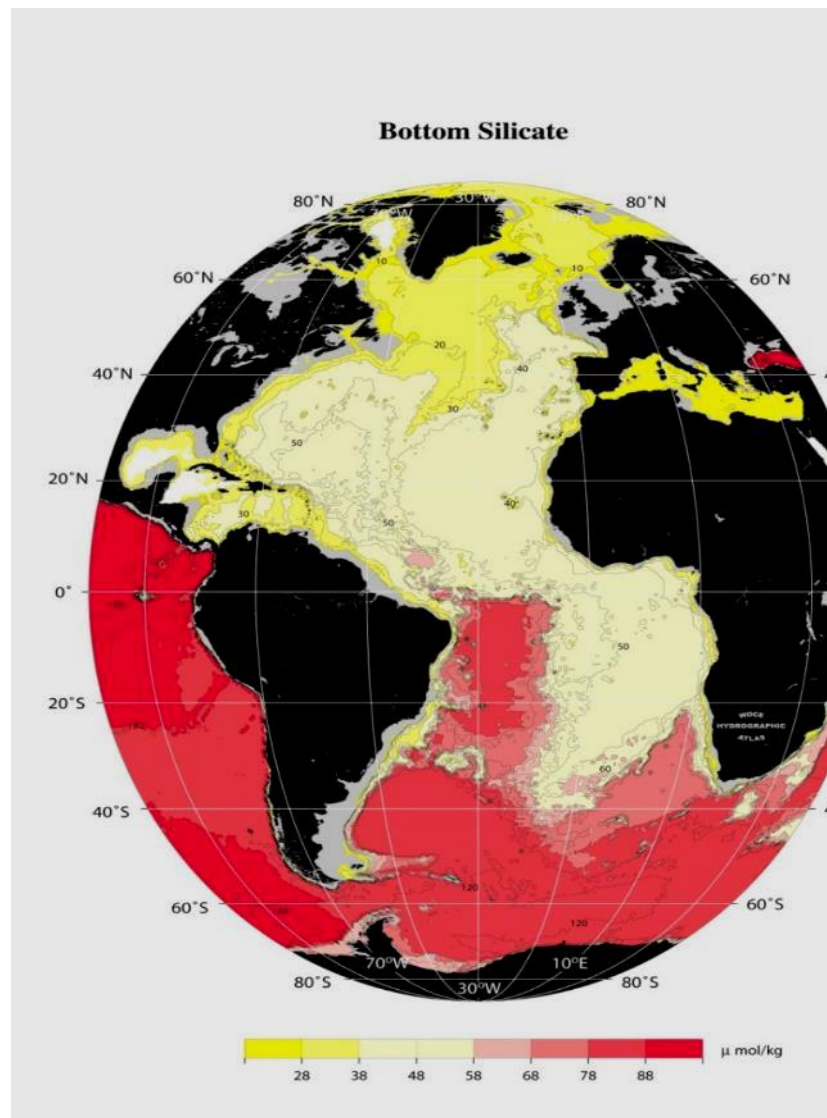
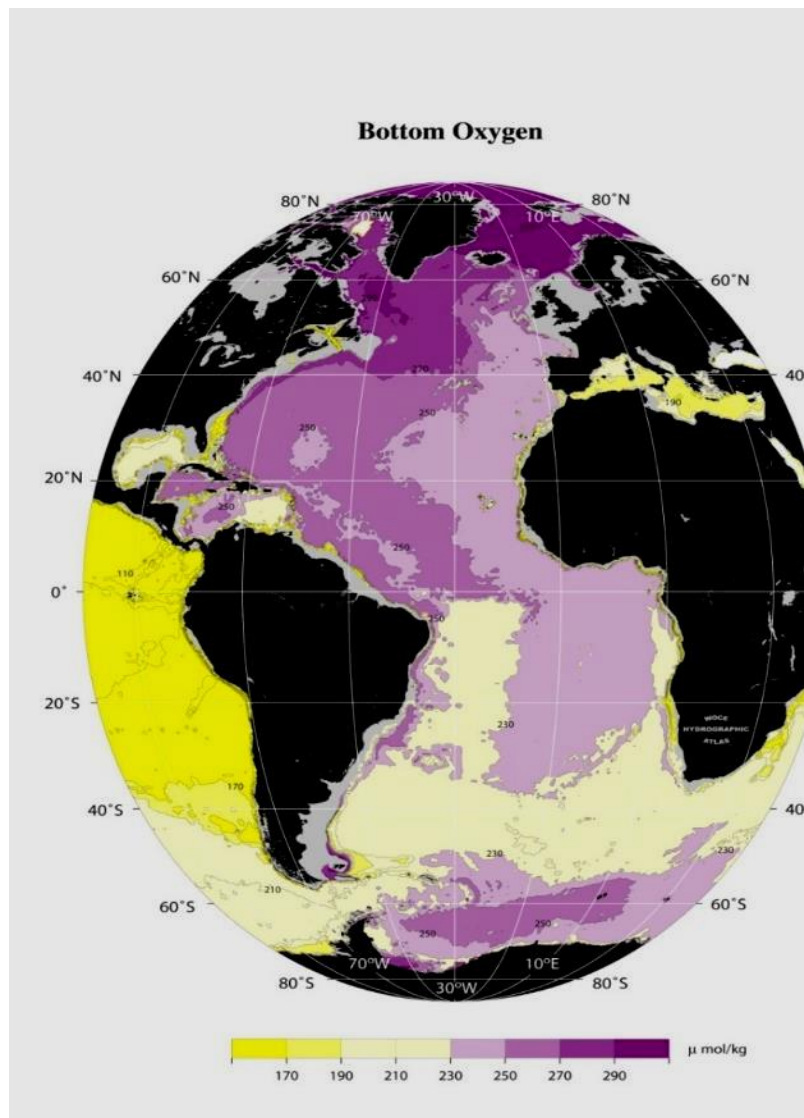
север

ЮГ

север

Соленость на глубине 3 км





**Придонные значения растворенного кислорода и силикатов
(атлас WOCE, 2013)**

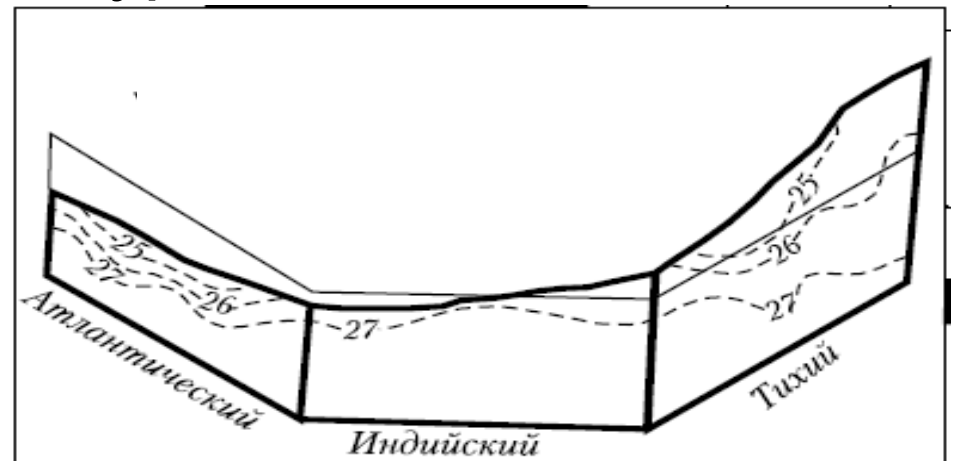
Сравнение средних по объему характеристик океанов

Параметры	Северная Атлантика + Сев. Ледовитый	Сев. Часть Тихого	Различия
Температура, °	4,95	3,69	+ 1,26°
Соленость, ‰	35,06	34,58	+ 0,48 ‰
Кислород, мл/л	5,3	2,5	Больше в 2 раза
Кремний, микромоль/кг	23	123	Меньше в 5,5 раз
Фосфор, микромоль/кг	1.2	2.6	Меньше в 2 раза

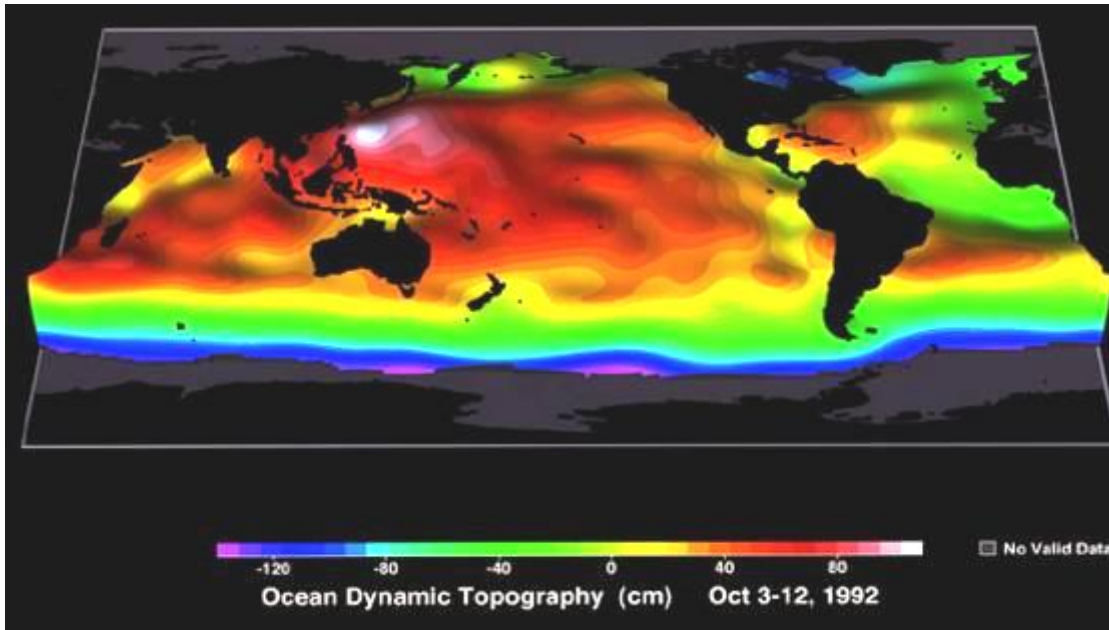
(Добролюбов, 1987, 2004)

Уровень океанов и глобальная циркуляция

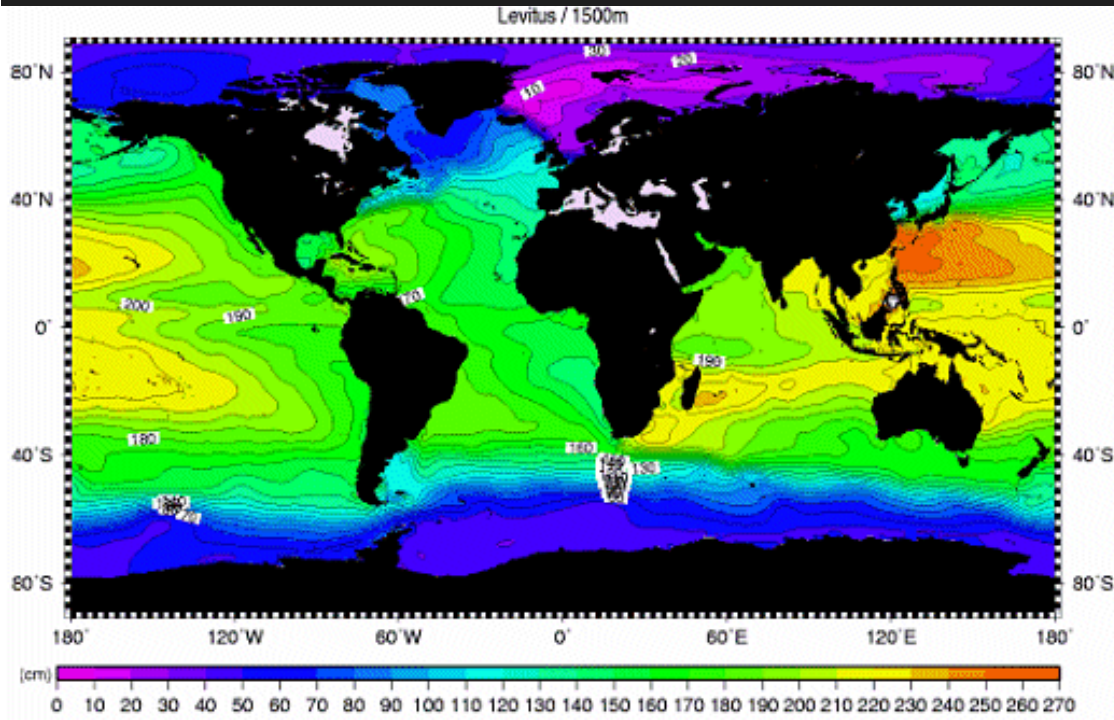
- Поскольку **плотность воды** зависит от температуры, солености, то отмеченные различия свойств проявляются и в этой характеристике.
- Чем больше средняя плотность столба воды, тем ниже будет положение уровня



Разность уровня поверхности океанов



Топография по данным спутниковых наблюдений (октябрь 1992 г.)



Топография поверхности за счет разности плотностей верхних 1500 м по данным океанологических наблюдений (Levitus, 1998)

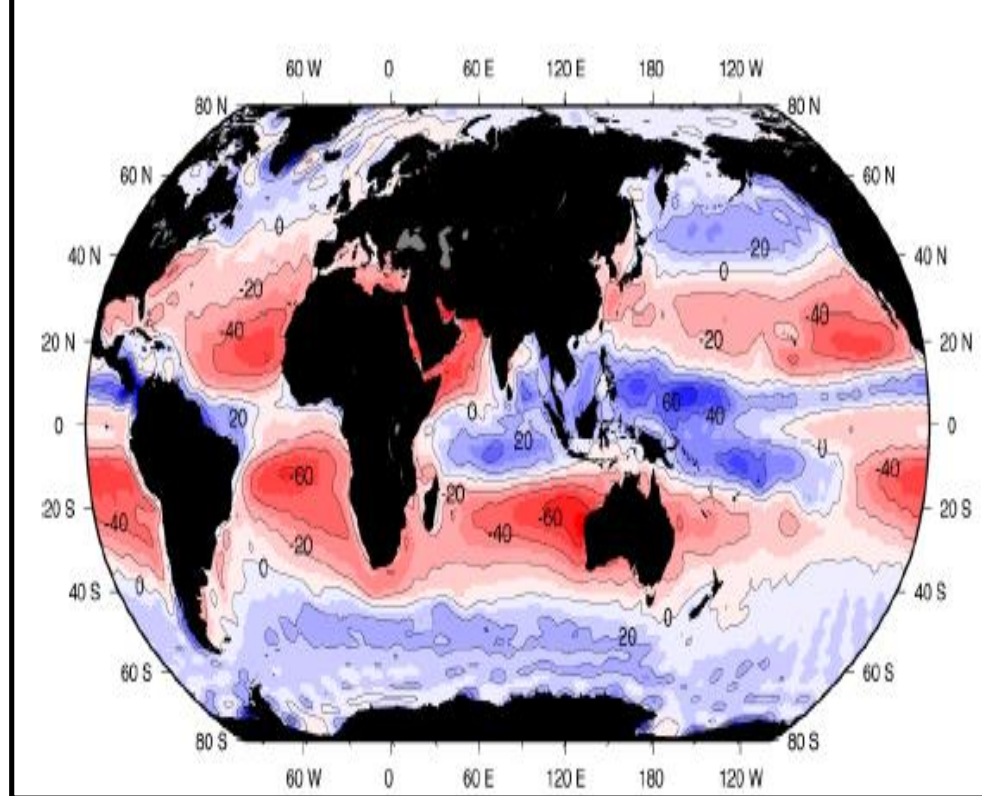
Разность среднеширотных уровней Тихого океана и Атлантики, полученная по их плотности



(Добролюбов, 2005)

Северная Атлантика:

- ✓ Меридиональное простираение и узость по широте
- ✓ Свободный водообмен с Арктическим бассейном
- ✓ Наличие Средиземного моря – бассейна испарения
- ✓ Отсутствие орографических барьеров для воздушных масс у западного берега в умеренных широтах



Испарение – Осадки (см/год)
по данным NCAR (Trenberth, 2001)

Северная Атлантика, покрывая лишь 11% поверхности Мирового океана, обеспечивает 17% потерь тепла всем Мировым океаном

Баланс тепла поверхности

Водный баланс

Северная Атлантика

-1 ПВт (10^{15} Вт)

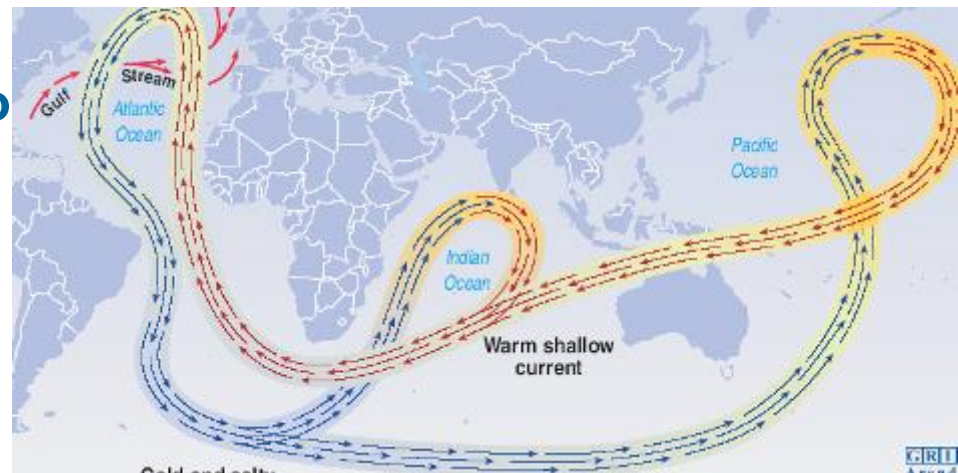
-0,4 Св ($1\text{Св}=10^6\text{м}^3/\text{с}$)

Сев. часть Тихого океана

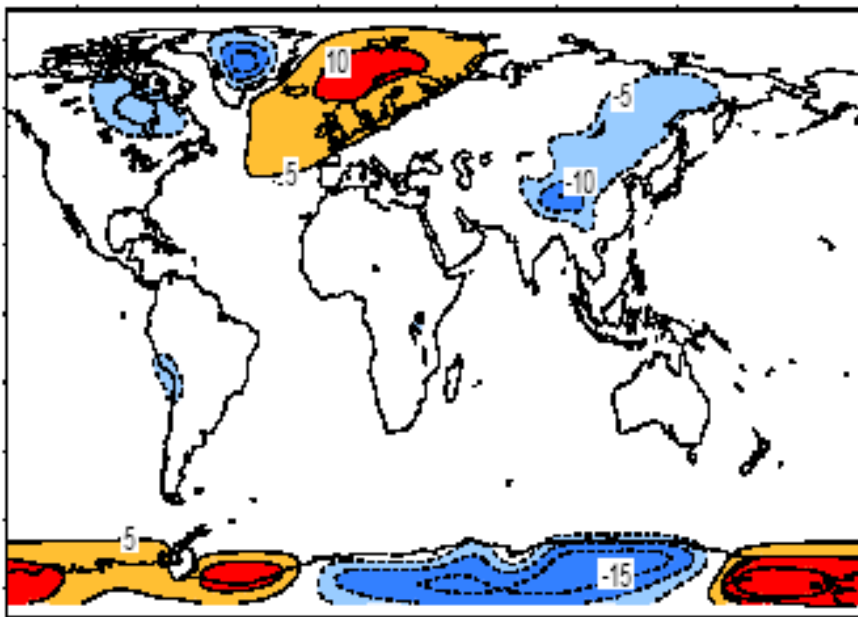
+ 0.5 ПВт

+0,5 Св

Разность уровня поверхности определяет поток теплых вод по его наклону из Тихого океана в Атлантику, составляя верхнюю ветвь «глобального океанского конвейера»

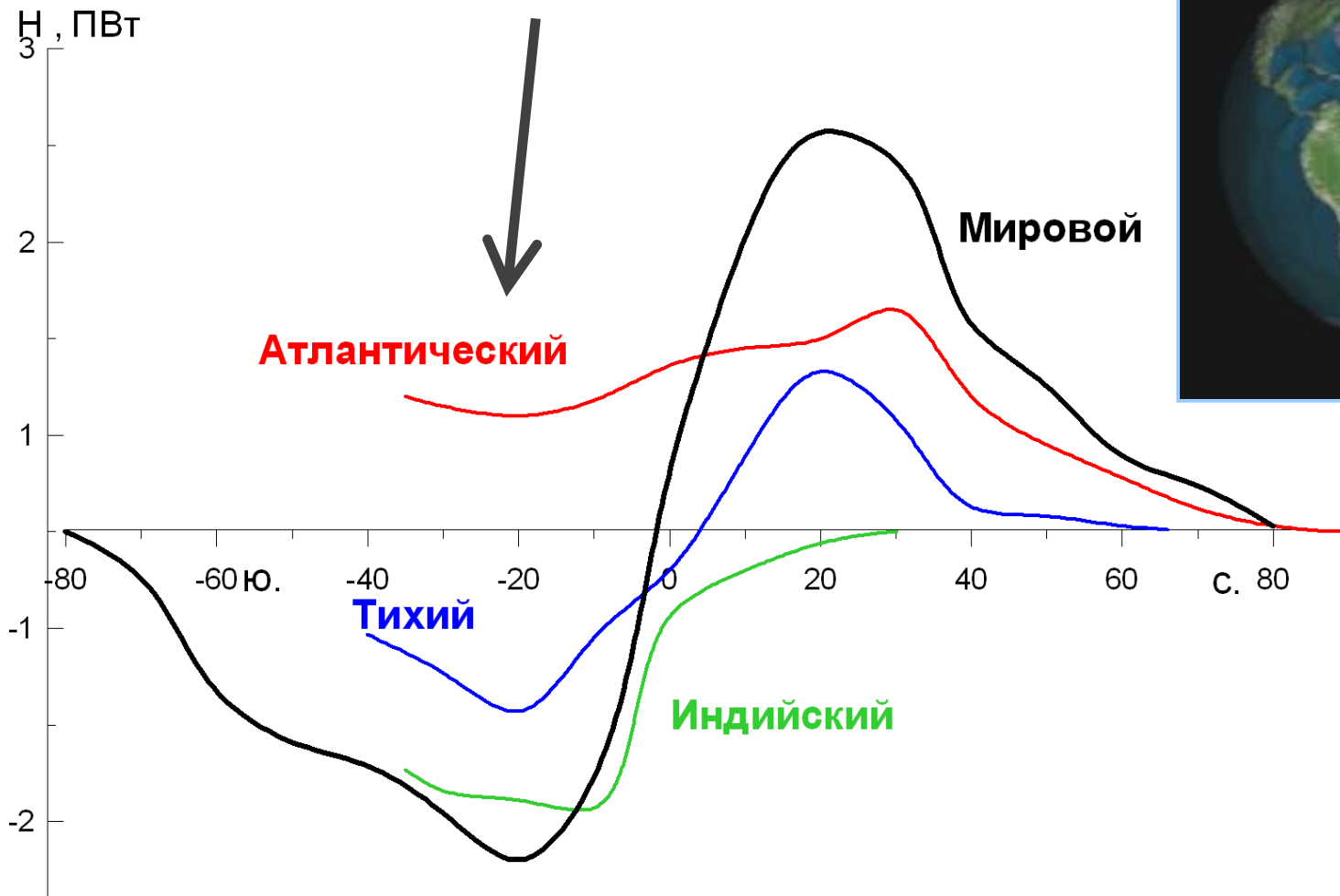


Движущиеся на север в Атлантическом океане теплые воды компенсируют отток холодной глубинной водной массы, формируя дополнительный поток тепла в Северное полушарие, приводящий к смягчению климата Европы



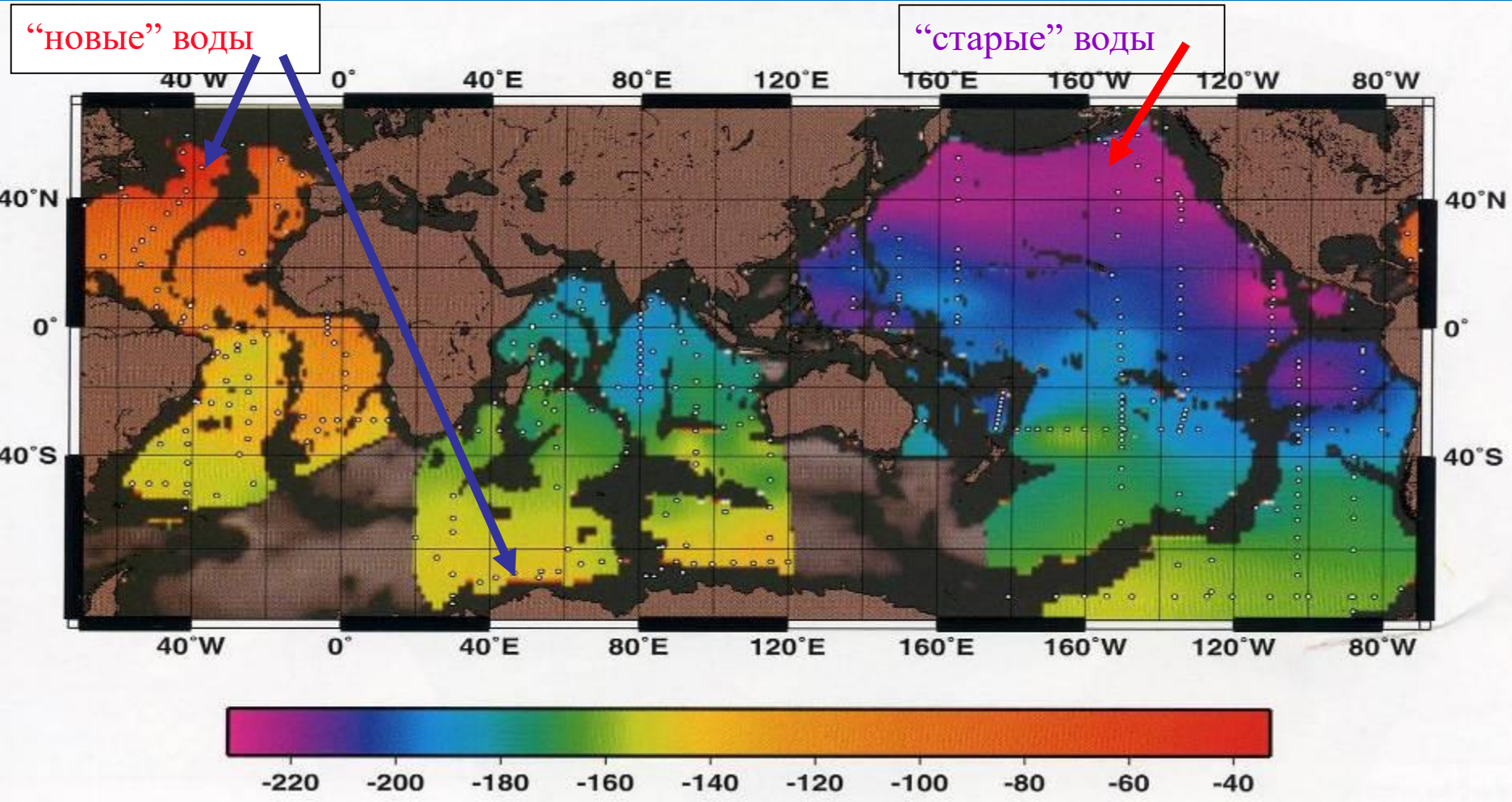
Аномалии температуры воздуха относительно среднезональных (Rahmstorf, 2000)

Аномальный перенос тепла в Атлантике - от Антарктиды к экватору



Сколько лет движется вода в глобальном конвейере?

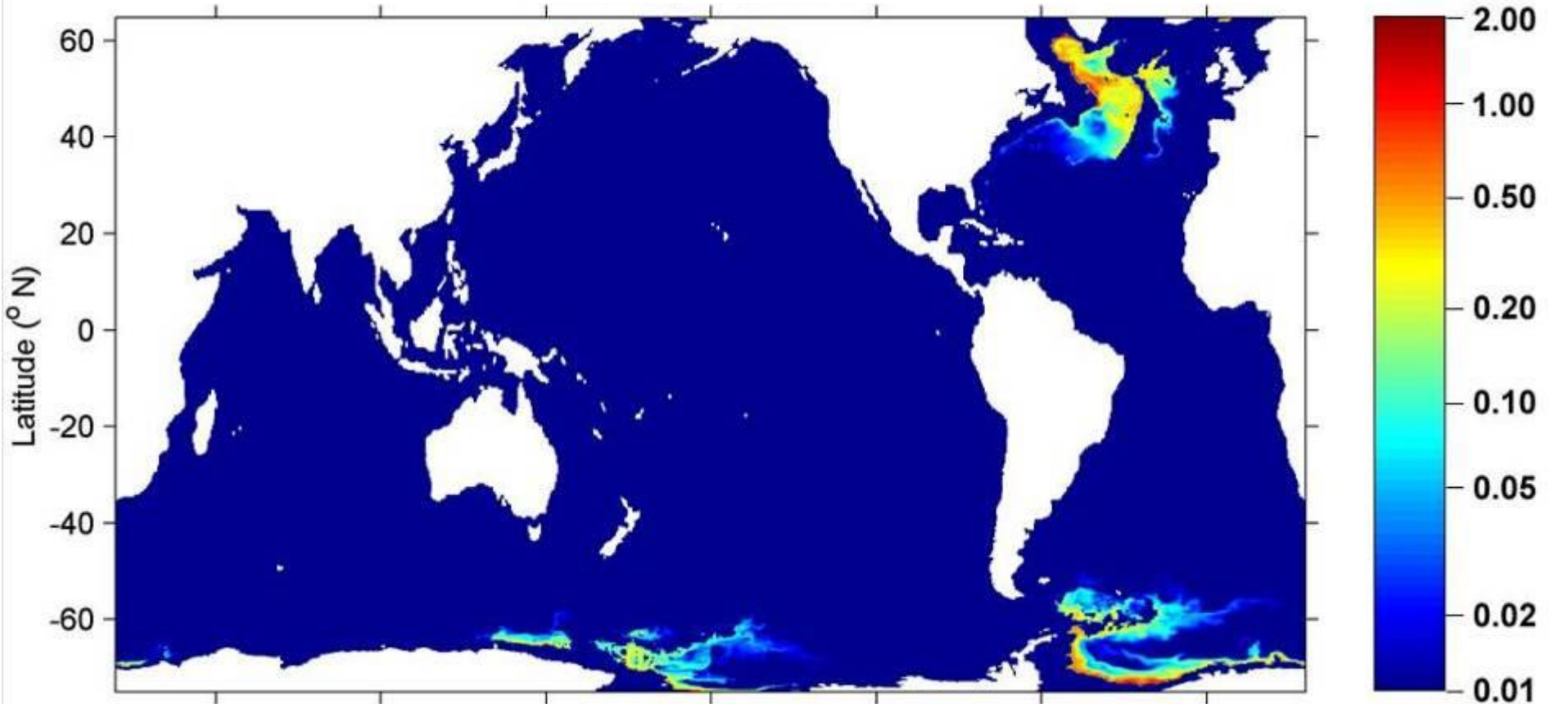
Распределение относительных концентраций радиоуглерода в придонном слое (‰)



ГДЕ ФОРМИРУЮТСЯ ГЛУБИННЫЕ ВОДЫ?

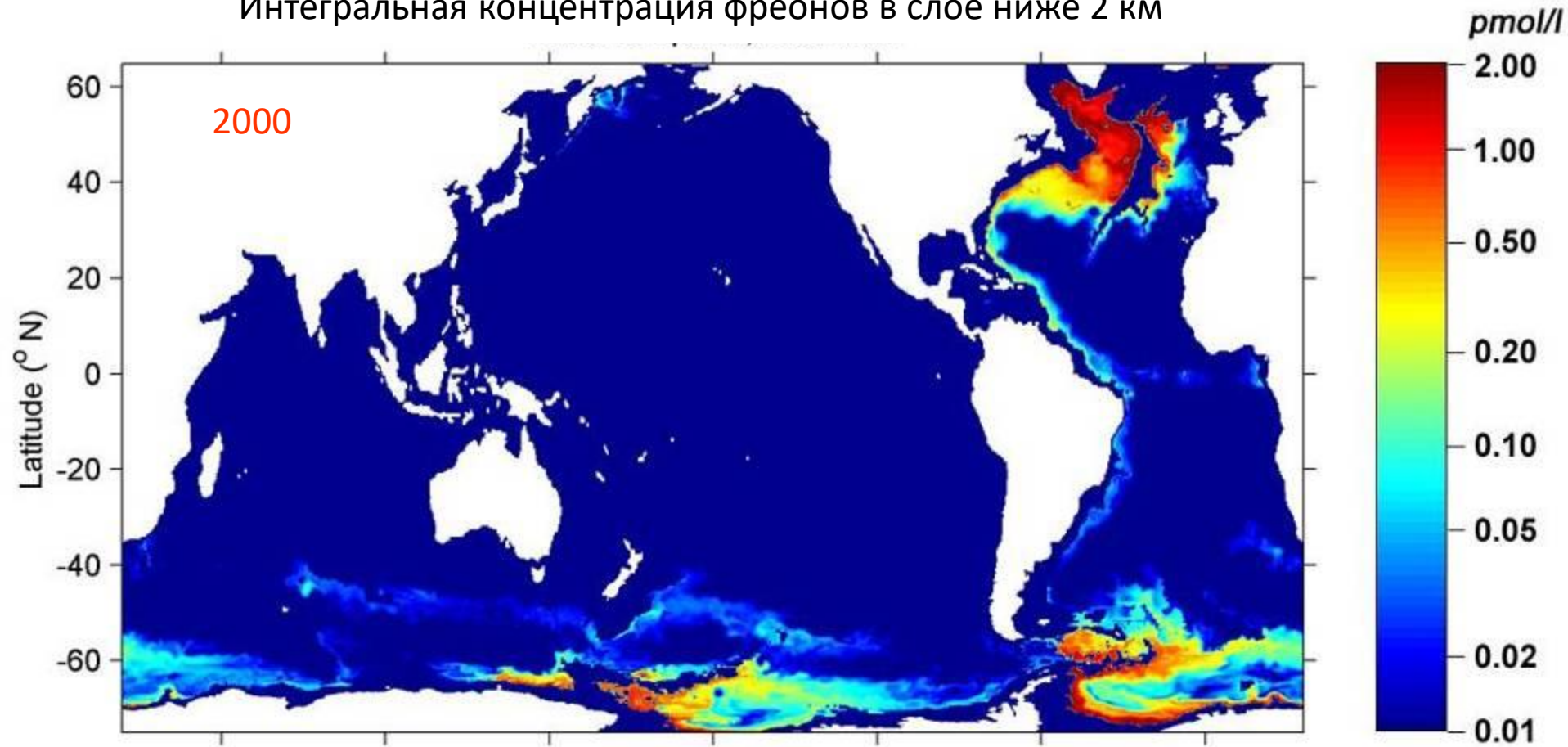
1980

Интегральная концентрация фреонов в слое ниже 2 км



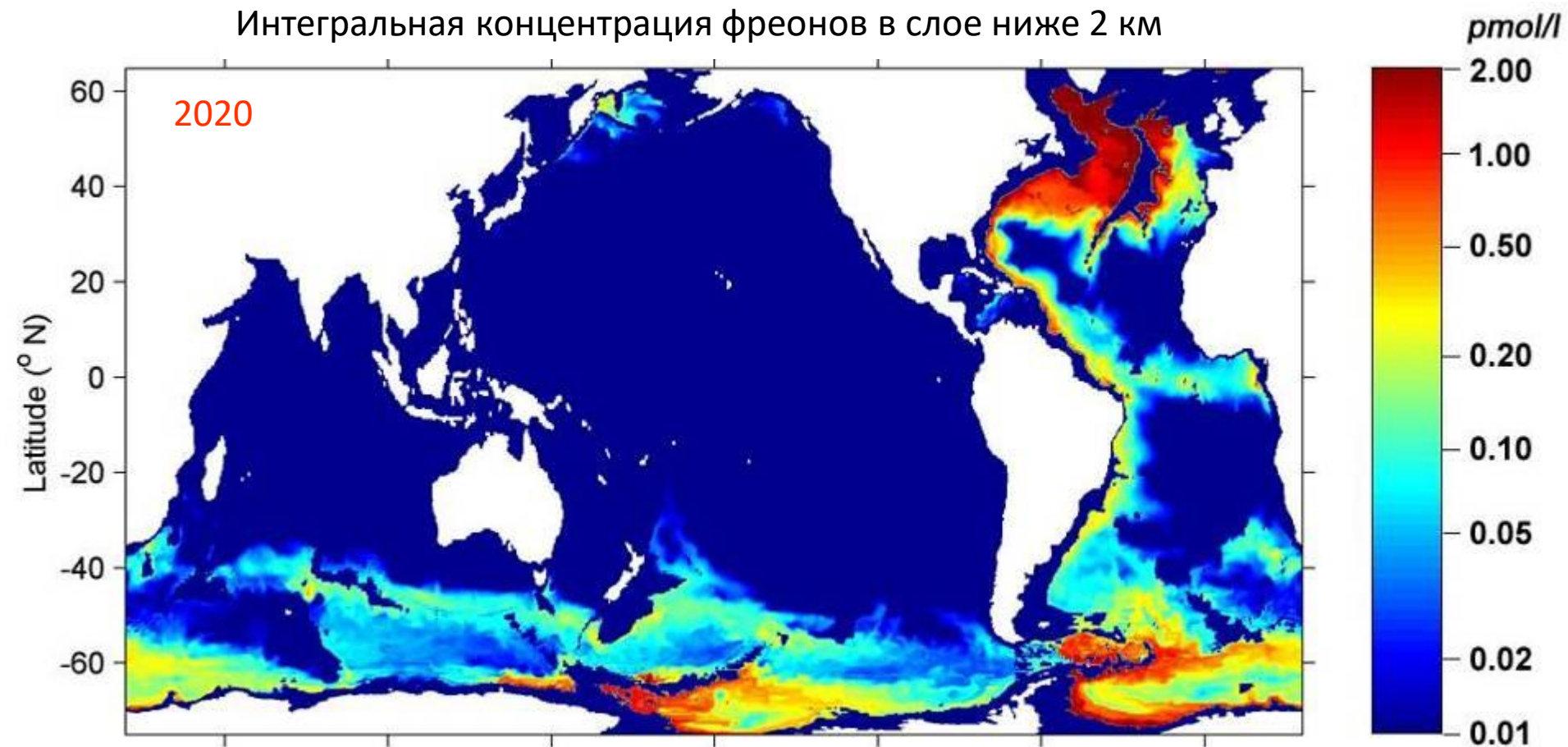
Sen Gupta, 2006

Интегральная концентрация фреонов в слое ниже 2 км



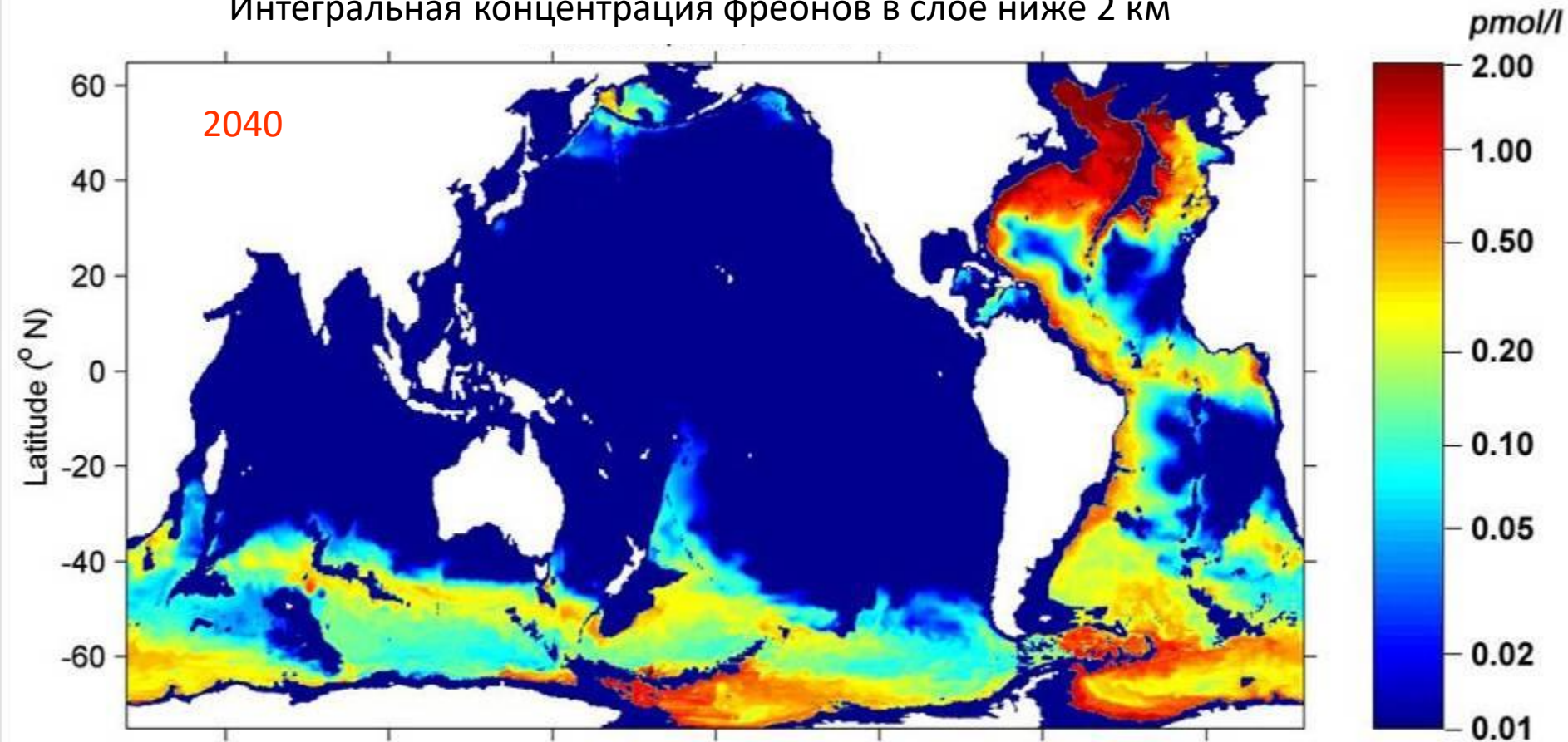
Sen Gupta, 2006

Интегральная концентрация фреонов в слое ниже 2 км



Sen Gupta, 2006

Интегральная концентрация фреонов в слое ниже 2 км

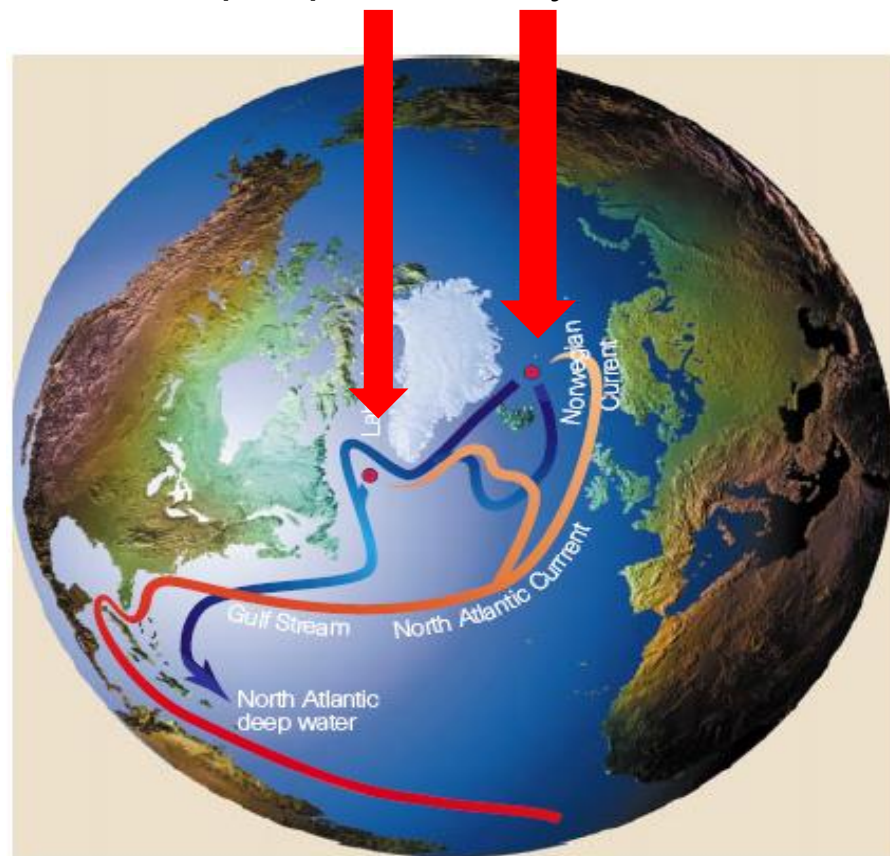


Sen Gupta, 2006

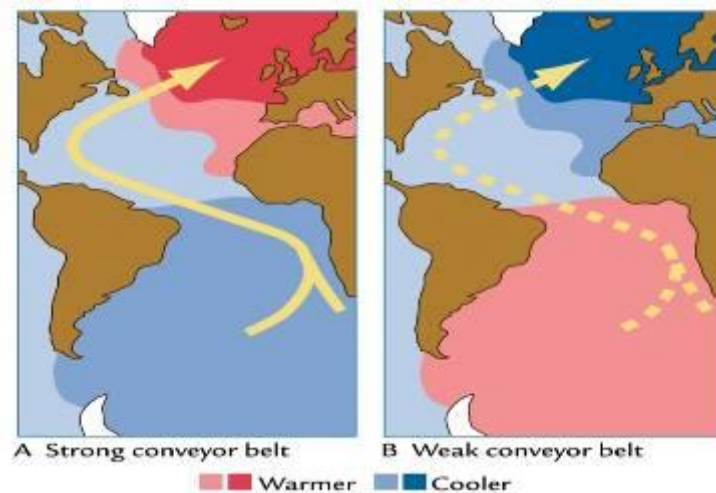
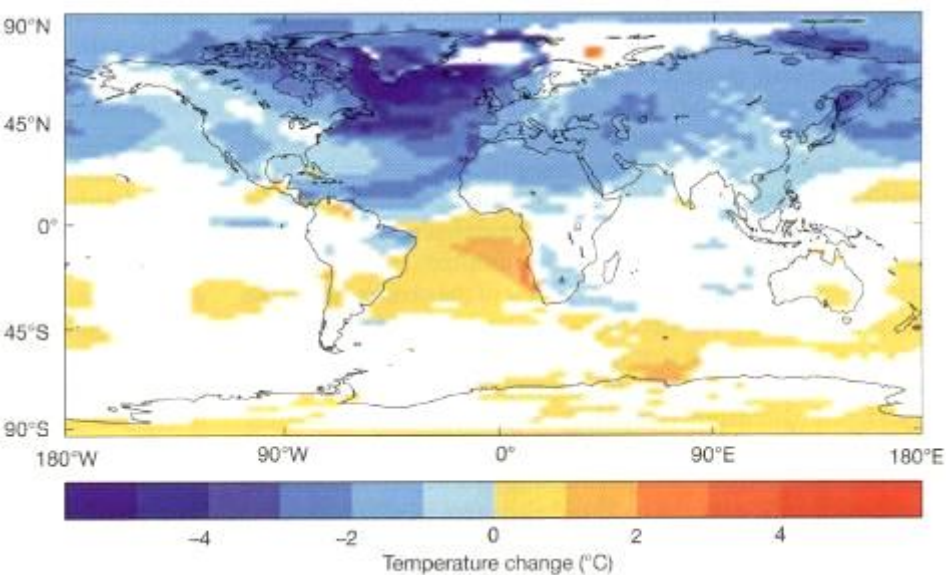
Устойчивая работа «глобального конвейера» может давать сбои, когда в области образования глубинных вод в Северной Атлантике не возникают условия для развития процессов глубокой конвекции:

- **уменьшение испарения** за счет ослабления ветра,
- **распреснение** за счет таяния Гренландского щита или дополнительного выноса морского льда из Арктики

Формирование глубинных вод



Влияние «Глобального конвейера» на климат



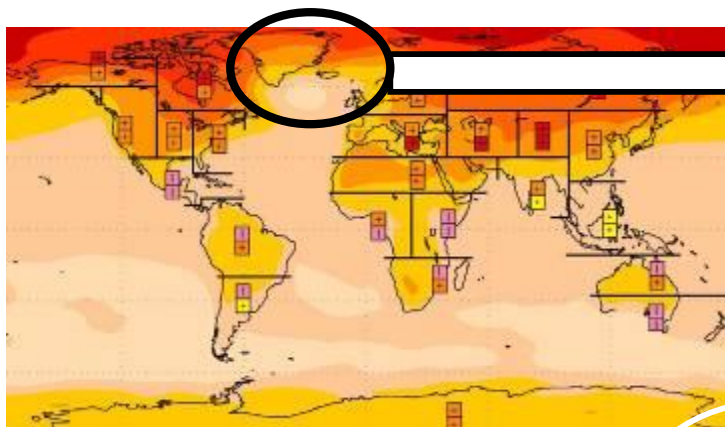
усиление –
потепление
Европы

ослабление –
похолодание
Европы

Изменение температуры
при остановке конвейера



Выключение конвейера при таянии льдов



Вынос
низкосоленных вод
из Арктики



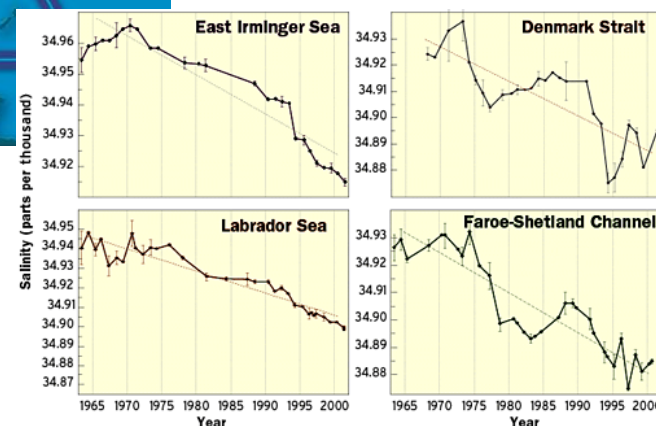
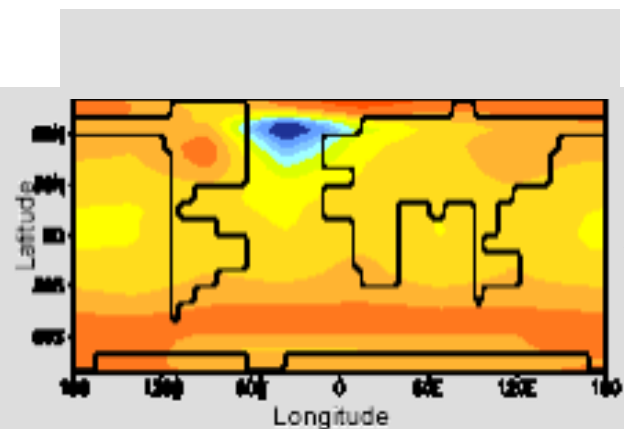
Глоб. конвейер



Наблюдаемое
уменьшение
солёности

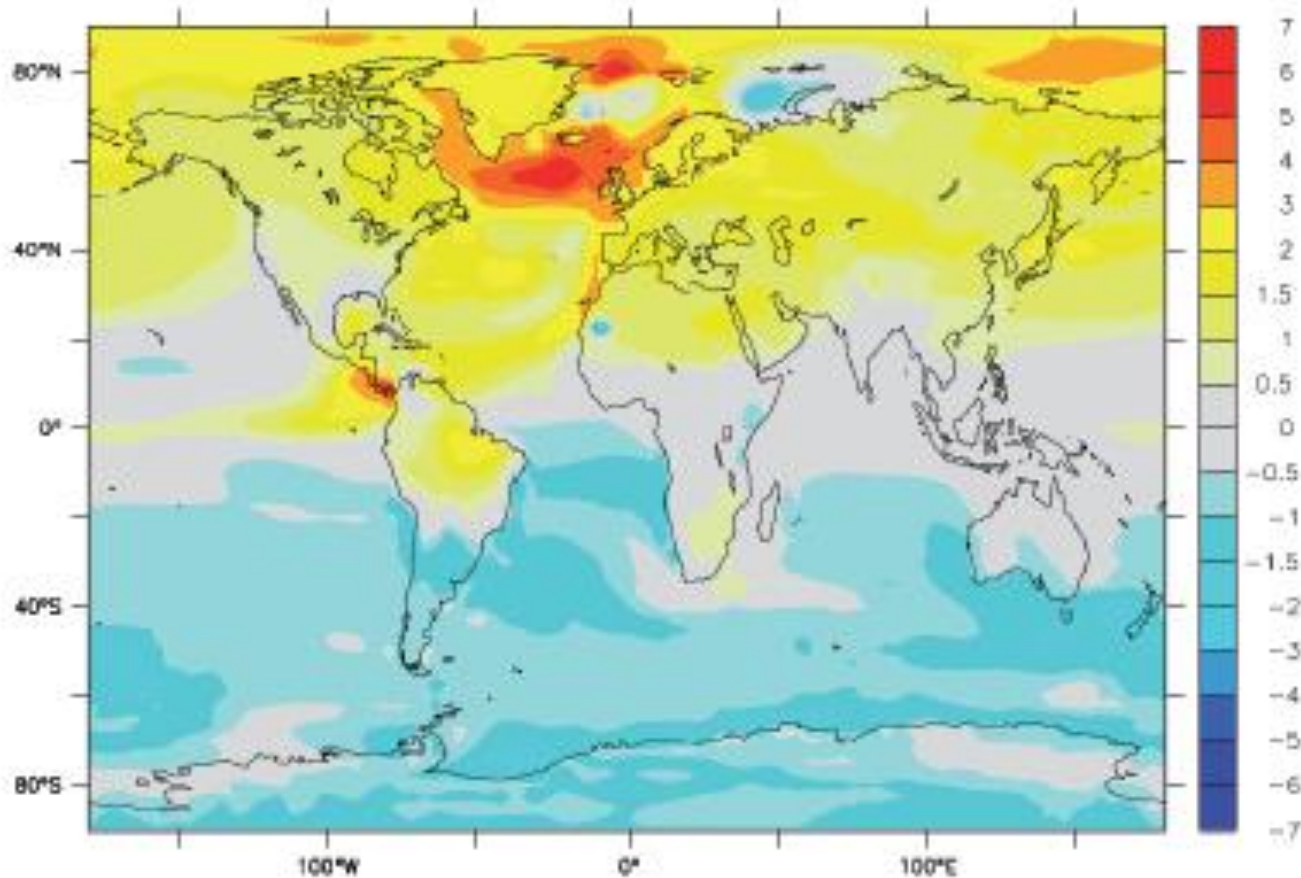
Потепление в
субполярной
Атлантики

Выключение



Закрытие Панамского перешейка – возникновение конвейера

(a) Surface temperature change, Closed Seaway - Open Seaway (K)



Изменения температуры после возникновения перешейка
(Lunt et al., 2007)

Изменения климата в 21 веке

ipcc
INTERGOVERNMENTAL PANEL ON
climate change



<http://www.ipcc.ch>

5-й доклад МГЭИК (2013)

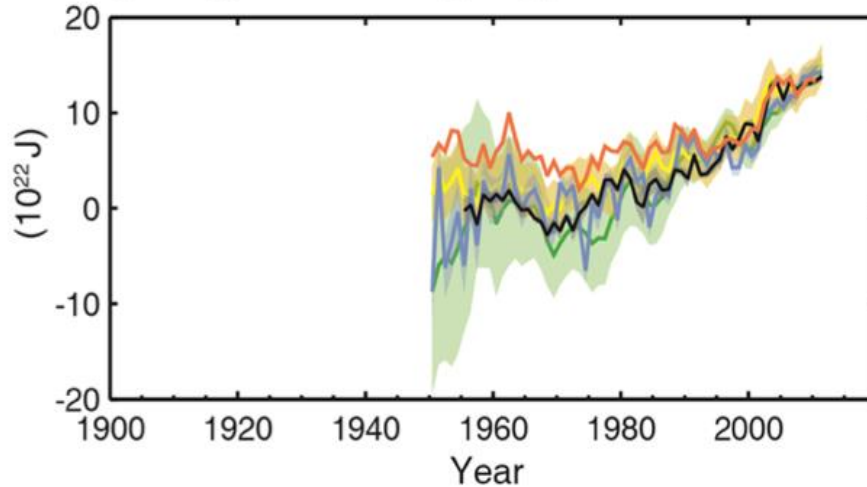


ОКЕАН

Наблюдения

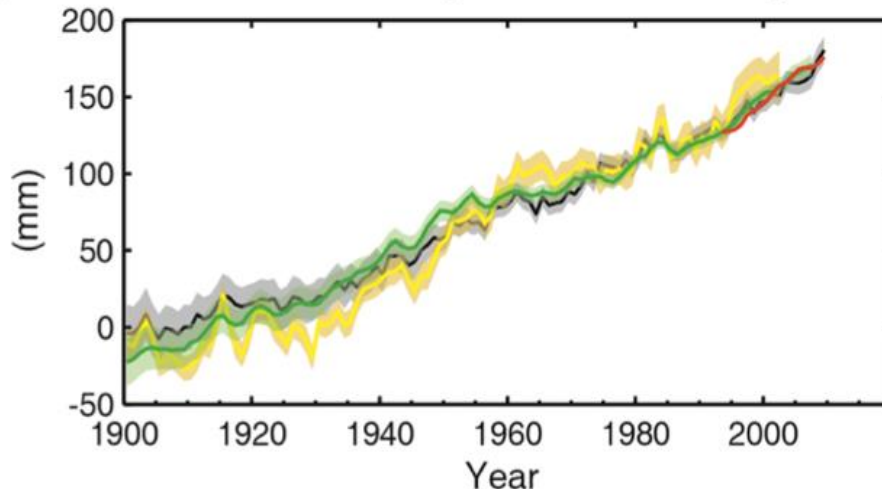
60% прироста энергии климатической системы последних 40 лет депонируется в верхний слой океана (0-700 м), еще 30% - в глубинные слои

(c) Change in global average upper ocean heat content



с) Изменения в глобальном среднем теплосодержании верхнего слоя океана (0-700 м), 2006-2010 гг. сведены воедино по всем базам данных

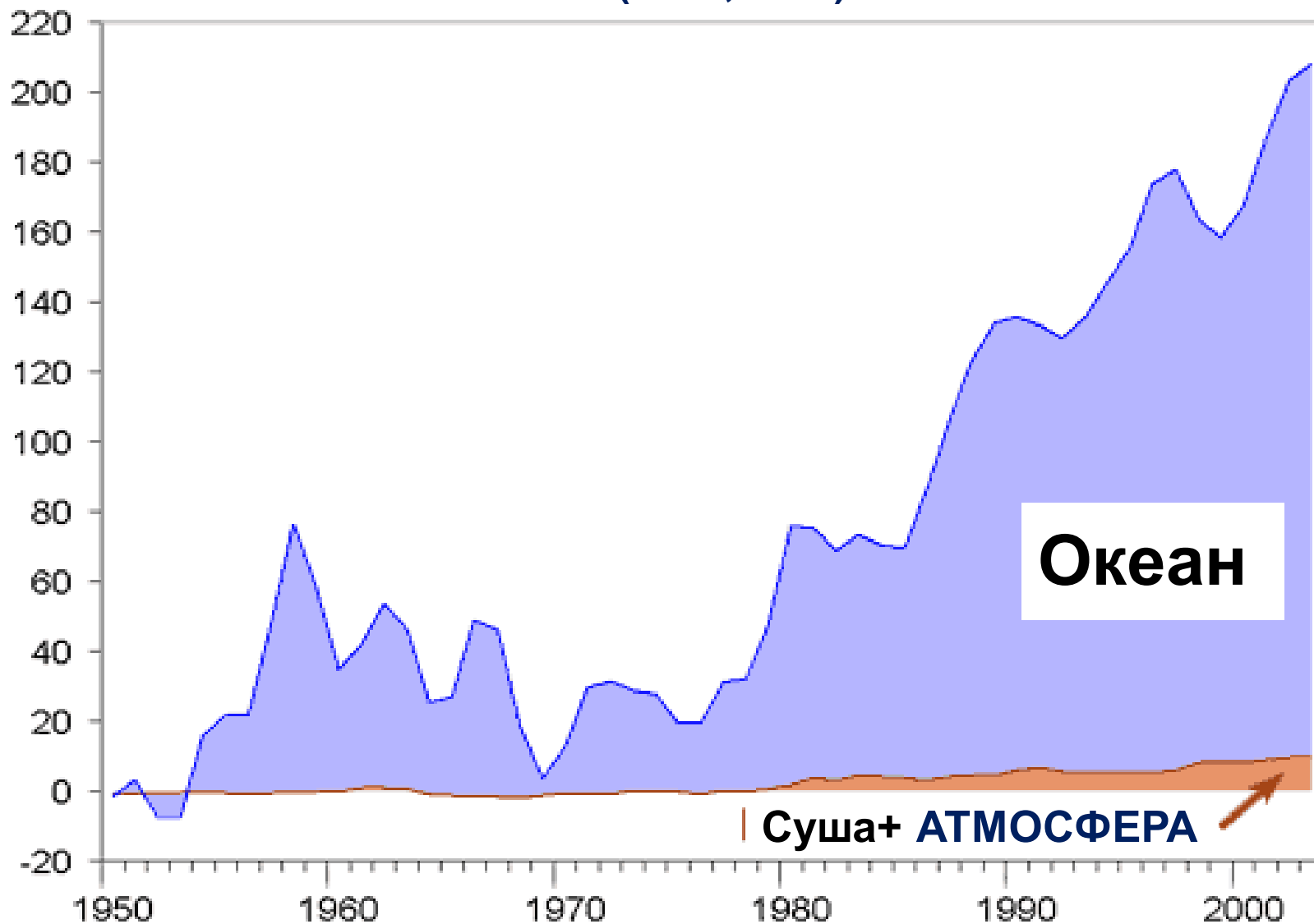
(d) Global average sea level change

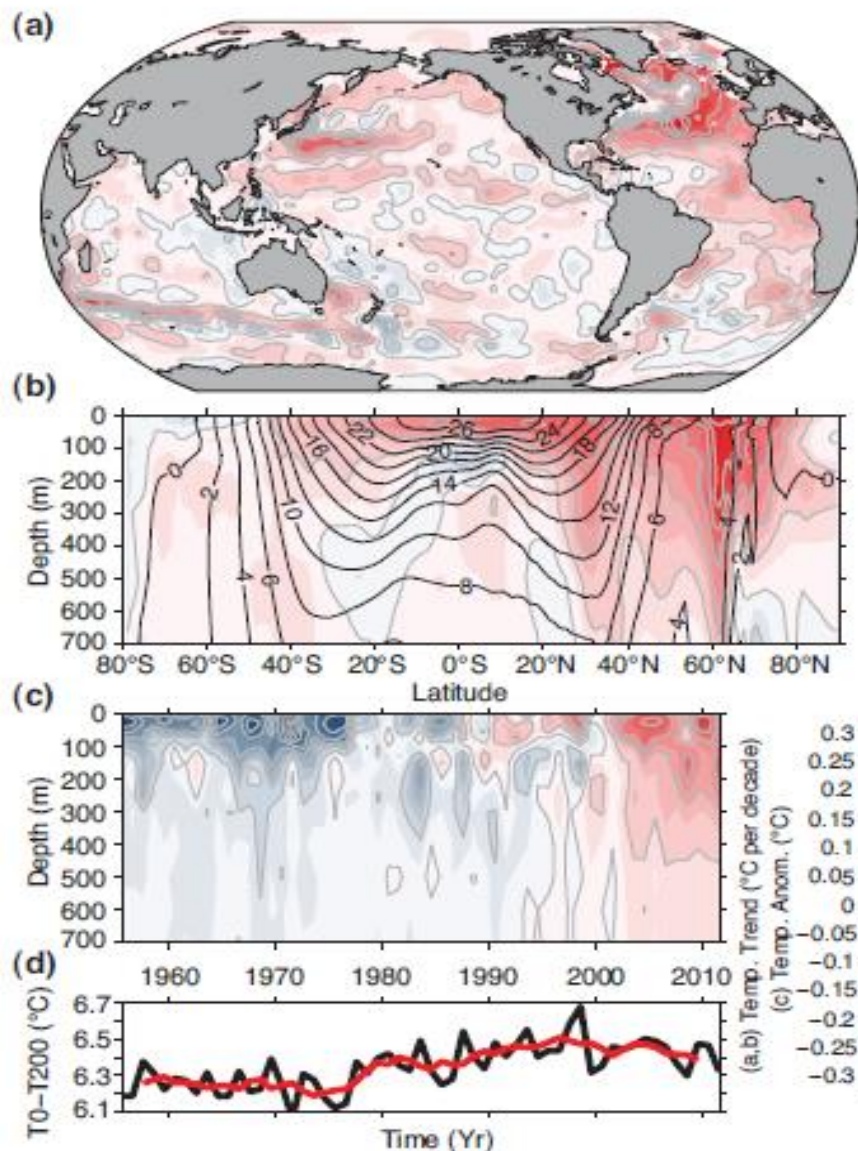


d) Глобальные среднее изменения уровня моря по отношению к среднему за 1900-1905. Все базы сведены воедино в 1993 г. (первый год спутниковых данных)

Аномалии глобального теплозапаса (10^{21} Дж)

(IPCC, 2013)





Изменения температуры океана

Figure 3.1: a) Depth-averaged 0–700 m temperature trend for 1971–2010 (longitude vs. latitude, colors and grey contours in $^{\circ}\text{C}$ per decade). b) Zonally-averaged temperature trends (latitude versus depth, colors and grey contours in $^{\circ}\text{C}$ per decade) for 1971–2010, with zonally averaged mean temperature over-plotted (black contours in $^{\circ}\text{C}$). c) Globally-averaged temperature anomaly (time versus depth, colors and grey contours in $^{\circ}\text{C}$) relative to the 1971–2010 mean. d) Globally-averaged temperature difference between the ocean surface and 200 m depth (black: annual values, red: 5-year running mean). All panels are constructed from an update of the annual analysis of Levitus et al. (2009).

Венеция: ступени церкви Иоанна и Павла

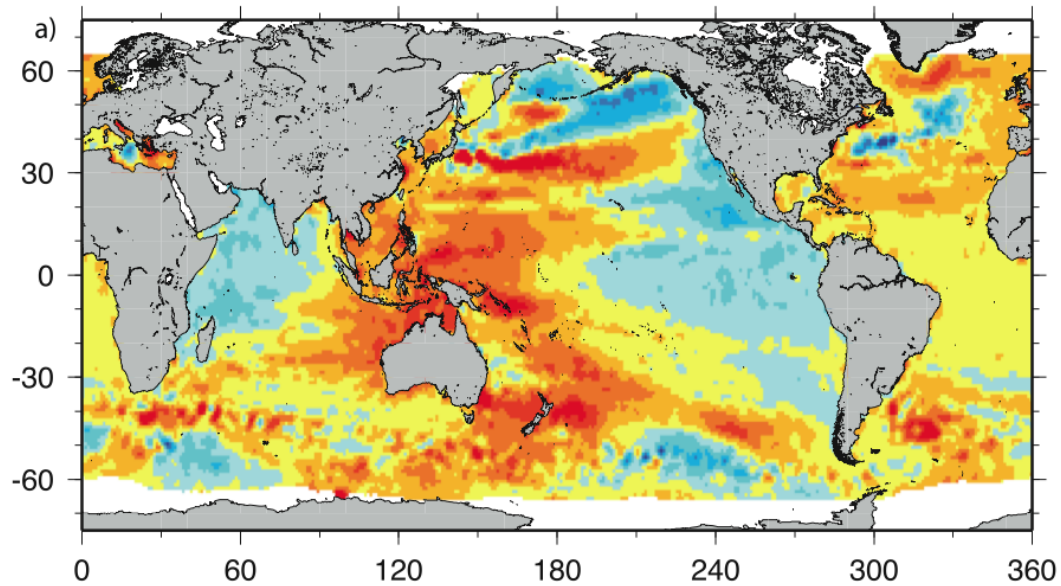
Картина Б.Белотто (1741)



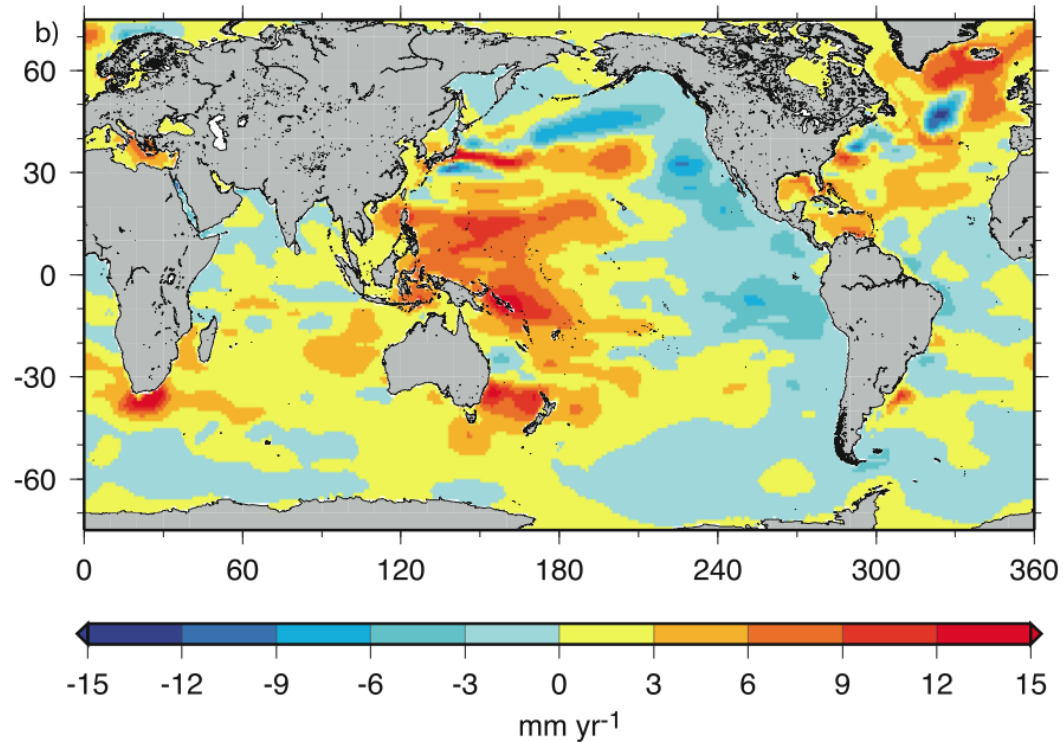
Изменения уровня за 261 год – 77 ± 10 см (Camuffo, Sturaro, 2003)

Тренды в уровне океана (2003 - 1993)

Спутниковый альтиметр



Термическое расширение



Ледниковый сток

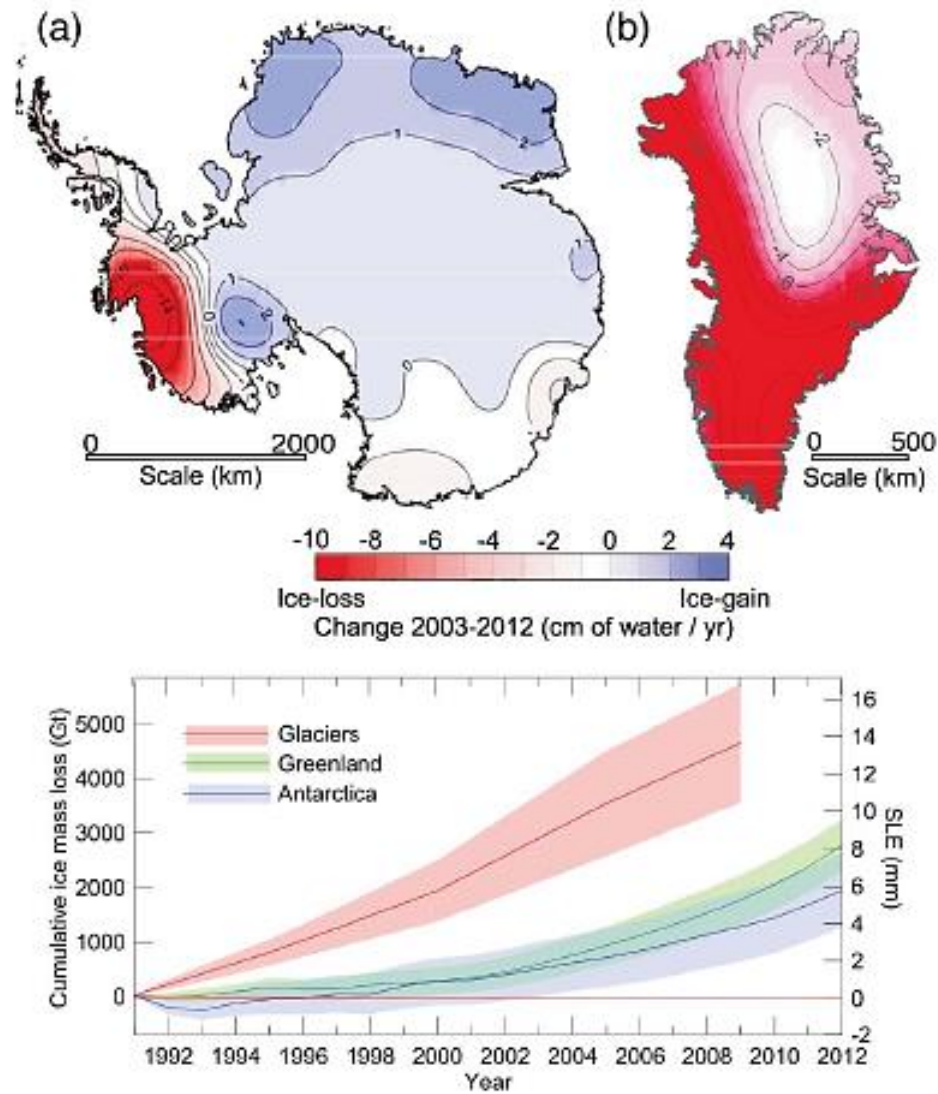
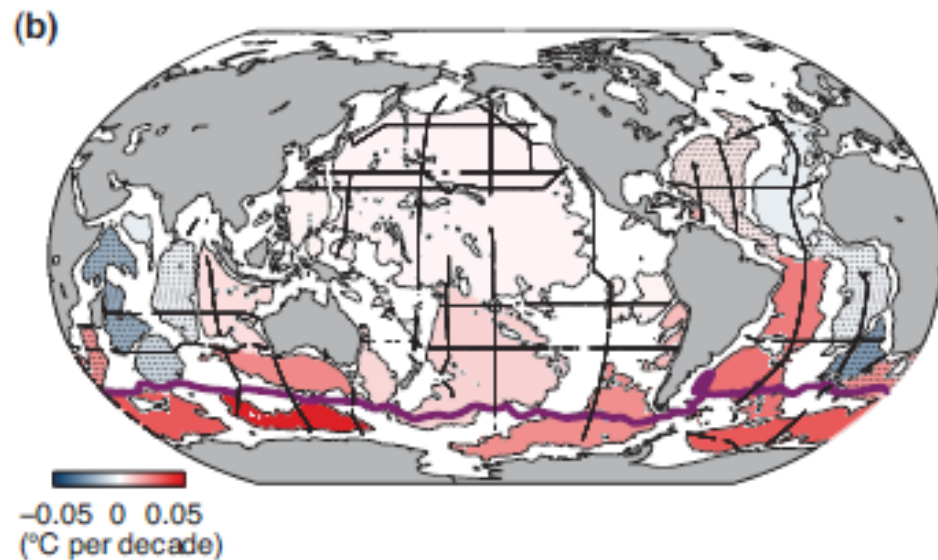
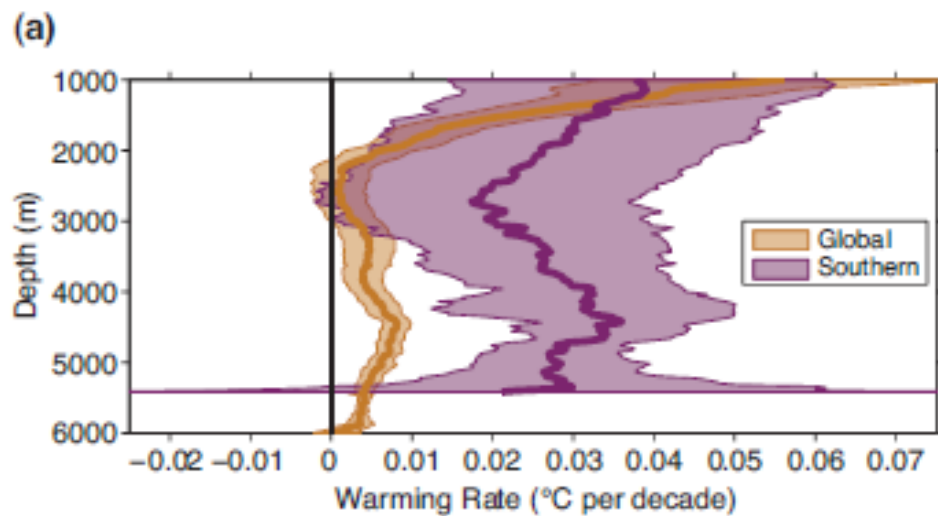


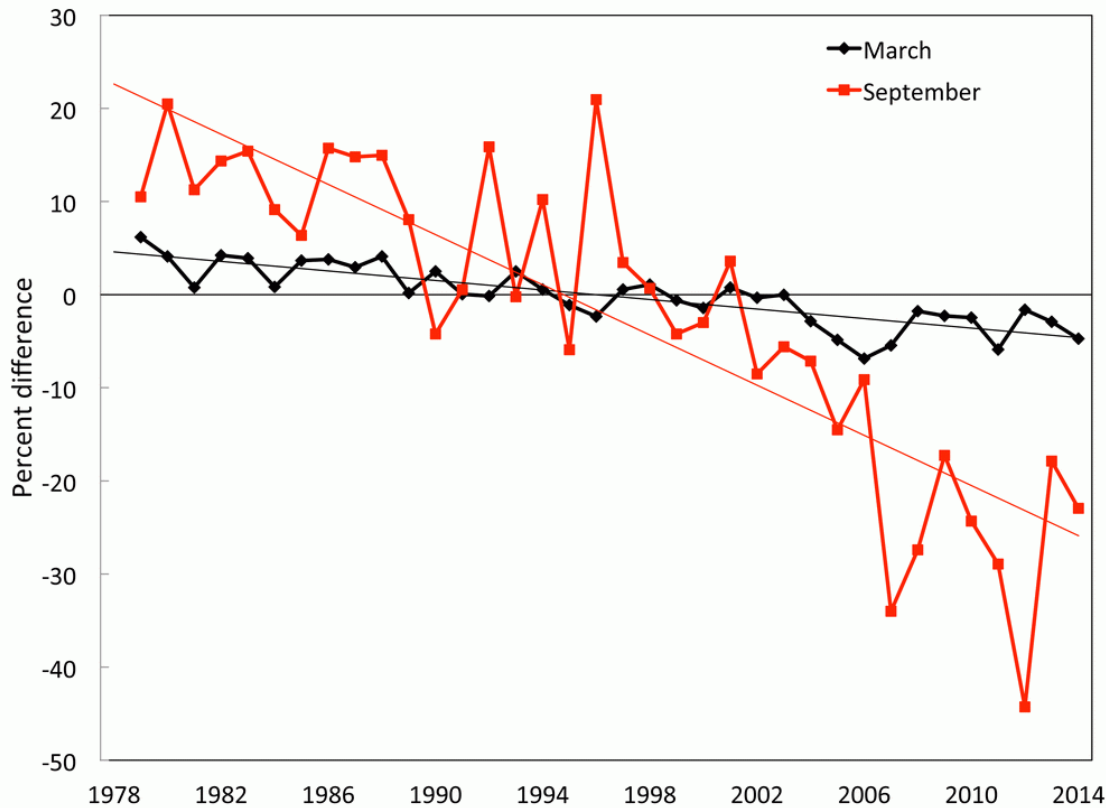
Figure TS.3: Upper panels: distribution of ice loss determined from GRACE time-variable gravity for (a) Antarctica and (b) Greenland, shown in centimetres of water per year ($\text{cm of water yr}^{-1}$) for the period 2003 to 2012. Lower panel: the assessment of the total loss of ice from glaciers and ice sheets in terms of sea level equivalent (in mm). The contribution from glaciers excludes those on the periphery of the ice sheets. {4.3.4; Figures 4.12, 4.13, 4.14, 4.16, 4.17}



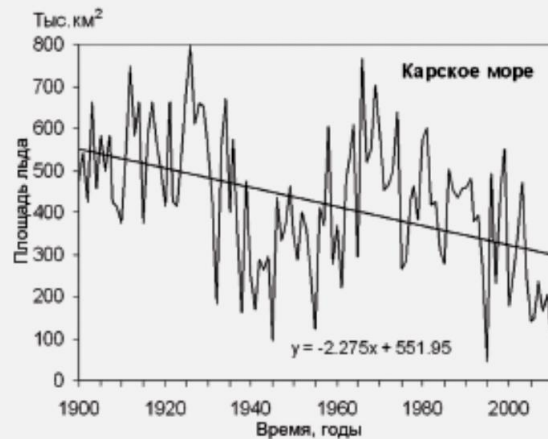
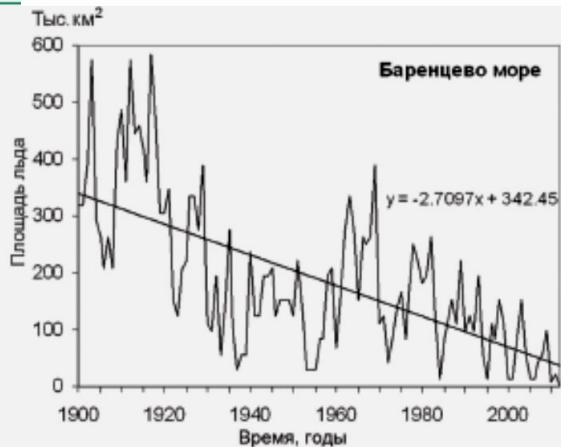
Потепление в
глубинных слоях

Figure 3.3: a) Areal mean warming rates ($^{\circ}\text{C}$ per decade) versus depth (thick lines) with 5 to 95% confidence limits (shading), both global (orange) and south of the Sub-Antarctic Front (purple), centred on 1992–2005. b) Mean warming rates ($^{\circ}\text{C}$ per decade) below 4000 m (colorbar) estimated for deep ocean basins (thin black outlines), centred on 1992–2005. Stippled basin warming rates are not significantly different from zero at 95% confidence. The positions of the Sub-Antarctic Front (purple line) and the repeat oceanographic transects from which these warming rates are estimated (thick black lines) also shown. Data from Purkey and Johnson (2010).

Площадь льда в Арктике



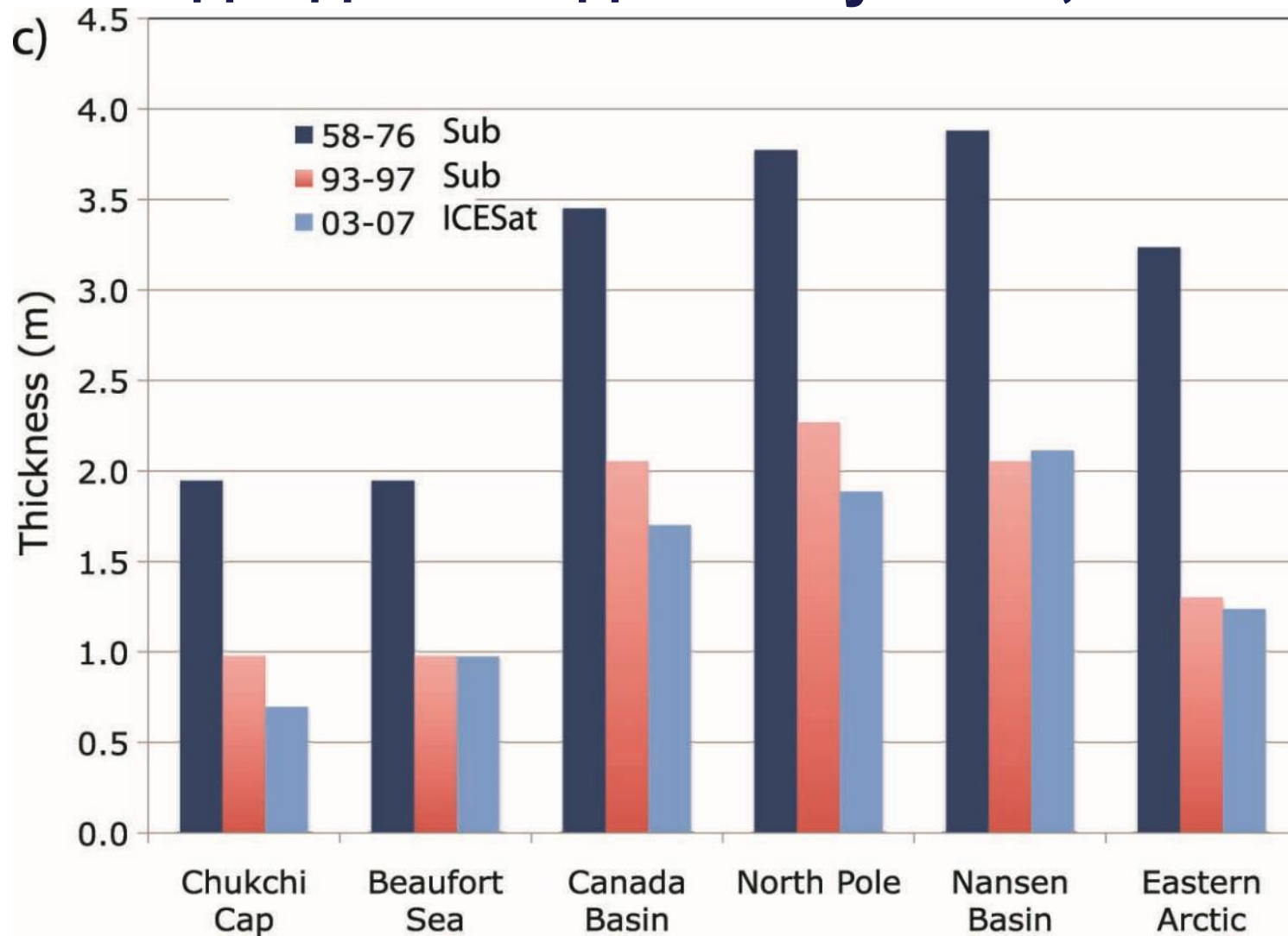
NOAA, 2015



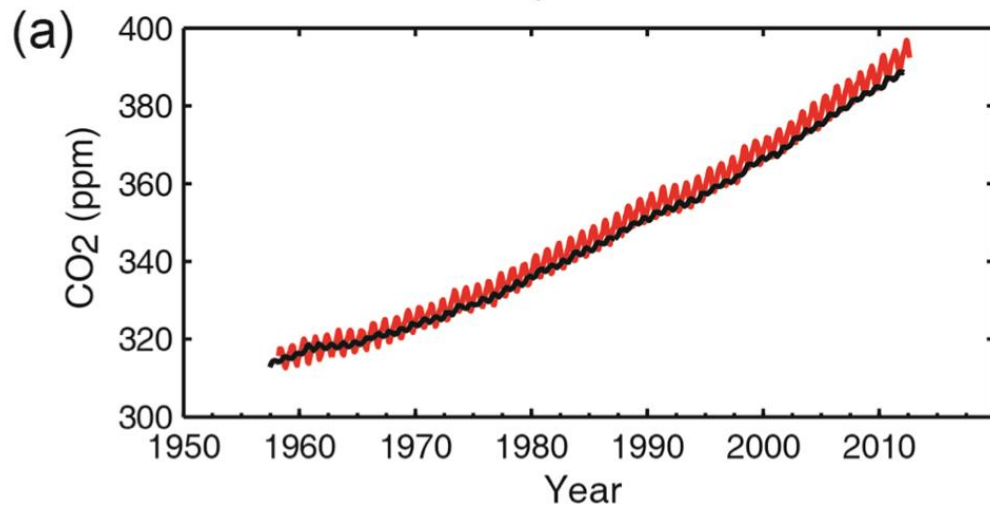
(2-ой Оценочный доклад..., 2014)

Толщина льда в Арктике

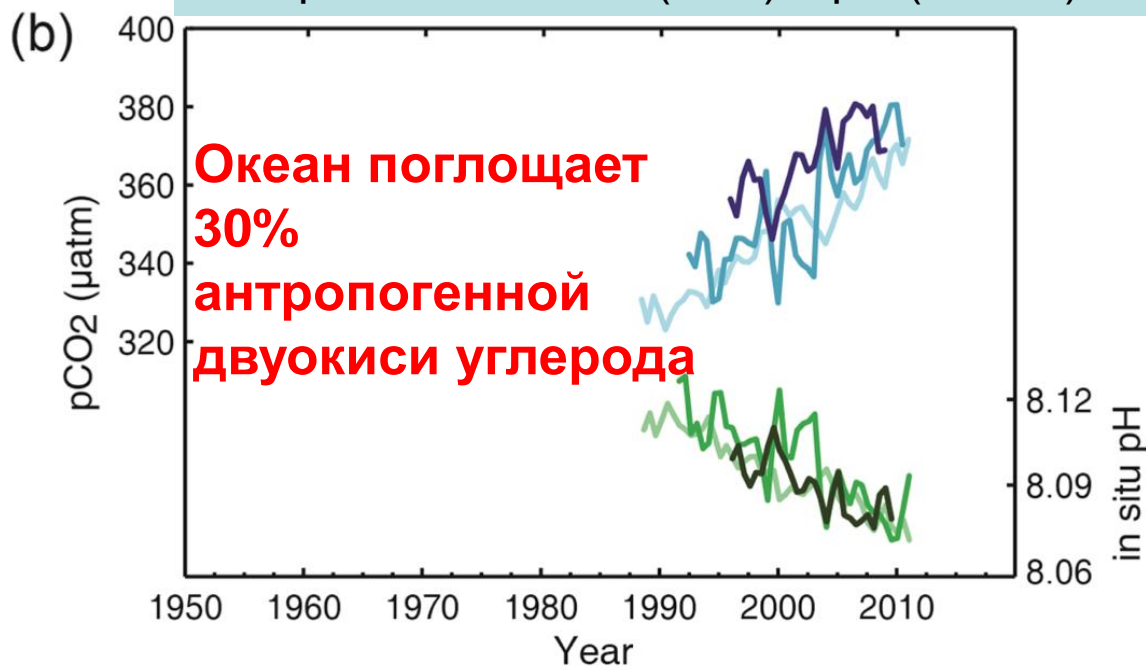
Подводные лодки и спутники, 1958-2007

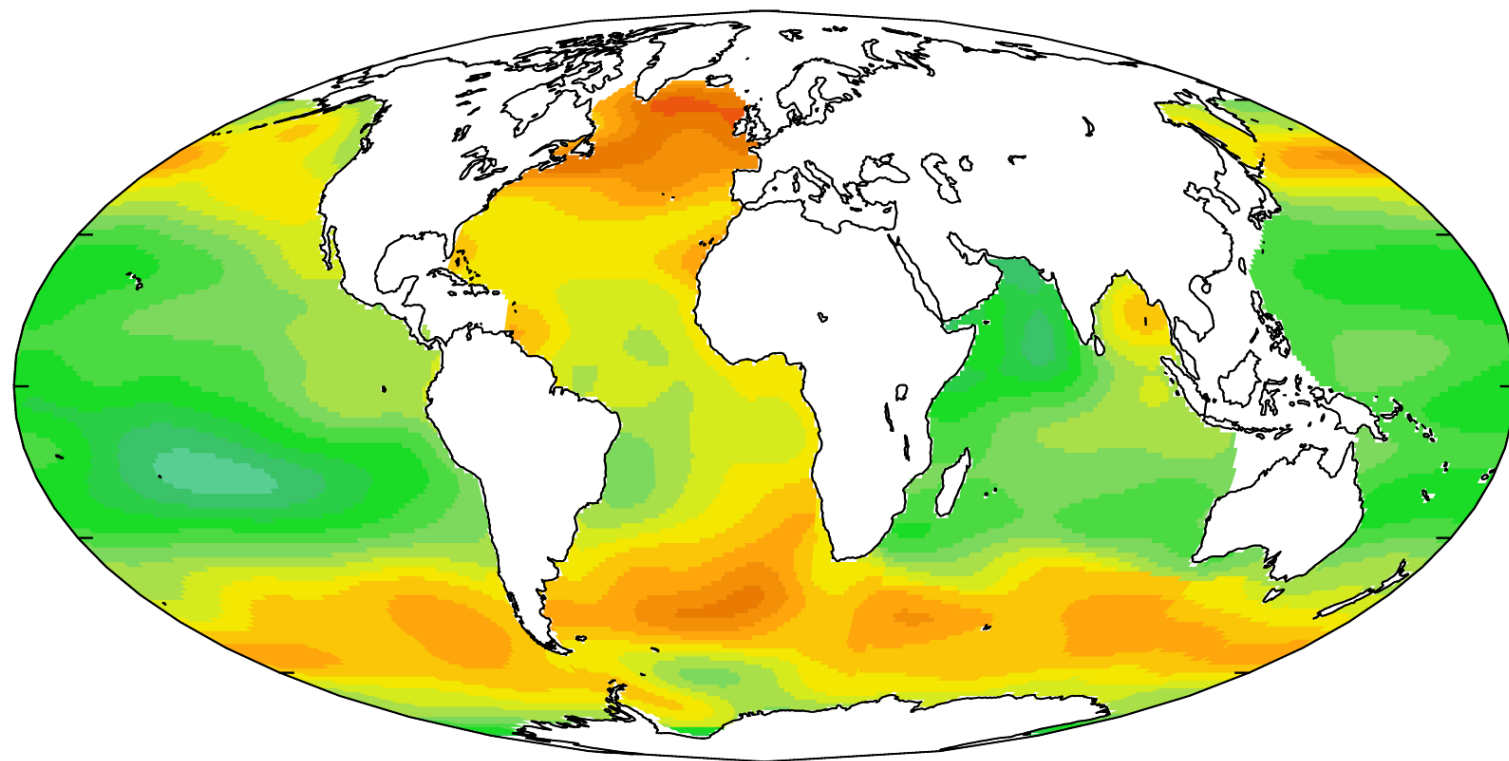


Концентрации CO₂ на Гавайях (красн.) и на Южном полюсе (черн.)

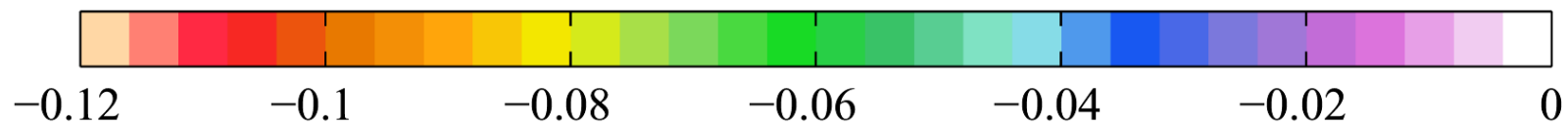


Парциальное давление растворенного углекислого газа на поверхности океана (син.) и pH (зелен.) океанской воды



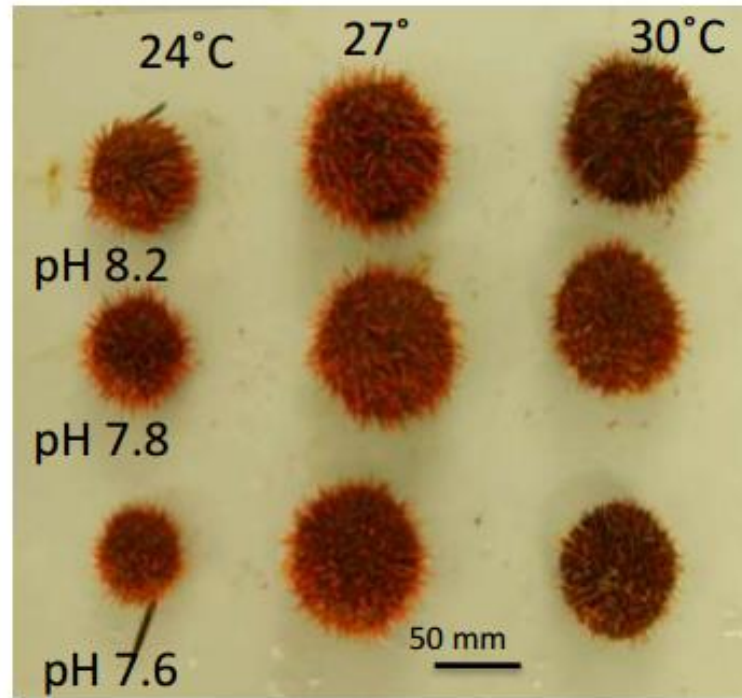


Δ sea-surface pH [-]



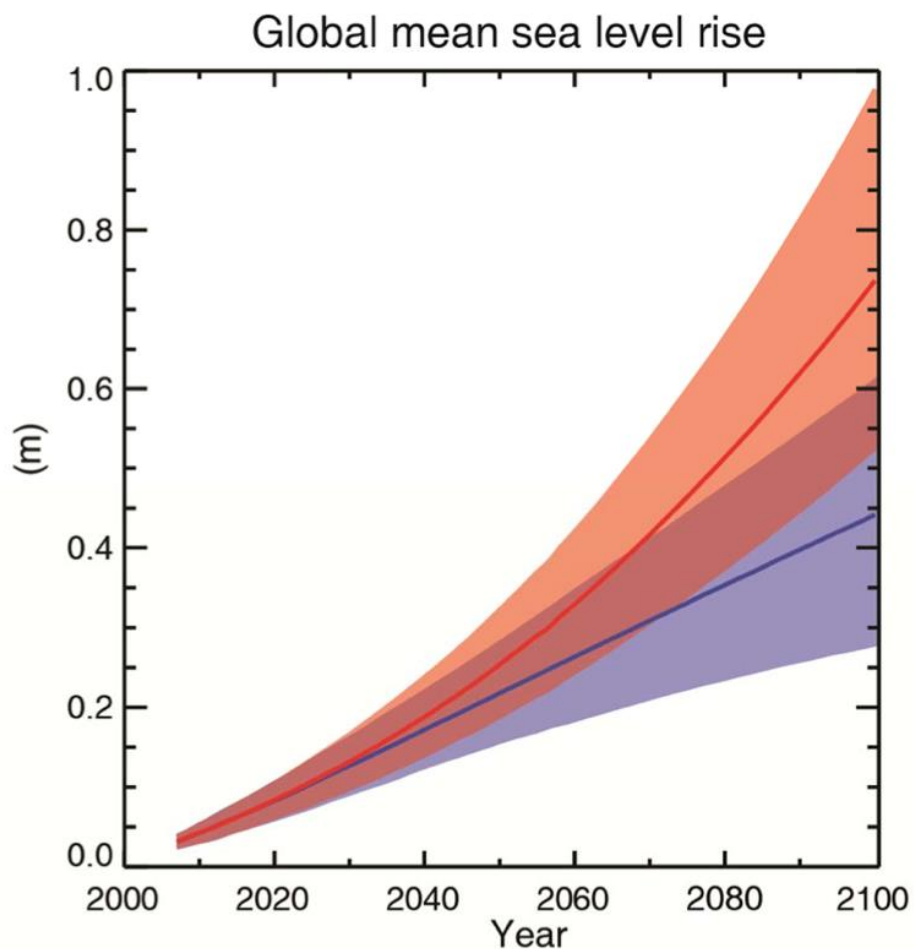
Изменение pH в поверхностном слое, (1700 - 2000)

Подкисление океана

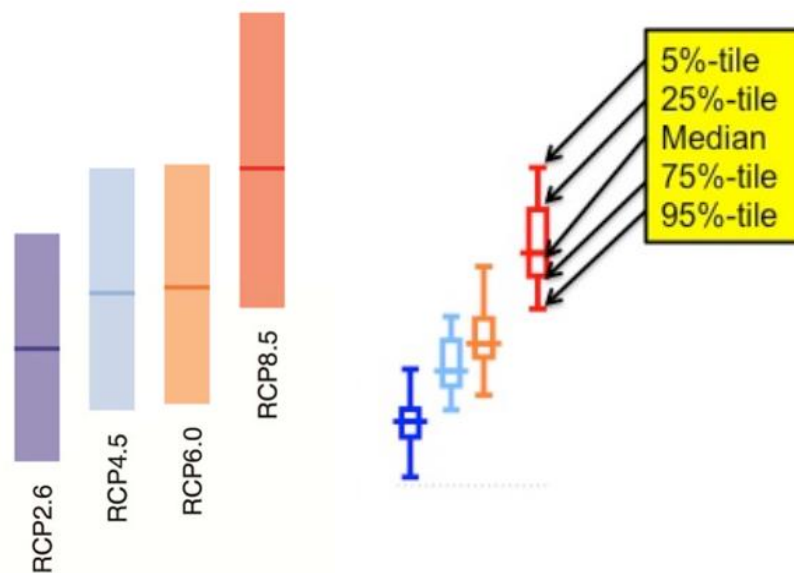


Морские ежи: совместный эффект pH и температуры (Burgne, 2015):
подкисление уменьшает размеры, потепление компенсирует этот эффект

Сценарии



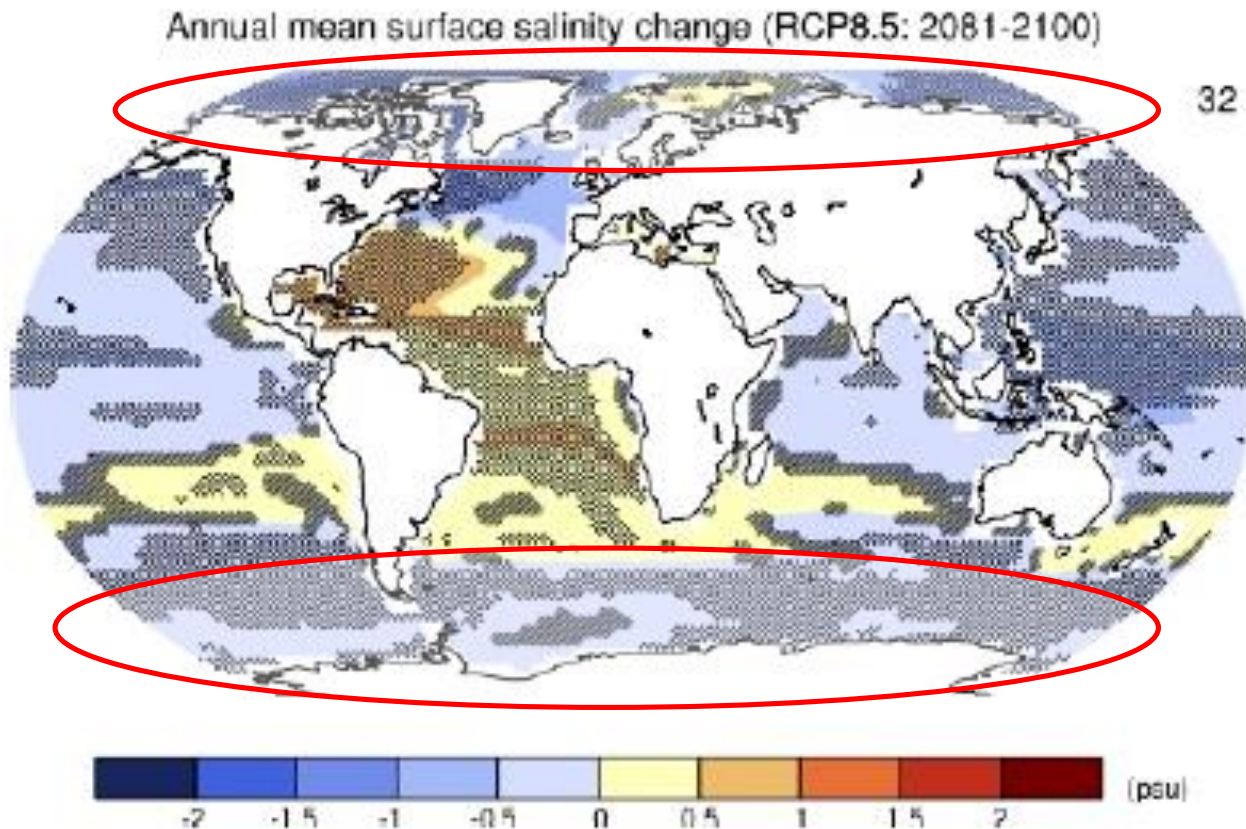
Mean over 2081–2100



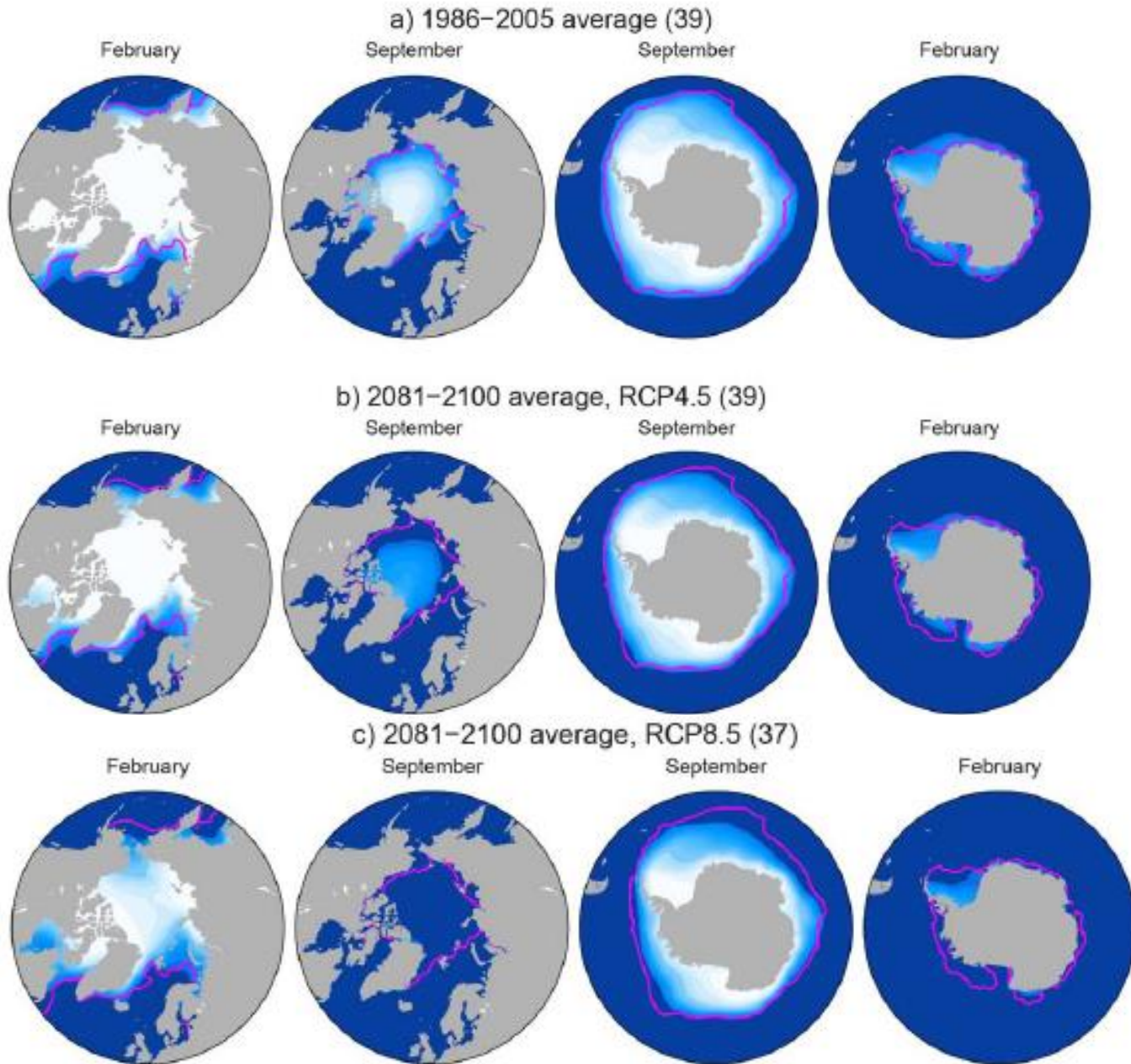
Проекции поднятия глобального среднего уровня моря за 21 век относительно 1986-2005 по комбинации ансамбля CMIP5 для проекций RCP2.6 и RCP8.5.

Интервал, котовый оценен как вероятный, показан заливкой. Аналогичные интервалы для среднего за 2081-2100 для всех RCP сценариев даны цветными вертикальными полосами, с соответствующей медианой в виде горизонтальной линии.

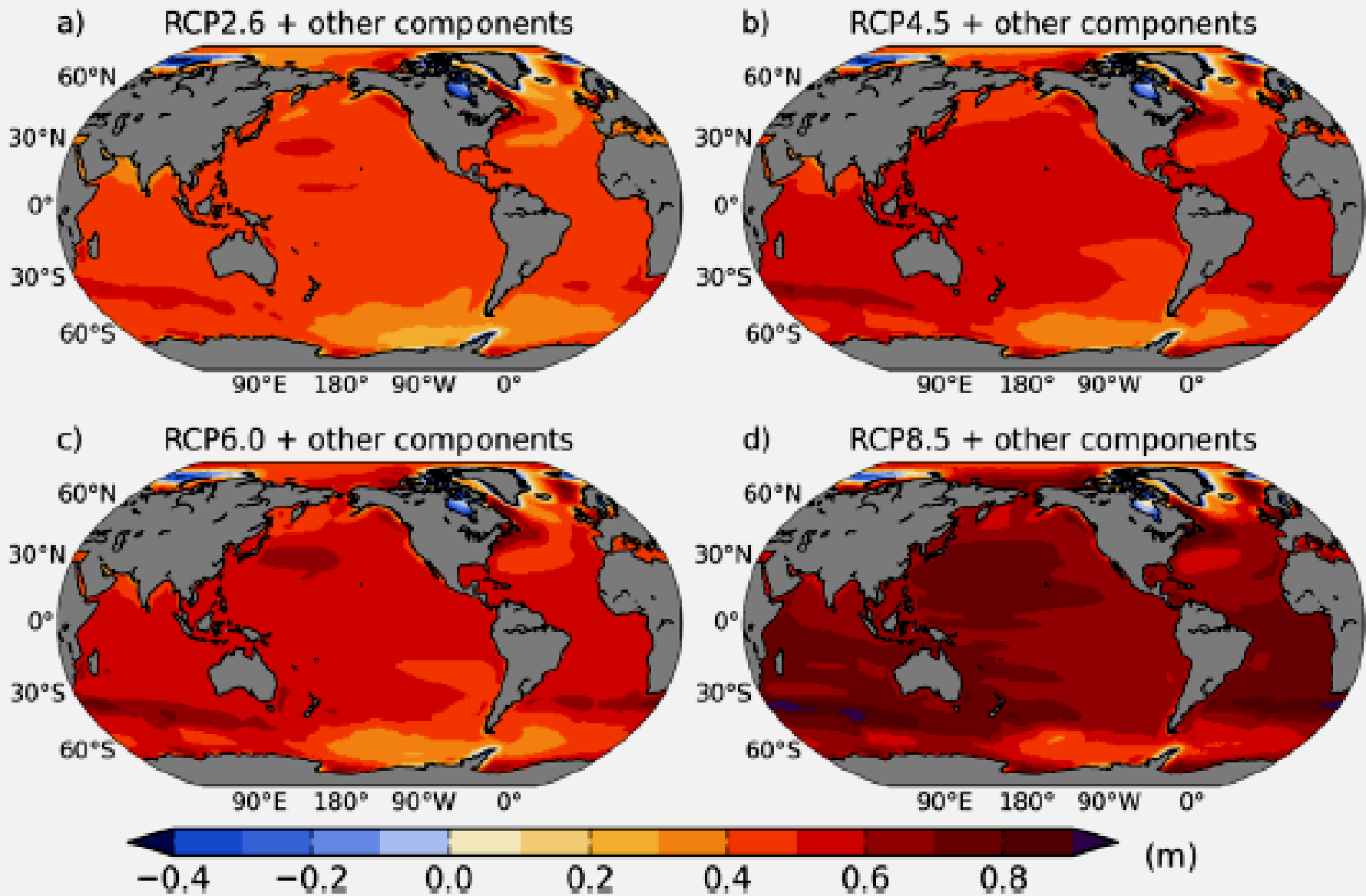
Модельные проекции: изменения солёности на поверхности океана



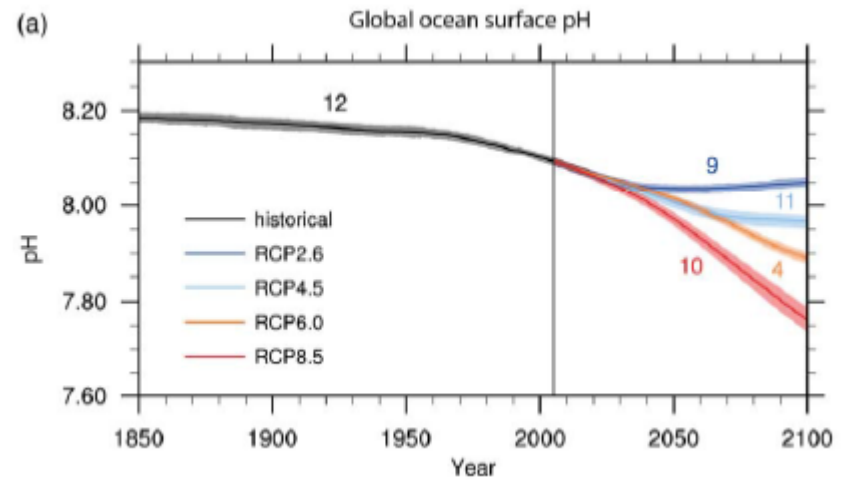
Ледовый покров



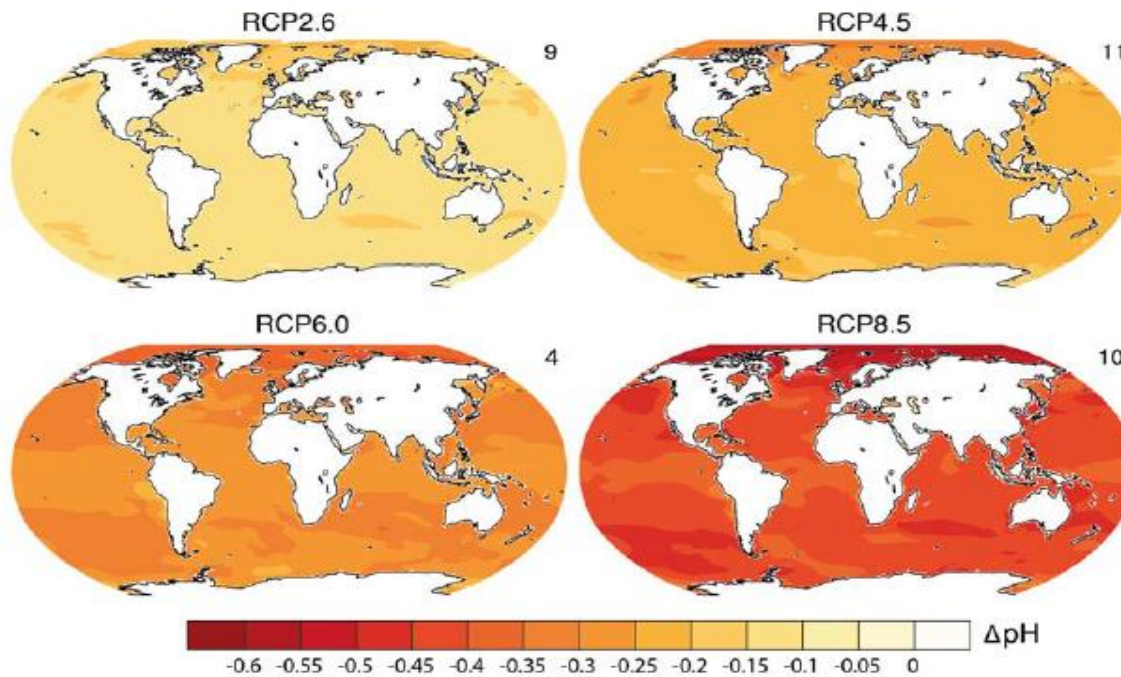
Уровень океана



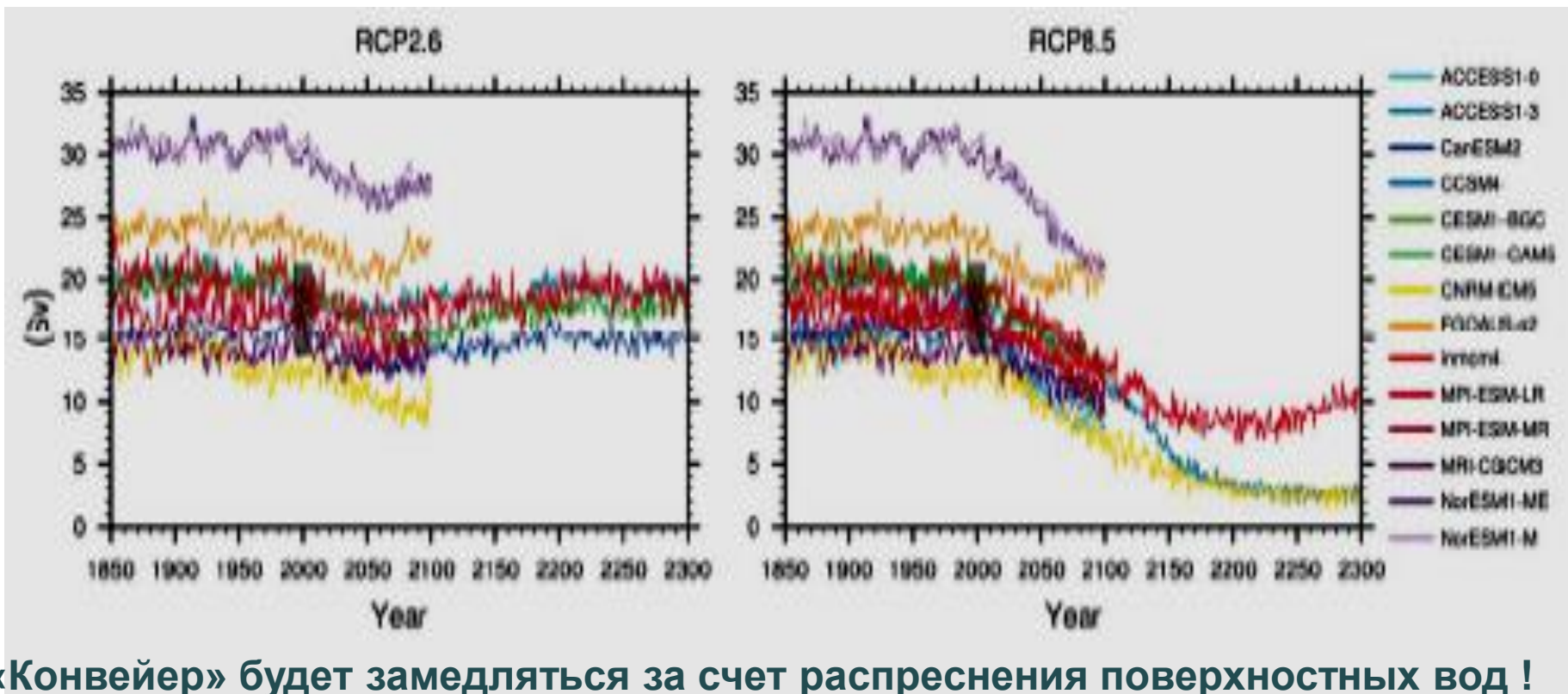
pH



(b) Change in ocean surface pH (2081-2100)



Расход северо-атлантических глубинных вод в на 30 с.ш. – нижнее звено глобального конвейера

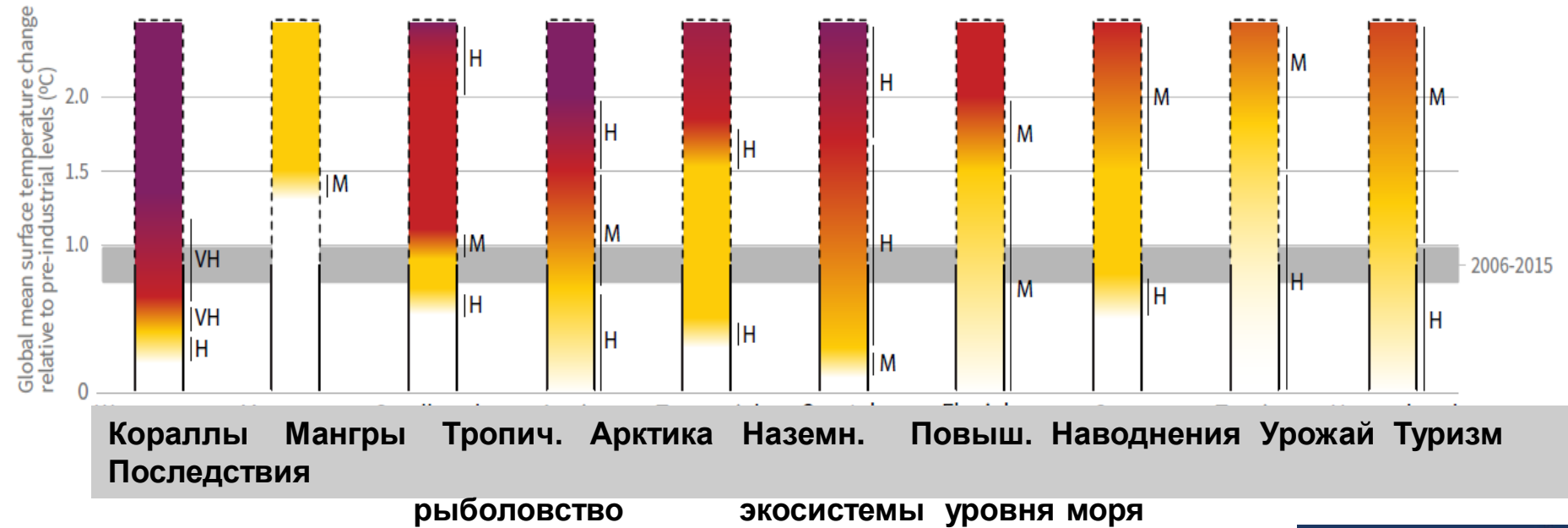


«Конвейер» будет замедляться за счет распреснения поверхностных вод !

Последний доклад МГЭИК:

Глобальное потепление на 1,5 °С - октябрь 2018

Воздействия и риски для природы и хозяйства



жары

Confidence level for transition: L=Low, M=Medium, H=High and VH=Very high

Уровень дополнительного риска, вызванного изменением климата

Необнаруживаемый Умеренный Высокий Весьма высокий



IPCC, 2018

Благодарю за внимание!



www.nral.org

