

Ocean a klimat:

wczoraj, dziś i jutro

Wykład 5:

Północny Atlantyk – kuźnia klimatu
(*cyrkulacja termohalinowa*)

Jacek Piskozub

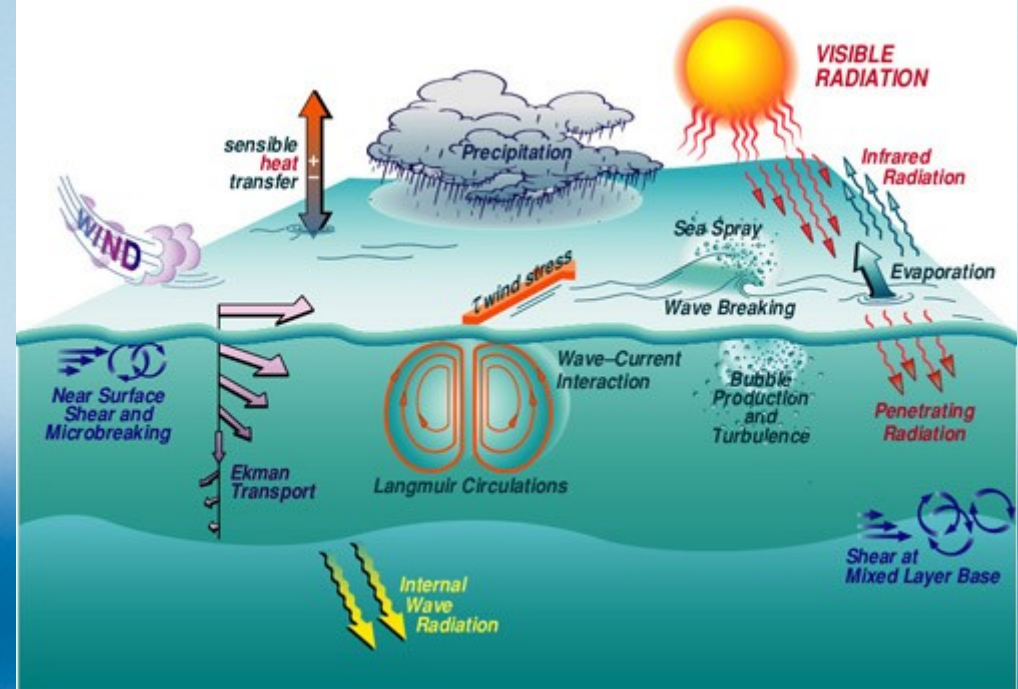
Studium Doktoranckie IOPAN, semestr zimowy 2016 /17r.

<http://www.iopan.gda.pl/~piskozub/klimat/>

Jacek Piskozub “Klimat a ocean: wczoraj, dziś i jutro”, kurs wykładów dla doktorantów X 2016 – I 2017

- ✓ Maszyna klimatyczna Ziemia (*zmienność w skali geologicznej*)
- ✓ Epoka lodowa w której żyjemy (*zmienność w skali astronomicznej*)
- ✓ Gwałtowne zmiany klimatu (*deglacjacja, zmienność “suborbitalna”*)
- ✓ Holocen: klimat, ocean a cywilizacja, (*stała słoneczna i wulkanizm*)
- ✓ **Północny Atlantyk – kuźnia klimatu (*cyrkulacja termohalinowa*)**
- ✓ Zmienność klimatu w skali dekadalnej (*AMO, NAO, PDO*)
- ✓ Tropiki a zmienność klimatu (*ENSO, huragany, monsuny*)
- ✓ Aerosol: wielka niewiadoma klimatyczna
- ✓ Gazy o znaczeniu klimatycznym (*cykl węgla, CO₂, metan, DMS*)
- ✓ Globalne ocieplenie a ocean (*zmienność antropogeniczna*)
- ✓ Zmiany klimatyczne w rejonach polarnych

Wymiana ocean-atmosfera



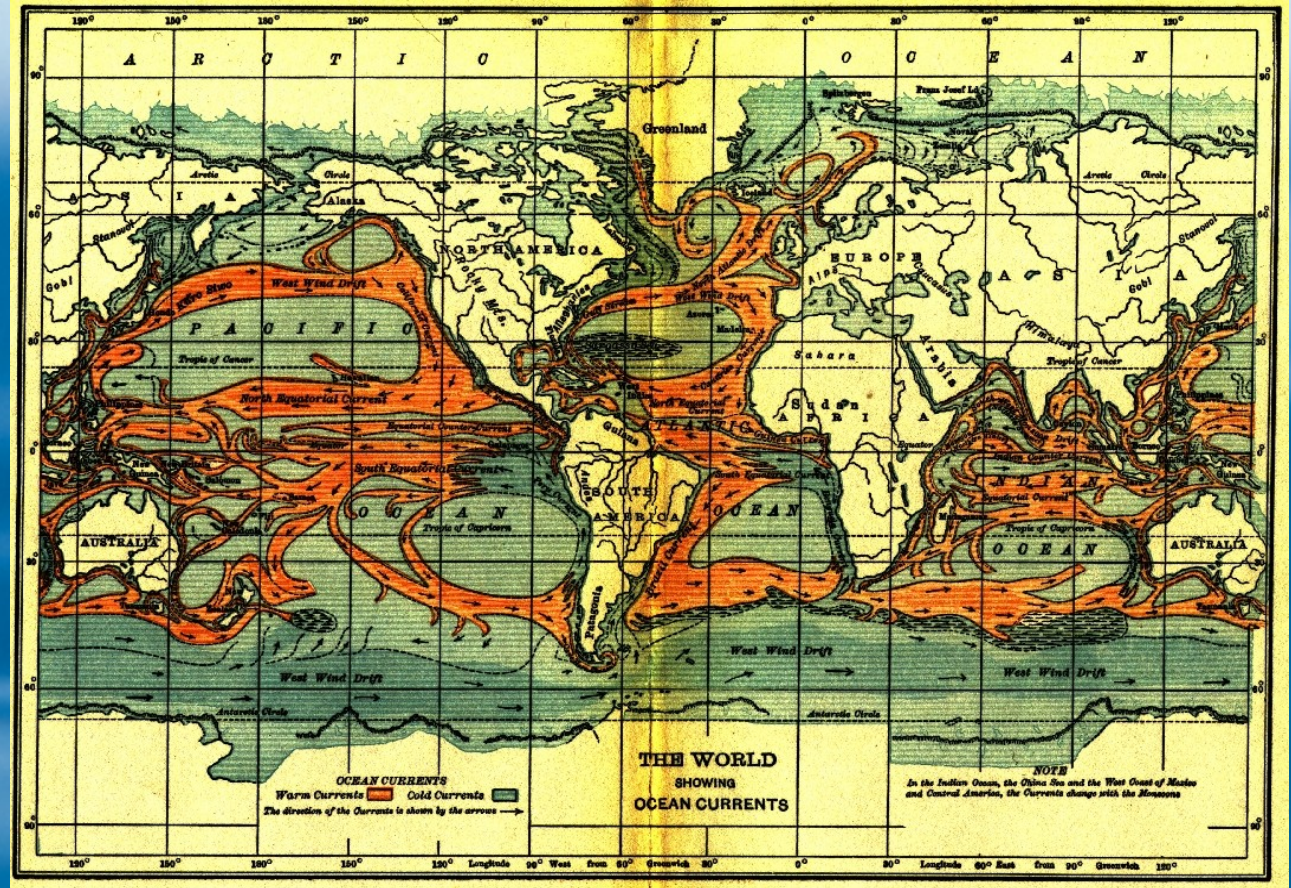
Na powierzchni oceanu występują następujące strumienie istotne dla klimatu:

- **Ciepło:** Istotnymi składowymi strumieni ciepła na powierzchni oceanu są ciepło wyczuwalne (sensible heat), ciepło utajone (latent heat), radiacja krótkofalowa pochodząca ze Słońca oraz termiczna radiacja długofalowa (w górę i w dół).
- **Pęd:** Atmosfera oddziałuje na oceanu poprzez siłę styczną związaną z prędkością wiatru wymuszając wielkoskalową cyrkulację oceaniczną.
- **Wilgotność:** (dla oceanografów "słodka woda") Ocean zyskuje słodka wodę dzięki opadom atmosferycznym a traci przez parowanie ("P - E")
- **Aerozol i gazy:** produkcja aerozolu morskiego i wymiana gazów wpływają istotnie na klimat Ziemi (patrz następne wykłady)

Mechanizmy napędowe cyrkulacji oceanicznej

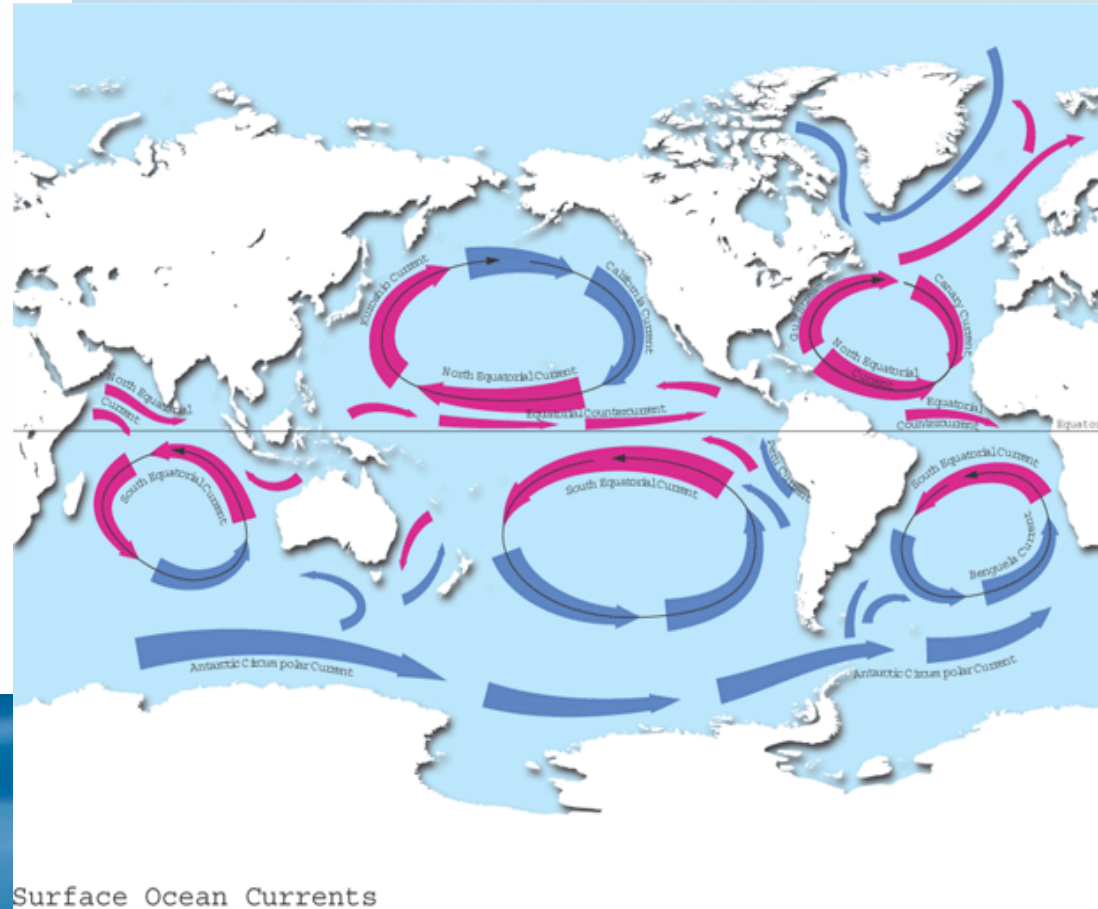
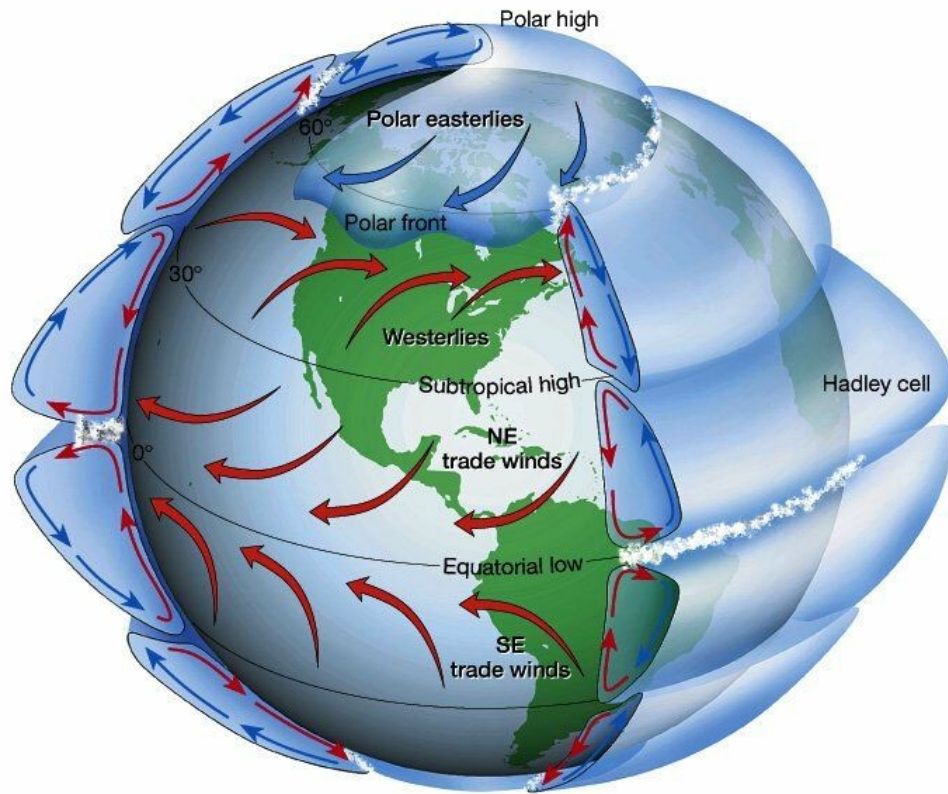
Istnieją trzy źródła energii napędzającej cyrkulację oceaniczną:

- Wiatr
- Wymiana ciepła
- Pływy



Potencjalny czwarty mechanizm, strumień ciepła geotermalnego (globalnie średnio 0.075 W/m^2), nie wydaje się być istotny gdziekolwiek w oceanie z wyjątkiem fragmentów grzbietów oceanicznych o intensywnym wulkanizmie

1. Cyrkulacja napędzana wiatrem

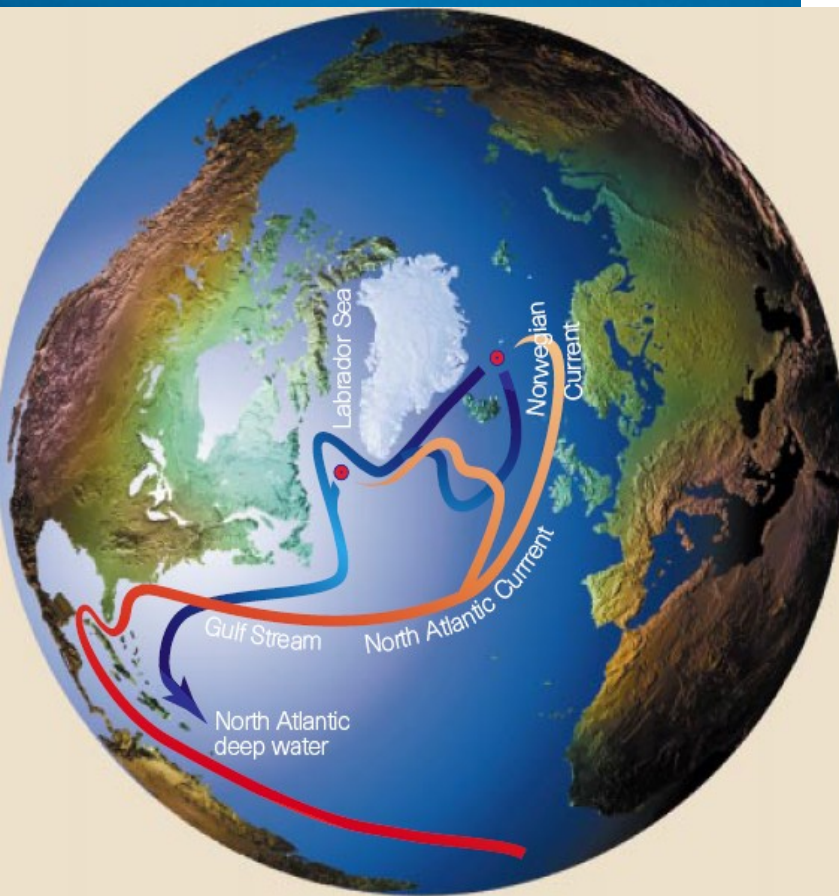
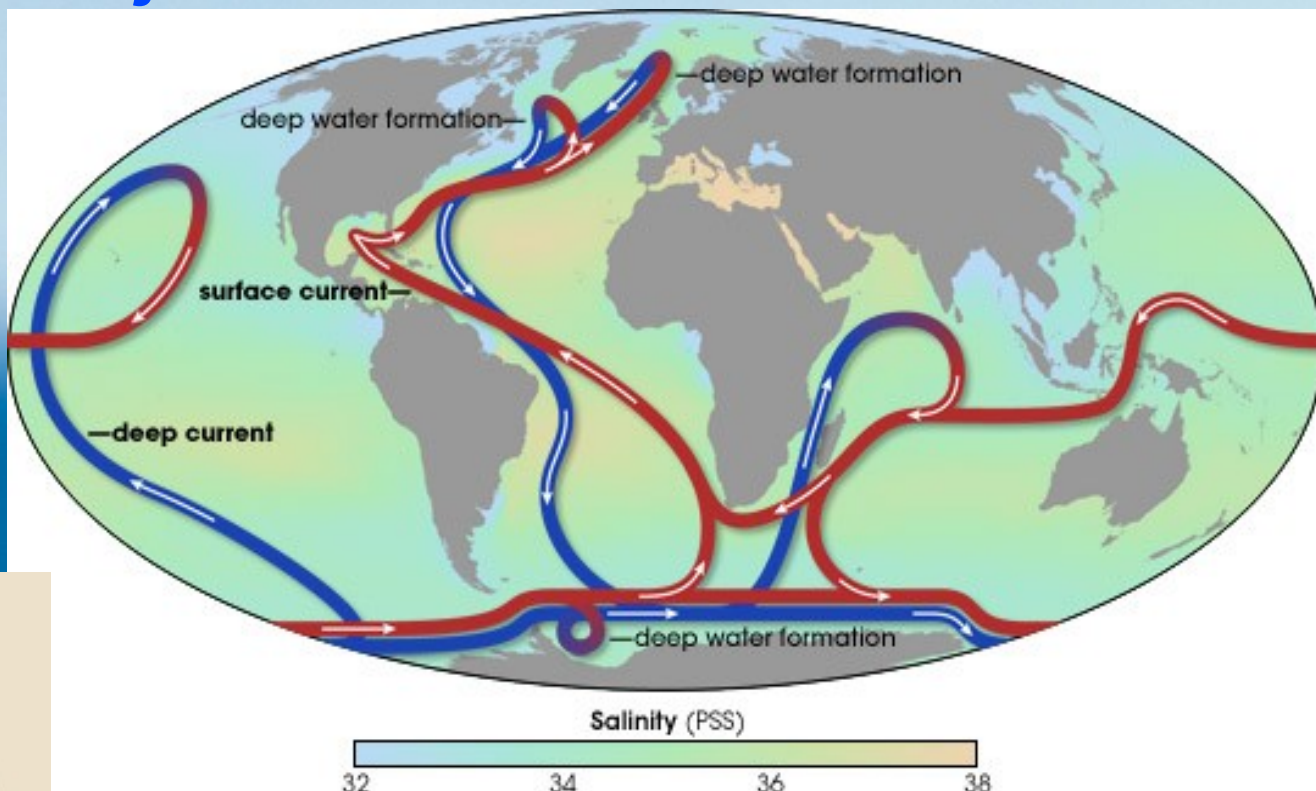


Wiatr dostarcza większości energii cyrkulacji oceanicznej przemieszczając masy wodne przy pomocy transportu Ekmana. Odpowiedź oceanu wymuszona koniecznością równowagi między siłami grawitacji a siłą Coriolisa (geostrofia) tworzy charakterystyczne „wiry” (gyres) umiarkowanych szerokości oraz prąd wokółantarktyczny.

2. Cyrkulacja termohalinowa

The thermohaline circulation is that part of the ocean circulation which is driven by fluxes of heat and freshwater across the sea surface and subsequent interior mixing of heat and salt.

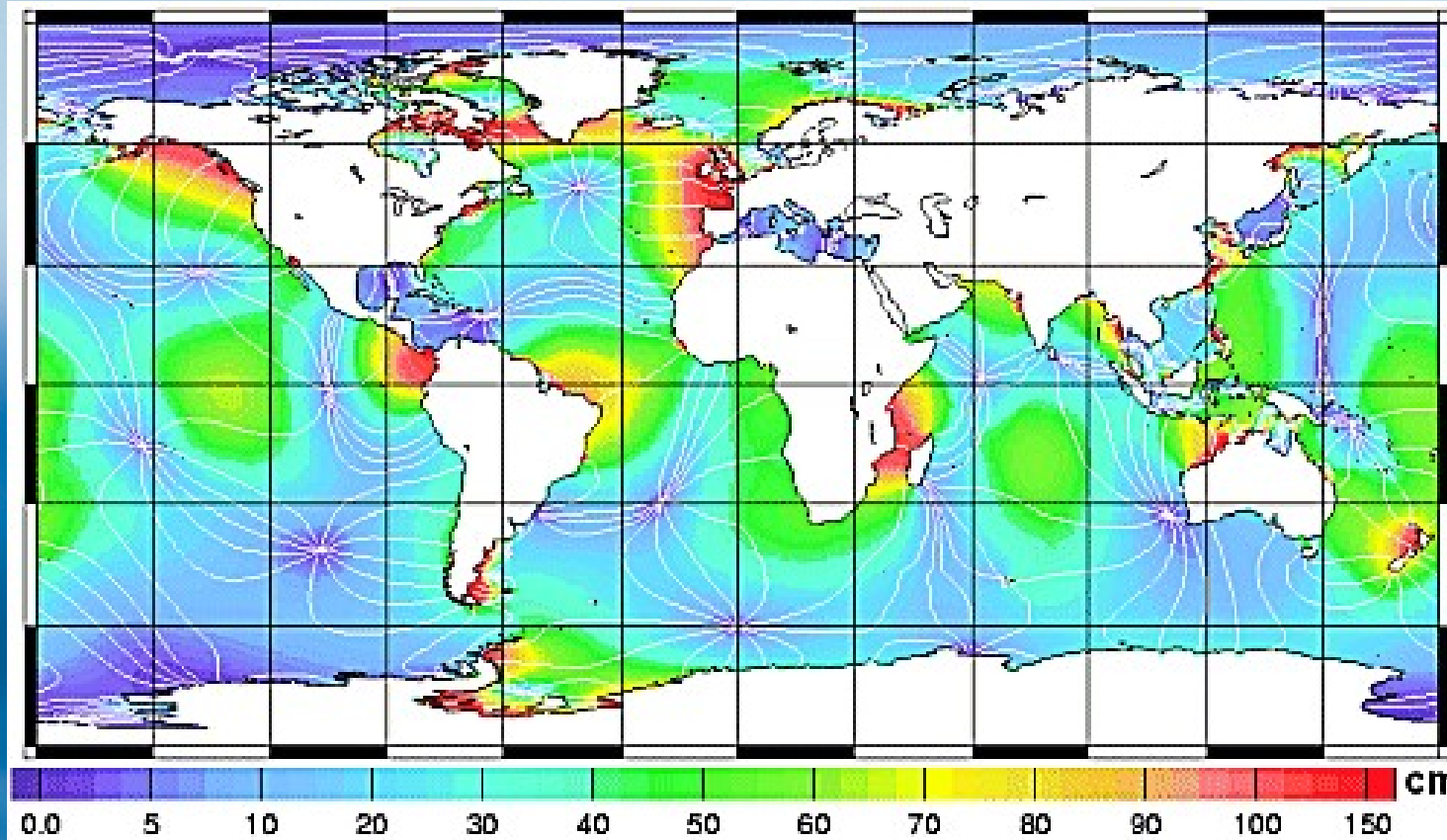
Stefan Rahmstorf, 2006



Cyrkulacja termohalinowa (THC) jest efektywnym mechanizmem transportu ciepła z tropików do Północnego Atlantyku.

Jest także źródłem wód głębinowych wentylujących ocean Światowy. THC jest głównym mechanizmem wymiany gazów (w tym CO_2) pomiędzy wodami powierzchniowymi a głębinowymi.

3. Pływy



Amplituda składowej M2 pływów (w cm) obliczona modelem FES99. Linie kotydalne (cotidal) wskazują fazy co 30 stopni spotykają się w punktach amfidromicznych (amphidromic) gdzie amplituda składowej pływów wynosi 0. (Legos/CNRS)

Łączne przyciąganie grawitacyjne Księżyca i Słońca of the Moon and the Sun tworzy prądy pływowe w oceanach Ziemi. Pływy M2, spowodowane przyciąganiem “idealnego” Księżyca na kołowej orbicie w płaszczyźnie równika. Mają one okres 12 godzin. Fala K1, z cyklem dobowym spowodowana jest różnicą deklinacji Słońca i Księżyca.

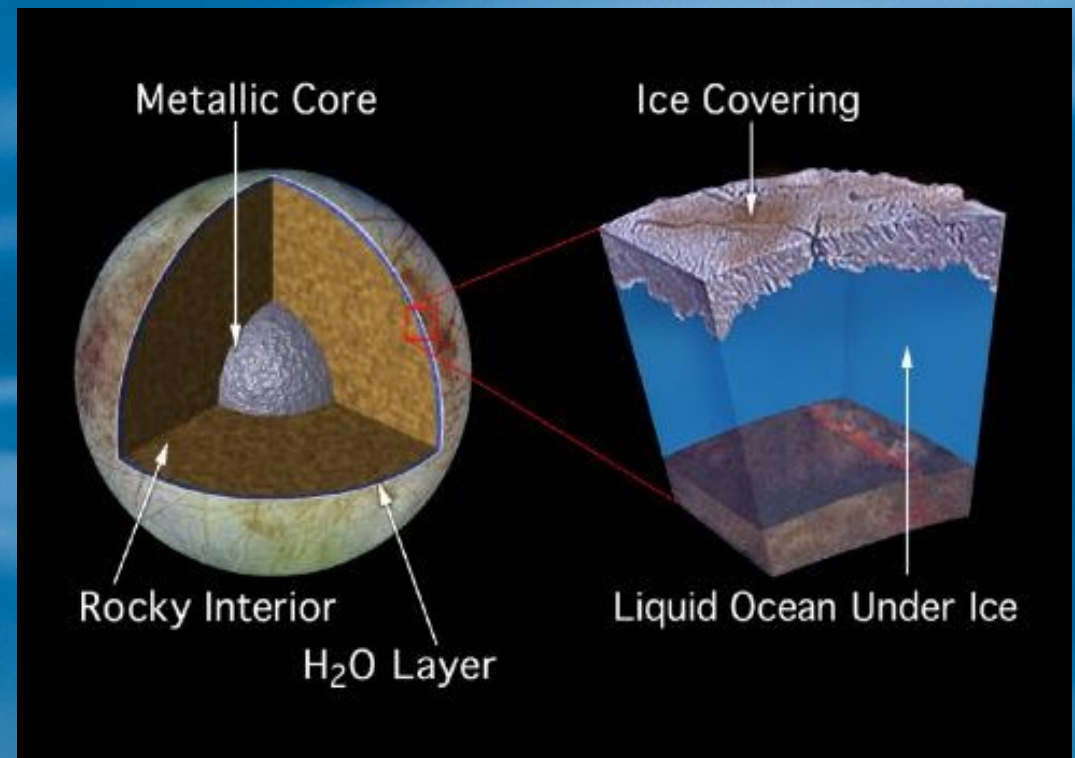
http://www.jason.oceanobs.com/html/applications/marees/200010_uk.html



Czy możemy sobie wyobrazić ocean bez wymiany masy, pędu i energii z atmosferą?

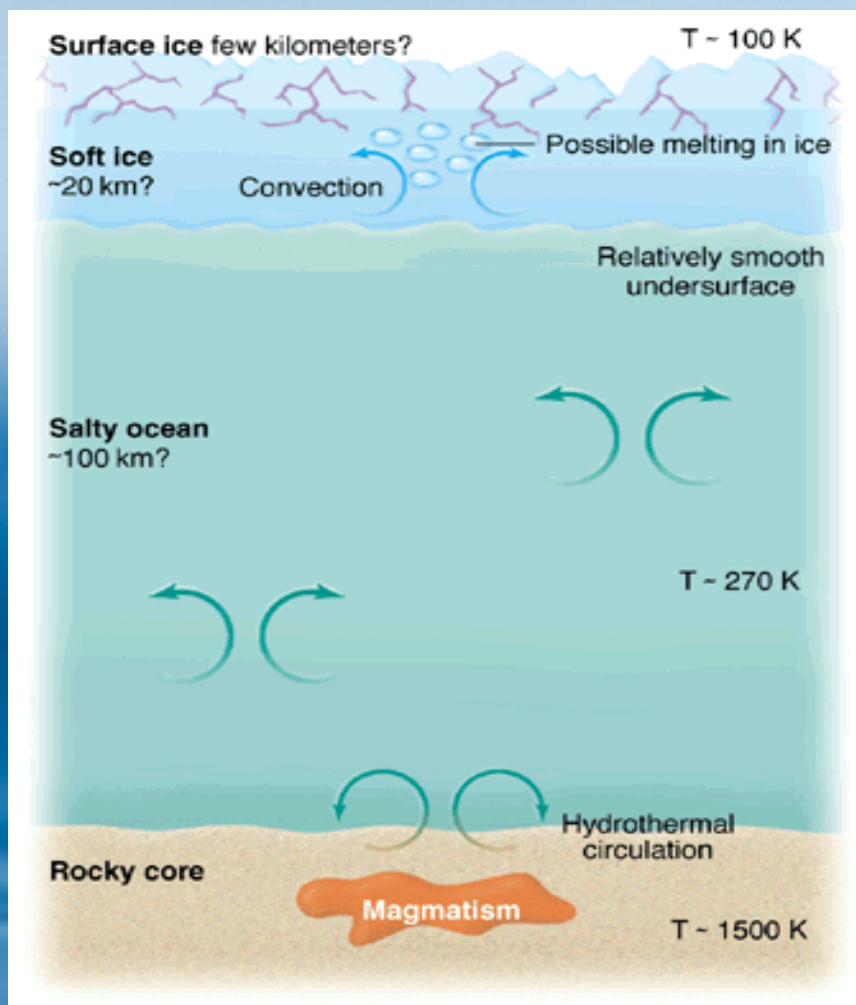
Tak, możemy. Jest możliwe, że Europa, księżyc Jowisza posiada ocean pod grubą stałą powłoką lodową. Jest to prawie idealny model oceanu bez wymiany z atmosferą.

Jak by wyglądała w nim cyrkulacja?



Europa być może posiada ocean o głębokości 100 km pokryty ok. 30 km lodu. (NASA)

Europa: cyrkulacja oceaniczna bez kontaktu z atmosferą?

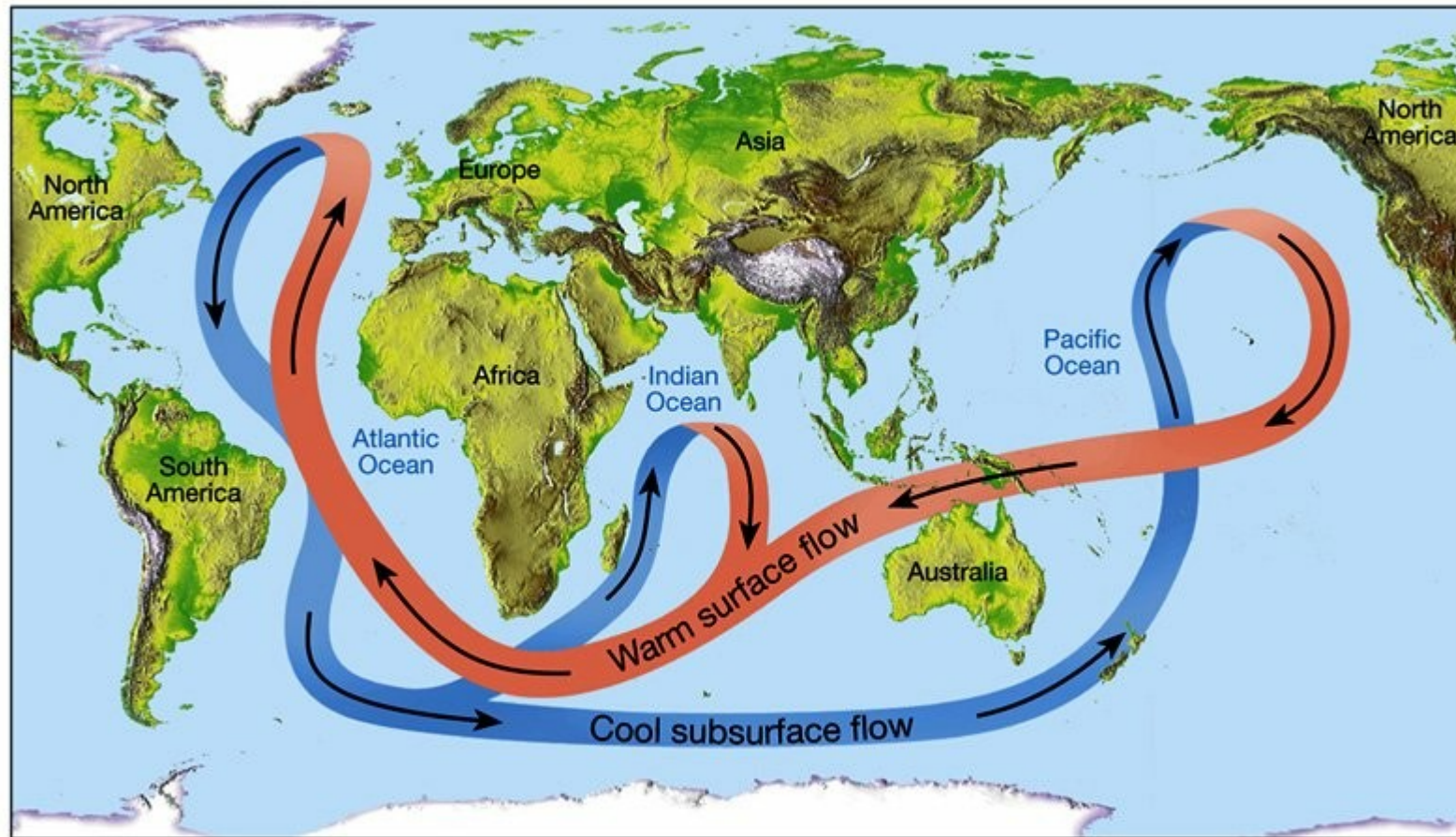


Artystyczna wizja przyszłej misji “oceanograficznej” na Europie. (NASA)

Możliwa cyrkulacja oceanu Europy
(Stevenson 2000, Science)

Bez wymuszenia wiatrowego i bez cyrkulacji termohalinowej (brak wymiany ciepła i słodkiej wody z atmosferą), jedynymi formami cyrkulacji oceanu Europy mogą być pływy i ciepło europotermalne. Pływy nie będą jednak zbyt mocne gdyż Europa jest na orbicie synchronicznej (skierowana zawsze tą samą stroną do Jowisza), z okresem 3.5 dnia.

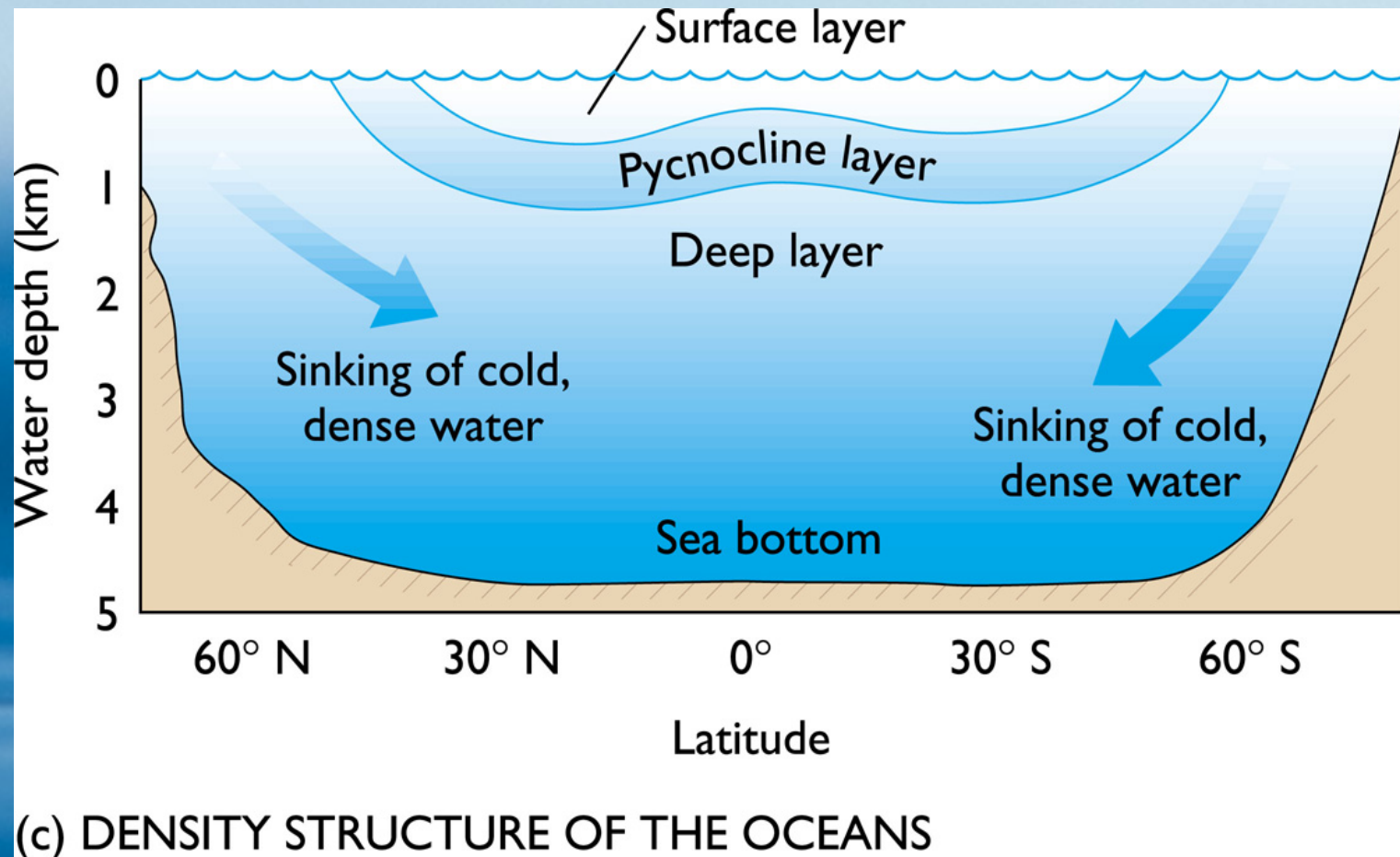
Cyrkulacja termohalinowa: popularny rysunek



Źródło: Science (niestety!)

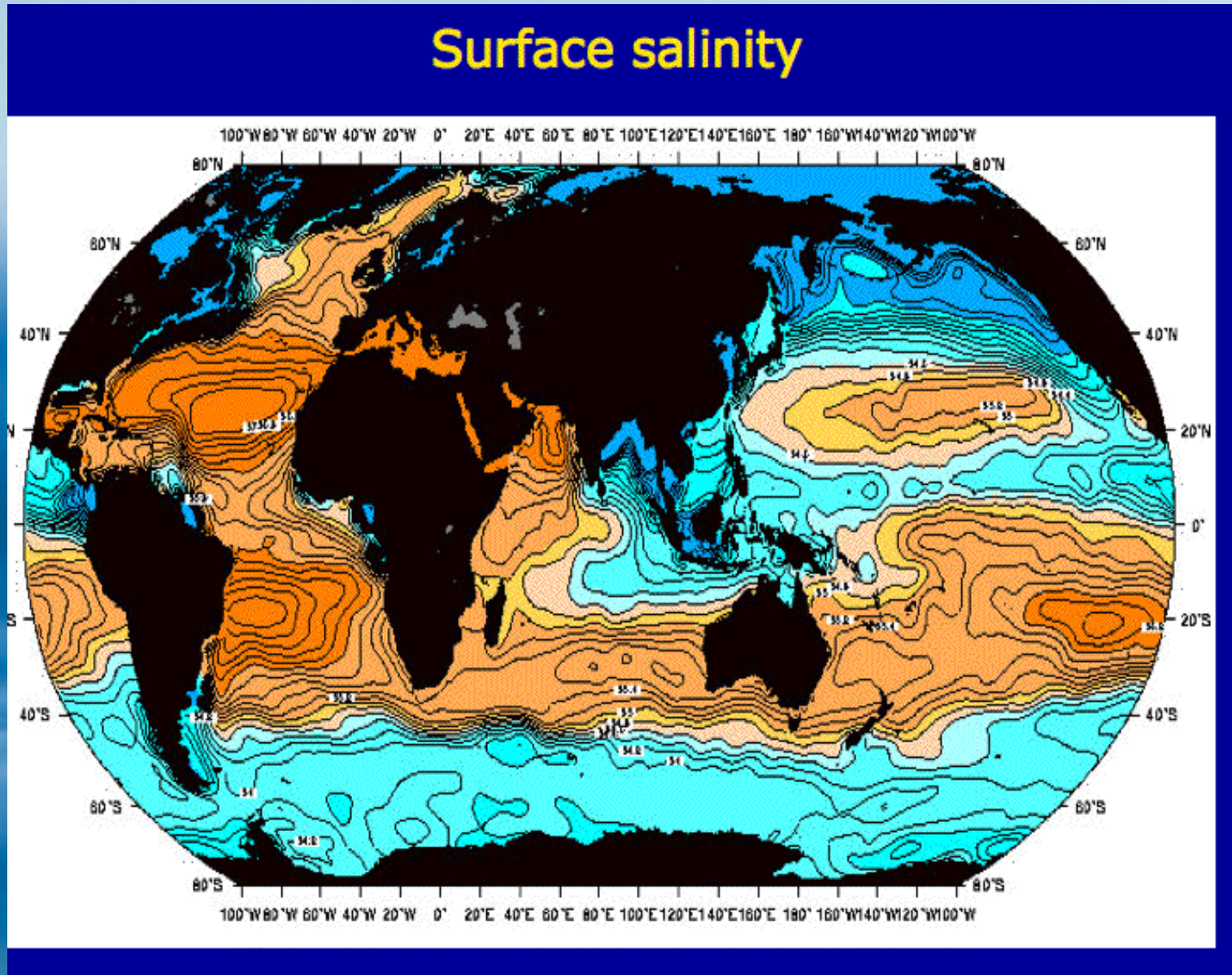
Co w nim złego? Prąd Zatokowy (Golfsztrom) płynie tu wzdłuż Afryki; prądy płyną wierzchem przez Nową Gwineę i Nową Zelandię; mamy tu chyba epokę lodową (woda głębinowa tworzy się na południe od Islandii), za to wcale nie tworzy się przy Antarktydzie (a powinna); brak prądu Wokółantarktycznego; istnieje jeden, jedyny pas transmisyjny (za duże uproszczenie).

Skąd się biorą wody głębinowe?



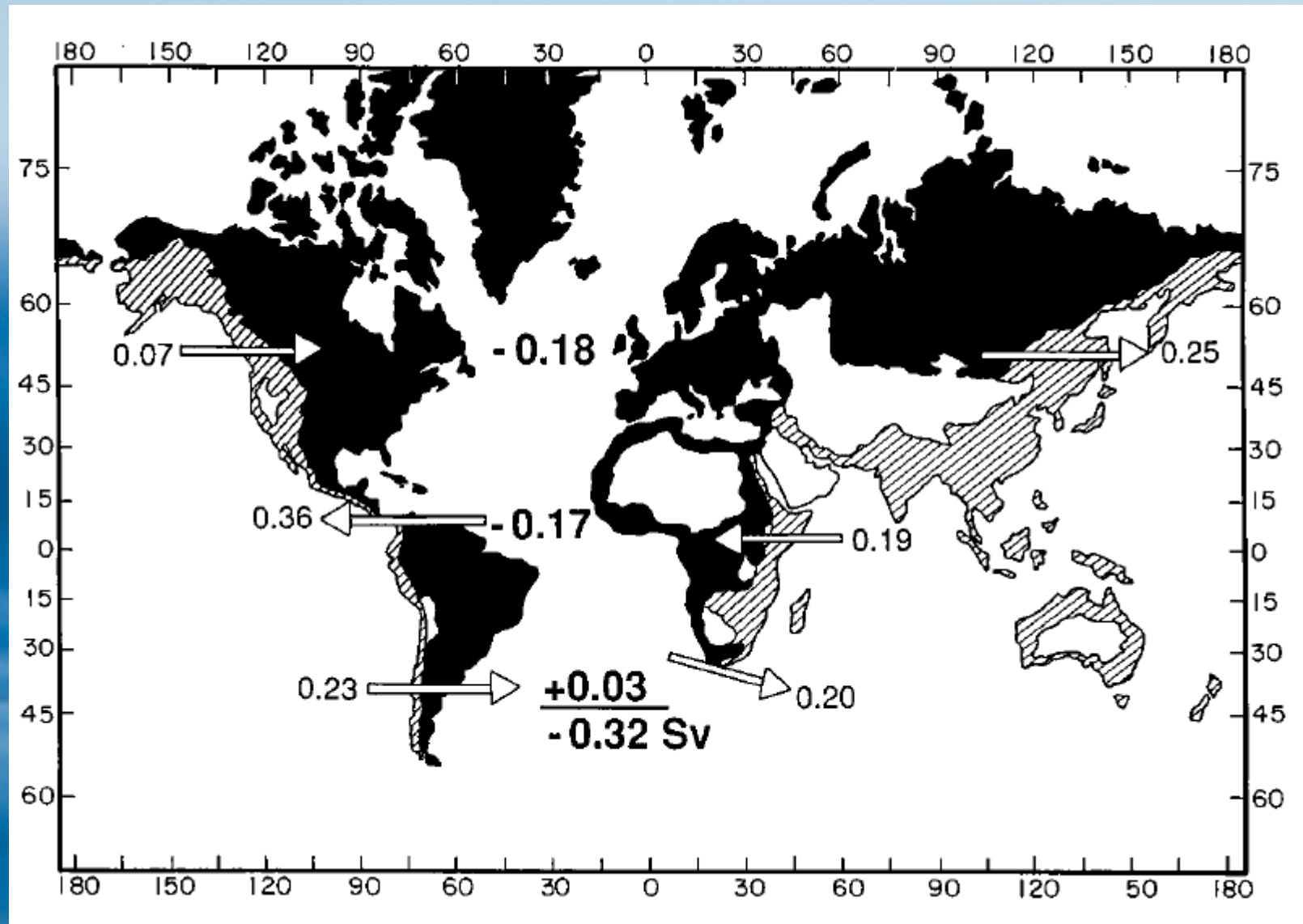
Wody głębinowe tworzą się w miejscach o największej gęstości wód powierzchniowych: małej temperaturze i dużym zasoleniu. Jedynymi kandydatami są słone morza subpolarne zimą (ale nie te nie pokryte lodem!)

Dlaczego wody głębinowe nie tworzą się na Pacyfku?



Pacyfik tam gdzie jest dość zimny jest za „słodki” na głęboką konwekcję (mieszanie pionowe). Morza wokółantarktyczne są umiarkowanie słone ale wody głębinowe tworzą się podczas tworzenia (słodkiego) lodu morskiego.

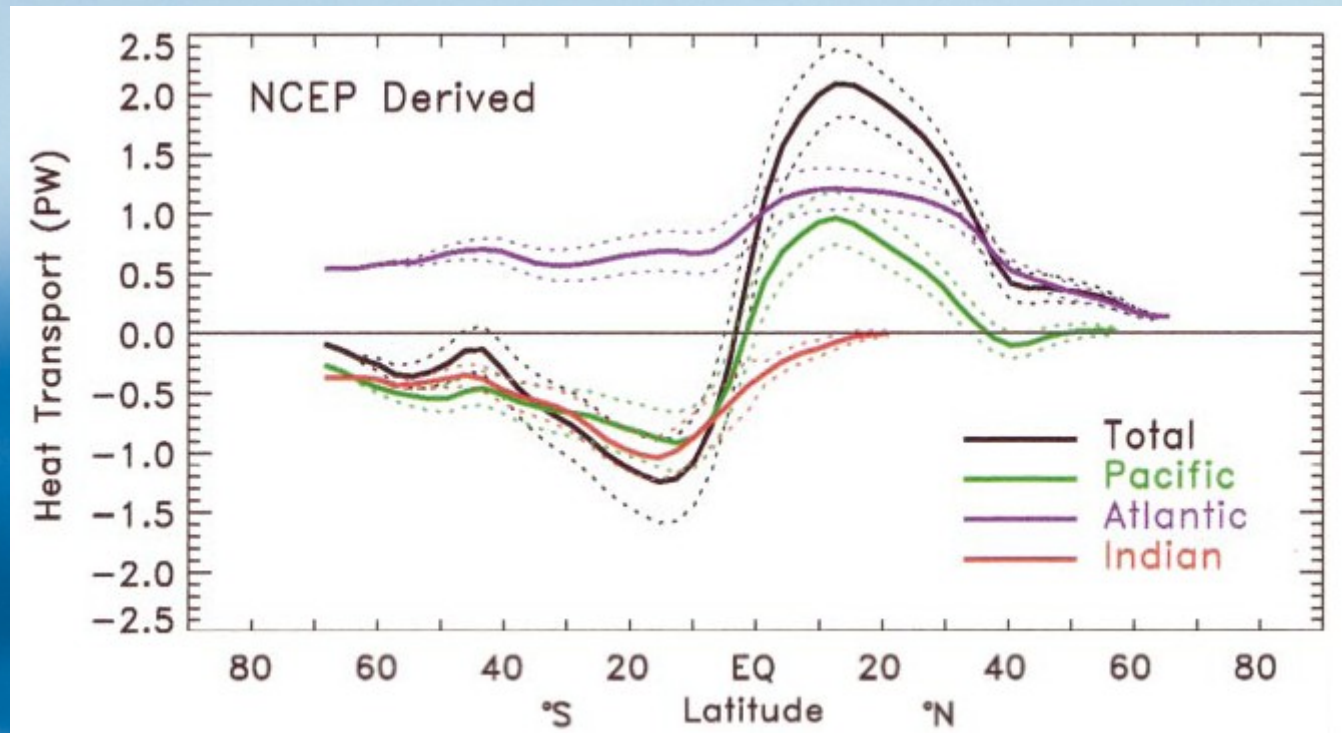
Dlaczego tak słony: bilans wody słodkiej w Atlantyku



Zlewisko Atlantyku ma ujemny bilans słodkiej wody wszędzie z wyjątkiem południowej części oceanu: chmury wynoszą więcej wody niż przynoszą z sąsiednich zlewisk.

Broecker 1997 (Science)

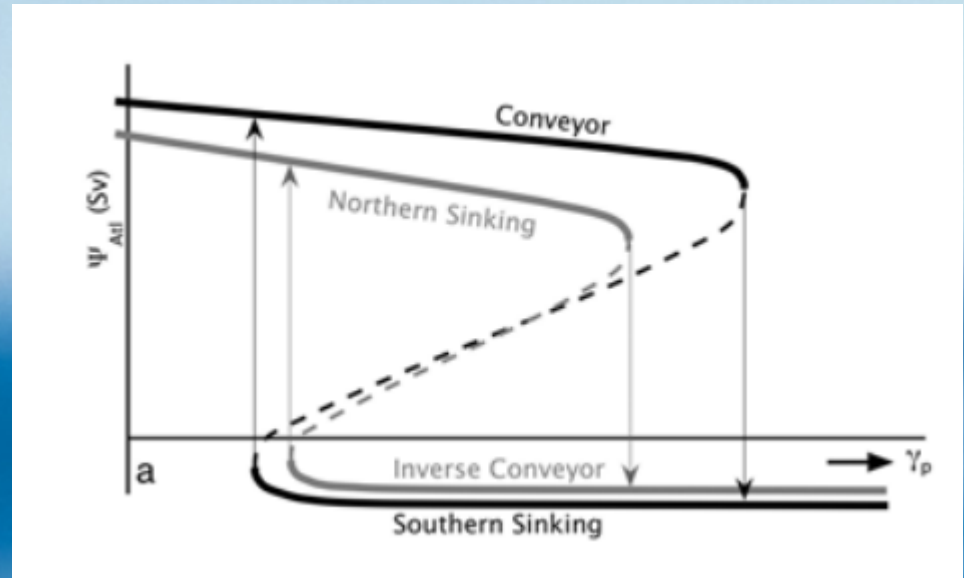
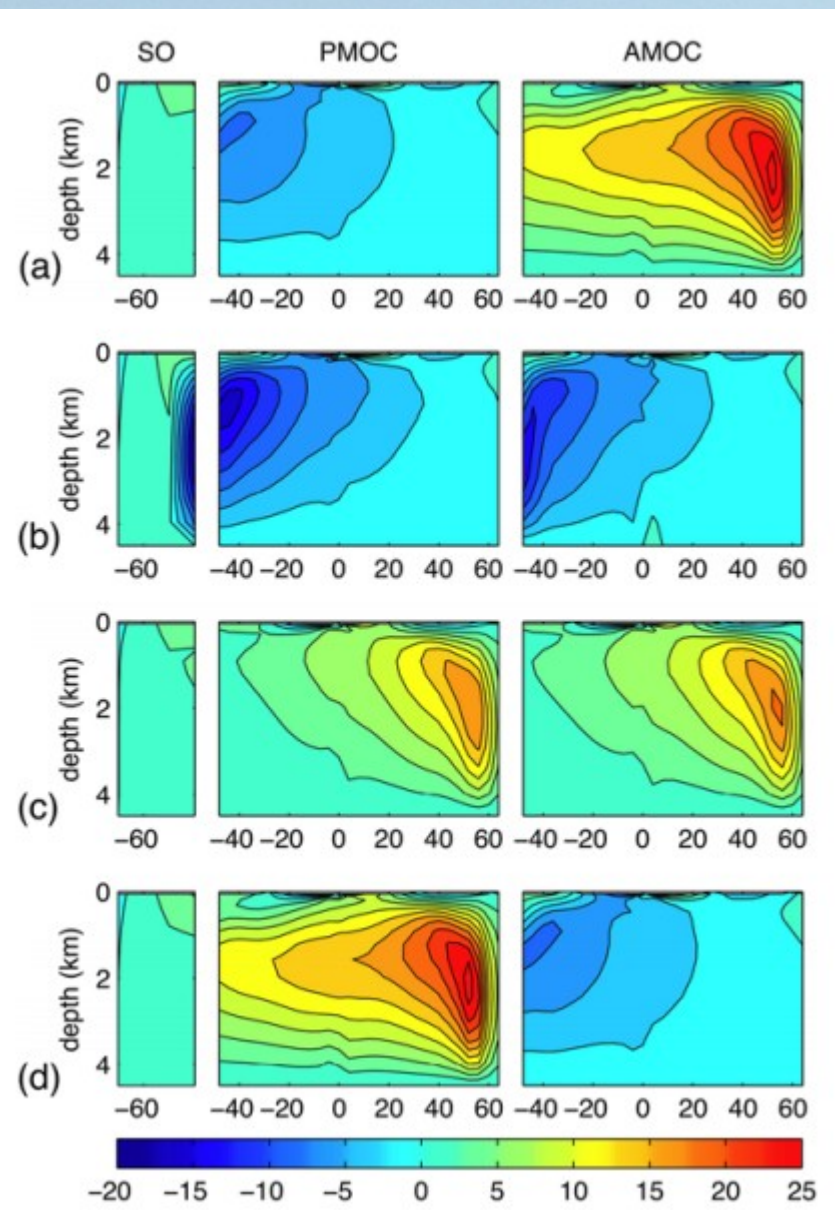
Południkowy transport ciepła: Atlantyk jest wyjątkiem



Oceaniczny transport ciepła (dodatni na północ, ujemny na południe).

Atlantyk jest oceanem gdzie dzięki THC transport ciepła na północ przekracza równik i osiąga wyższe szerokości niż a Pacyfiku. Oprócz monsunów na Oceanie Indyjskim (transport ciepła na południe) jest to główny mechanizm spinający klimat obu półkul.

Cztery możliwe mody globalnej cyrkulacji

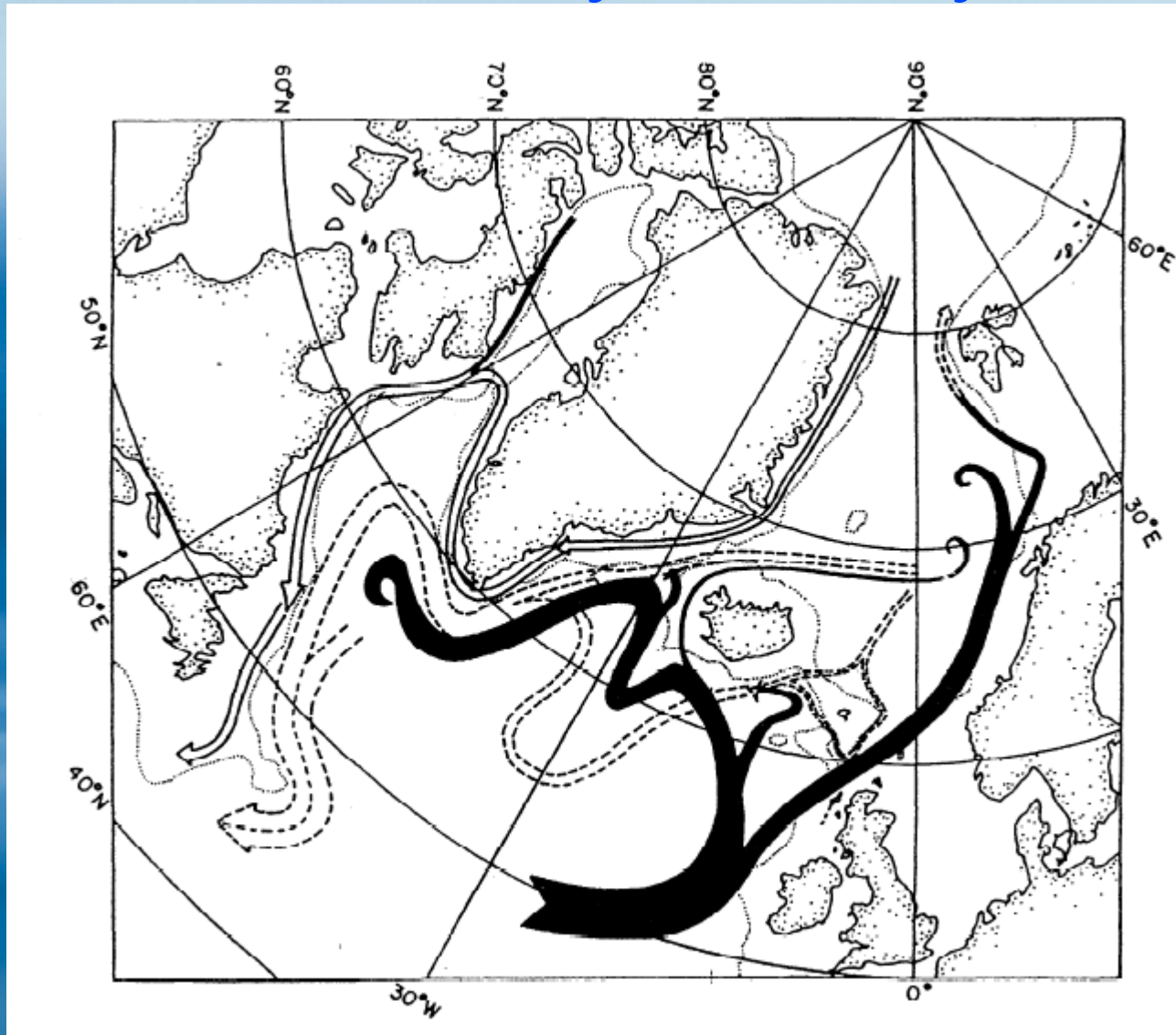


W ogólności (w modelu) możliwe są cztery mody cyrkulacji:

(a) Conveyor czyli normalna THC, (b) Southern Sinking, (c) Northern Sinking, (d) Inverse Conveyor (Pacyficzny THC).

Co ciekawe niezależnie od konfiguracji geograficznej i opadów na Atlantyku i Pacyfiku mody zmieniają się parami C $\leftrightarrow$ SS oraz NS $\leftrightarrow$ IC. W naszym świecie mogą wystąpić zatem tylko dwa pierwsze. Czy zaprzecza to nowym danym o cyrkulacji w czasie zdarzenia Heinricha (Wykład 3)?

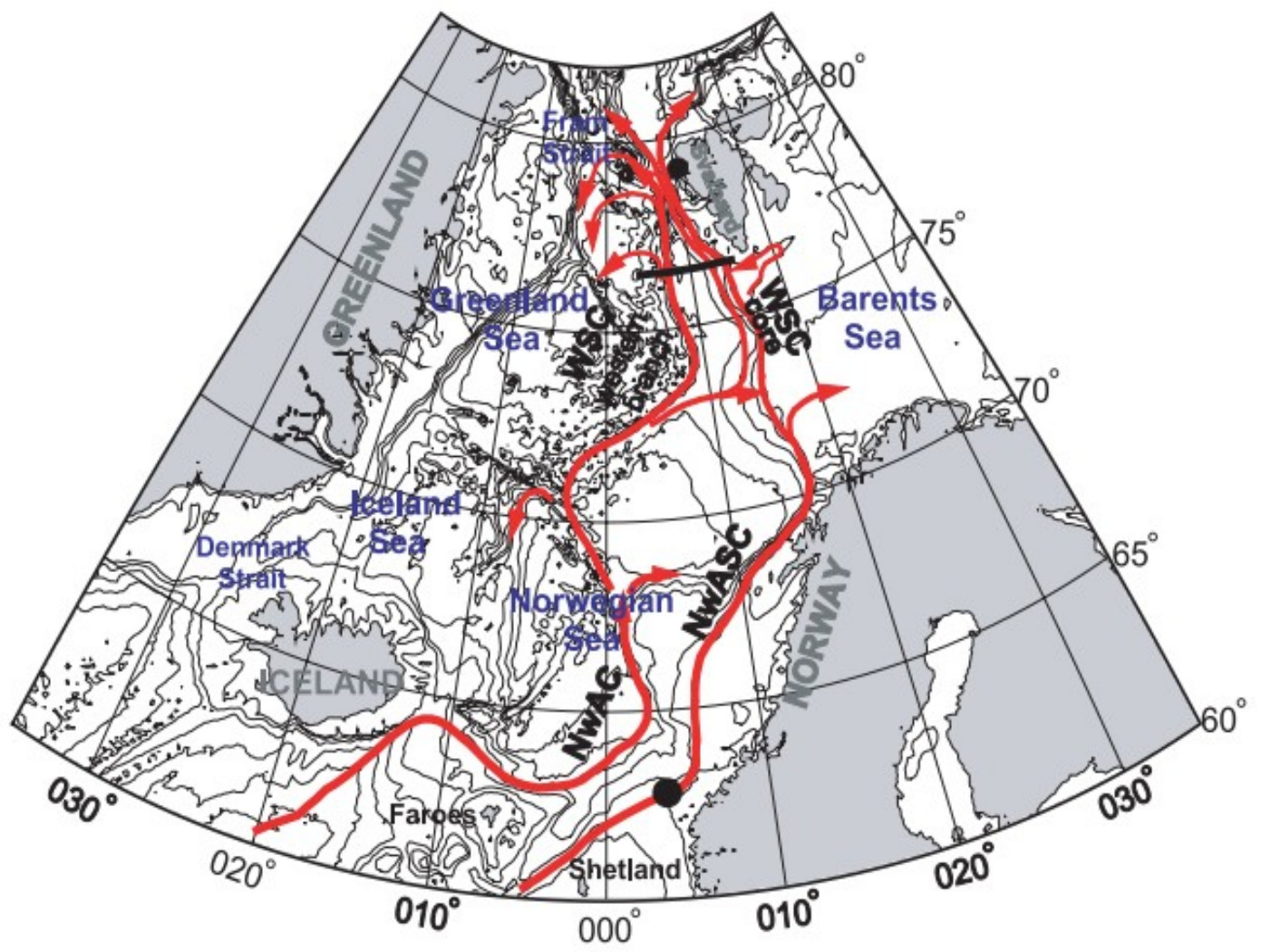
(Nieco przestarzały) obraz THC na Północnym Atlantyku



Czarne strzałki – wody powierzchniowe; jasne – wody głębinowe.

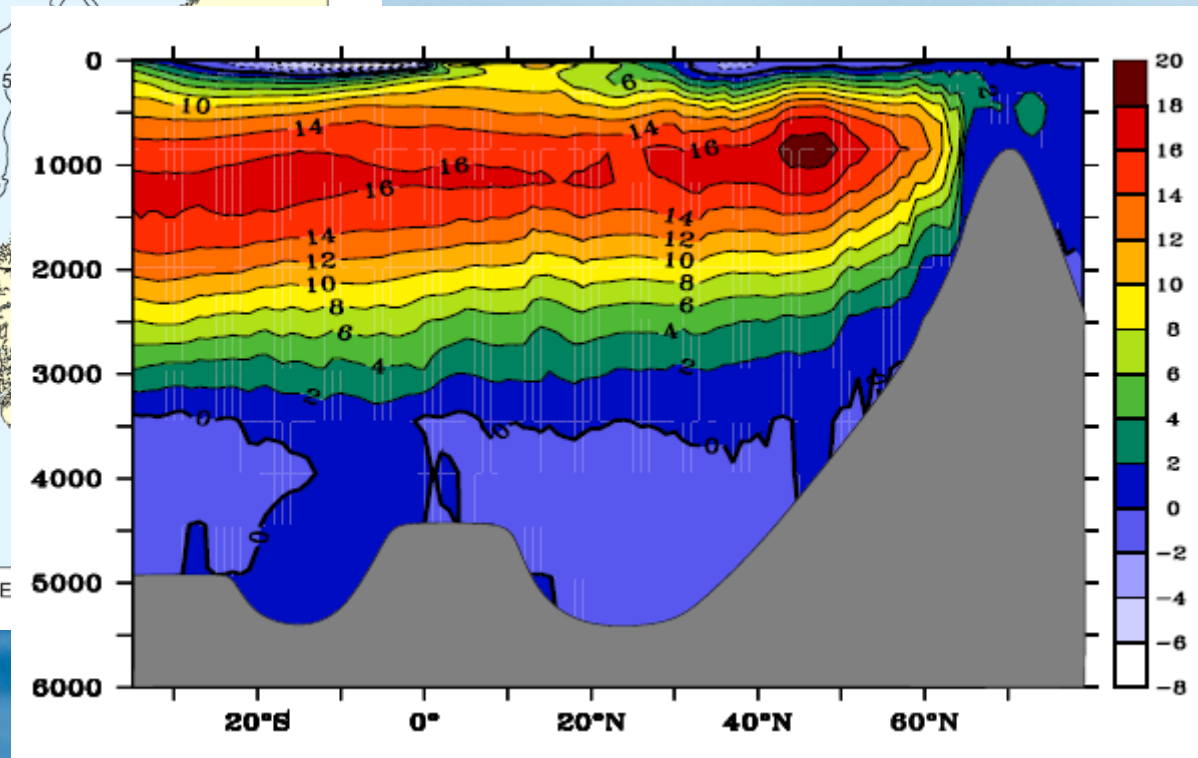
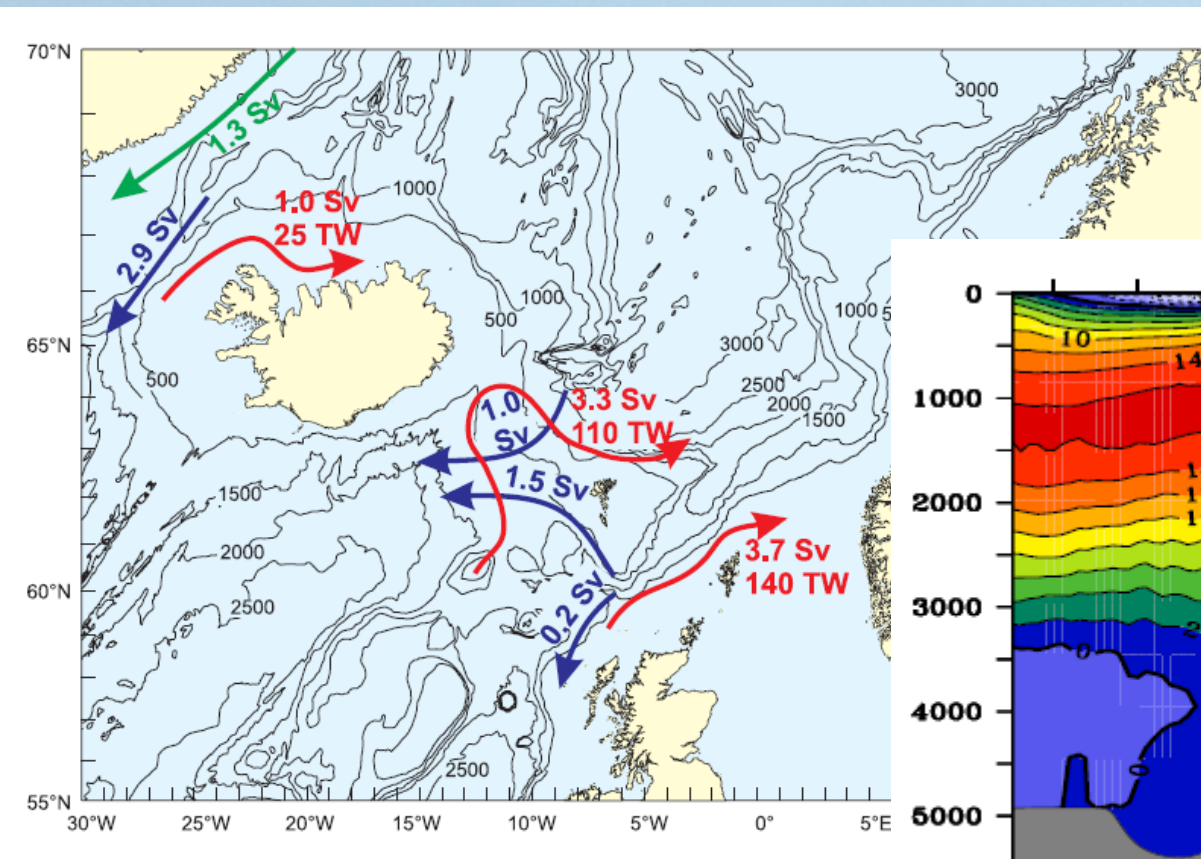
Dickson & Brown 1994 after McCartney & Talley 1984

Nowszy obraz propagacji Wód Atlantyckich na Północnym Atlantyku



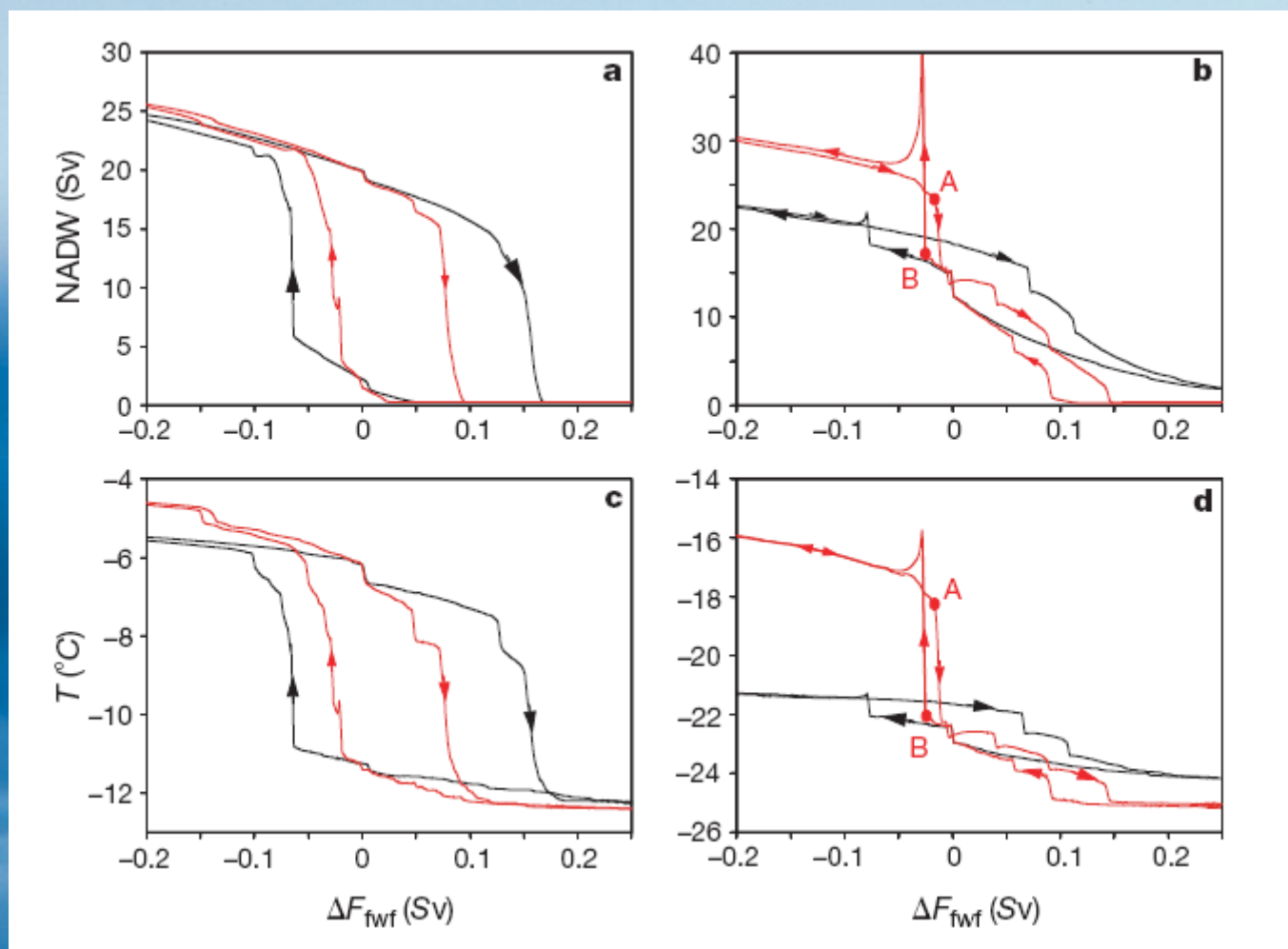
Badania prowadzone przez IOPAN pokazują, że istnieje druga odnoga prądu Norweskiego łącząca się w Prąd Zachodnio-spitsbergeński

THC na Północnym Atlantyku



Cyrkulacja termohalinowa to około 15-20 Sv wody ($1 \text{ Sv} = 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$). Jej część docierająca do Mórz Nordyckich niesie ponad 250 TW ciepła. Szlaki prądów, średnie przepływy i ich zmienność są nadal badane (także przez IOPAN).

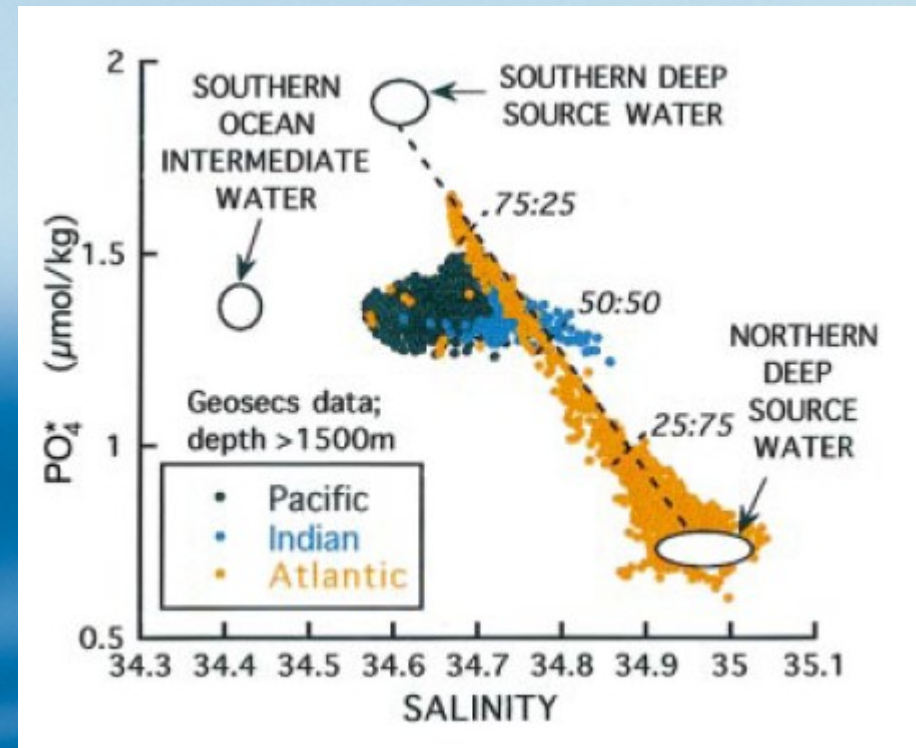
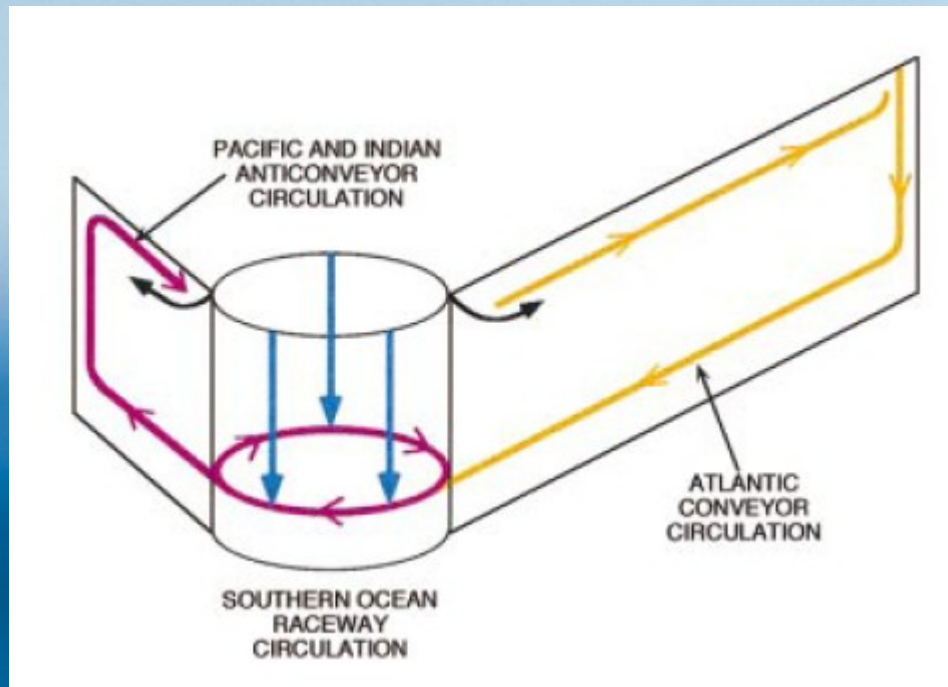
Powtórka: wpływ słodkiej wody na THC



Zmienność produkcji wód głębinowych Północnego Atlantyku (NADW) i temperatury powietrza (60-70° N) w funkcji napływu słodkiej wody dziś (po lewej) i podczas ostatniego maksimum epoki lodowej (po prawej) na szerokościach 20-50° N (czarne) i 50-70° N (czerwone).

Ganopolski i Rahmstorf, 2002

Cyrkulacja termohalinowa: mieszanie wód



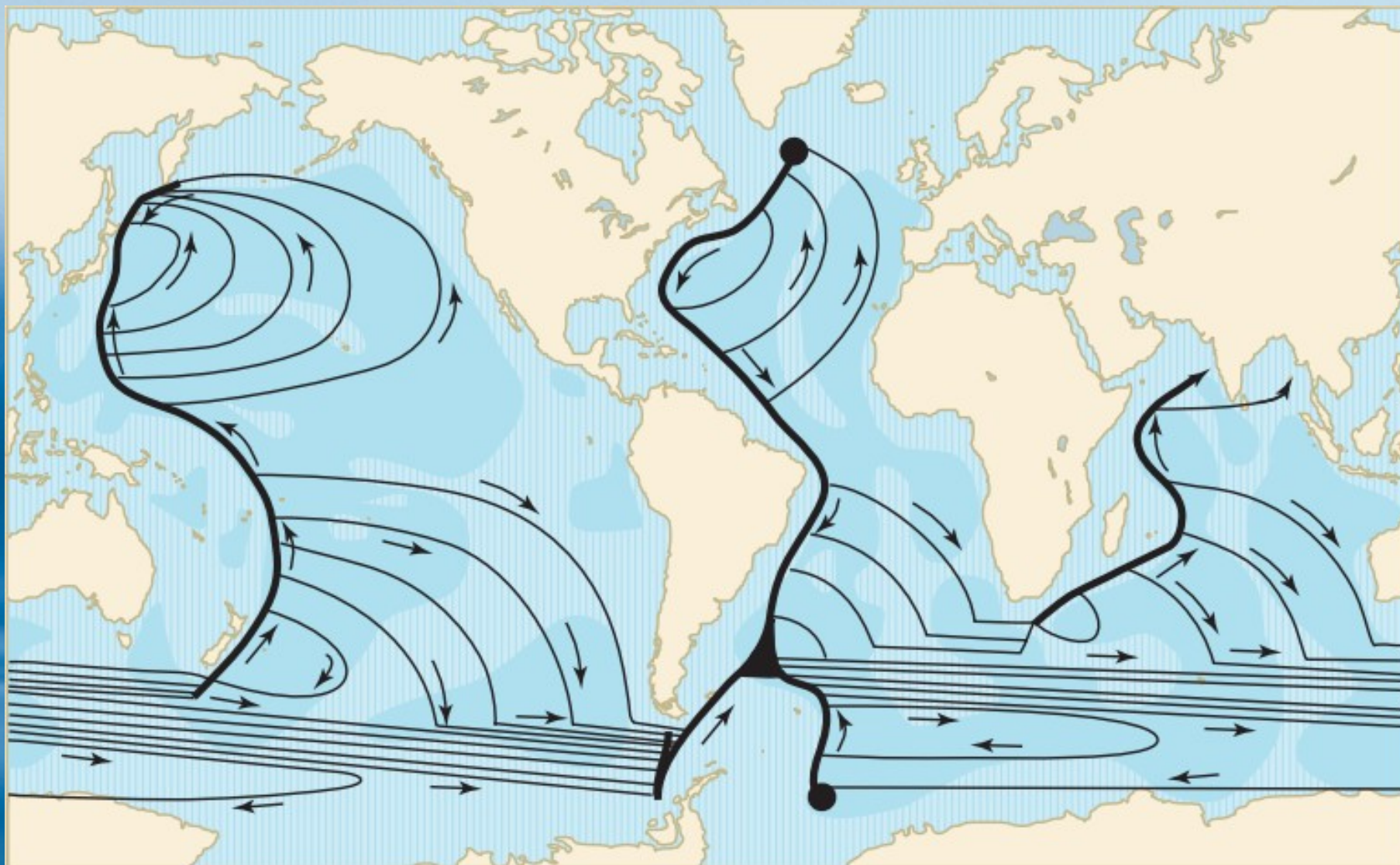
Wody głębinowe są mieszaniną dwóch źródeł wód głębinowych: Północnego Atlantyku i Mórz Wokółantarktycznych. Procentowy pochodzenie od obu źródeł da się wyznaczyć przy pomocy wartości kwazi-zachowawczej (prawie niezmiennej), kombinacji koncentracji tlenu (O_2) oraz fosforanów (PO_4), ponieważ zużycie 175 moli tlenu przy oddychaniu uwalnia jeden mol PO_4 .

$$PO_4^* = PO_4 + O_2/175 - 1,95 \mu\text{mol/kg}$$

Obecna zawartość PO_4^* w oceanach oznacza że w ciągu ostatniego 1000 lat (czas mieszania wód) na obu półkulach tworzyło się po około 50 % światowych wód głębinowych.

Broecker 1997 (Science)

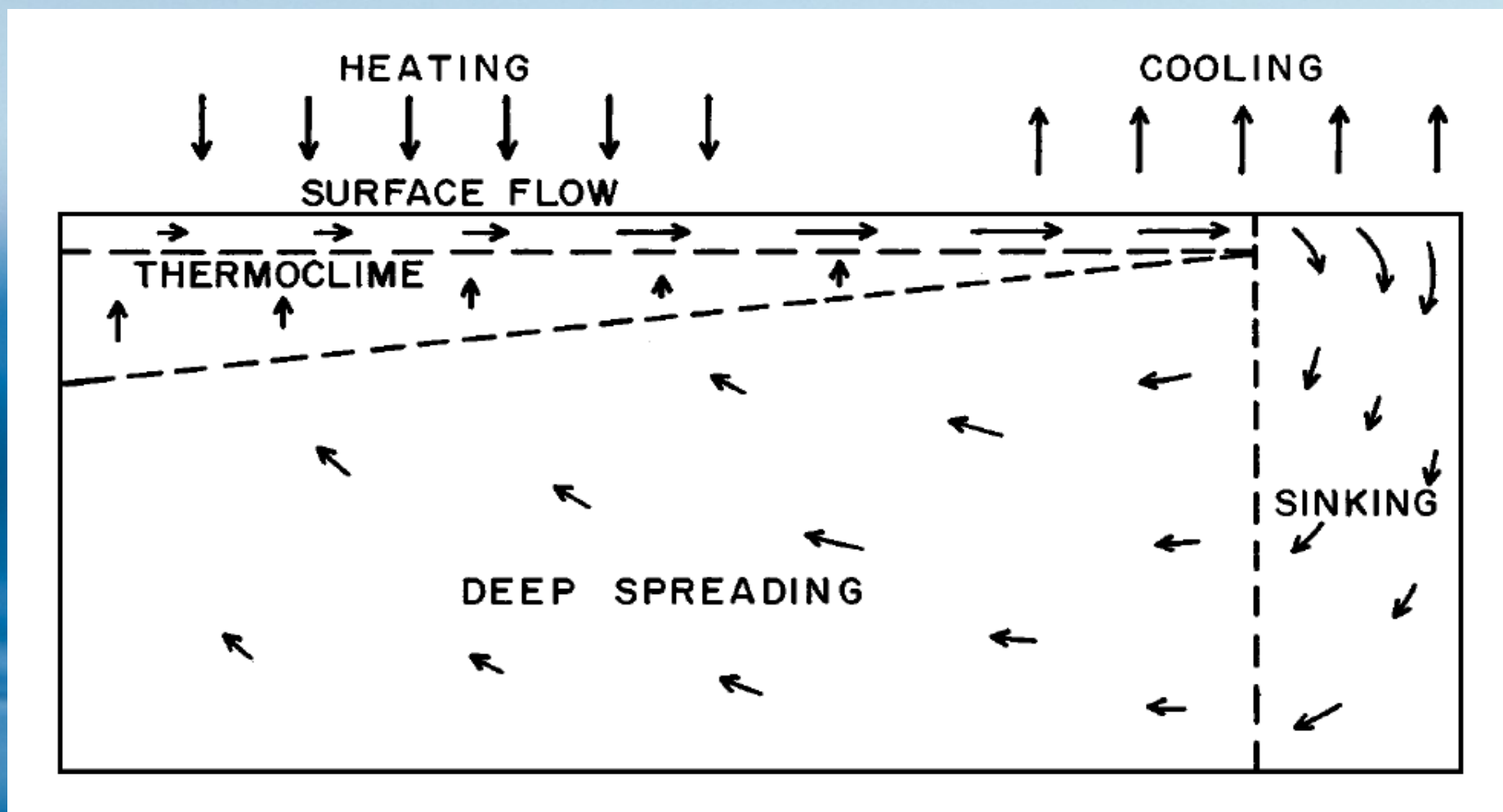
Klasyczny obraz cyrkulacji głębinowej



Jest tylko jeden problem:
dlaczego gęsta (zimna i słona) woda w ogóle powraca na powierzchnię?

Lozier 2010 after Stommel 1958

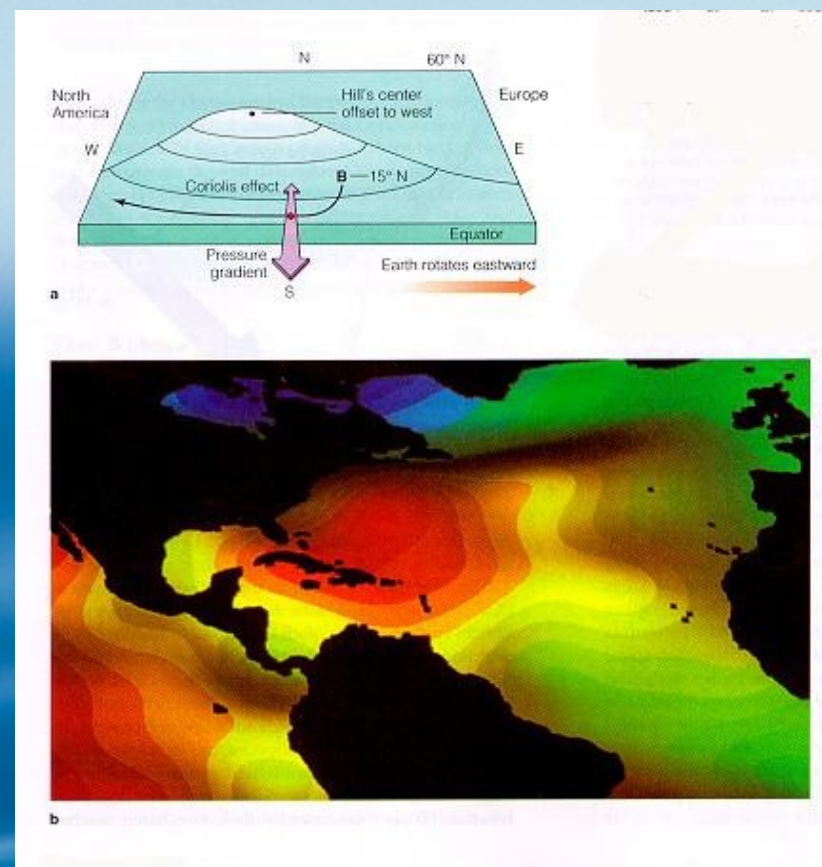
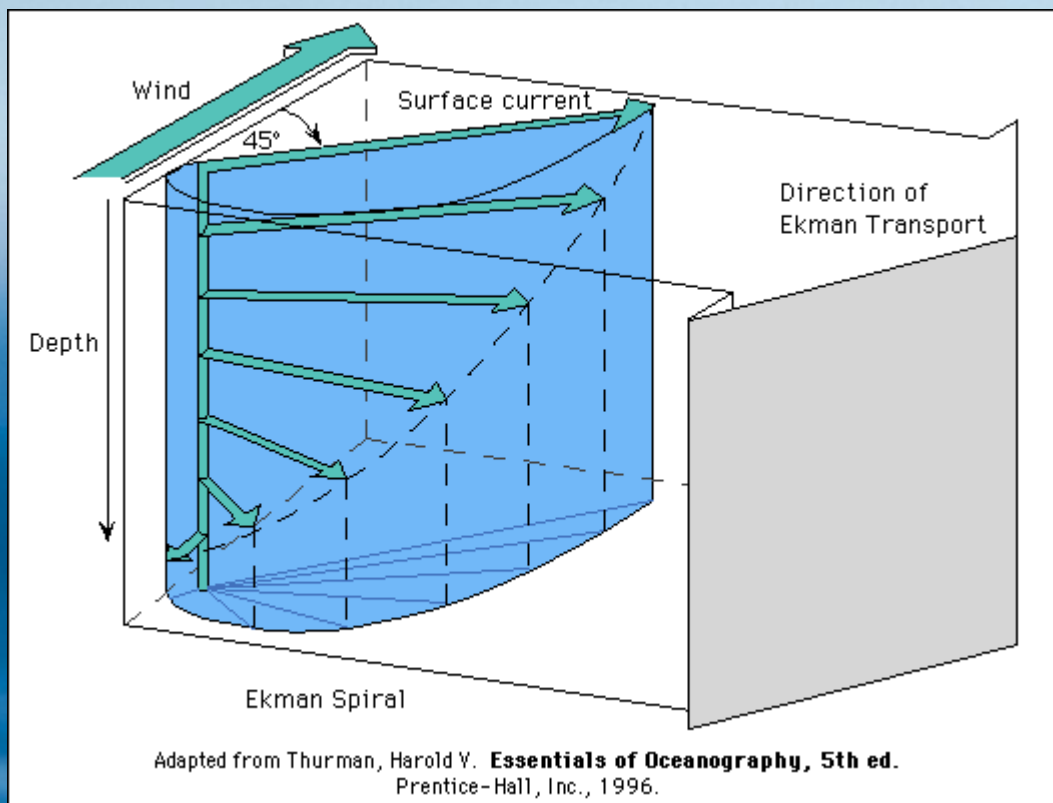
Klasyczny obraz cyrkulacji termohalinowej



W klasycznym modelu THC (Stommel & Arons 1960) cyrkulacja spowodowana jest wyłącznie różnicami temperatury i zasolenia. Jest jednak problem: już w 1908 r. Sandström wykazał, że niemożliwa jest cyrkulacja w cieczy jeśli źródło ciepła i chłodnica są na tej samej głębokości (np. na powierzchni morza).

Weaver et al. 1999 after Wyrtki 1961

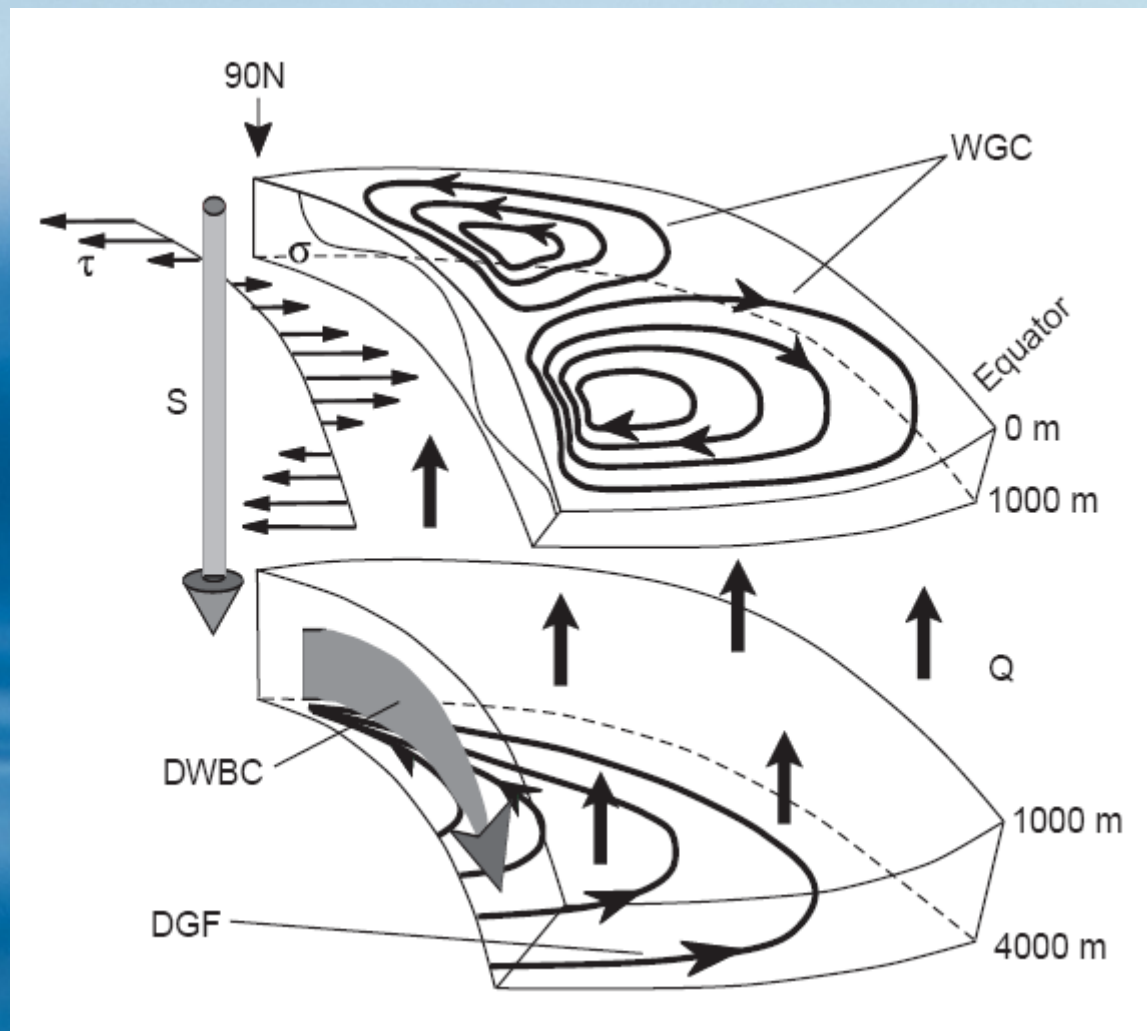
Spirala Ekmana i powierzchnia geostroficzna



Bez paniki. Ziemia się kręci więc na północnej półkuli na ruchome obiekty działa pozorna siła (siła Coriolisa) zgodna z obrotem wskazówek („w prawo”). Spirala Ekmana to zjawisko związane z tą siłą: wiatr wywołuje średni ruch wody 90 stopni na prawo od swego kierunku (45 stopni na powierzchni). Równowaga między siłą Coriolisa a gradientem ciśnienia spowodowanym transportem Ekmana to wywołuje zmiany wzniesienia (obniżenia) powierzchni morza wewnątrz wiru kręcącego się „na prawo” („na lewo”).

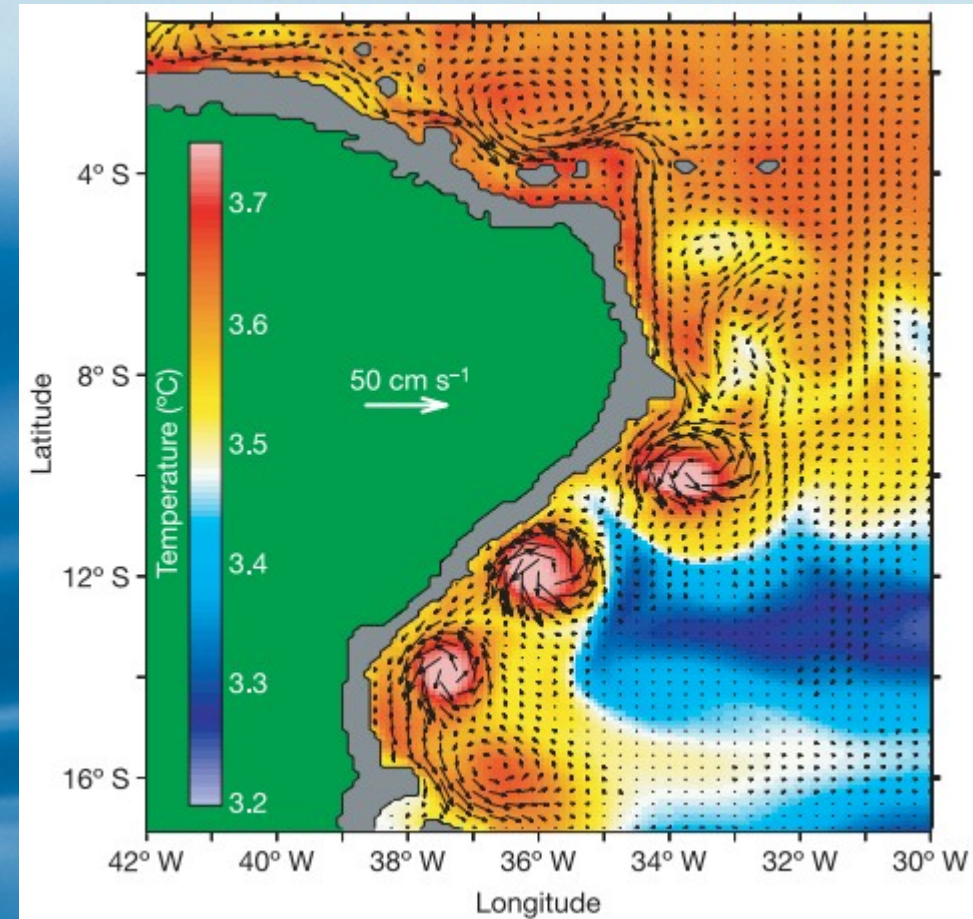
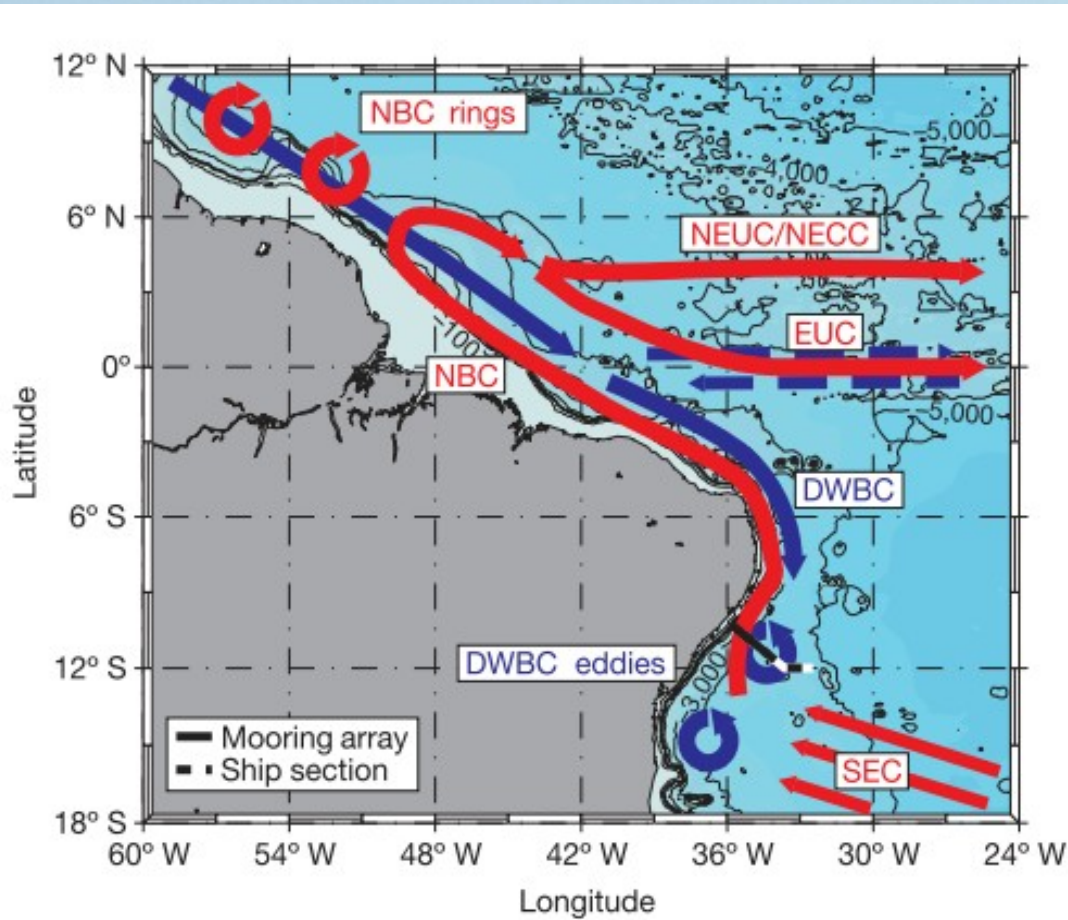
<http://earth.usc.edu/geol150/variability/sfcocean.html>

Cyrkulacja oceaniczna Północnego Atlantyku (wersja hardcore'owa)



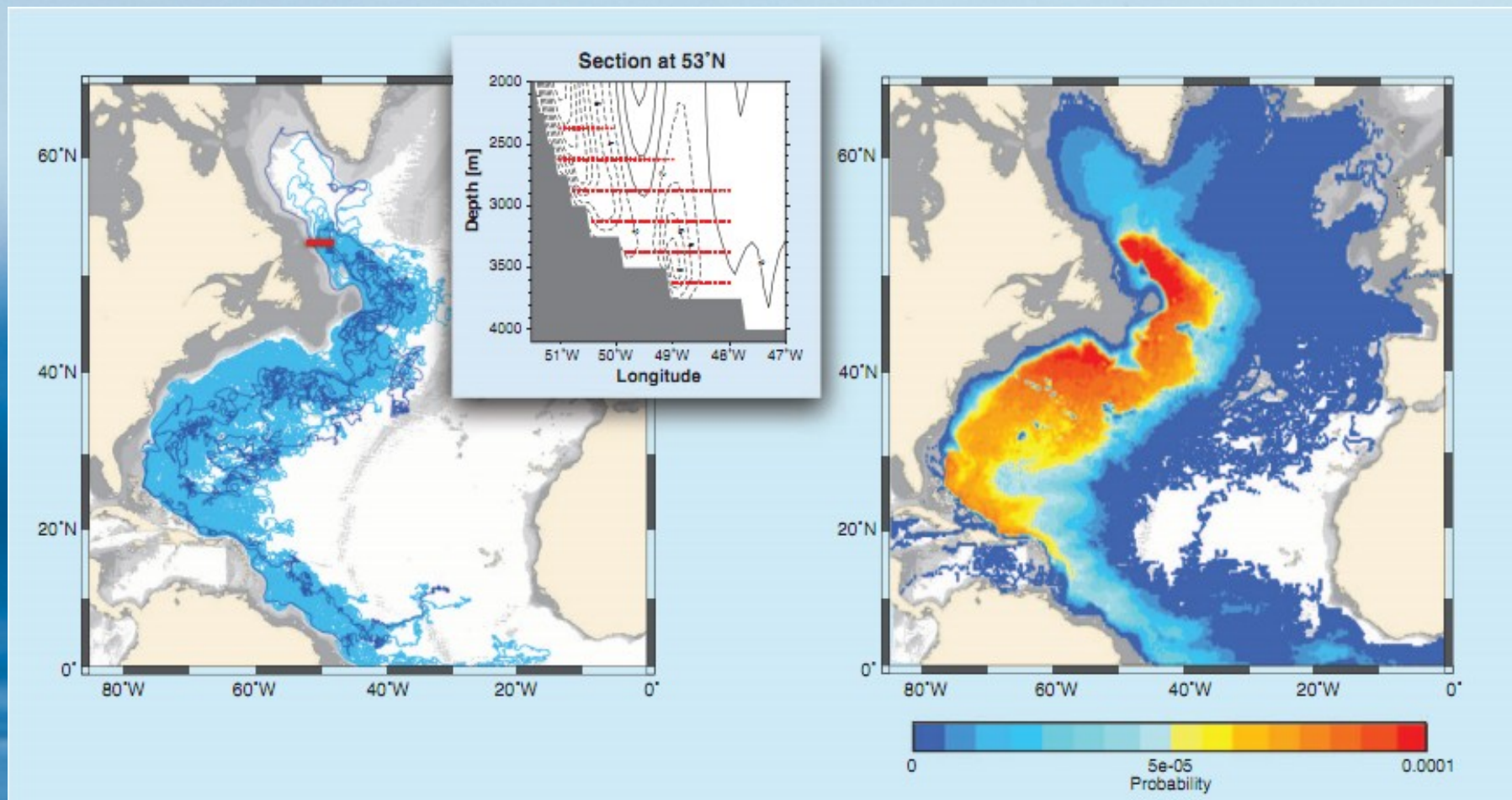
Cyrkulacja termohalinowa nie da się naprawdę wydzielić z całego obrazu cyrkulacji oceanicznej: na powierzchni dominuje cyrkulacja wiatrowa (WGC = Wind-driven Gyre Circulation), w głębinach prąd brzegowy po zachodniej stronie basenu (DWBC = Deep Western Boundary Current) i głębinowy przepływ geostroficzny (DGF = Deep Geostrophic Flow).

Pierwsze oznaki, że cyrkulacja głębinowa nie jest taka prosta



Obserwacje i modele w dużej skali (“eddy resolving”) świadczą, że zachodni prąd graniczny na Atlantyku zamienia się na szerokości 8° S w serię wirów.

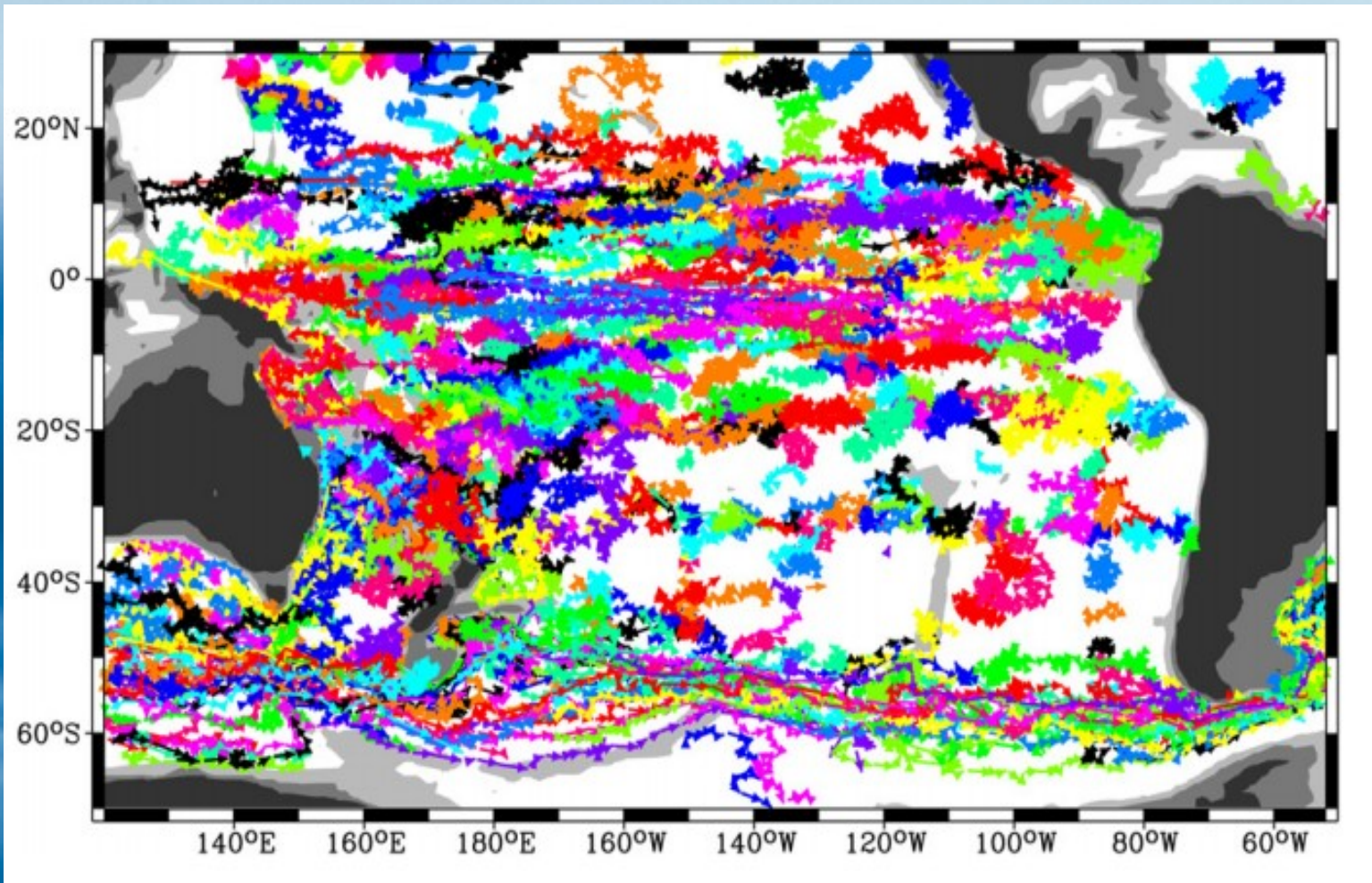
Jako na południu tako i na północy...



Lozier (2010) w swoim artykule „*Deconstructing the Conveyor Belt*” pokazuje, że dryftery w modelu “eddy resolving” wcale nie podążają grzecznie za zachodnim prądem granicznym. Po lewej trajektorie 50 wybranych losowo, a po prawej prawdopodobieństwo znalezienia się dryftera w danym miejscu w ciągu 50 lat.

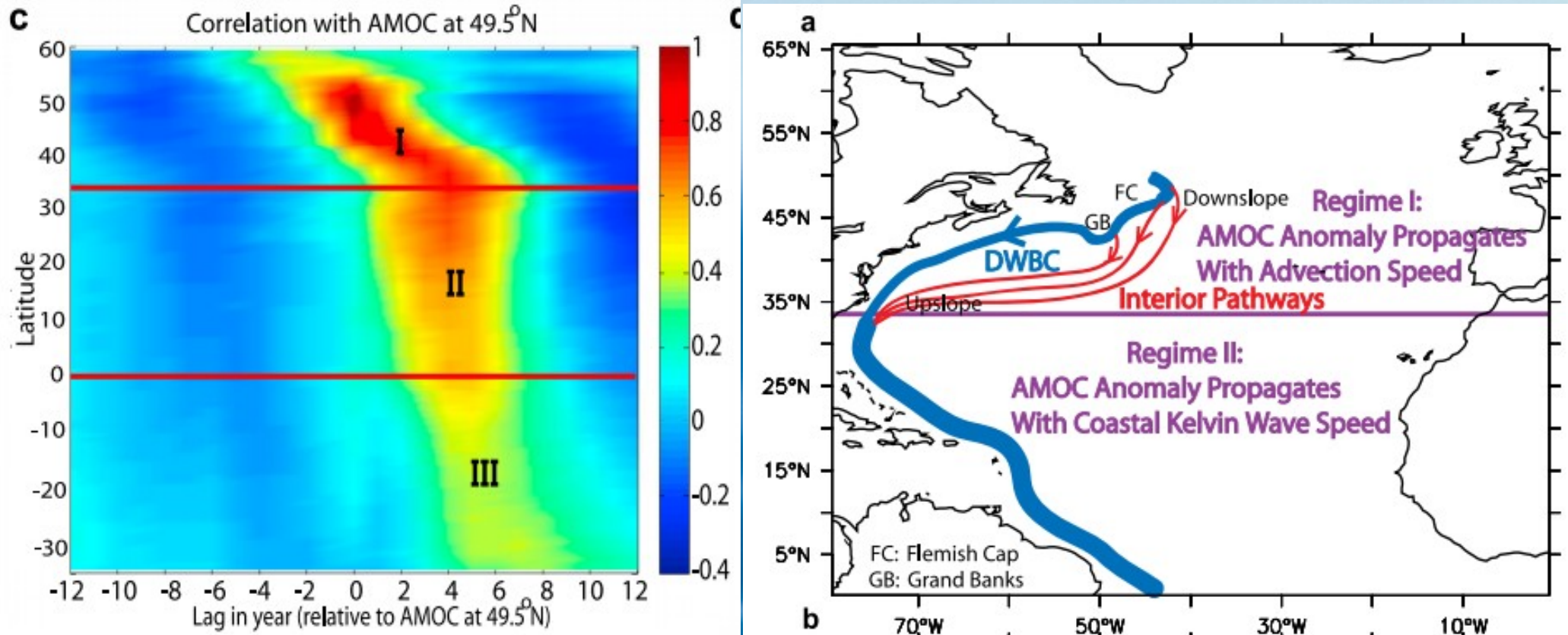
Lozier 2010 (Nature)

Gdzie ten pas transmisyjny (“conveyor belt”)?



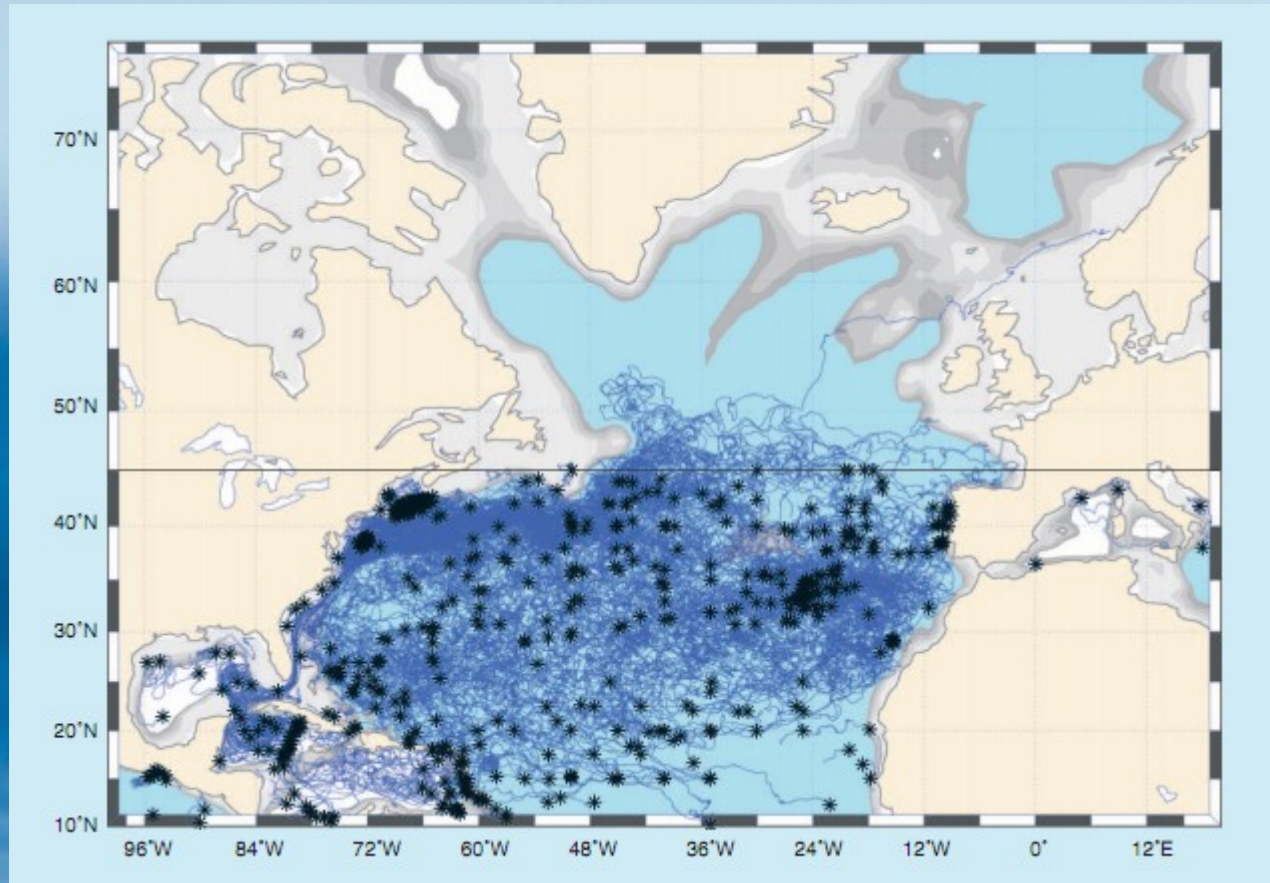
Trajektorie automatycznych dryfterów podróżujących z prądami na (nominalnej) głębokości 900 m nie wykazują podobieństwa ani do głębinowej cyrkulacji Stommela ani do „pasa transmisyjnego” Broeckera.

Mechanizmy przenoszenia się anomalii AMOC



Zachodni prąd graniczny na Atlantyku zachowuje się jak przykazał Stommel tylko do szerokości 34° N Jego anomalie („sygnały”) poruszają się z prędkością adwekcji. Na południe od 34° N anomalie przesuwały się ze znacznie mniejszą prędkością przybrzeżnych fal Kelvina.

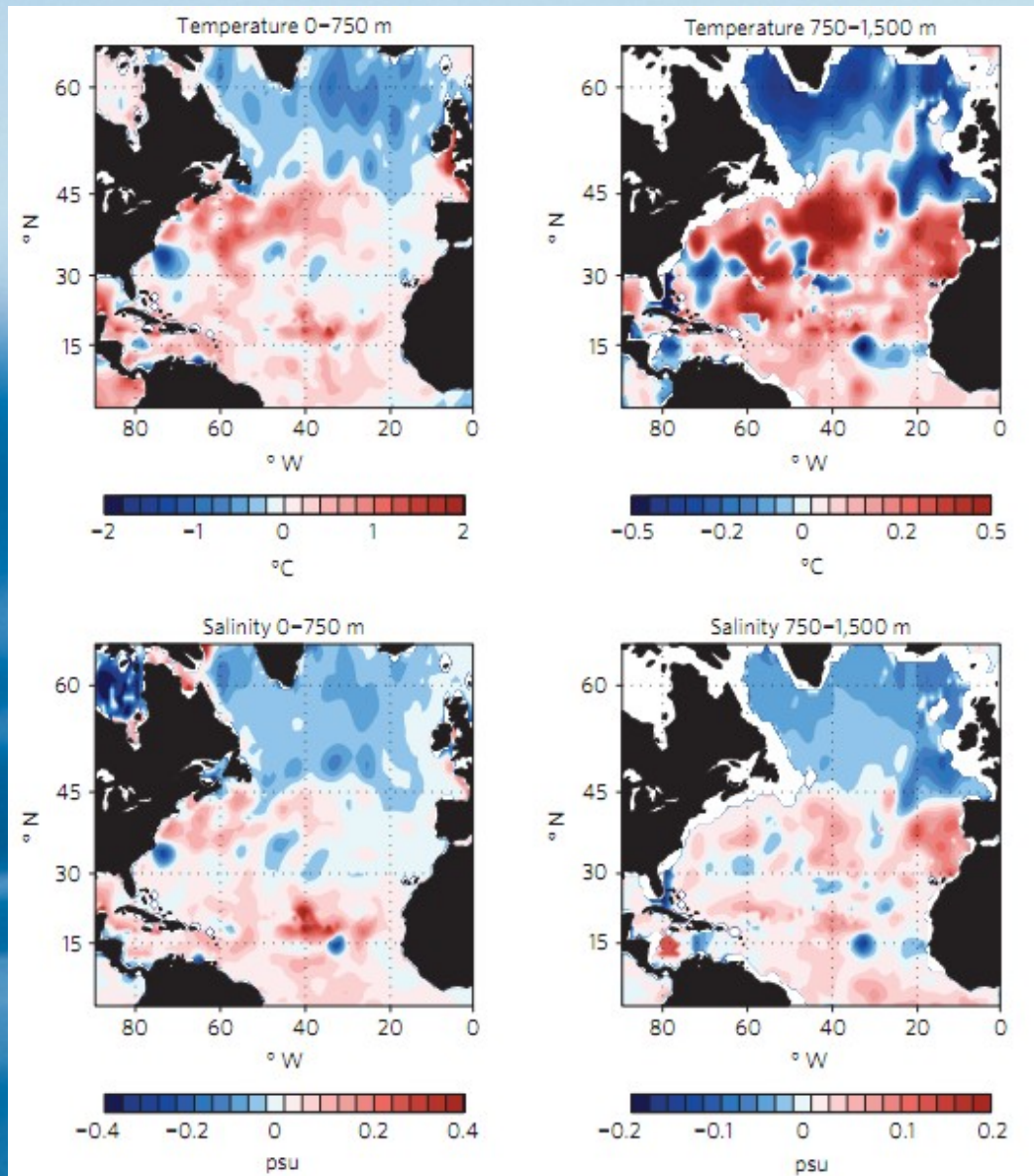
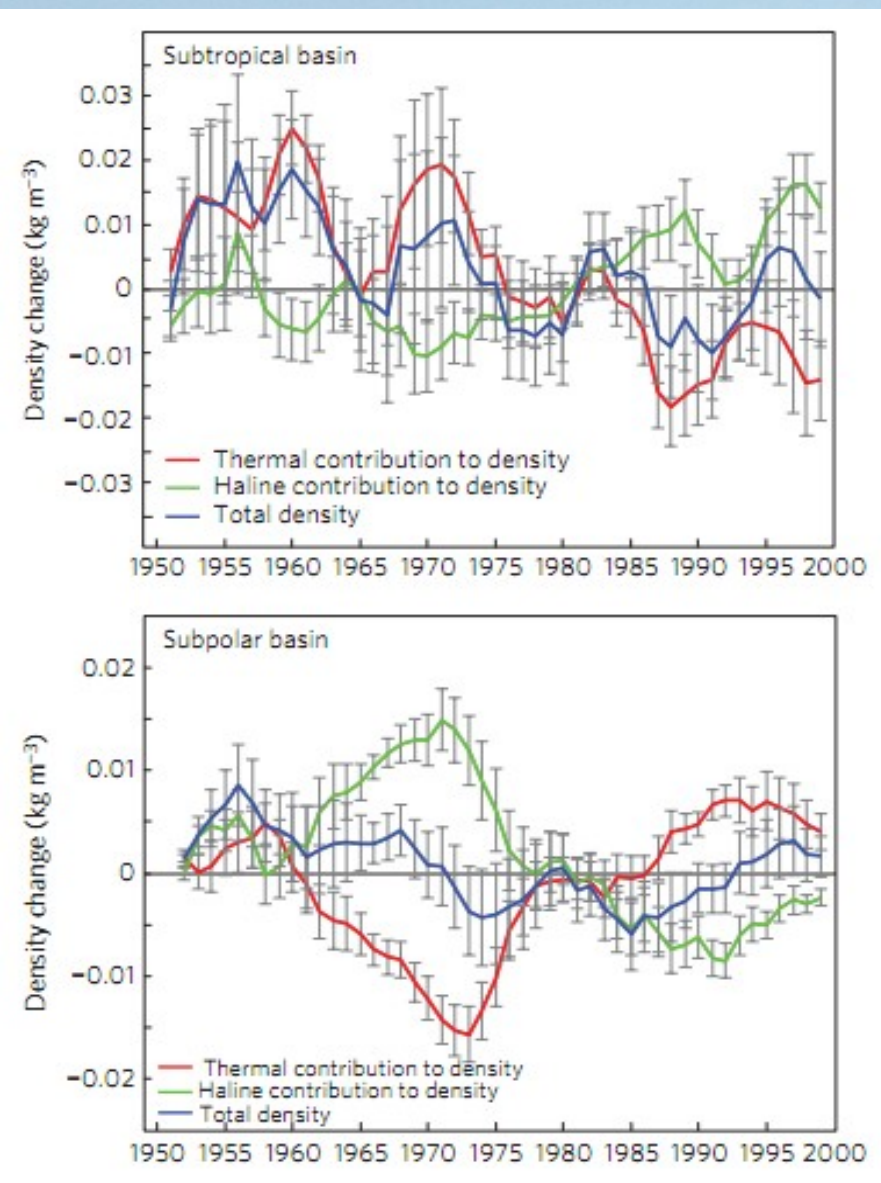
“Nie takie to proste, wcale nie..”



Lozier (2010) w tym samym artykule pokazuje wyniki badań przy pomocy dryfterów wypuszczonych na południe od 45° S (za Talley 2006) (z lat 1992 – 2002). Tylko jeden zachował się przyzwoicie i podążył z Prądem Zatokowym do wiru subpolarnego. Zła metoda próbkowania czy mamy problem teoretyczny?

Lozier 2010 (Nature)

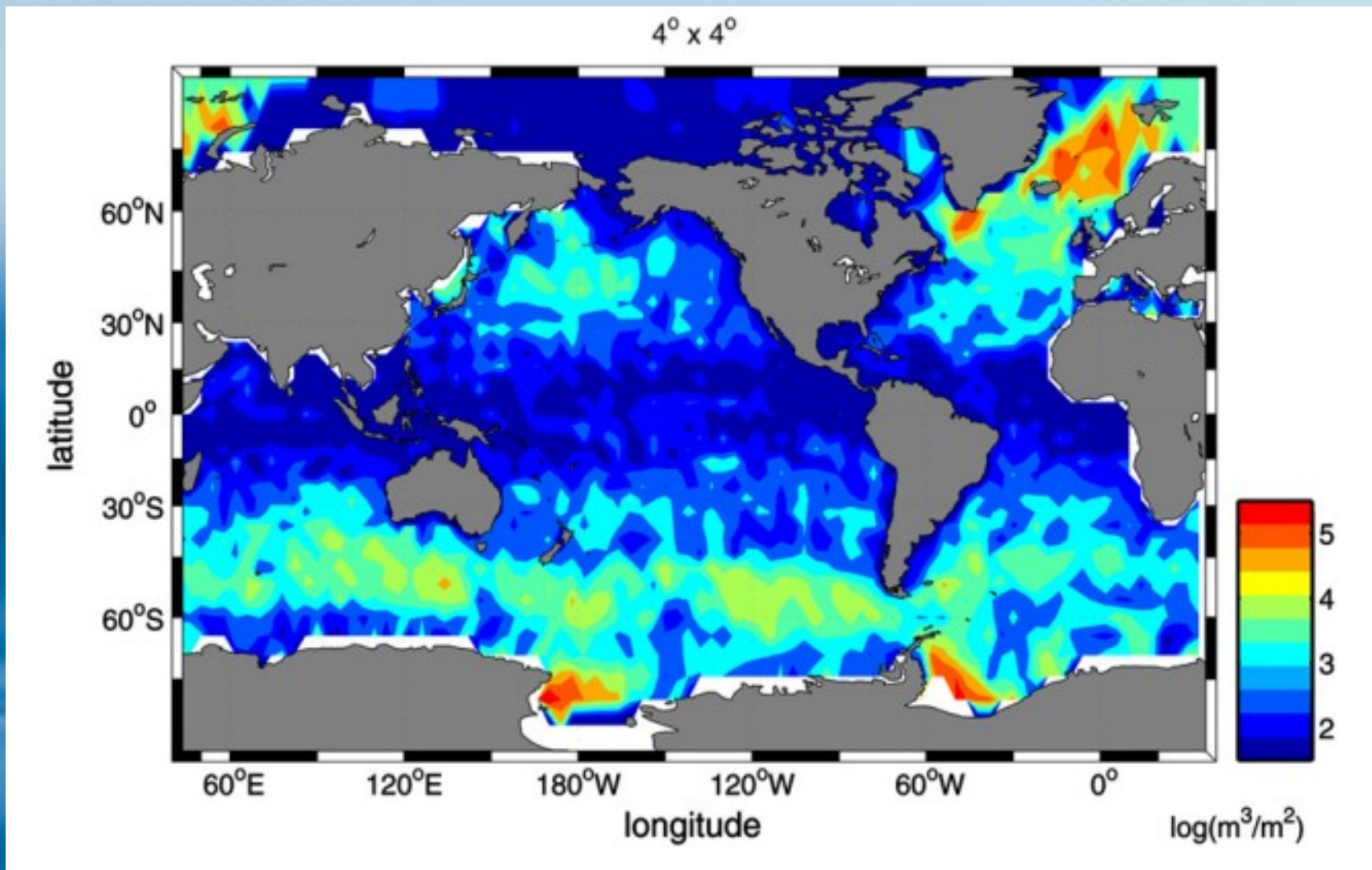
Przeciwnie znaki zmian w różnych rejonach Pn. Atlantyku



Zmiany zasolenia i temperatury w wirze subpolarnym i w subtropikalnym mają przeciwne znaki. THC w latach 1950 – 2000 zwiększyła się w pierwszym o $+0.8 \pm 0.5$ Sv, a zmniejszyła w drugim o -1.5 ± 1 Sv.

Lozier et al. 2010 (Nature Geoscience)

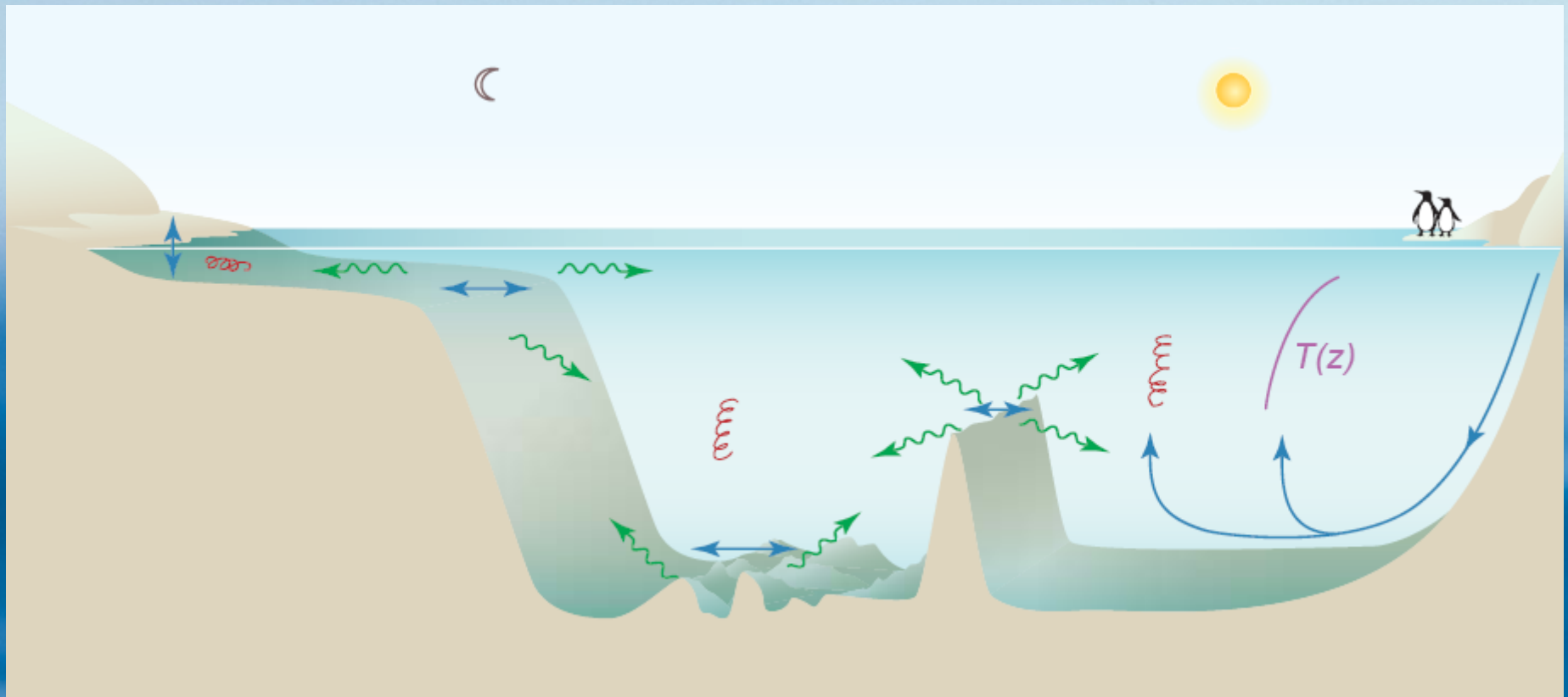
Gdzie tak naprawdę tworzą się wody głębinowe



Obszary w których tworzą się wody głębinowe (wynik “odwrotnego” modelowania) w km³ wód głębinowych na km² powierzchni. *Uwaga: skala jest logarytmem dziesiętnym, a zatem każda liczba to jeden rząd wielkości !*

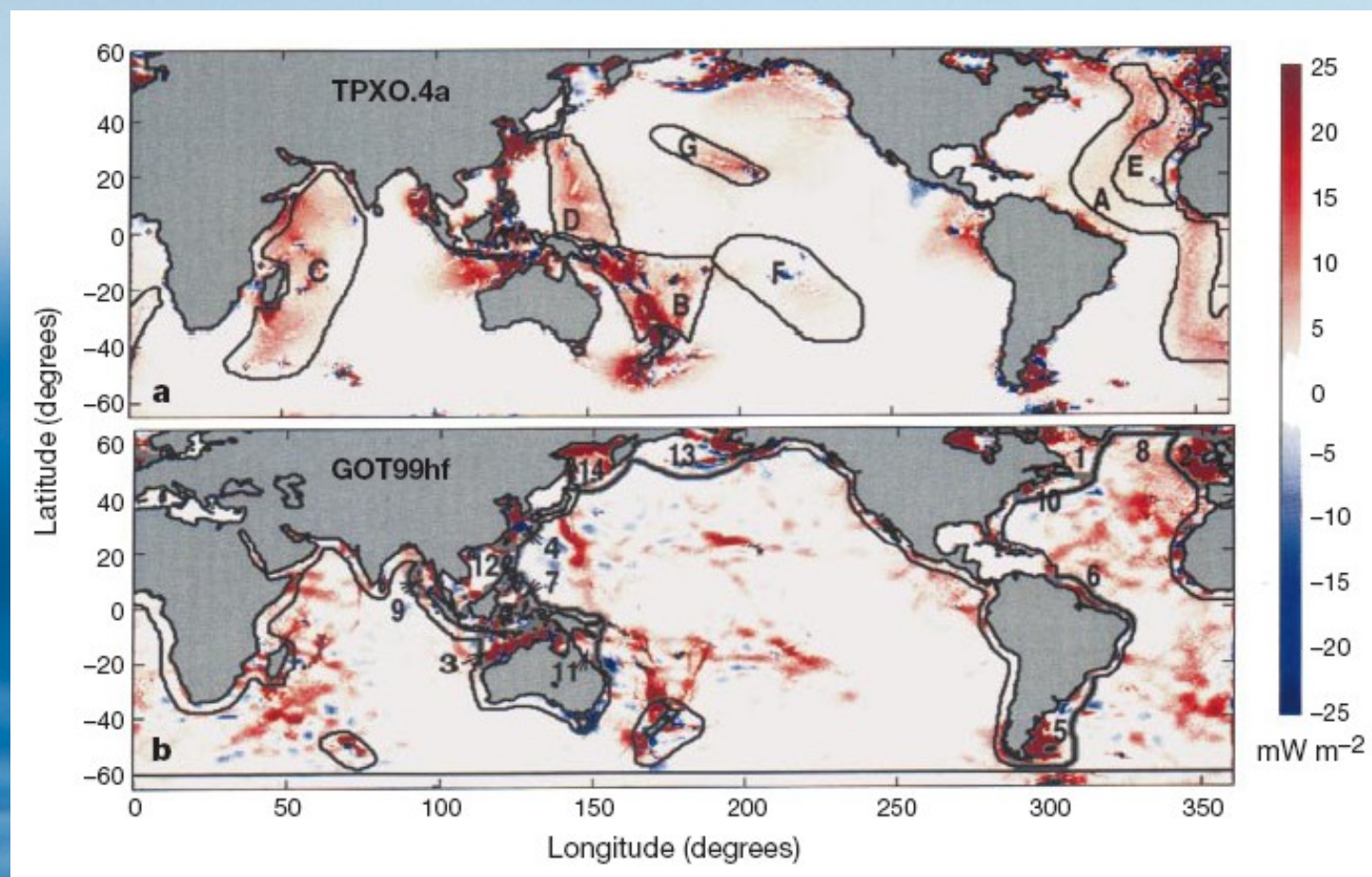
Wunsch 2010 (Quaternary Science Reviews), fig. from Gebbie & Huybers

Dlaczego gęsta woda wypływa na powierzchnię?



Gęsta (słona i zimna) woda może wypłynąć na powierzchnię jedynie po wymieszaniu z lżejszą. Jednym z mechanizmów (oprócz mieszania związanego z wiatrem) jest wytwarzanie fal wewnętrznych (**zielone**) na nierównościach dna (grzbietach i zboczach kontynentalnych) przez ruchy pływowe. Fale wewnętrzne prowadzą do turbulentnego mieszania (**czerwone**).

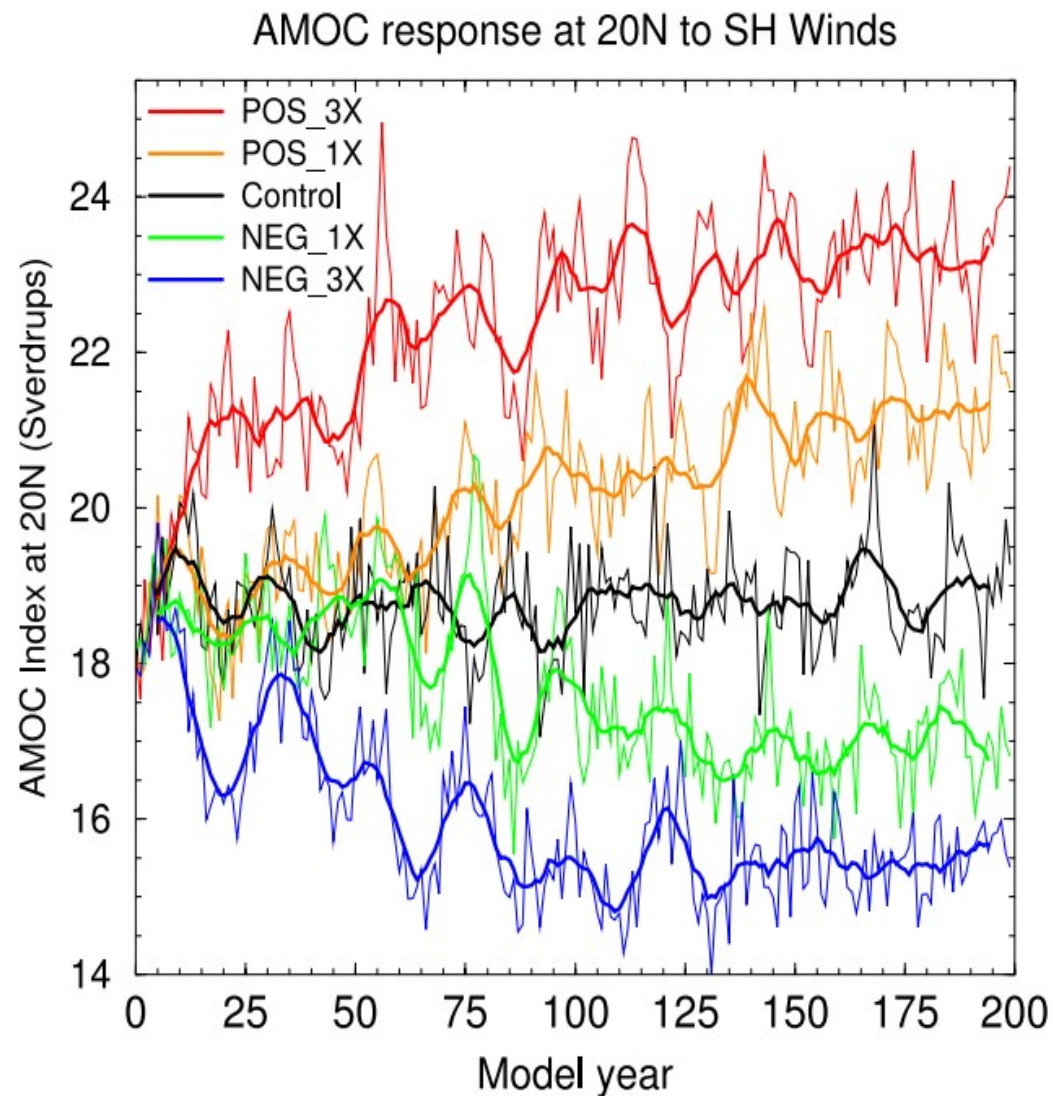
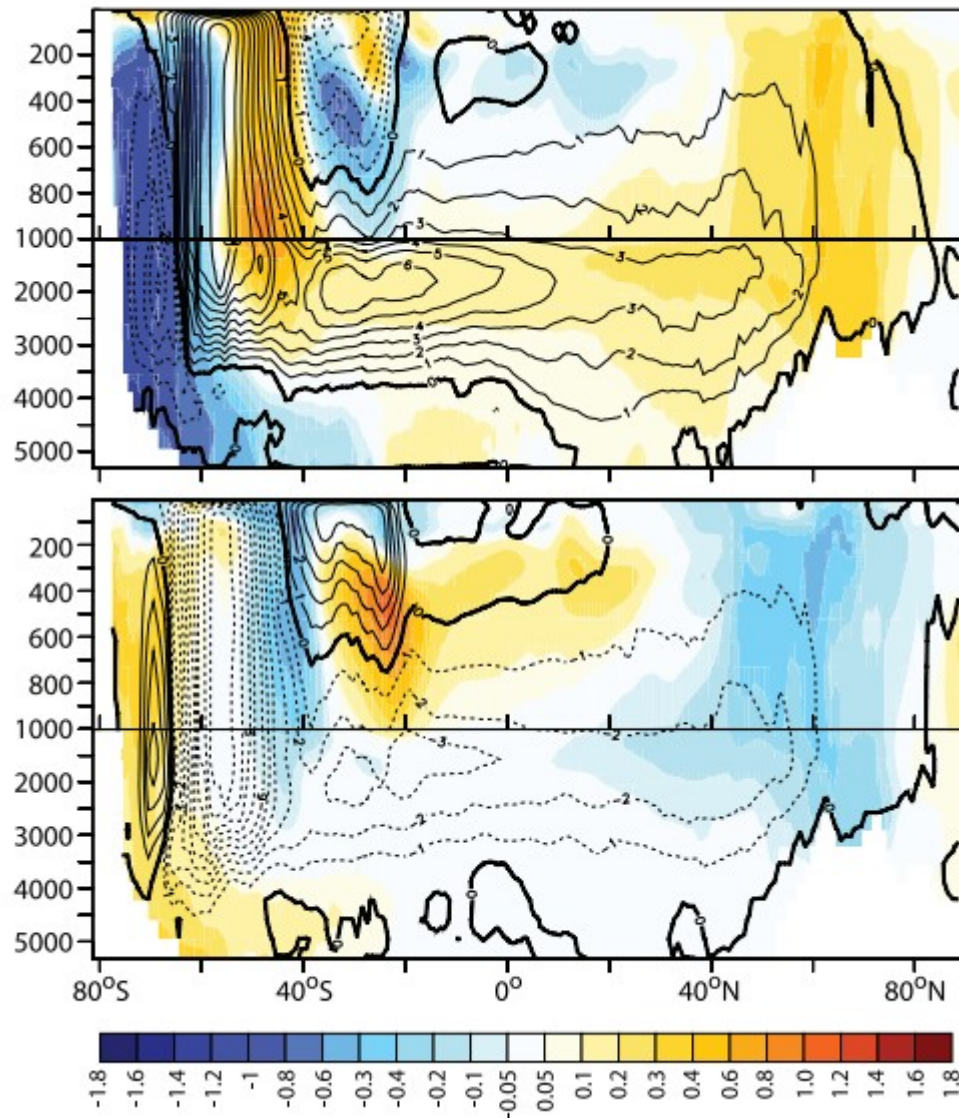
Mieszanie turbulentne przy użyciu energii pływów



Jednym z mechanizmów mieszania jest wytwarzanie fal wewnętrznych na grzbietach podmorskich przez pływy M2 (składnik 12 godzinny). Oceny satelitarne (dwa modele matematyczne wykorzystujące dane z satelitarnego altimetru radarowego TOPEX/Poseidon) tej energii są rzędu 1 TW, połowy z mocy mieszania turbulentnego potrzebnej dla podtrzymania cyrkulacji termohalinowej.

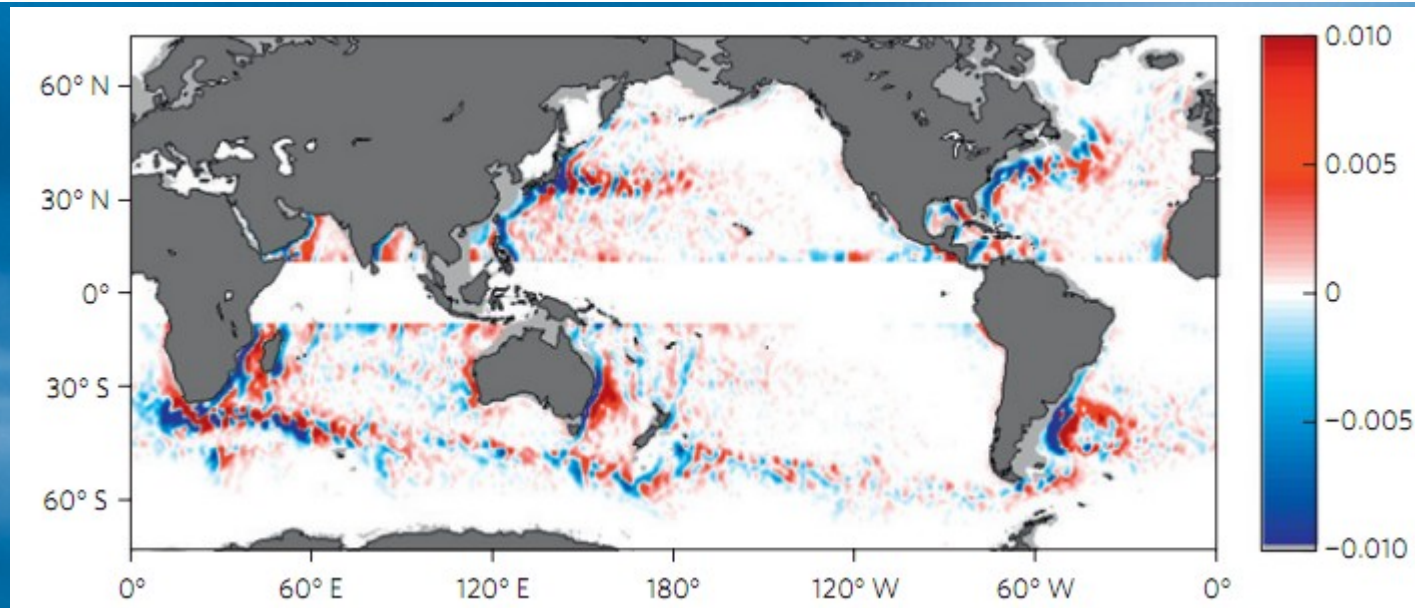
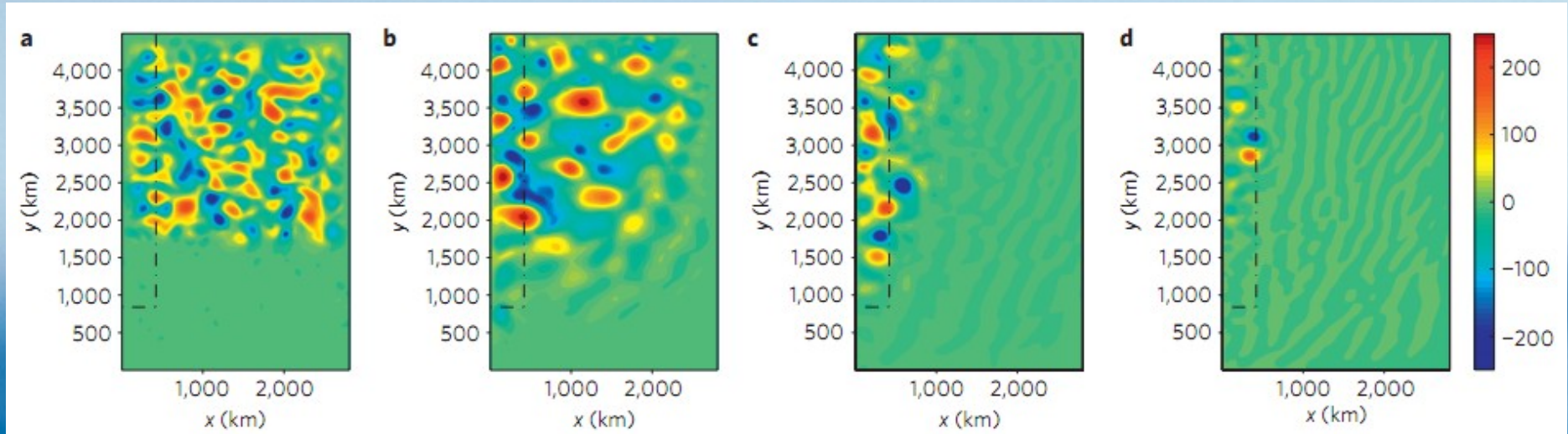
Egbert & Ray 2000 (Nature)

Wiatry zachodnie południowej półkuli napędem THC



Wynik modelowania THC przy zwiększeniu (POS) lub zmniejszeniu (NEG) wiatrów wokół Antarktydy. Więszemu (mniejszemu) wiatrowi towarzyszy jego przesunięcie na S (N).

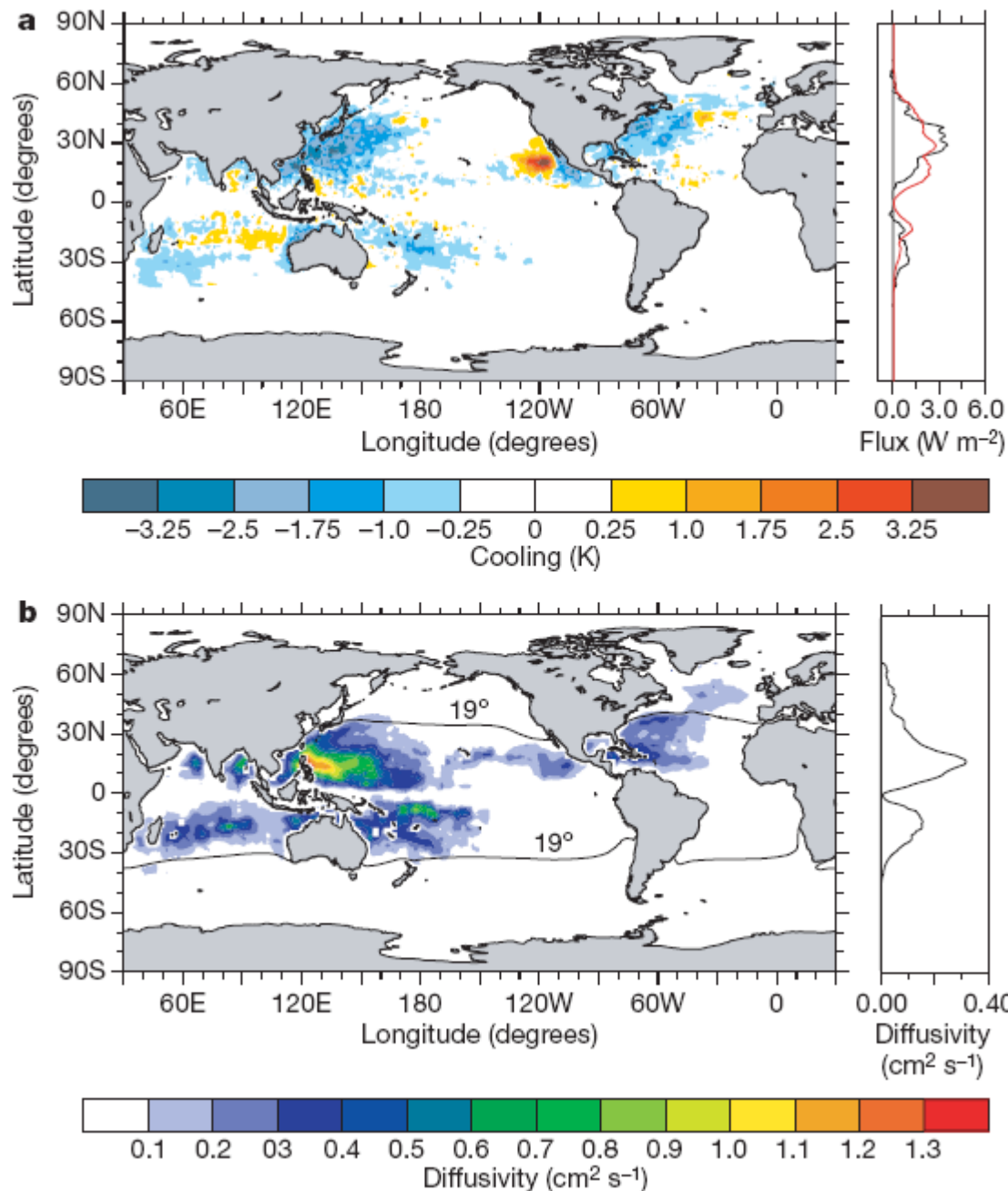
Energia wirów rozprasza się na zachodnich brzegach



Wyniki modelowania i analizy pierwszego modu baroklinowego wyliczonego z danych altymetrii satelitarnej pokazują, że energia wirów („eddies”) ulega dysypacji w 90% przy zachodnich granicach basenów (niebieskie na mapie)

Zhani, Johnson & Marshall 2010 (Nature Geoscience)

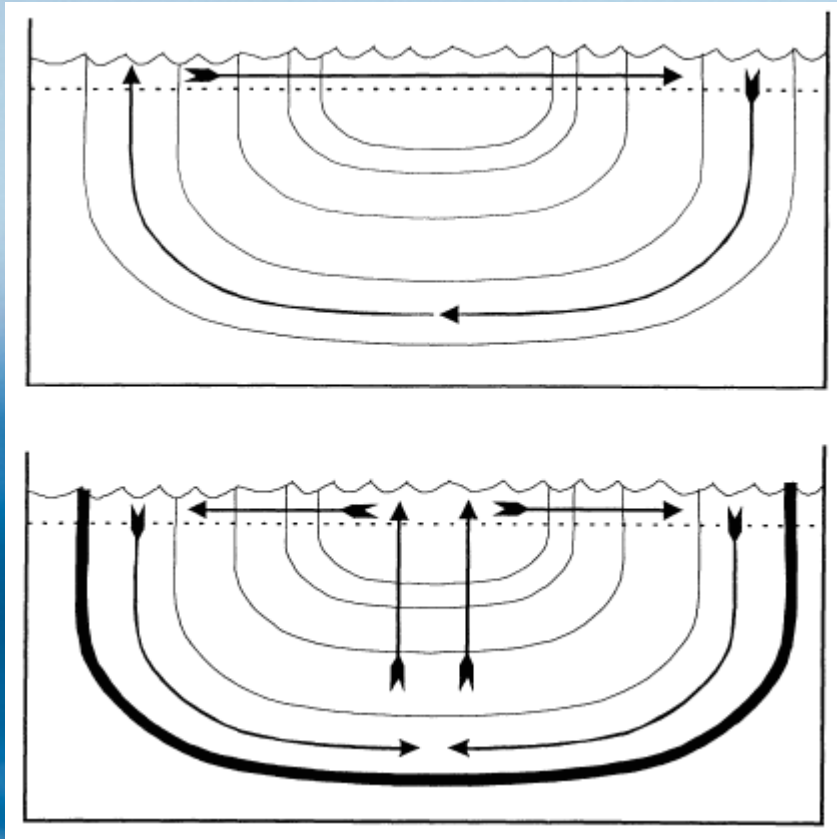
Czy huragany mieszają oceanem?



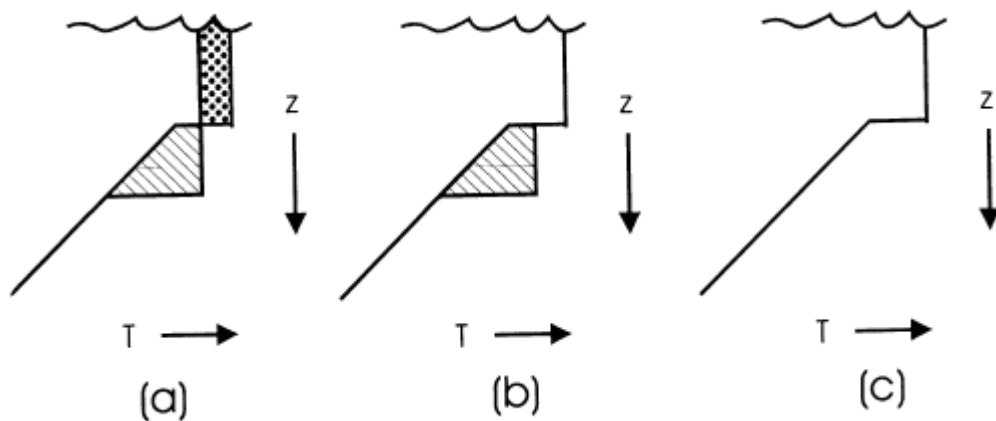
Emanuel (2001) zaproponował Huragany jako mechanizm domknięcia energetycznego THC. Srivier and Huber (2007) ocenili intensywność mieszania (traktowanej jako dyfuzyjnego transportu ciepła – panel dolny) spowodowanego wychłodzeniem wód powierzchniowych (panel górny) przez huragany tropikalne. Wyniki wskazują, że tłumaczy to 15% transportu południkowego, zapewniając do 50% energii mieszania potrzebnej dla globalnej THC.

Inne niedawne (bardziej szalone?) pomysły to między innymi mieszanie wody przez zooplankton (Kunze al. 2006).

Czy huragany mieszają oceanem?

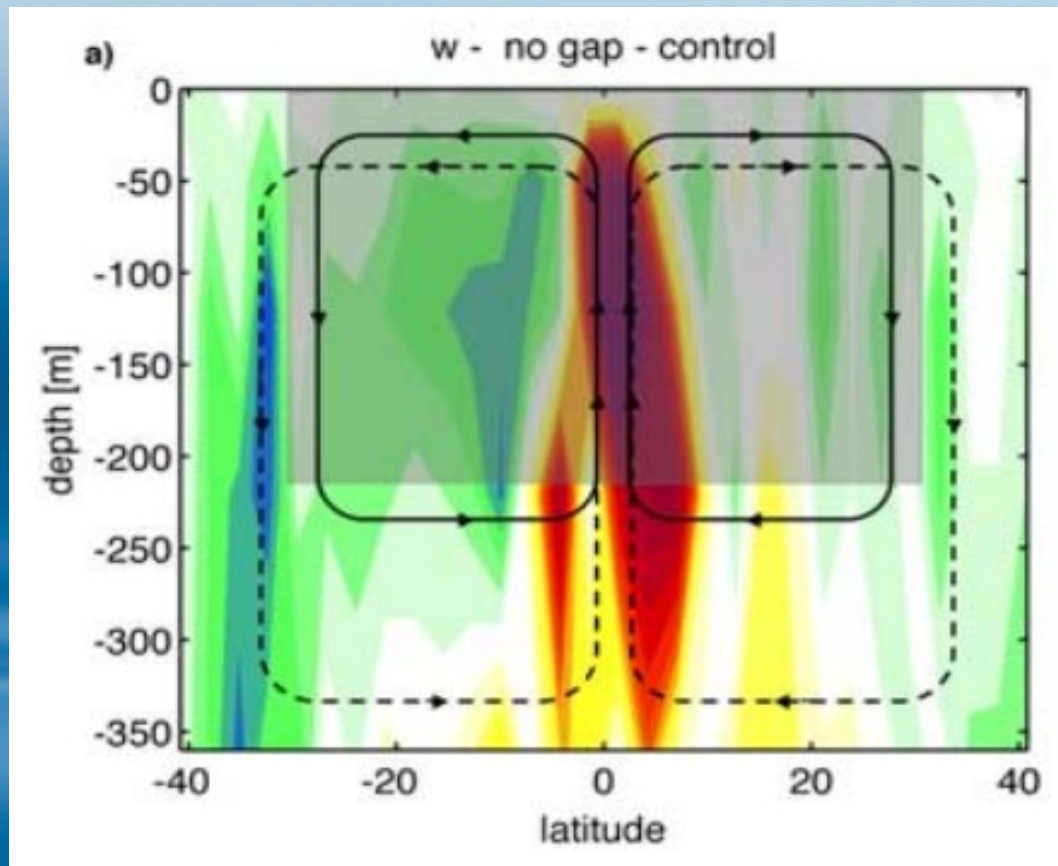


Emanuel (2001) proponuje aby THC widzieć nie tylko jako transport wód powierzchniowych z południa na północ, wyrównbany powrotem wód głębinowych w głębinach i upwellingiem Ekmana koło Antarktydy (górny panel, góra) ale również jako powrót wód głębinowych w tropikach dzięki mieszaniu (dół). Mechanizmem tego jest ogrzewanie oceanu przez huragany tropikalne (dolny panel). Trzy fazy to (a) oziębienie wód powierzchniowych i ogrzanie wód głębszych przez huragan, (b) ponowne ocieplenie wód powierzchniowych w wyniku wymiany ciepła morze-atmosfera, (c) oziębienie wód głębszych w wyniku poziomej adwekcji (czyli ogrzanie całej warstwy pod termokliną). *Emanuel 2001 (JGR)*



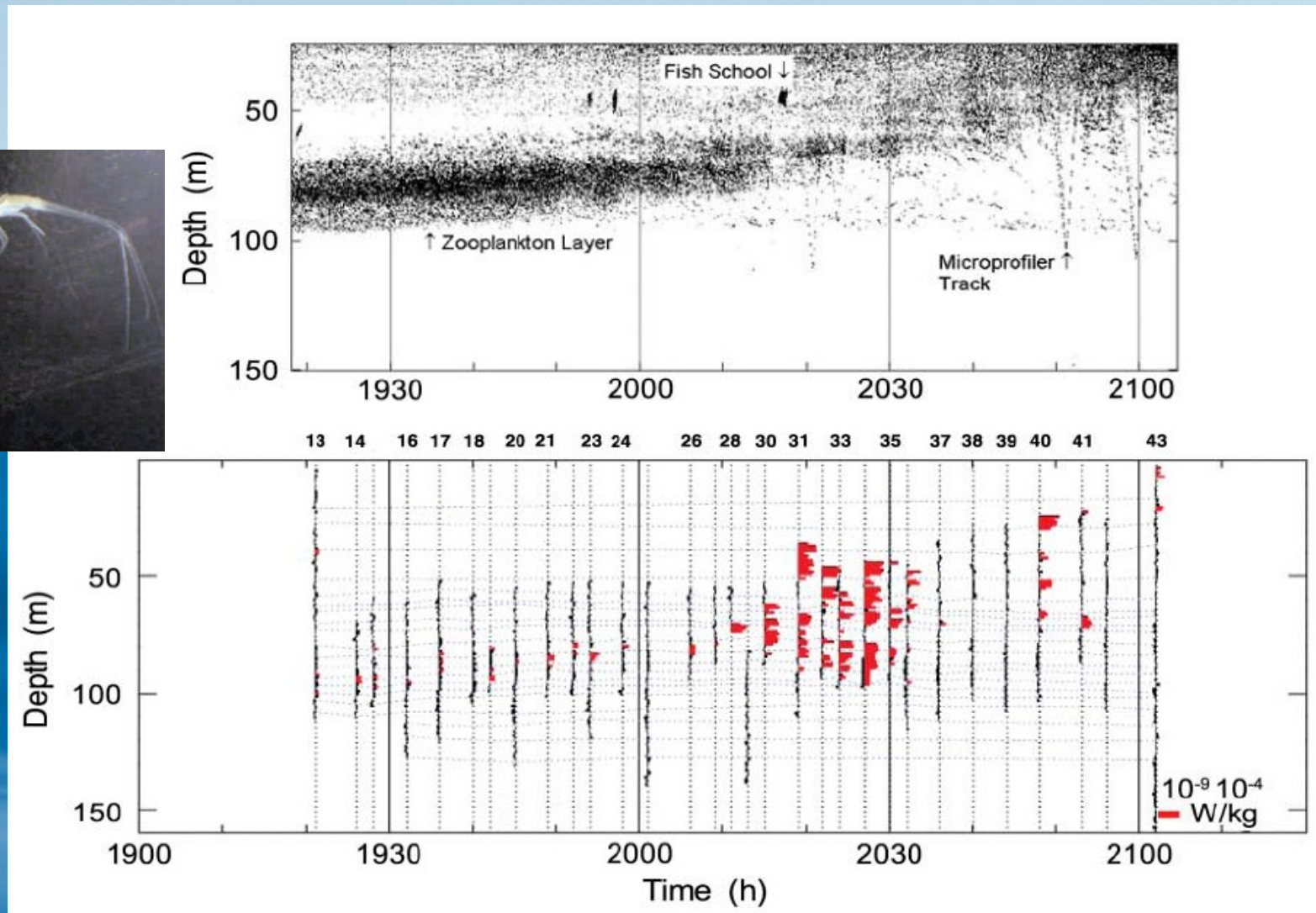
Czy mechanizm Emanuela jest jednak efektywny?

Duża część ciepła przekazywanego przez huragany oceanowi, wraca do atmosfery w obszarze równikowym gdzie huragany nie występują, a zatem nie jest w stanie uczestniczyć w ogrzaniu wód głębszych i dalszych od równika.



Rysunek przedstawia wyniki eksperymentu numerycznego, w którym Jansen i Ferrari (2009) porównują temperaturę oceanu w hipotetycznym świecie z huraganami także przy równiku ("no gap") i w rzeczywistości. Rysunek przedstawia różnicę temperatury i cyrkulacji (przerywana to "no gap"). Gdyby nie "przerwa równikowa" ciepło rozprzestrzeniałoby się dalej a obszar równikowy był cieplejszy.

Zooplankton miesza oceanem?



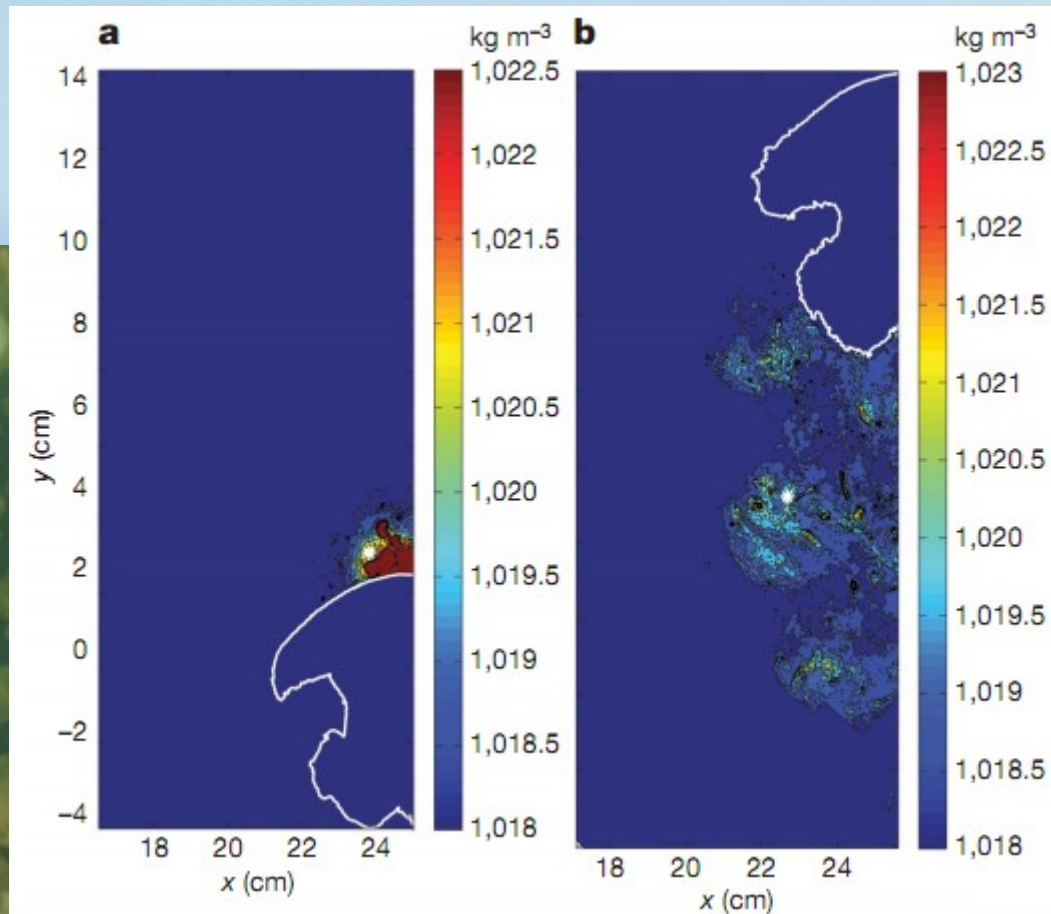
Jednoczesne pomiary akustyczne i hydrologiczne (energia dysypowana) wykazują, że zooplankton (tu krył *Euphasia pacifica*) podczas migracji pionowej potrafi wytwarzać energię turbulencji podobną do występującej w kanałach pływowych. W skali globalnej może stanowić to znaczącą część dostępnej energii turbulentnej oceanu (*metabolizm zooplanktonu to 63 TW*).

Kunze et al. 2006 (Science)

A może meduzy?

Ocean modelers will “need to start thinking about the fluid dynamics of biology. That’s a tough one.”

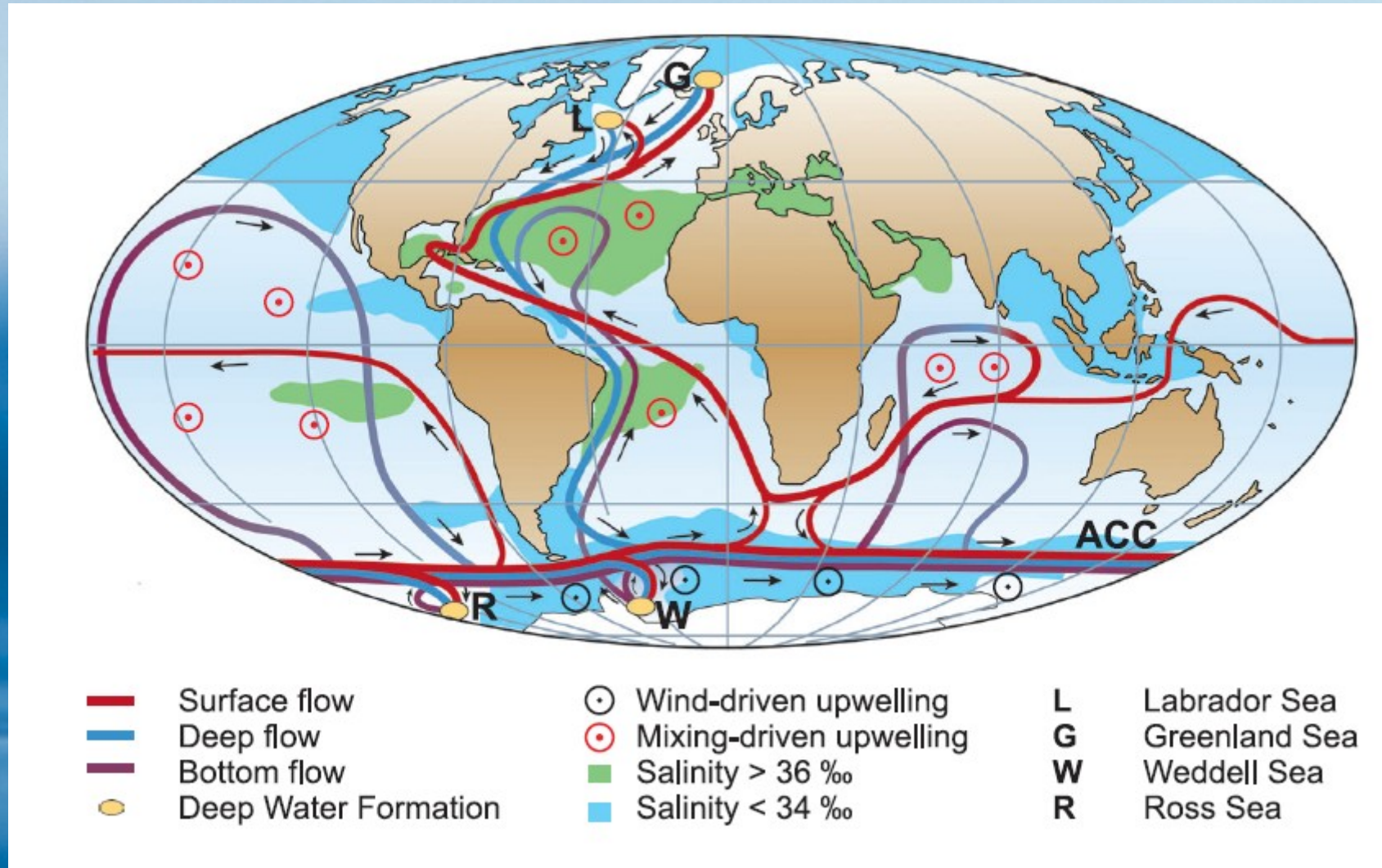
Carl Wunsch.



Zooplankton nie przekracza rozmiarami typowych dla oceanu wartości skali Ozmidowa (powyżej której turbulencja jest mniejsza od sił wyporu związanych ze stratyfikacją) dlatego nie jest dobrym mieszadłem oceanu. Natomiast meduzy i ryby) są w stanie przeciągać za sobą duże ilości wody podróżując w poprzek stratyfikacji (po prawej gęstość barwnika mierzona laserowo “przed” i “po” przepłynięciu meduzy).

Katija & Dabiri 2009(Nature)

Współczesny obraz cyrkulacji termohalinowej

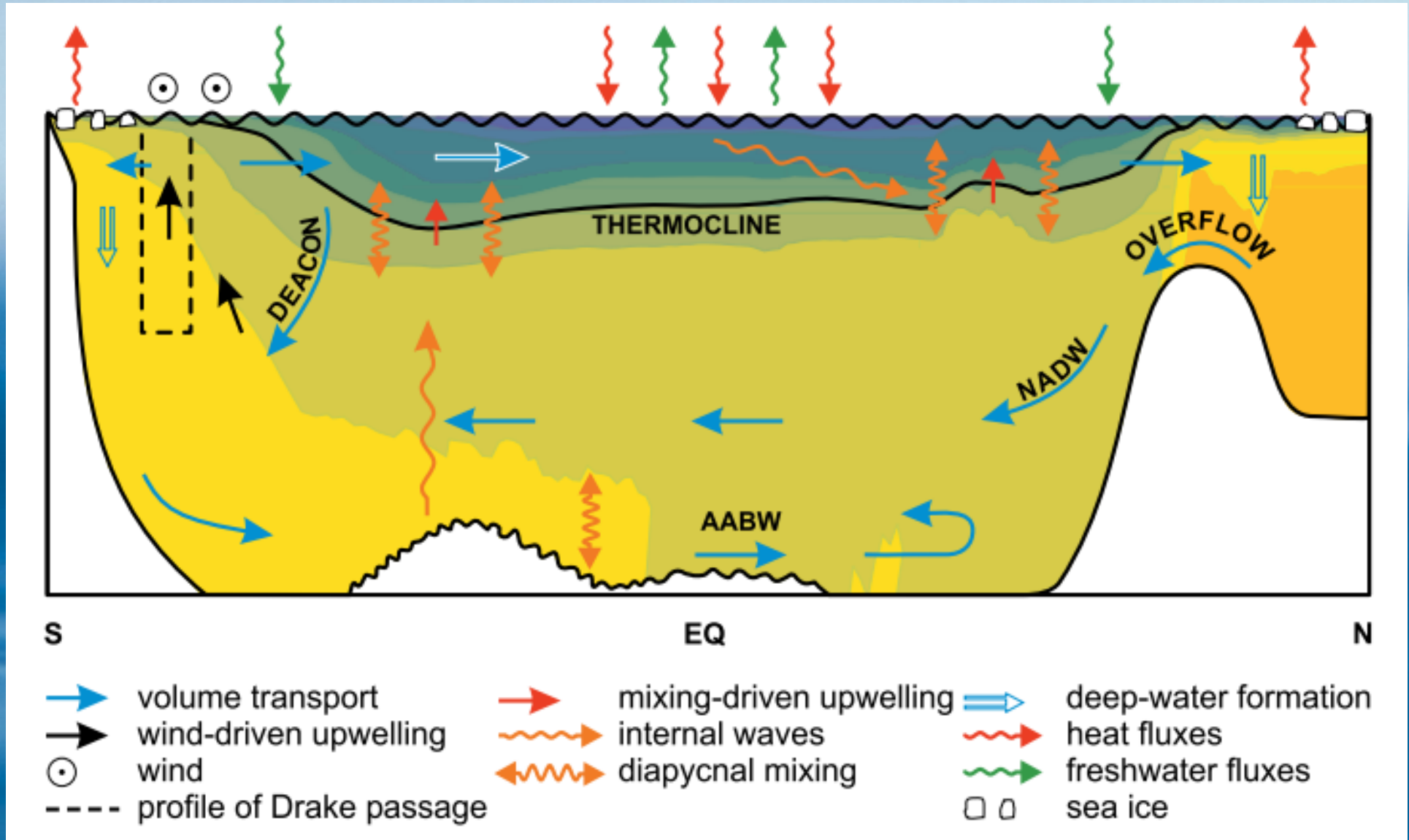


Wody głębinowe wracają na powierzchnię dzięki mieszaniu turbulentnemu (szczególnie na grzbietach podmorskich) i upwellingowi (strumieniowi ku powierzchni) związanemu z transportem Ekmana wokół Antarktydy.

Dlaczego transport Ekmana działa „na lewo”? Bo to półkula południowa!

Kühlbrodt et al 2007 (Reviews of Geophysics), modified from Rahmstorf 2002

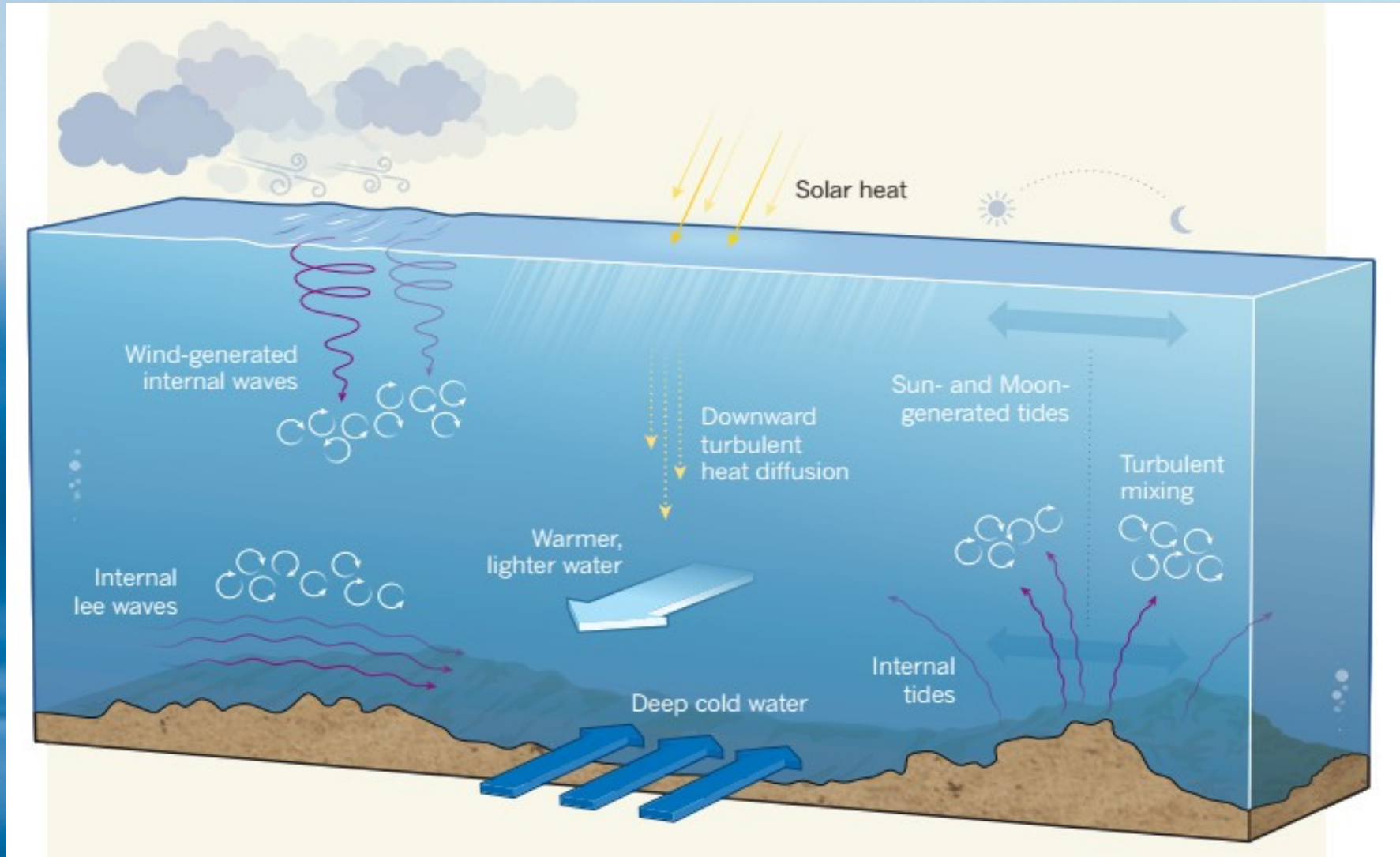
Współczesny obraz cyrkulacji termohalinowej (c.d.)



Idealizacja cyrkulacji termohalinowej Atlantyku, w przekroju pionowym południe (po lewej) – północ (po prawej). Wśród przedstawionych procesów brakuje tylko tropikalnych huraganów i... zwierząt morskich.

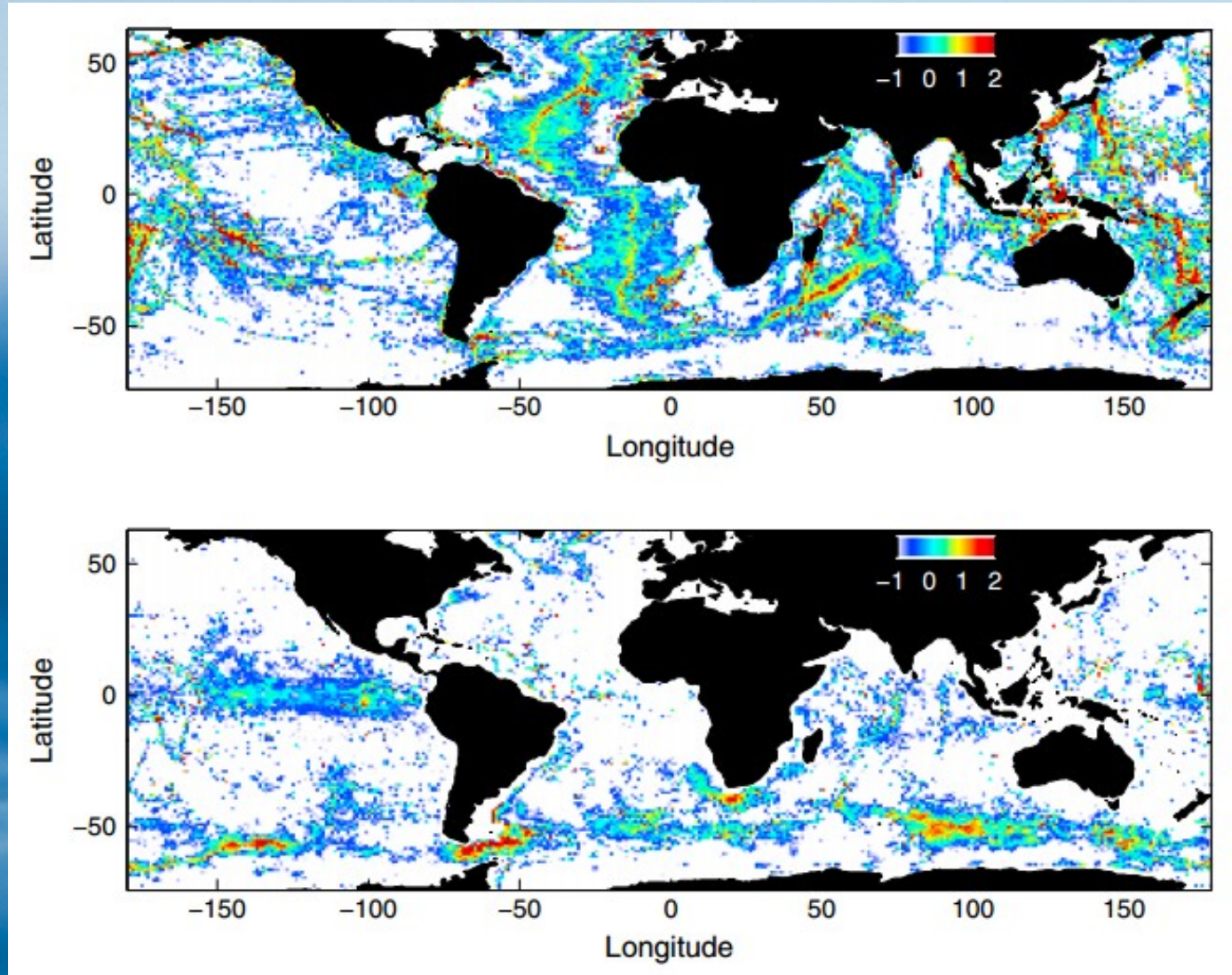
Kühlbrodt et al 2007 (Reviews of Geophysics)

Współczesny obraz mieszania w oceanie



W stosunku do poprzedniego obrazu dodatkiem jest zaproponowany przez Nikurashina i Ferrari (2011 i 2013) mechanizm łamania fal wewnętrznych wywołanych przepływem prądu nad nierównym dnem (“lee waves”)

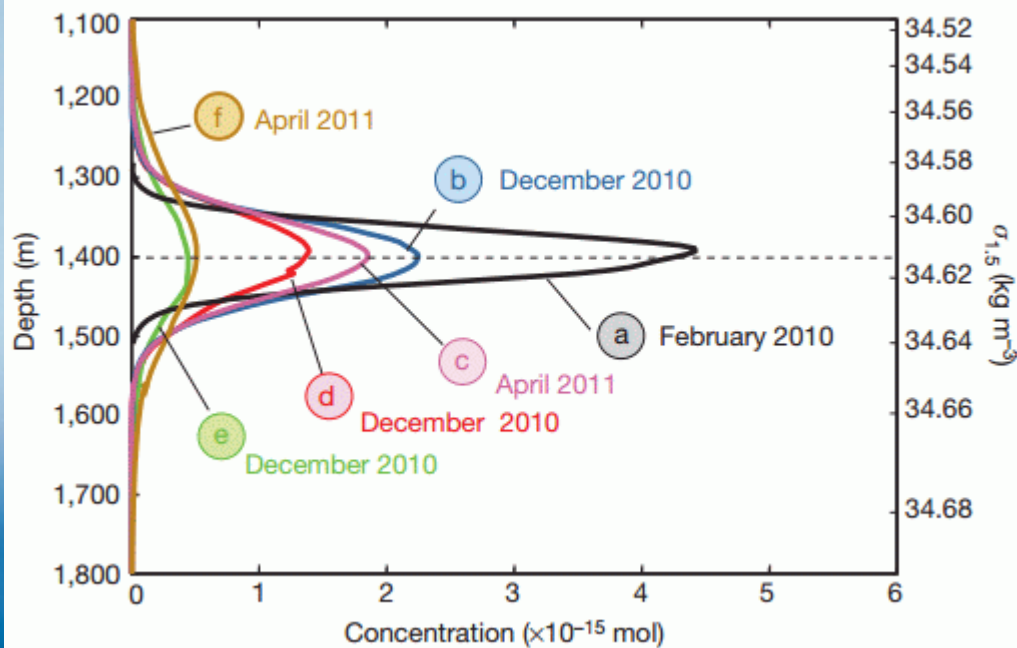
Mieszanie przez łamanie fal wewnętrznych



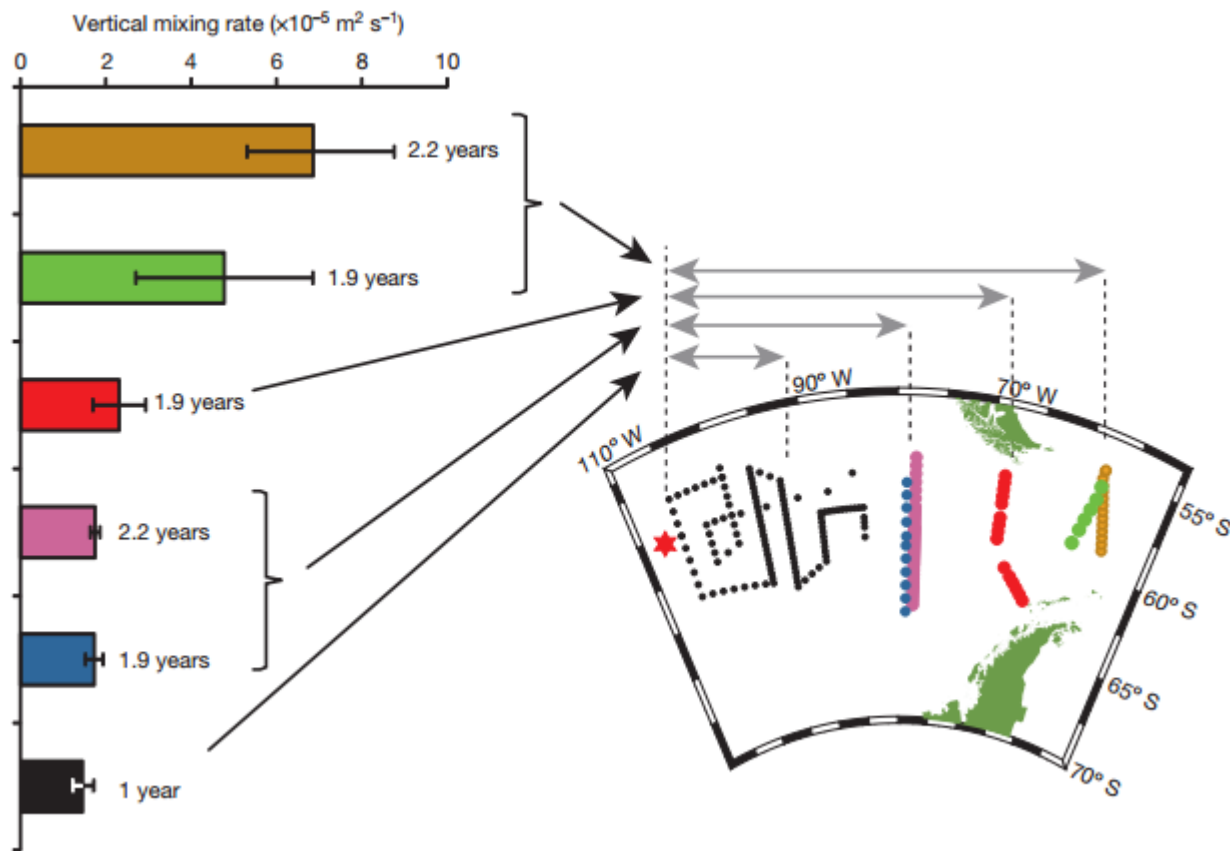
Obliczony strumień energii z łamania fal wewnętrznych w $\log_{10}(\text{mW m}^{-2})$ pochodzących z pływów M2 (góra) i prądów geostroficznych ("lee waves") (dół). Widać, że geograficznie uzupełniają się one, pokrywając większość oceanu.

Nikurashin & Ferrari 2013 (GRL)

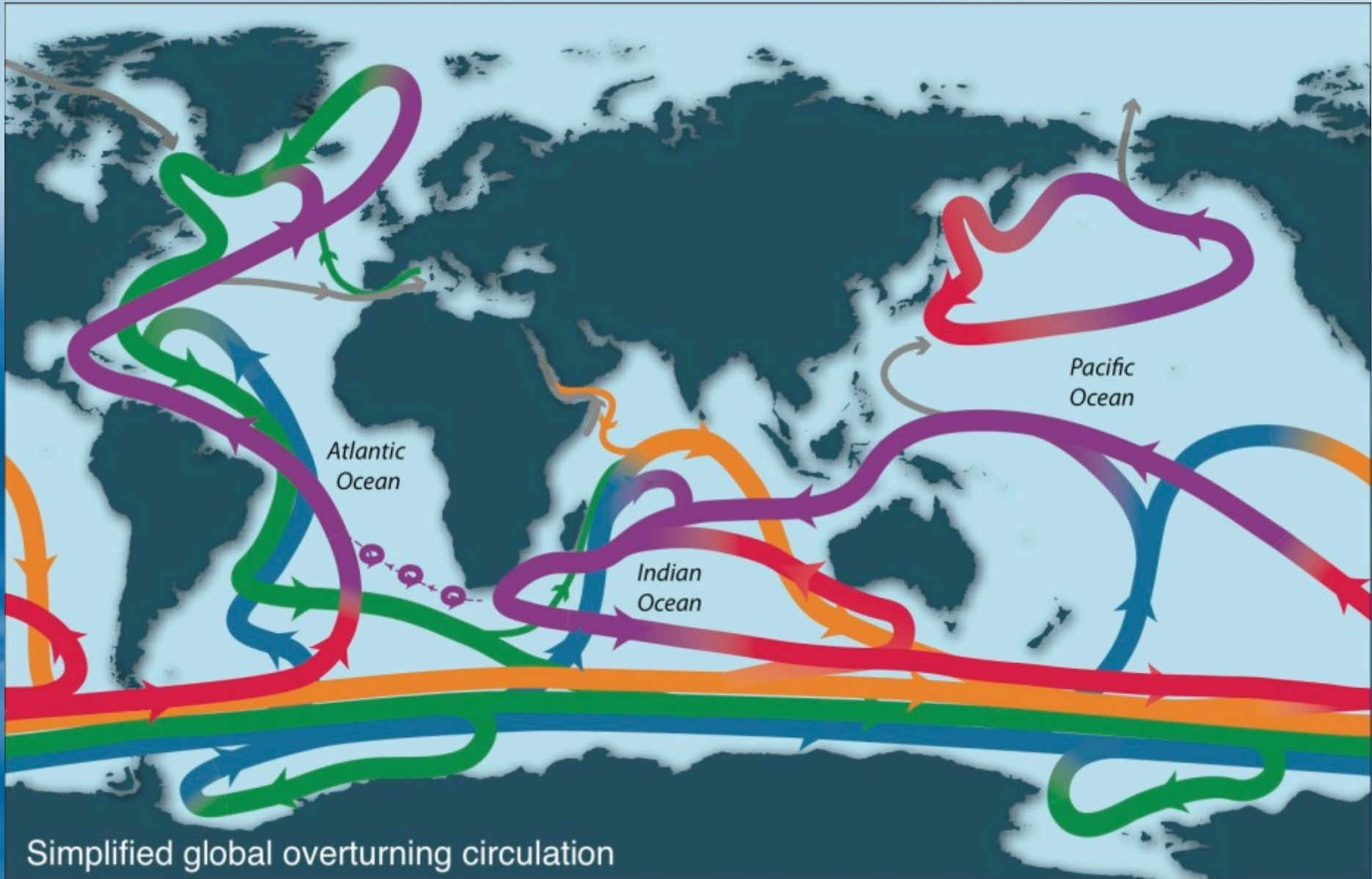
Potwierdzenie doświadczalne



Pomiary rozprzestrzeniania się 76 kg trójsulfu węgla (CF_3SF_5) w rejonie Cieśniny Drake'a wskazują na 20-krotne zwiększenie mieszania zgodne co do 50% z obliczeniami Nikurashina i Ferrari (2011). Wynik ten rozszerzony na cały obszar Prądu Wokółantarktycznego jest w stanie wytłumaczyć 20-30% mieszania potrzebnego do utrzymania 20 Sv MOC

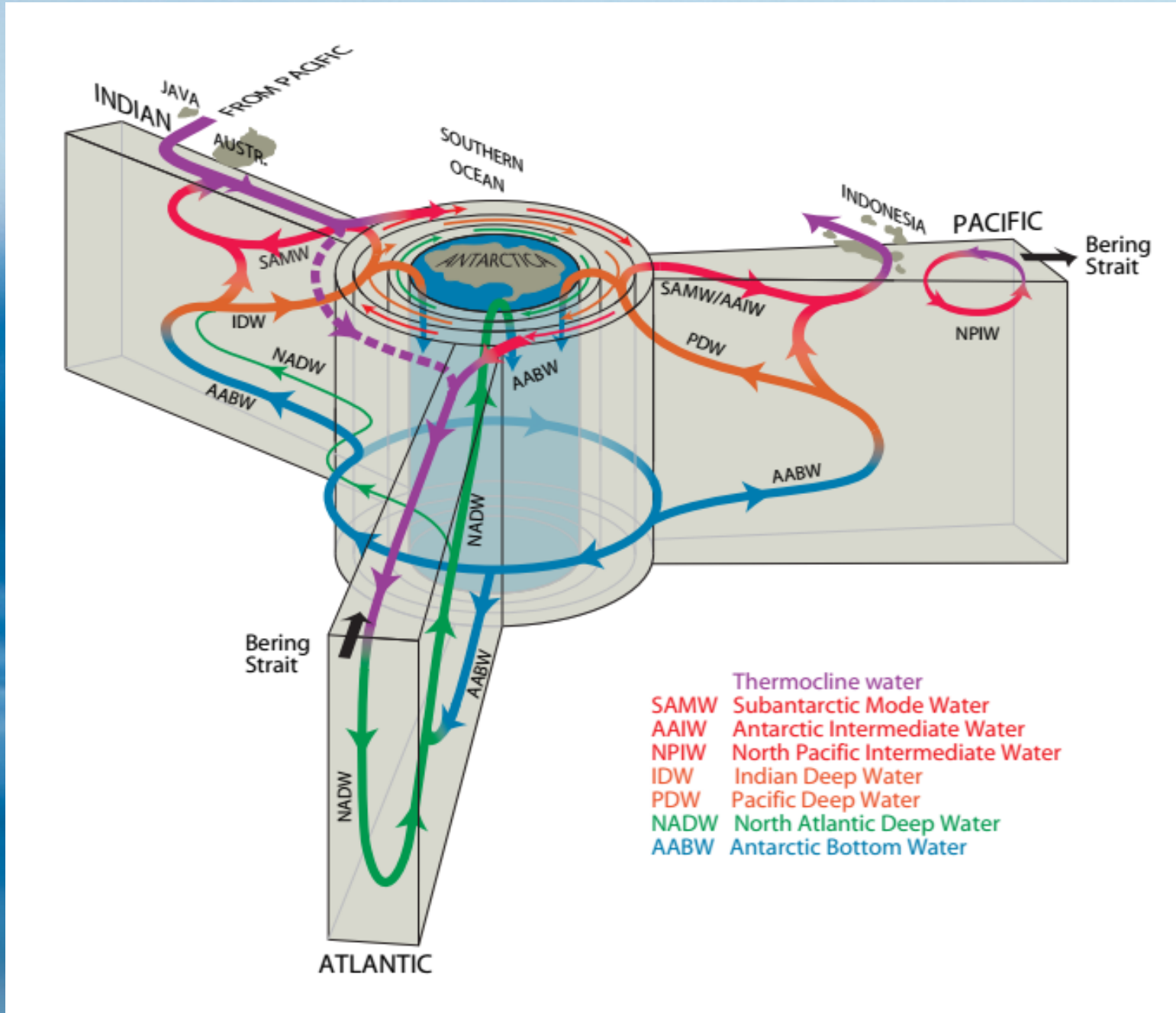


Najnowszy obraz cyrkulacji termohalinowej

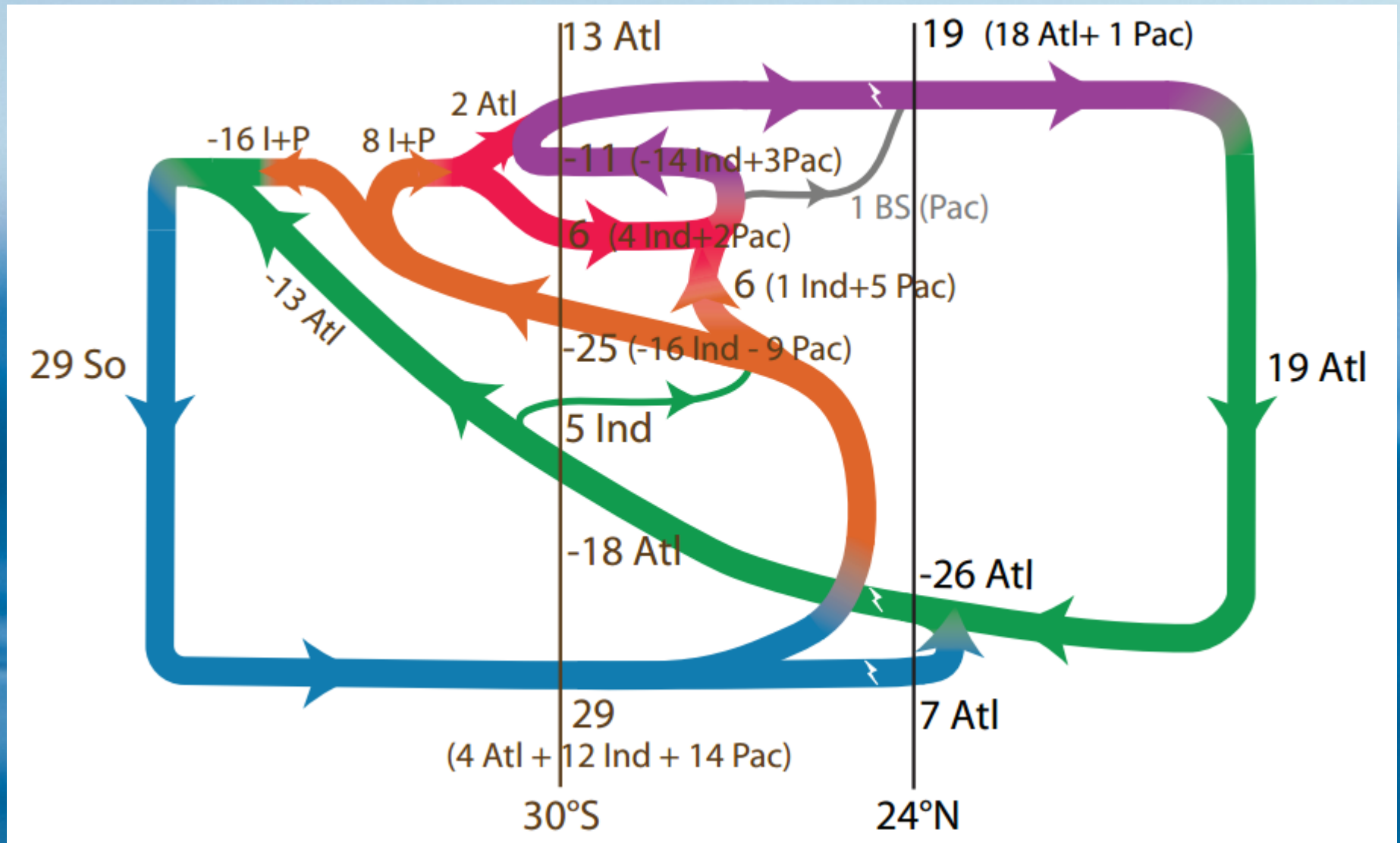


Wiemy o MOC coraz więcej. Dlatego właśnie powyższy schemat jest... „uproszczony”.

Najnowszy obraz cyrkulacji termohalinowej



Najnowszy obraz cyrkulacji termohalinowej



Transport masyw sverdrupach (Sv)

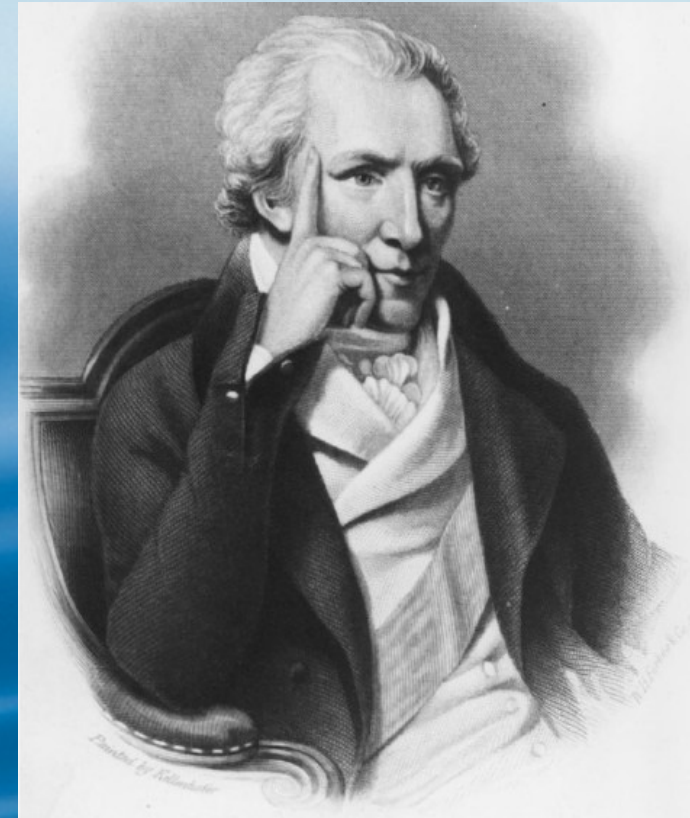
Podsumowanie 1/2

Cyrkulacja termohalinowa nie jest wymuszana jedynie różnicami temperatury i zasolenia. Trudno ją oddzielić od cyrkulacji wymuszanej wiatrem. Część jej energii pochodzi od mieszania spowodowanego wiatrem i pływami (oraz zooplanktonem?).

Wunsch (2002) zaproponował aby nazwę THC pozostawić dla bilansu soli i ciepła a część cyrkulacji związanej z produkcją wód głębinowych nazwać Meridional Overturning Circulation (MOC) [*Południkowa Cyrkulacja Przewracająca ???*]. Nazwa ta ostatnio zaczyna dominować w literaturze.

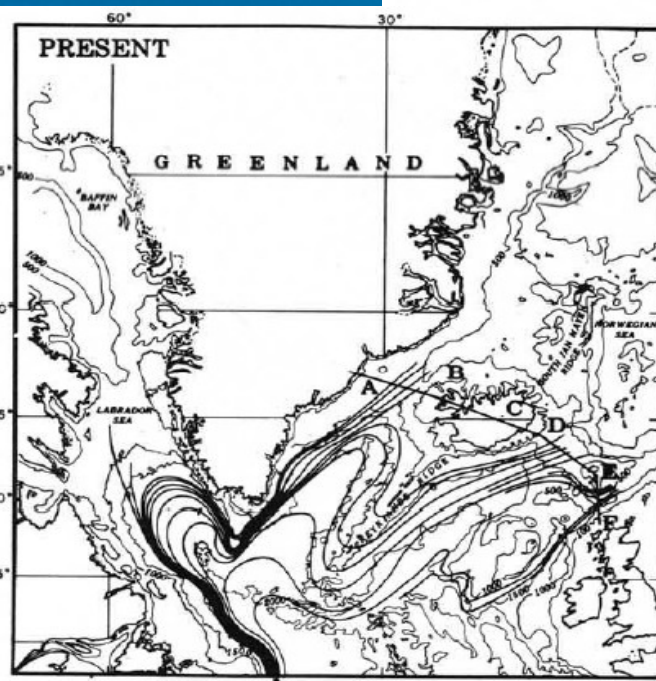
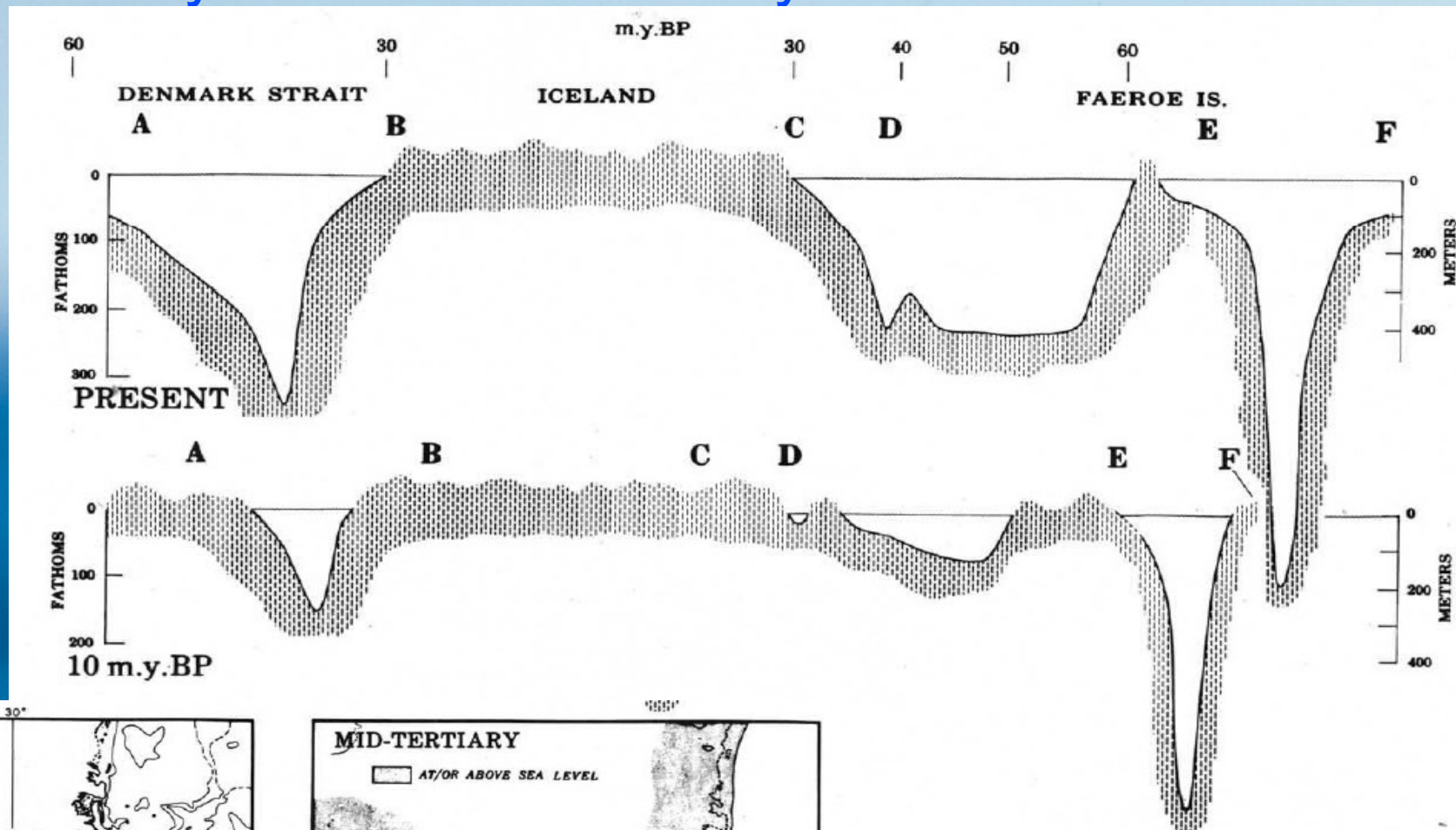
Rahmstorf (2006) zdefiniował THC jako „tą część cyrkulacji oceanicznej, która napędzana jest strumieniami ciepła i słodkiej wody poprzez powierzchnię morza oraz mieszanie ciepła i zasolenia w toni wodnej”.

Która nazwa (i definicja) zwycięży? Chyba już widać, że MOC i AMOC...



Sir Benjamin Thompson, odkrywca (1798) idei transportu ciepła ku biegunom wodami powierzchniowymi wracającymi jako zimne wody głębinowe.

Od kiedy może istnieć atlantycka THC?



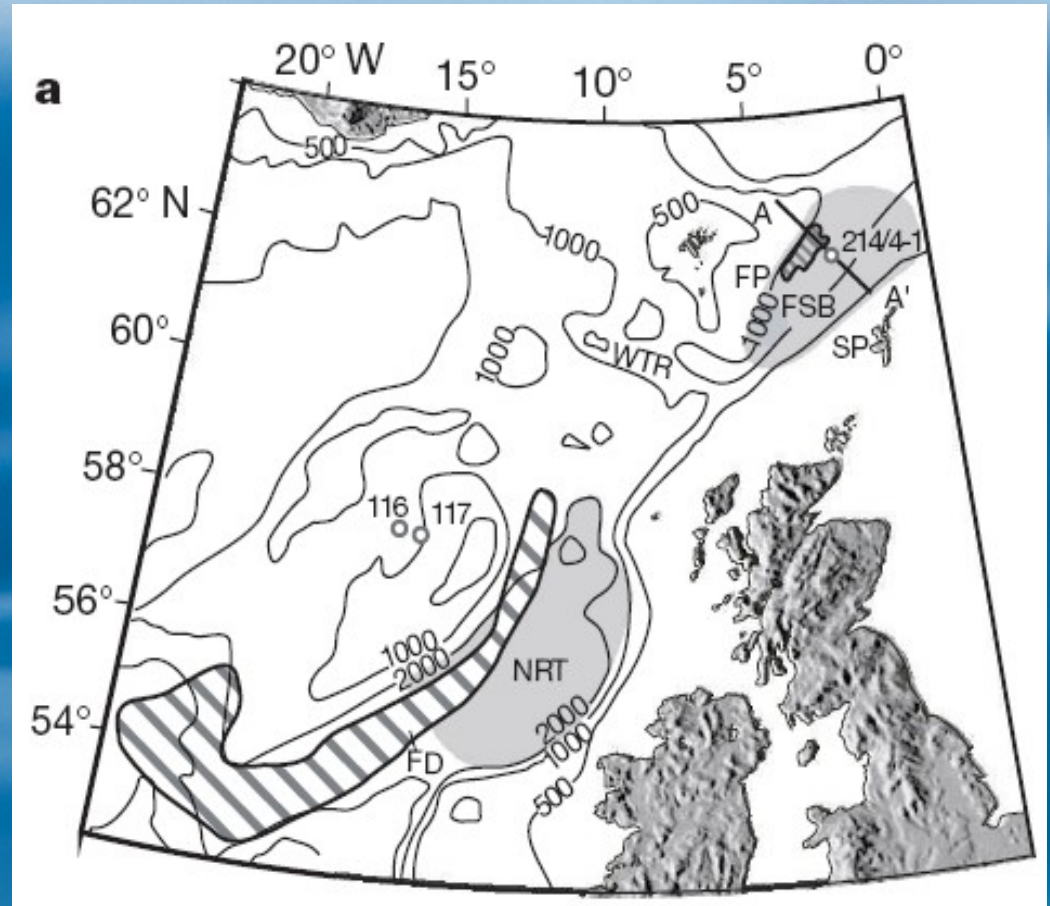
Kiedy otworzyło się przejście z Atlantyku do Mórz Nordyckich. Czy 10 Ma jak sądzono jeszcze 30 lat temu?

Vogt 1972 (Nature)

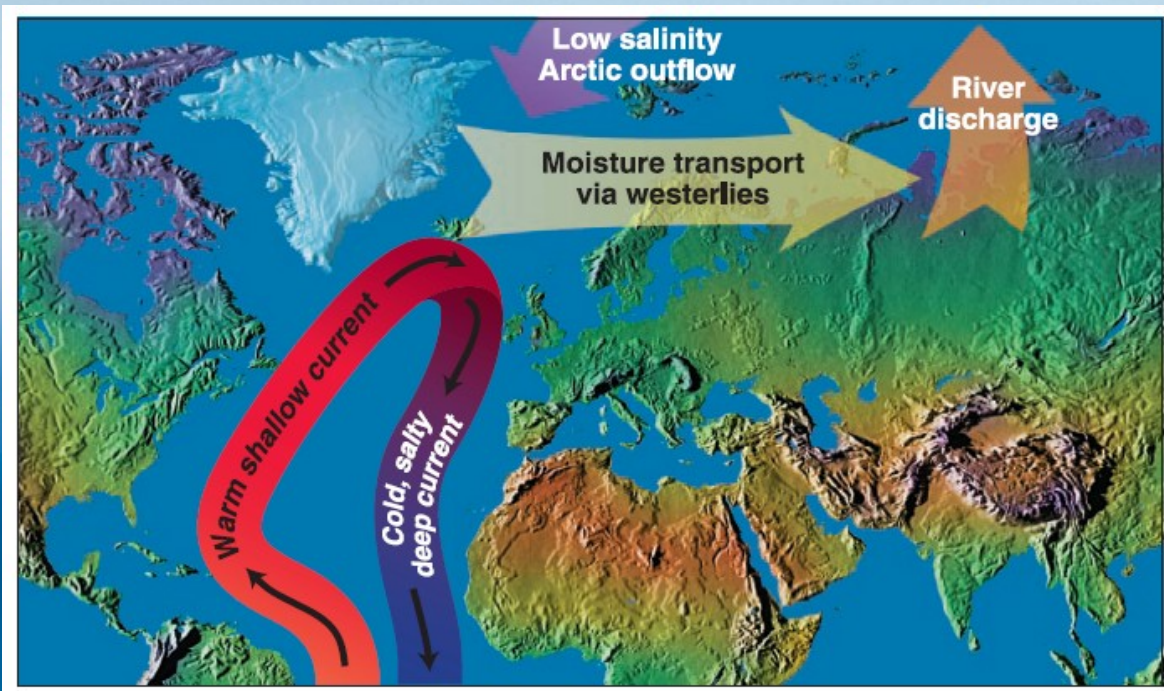
Atlantycka THC istniała od 35 mln lat

Datowanie najniższych warstw pola osadów (kreskowane) przyniesionych przez przydenne wody głębinowe z kanału pomiędzy Szetlandami a Wyspami Owczymi „FSB” (*Faroe-Shetland Basin*) daje wiek ok. 35 mln lat . Pozwala to przypuszczać, że tworzenie Atlantyckich Wód Głębiniowych w Morzach Nordyckich trwa mniej więcej od tego czasu.

[Czy koincydencja z początkiem zlodowacenia Antarktydy jest przypadkowa? - JP]

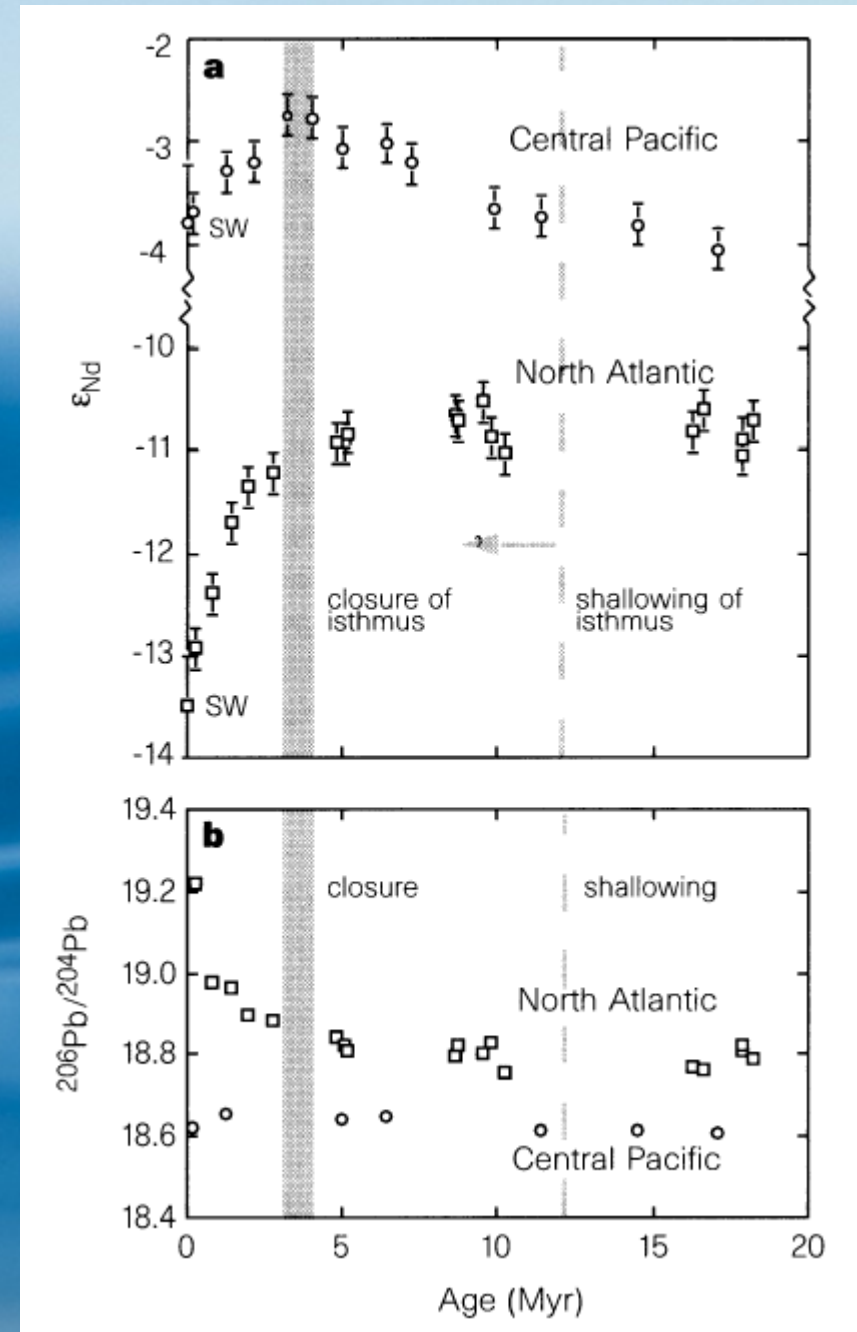


THC i zamknięcie Przesmyku Panamskiego 4.5 Ma



Zamknięcie połączenie Atlantyku i Pacyfiku ok 4.5 Ma zwiększyło intensywność THC (widoczne w bardziej “atlantyckim” stosunku izotopów neodymu i ołowiu (po prawej).

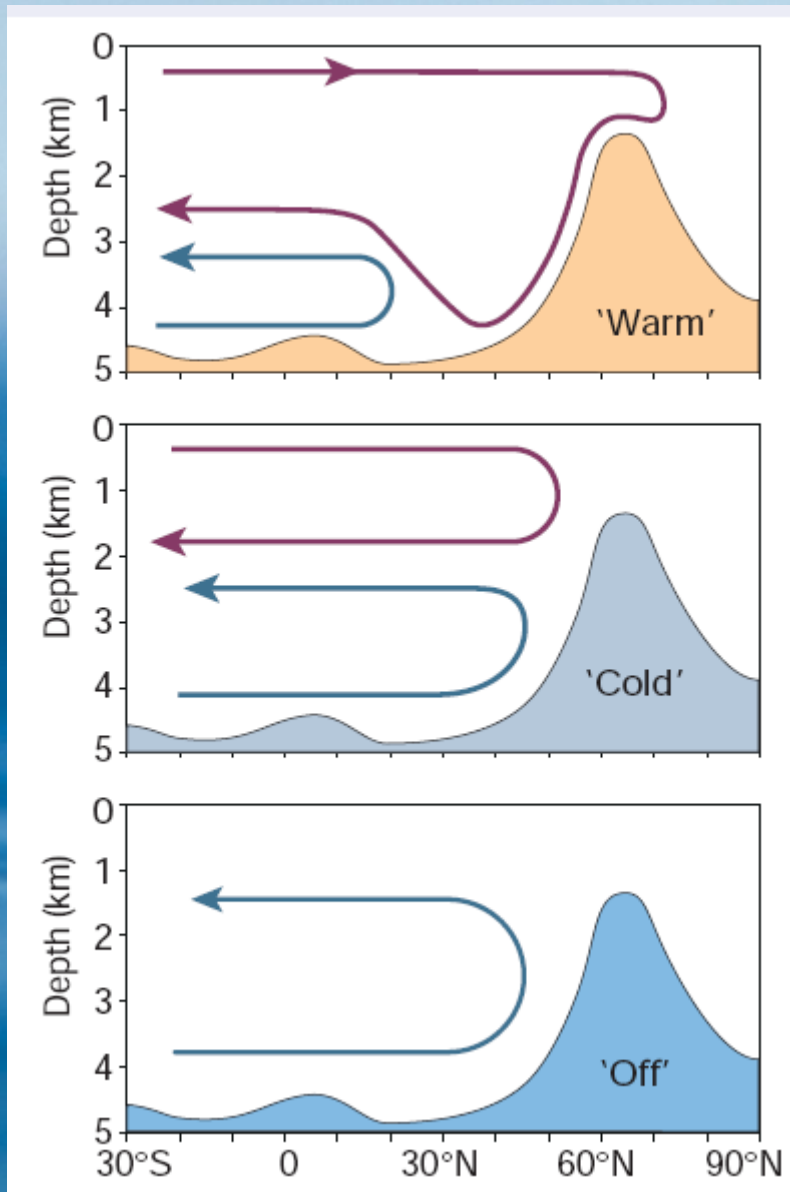
Prawdopodobnie nie spowodowała jednak zlodowaceń (na górze) przez hipotetyczne zwiększenie opadów w Eurazji które następnie przyhamowało THC.



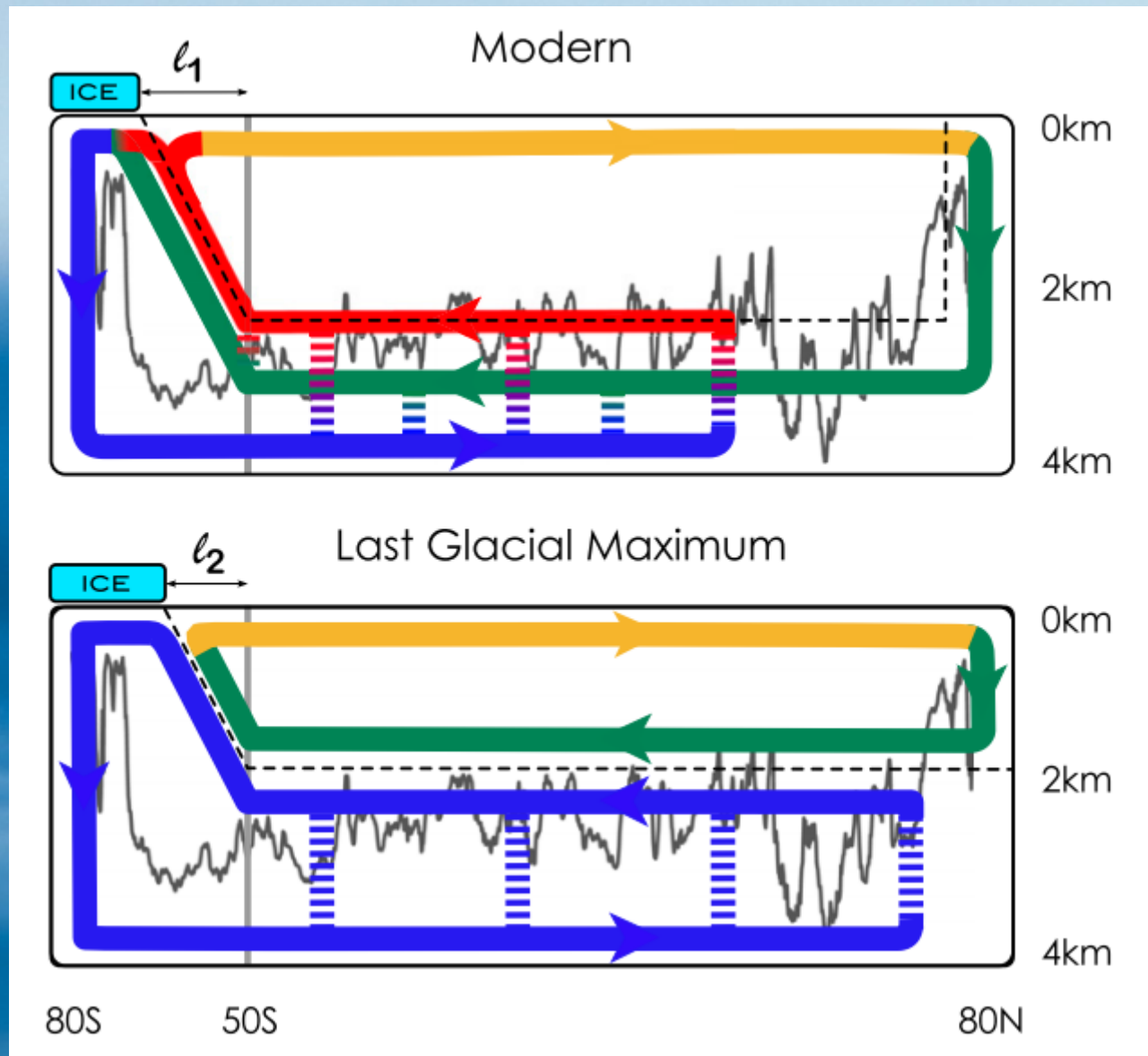
Przypomnienie: THC w epoce lodowej

Trzy fazy THC

- Faza ciepła D/O: THC podobna jak obecne, NADW tworzy się na Morzach Nordyckich, Antarktyczne Wody Głębiny odepchnięte daleko na południe.
- Faza zimna D/O: Atlantyczne Wody Pośrednie tworzą się na południe od Islandii; Antarktyczne Wody Głębiny wypełniają głębie Atlantyku.
- Zdarzenie Heinricha: cyrkulacja termohalinowa ustaje całkowicie.



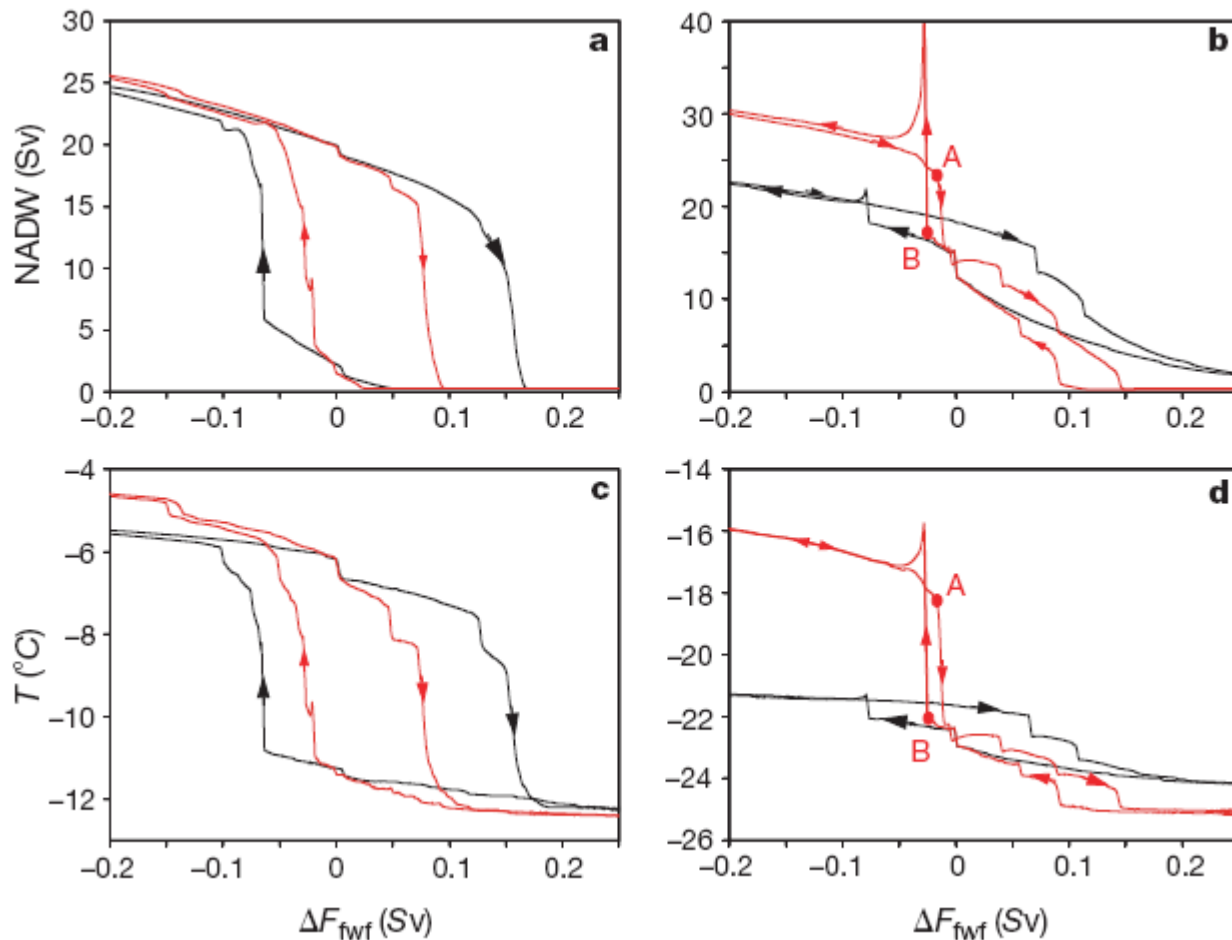
THC w epoce lodowej i dziś (najnowszy obraz)



Kluczowy w tym obrazie jest zasięg lodu wokół Antarktydy, decydujący o dalszych losach wód atlantyckich (NADW).

Ferrari et al 2014 (PNAS)

Przypomnienie: THC zależy od dopływu słodkiej wody do Północnego Atlantyku

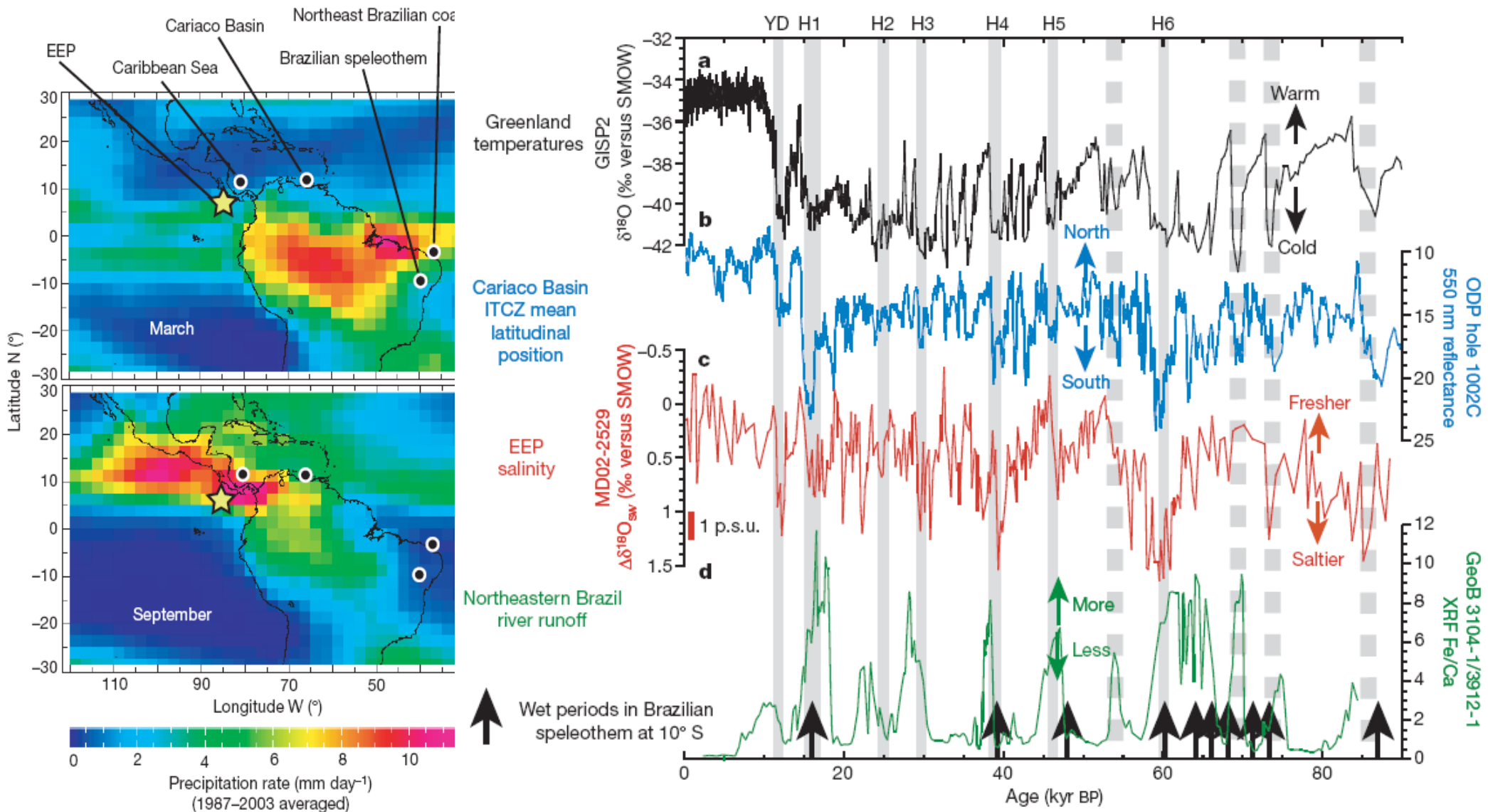


Modelowanie klimatyczne wielkości produkcji NADW (góra) i temperatura powierzchniowa (dół) Północnego Atlantyku obecnie (po lewej) i w epoce lodowej (po prawej) w funkcji strumienia dopływu słodkiej wody do subarktycznego (czerwone) i polarnego (czarne) Atlantyku.

Modele klimatyczne pokazują, że woda słodka wpływa nieliniowo (pętla histerezy) na NADW. Dla zatrzymania THC potrzeba więcej wody słodkiej wlanej daleko lub mniej blisko Arktyki. W czasie zlodowaceń pętla histerezy była węższa co powodowało niestabilność klimatu.

Ganopolski & Rahmstorf 2001 (Nature)

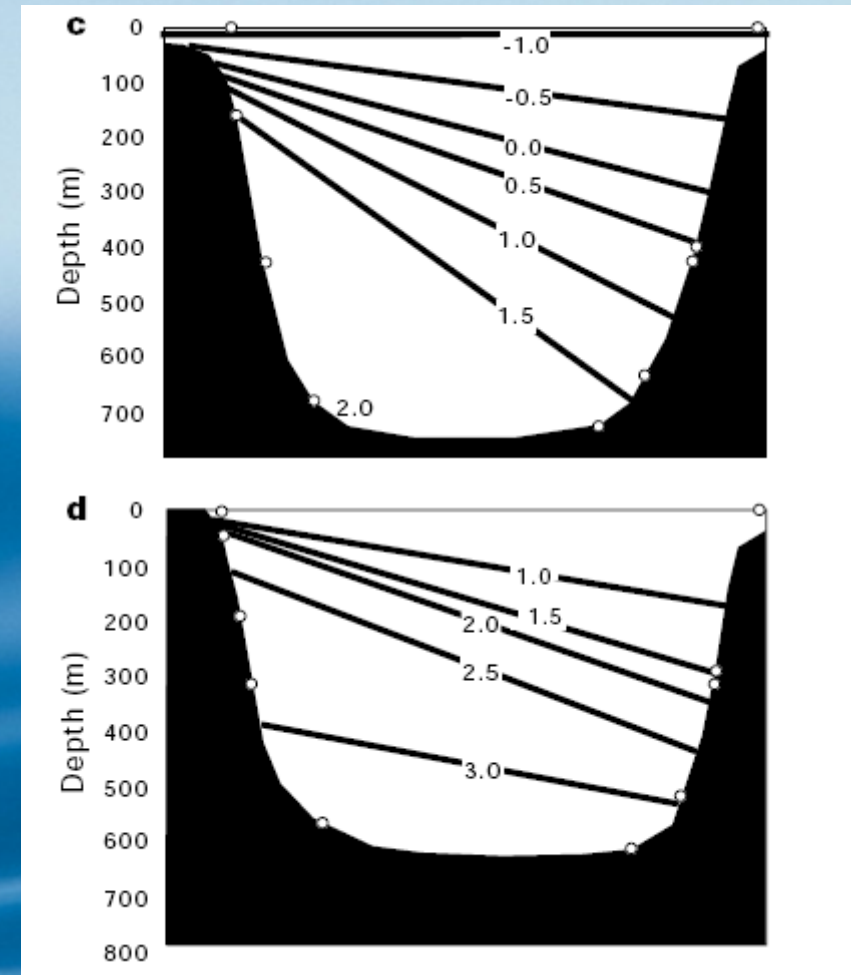
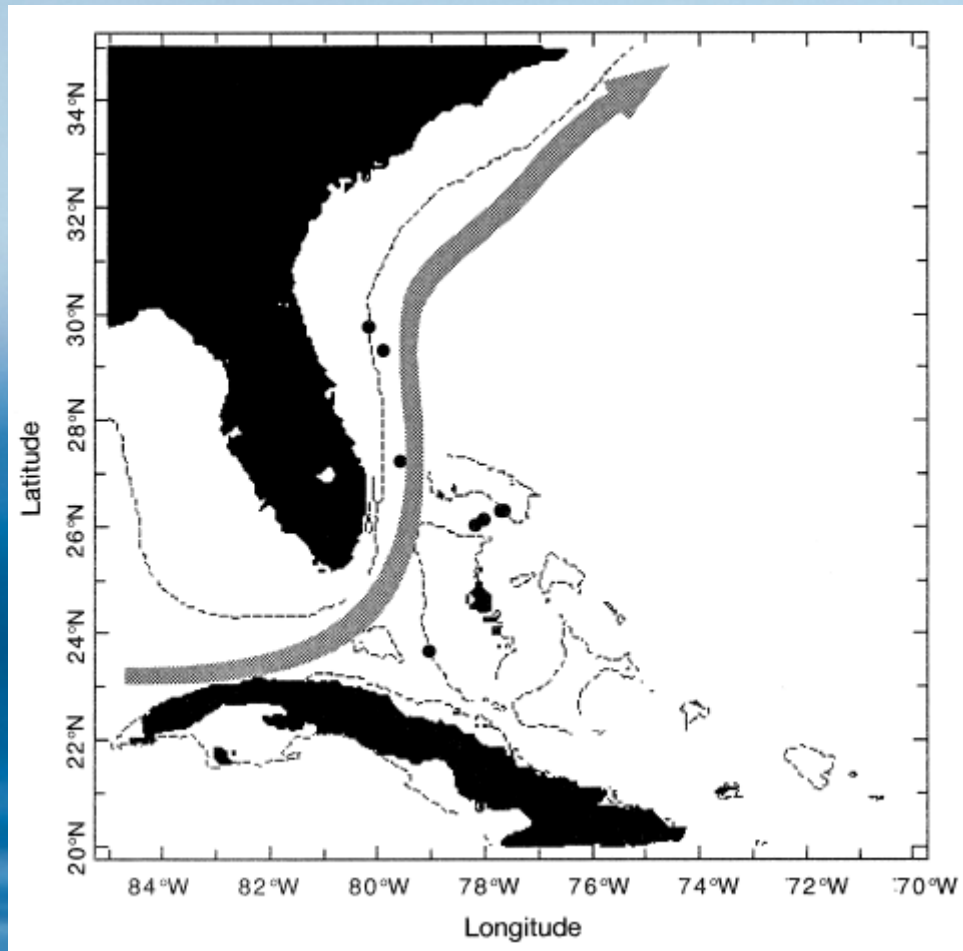
Czy na zmiany THC epoki lodowej miały wpływ tropiki?



Zmienność położenia Tropikalnej Strefy Konwergencji, a zatem i transportu wody słodkiej Atlantyk -> Pacyfik (**zasolenie tropikalnego Pacyfiku Wschodniego**) wydaje się korelować z THC (temperatura Grenlandii). Jednak co jest przyczyną a co skutkiem?

Leduc et al. 2007 (Nature)

Prawie bezpośredni pomiar Gofsztrouu w epoee lodowej

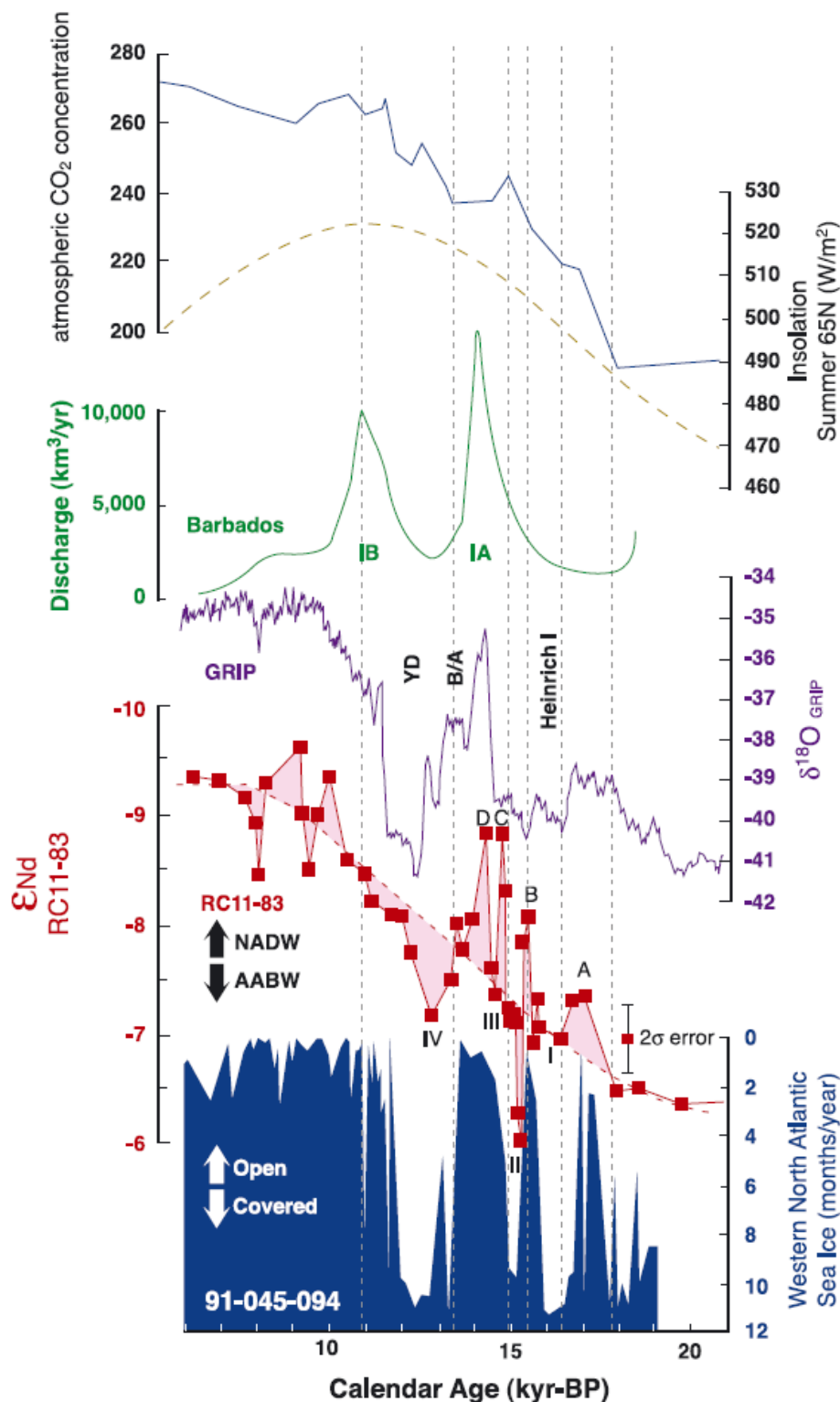


Pomiar koncentracji izotopów tlenu kopalnych otwornic przybrzeżnych po obu stronach Prądu Zatokowego pokazuje dzisiejsze (góru) i dawne (dół) nachylenie geostroficzne prądu. Pozwala to na obliczenie prędkości przepływu. Wyniki wskazują na przepływ w Ostatnim Maksimum Lodowcowym równy jedynie 2/3 dzisiejszej wartości.

Lynch-Stieglitz, Curry & Slowey. 1999 (Nature)

Przypomnienie: THC podczas deglacjacji

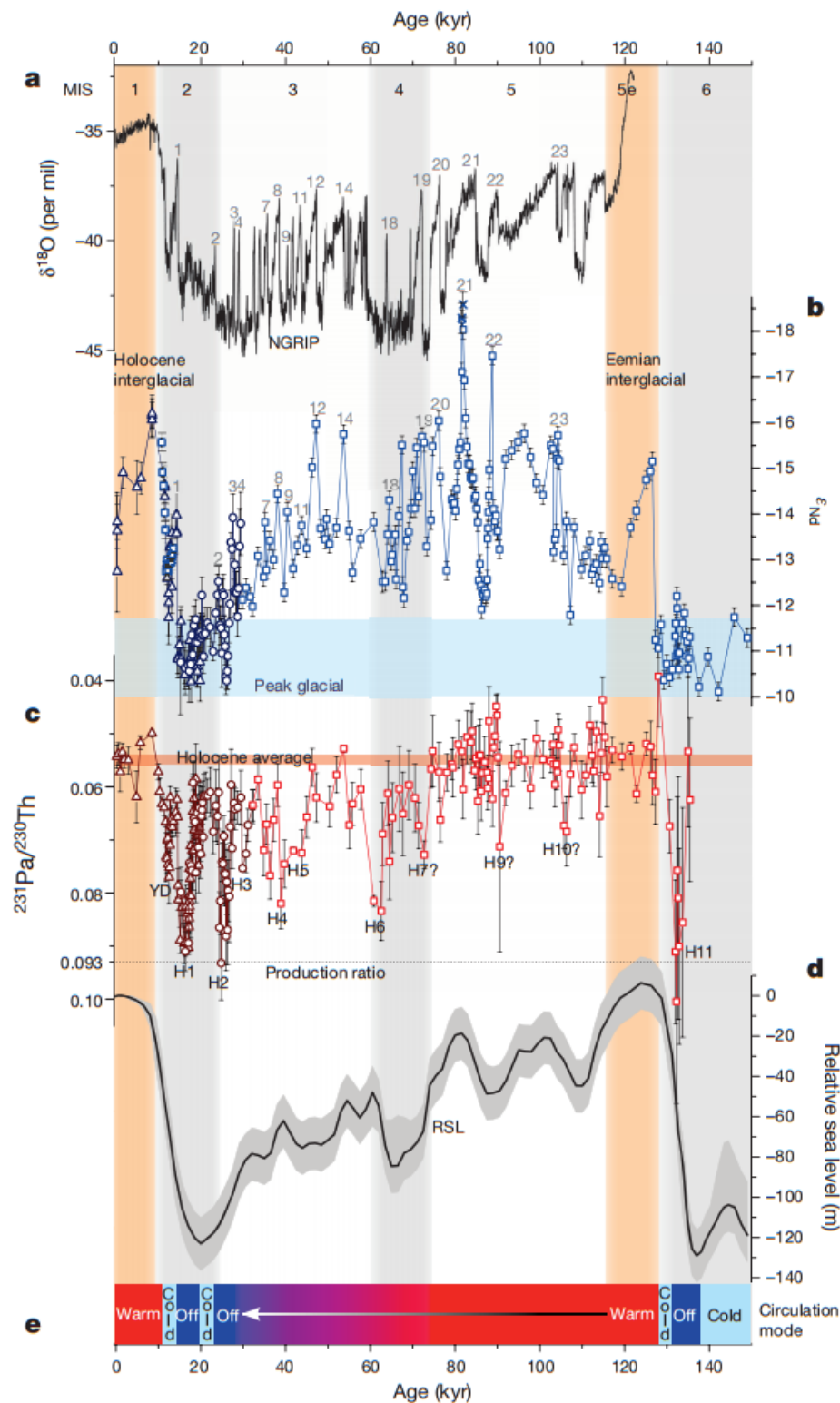
Zawartość neodymu w wodzie morskiej wskazuje na jej pochodzenie (najmniej na Morzu Labradorским, najwięcej na Pacyfiku). Parametr ten (***czzerwona linia***), z rdzeni z Południowego Atlantyku wskazuje na systematyczny wzrost wpływu Głębokiej Wody Północnoatlantyckiej kosztem Głębokiej Wody Antarktycznej, czyli na systematyczne wzmocnienie THC. Młodszy Dryas jest lokalnym minimum na wykresie.



*Piotrowski et al. 2004
(Earth and Planetary Science Letters)*

THC podczas epoki lodowej

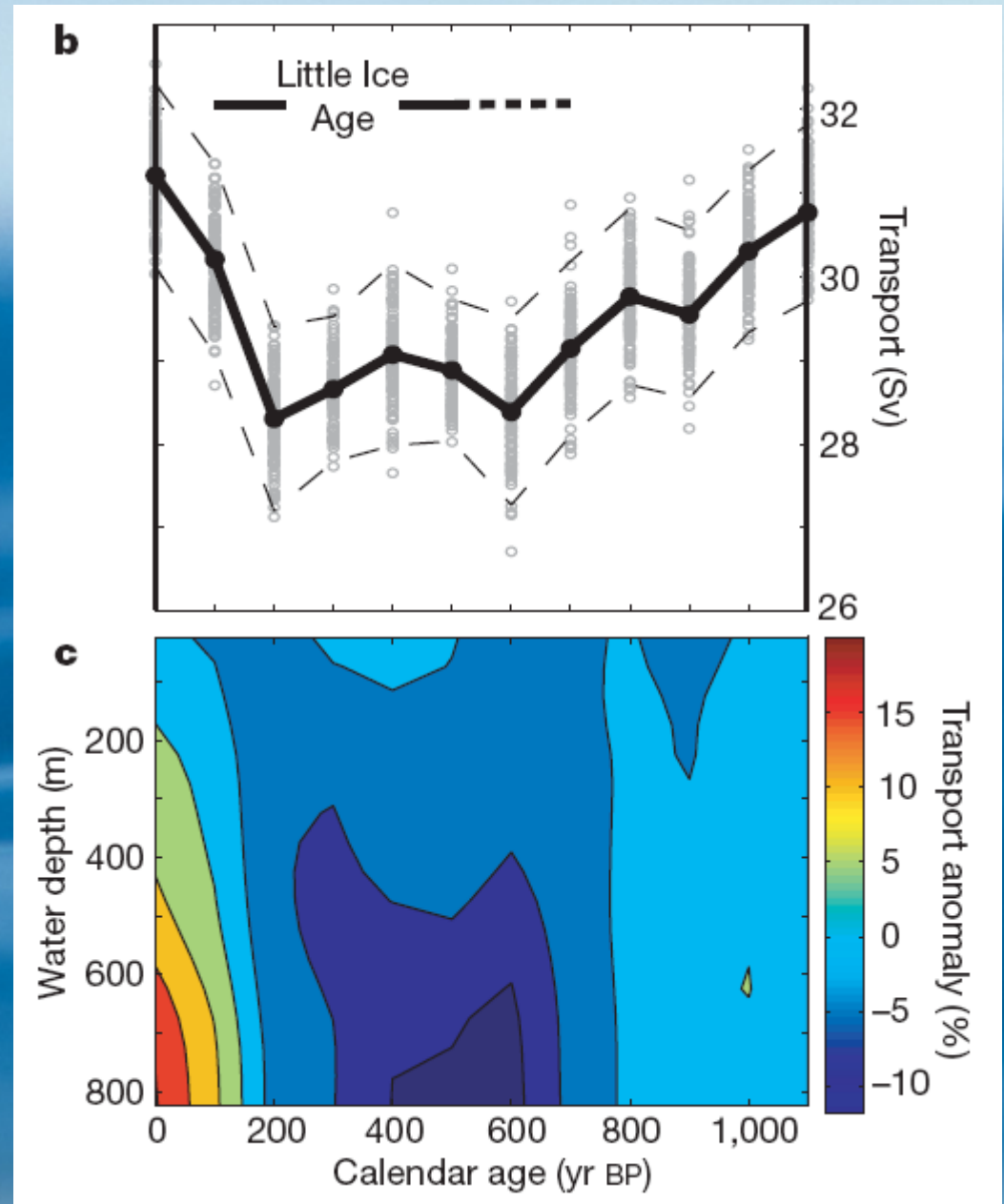
Zawartość neodymu oraz stosunek izotopów $^{231}\text{Pa}/^{230}\text{Th}$ świadczą o tym, że słabszy mod cyrkulacji termohalinowej “włączył się” dopiero w maksimum zlodowacenia, a mod bez cyrkulacji termohalinowej na Atlantyku jedynie podczas ostatnich dwóch zjawiska Heinricha (H1 i H2) oraz jednego z poprzedniej epoki lodowej (H11).



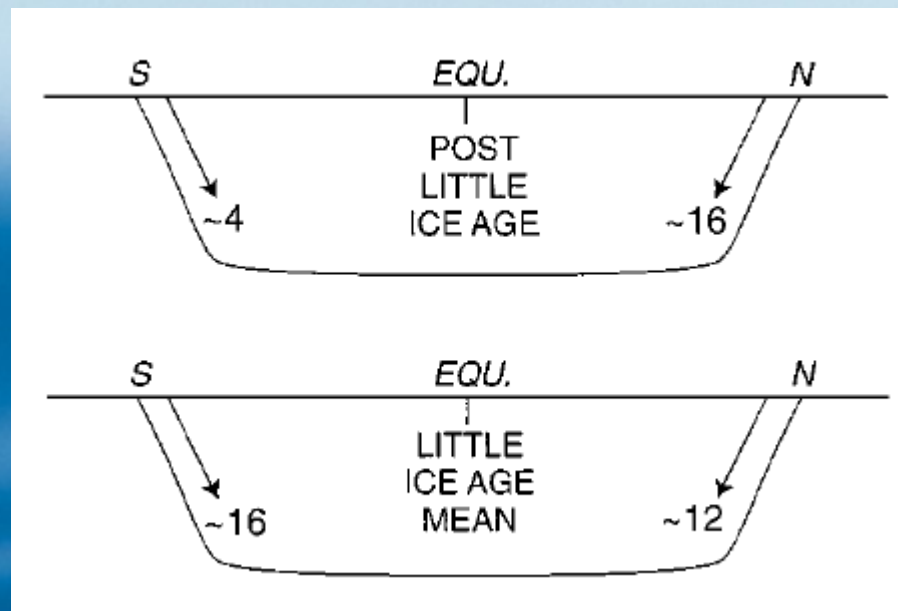
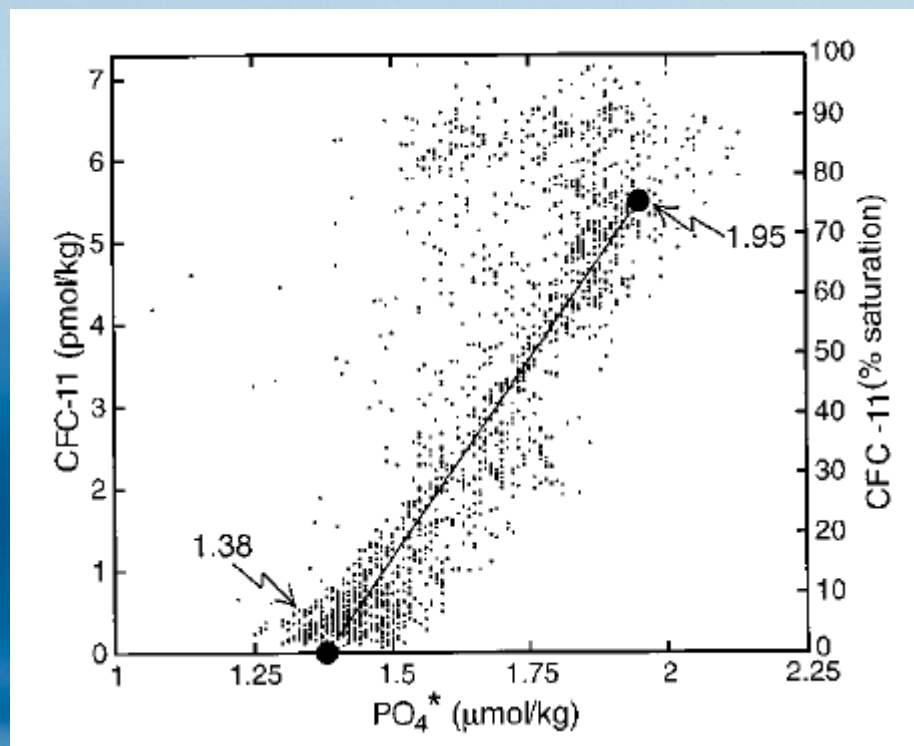
THC w okresie Małej Epoki Lodowej

Badania intensywności Prądu Zatokowego w przeciągu ostatniego tysiąca lat (metodami analogicznymi do badania Golsztromu epoki lodowcowej) wskazują, że był on zmniejszony o około 10% w stosunku do dzisiejszego.

Na górze: intensywność Prądu Zatokowego w ciągu ostatniego 1000 lat;
na dole: zmiany procentowe przepływu na poszczególnych głębokościach.



Produkcję wód głębinowych podczas Małej Epoki Lodowej można wyliczyć



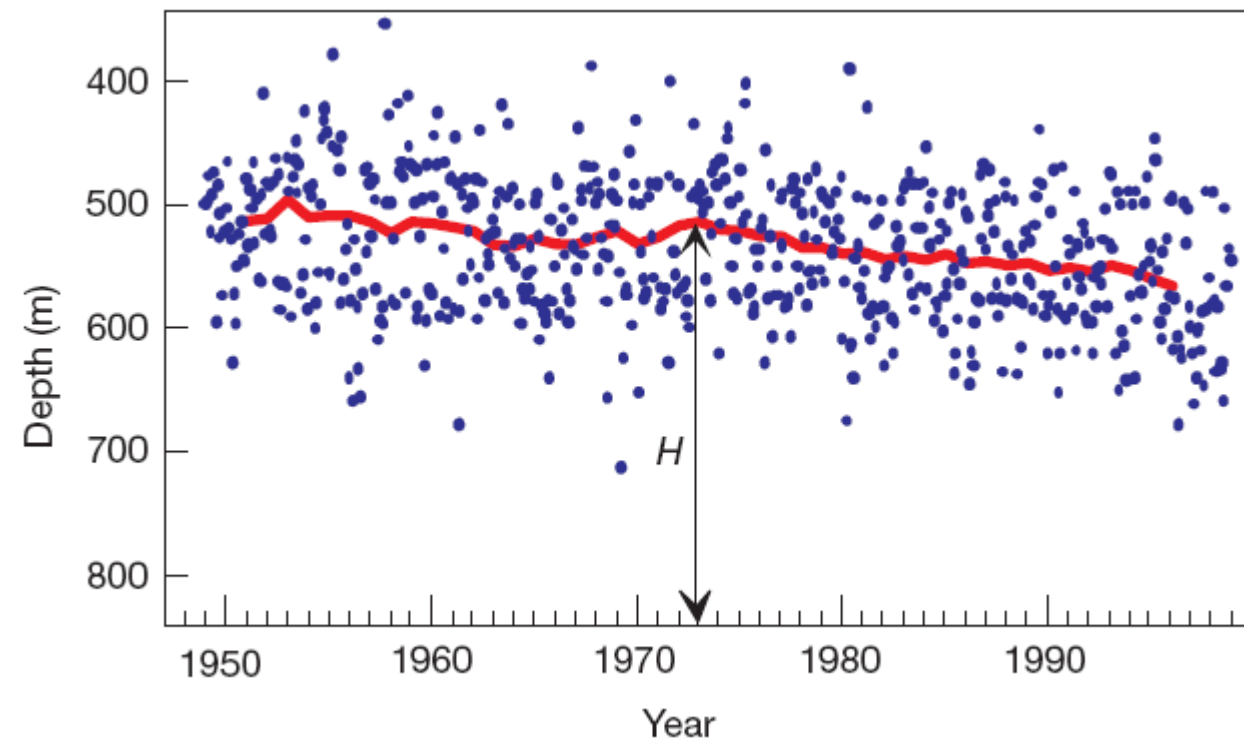
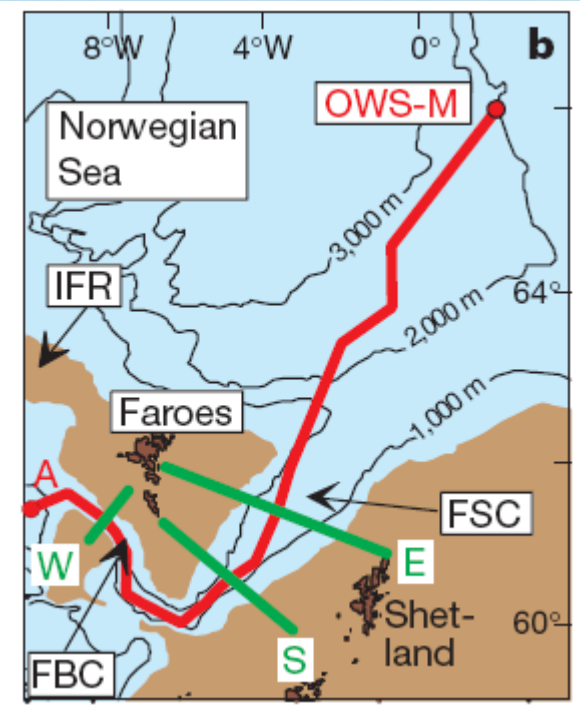
Nasycenie wód głębinowych mórz południowych freonem-11 (CFC-11) jest miarą ich świeżości gdyż związek nie występował w naturze przed 1950 r. Wody stare (bez freonu) zawierają inną koncentrację PO_4^* niż wody młode.

Ponieważ PO_4^* jest wielkością konserwatywną (zachowawczą) może posłużyć do wyliczenia wieku wód głębinowych tworzących się na Północy (0.73 dla „czystych wód północnych”) i Południu (1.95). Obecnie na Pn. Atlantyku tworzy się ok. 16 Sv a wokół Antarktydy 4 Sv. W Małej Epoce Lodowej ilości te były zupełnie inne (odpowiednio 12 Sv i 16 Sv).

Broecker 2000 (PNAS)

Czy cyrkulacja termohalinowa słabnie?

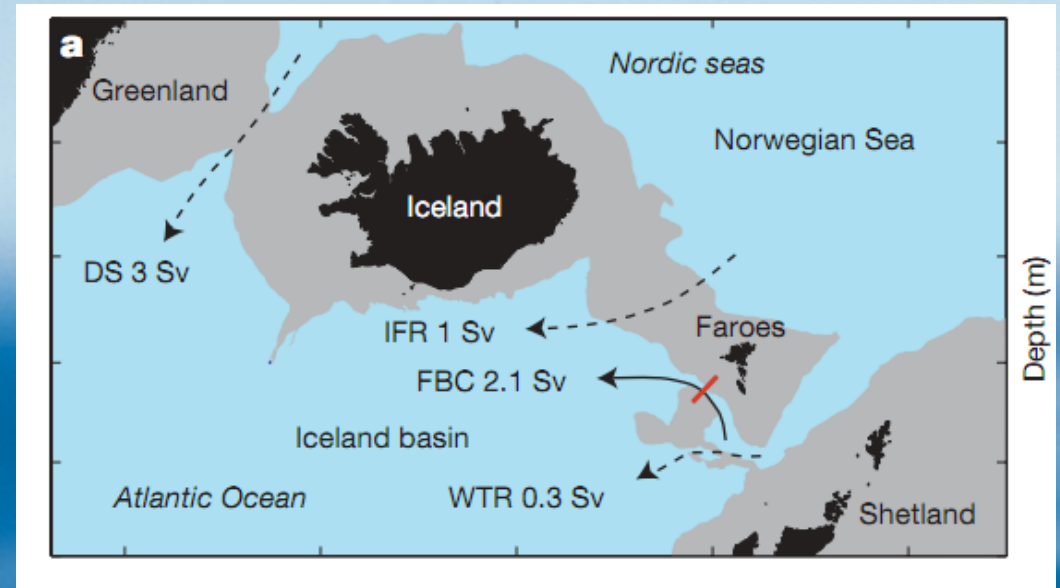
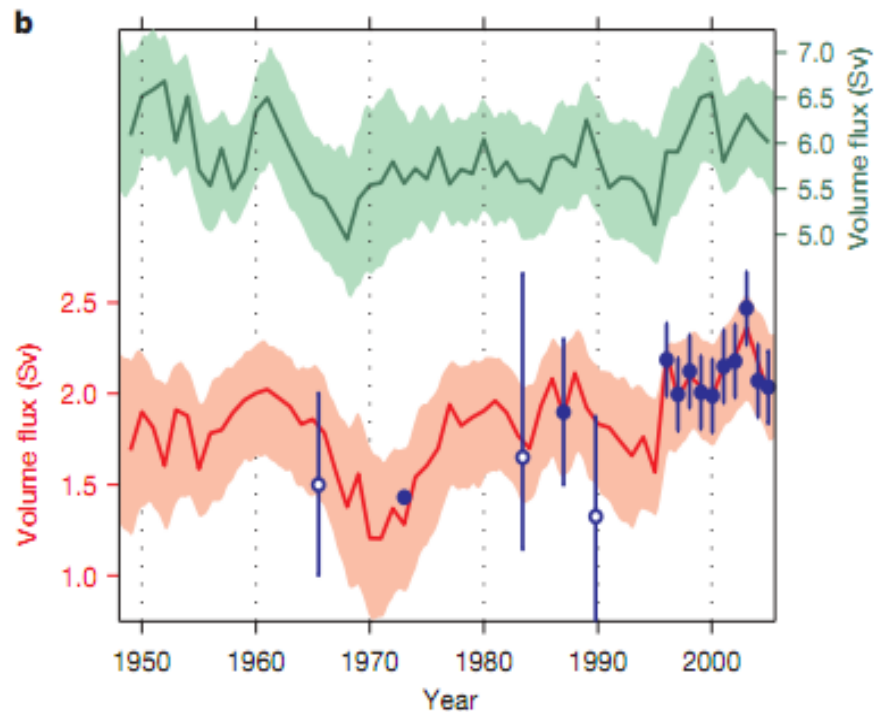
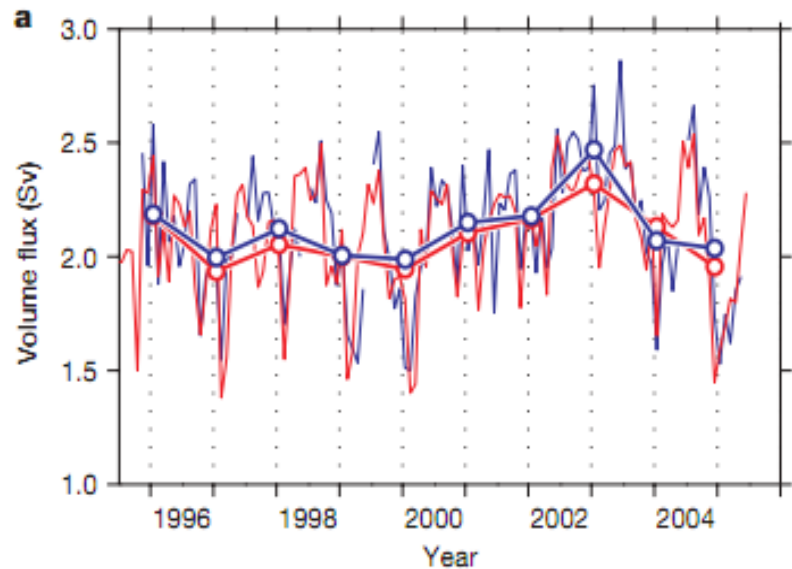
Wielkość przepływu wód głębinowych z Mórz Nordyckich do Atlantyku między Szetlandami a Wyspami Owczymi od 1950 na podstawie głębokości ich górnej granicy.



Zmienność tworzenia wód głębinowych na Morzach Nordyckich zmalała od 1950 o ok. 20%.

Przypadek, fragment cyklu czy trend?

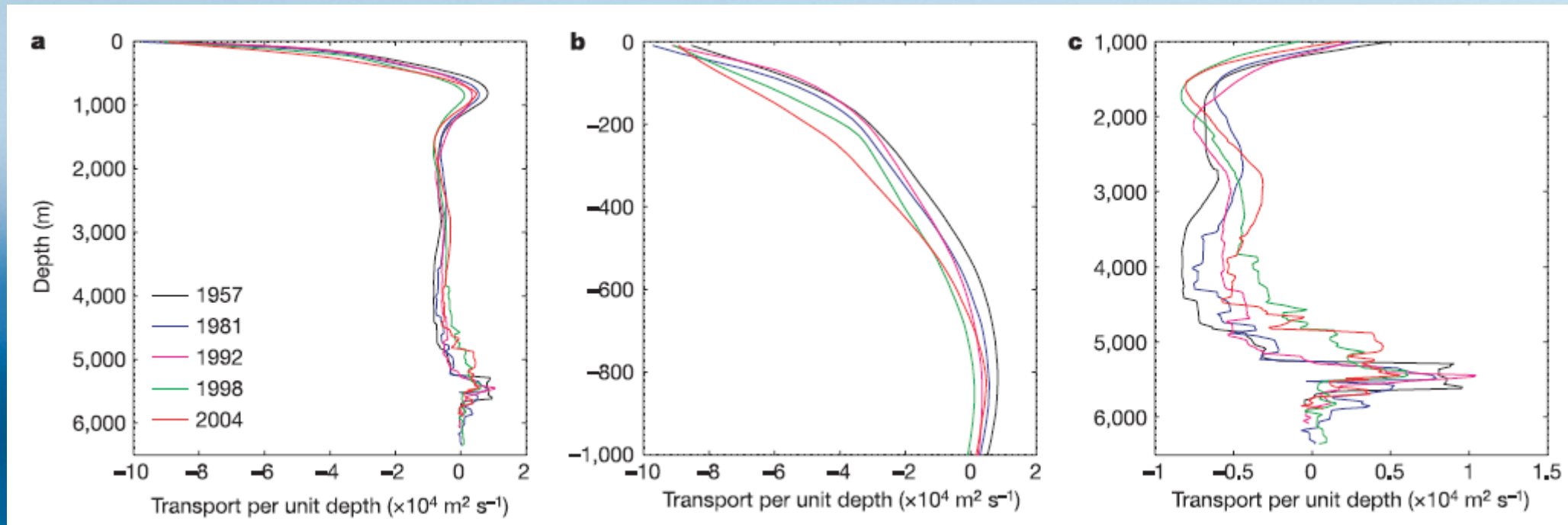
Odpowiedź: chyba jednak nie.



Pomiary przepływu wód przelewających się na południe przez Faroe Bank Channel (FBC) górnego panelu) w latach 1996-2004 oraz modelowanie przepływu prądów (na dole **czzerwony**) i przez cały Grzbiet Grenlandia - Szkocja (**zielone**) od roku 1950 wskazują na brak istotnego trendu w ilości produkowanych w ten sposób Głębinowych Wód Północno-Atlantyckich (NADW).

Olsen et al. 2008 (Nature)

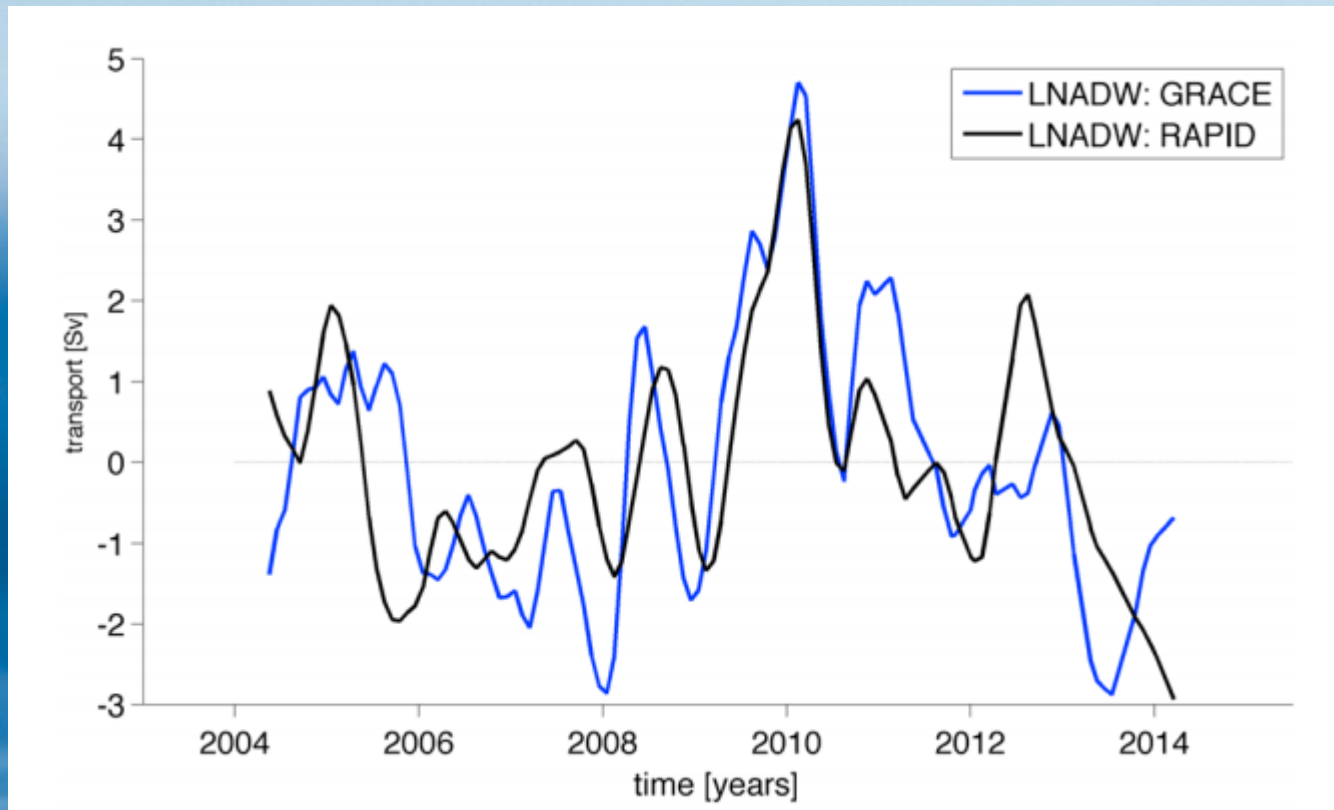
Osłabienie THC? Fałszywy alarm



Pomiar prądów Atlantyckich na profilu 25° N w roku 2004 zdawał się świadczyć o osłabieniu przepływu przez ten równoleżnik o 30%. Jednak pomiary z 19 boi programu RAPID (26.5° N) wydają się zaprzeczać istnieniu takiego trendu - chociaż potwierdzają dużą zmienność międzyroczną (*Nature*, 17 listopada 2006). Także ciągłe pomiary intensywności Golsztromu na 27° N od roku 1982 (Baringen & Larsen 2001) przy pomocy różnicy potencjału na podmorskich kablach telefonicznych nie wykazują trendu malejącego jego przepływu.

Bryden, Longworth & Cunningham 2005 (Nature)

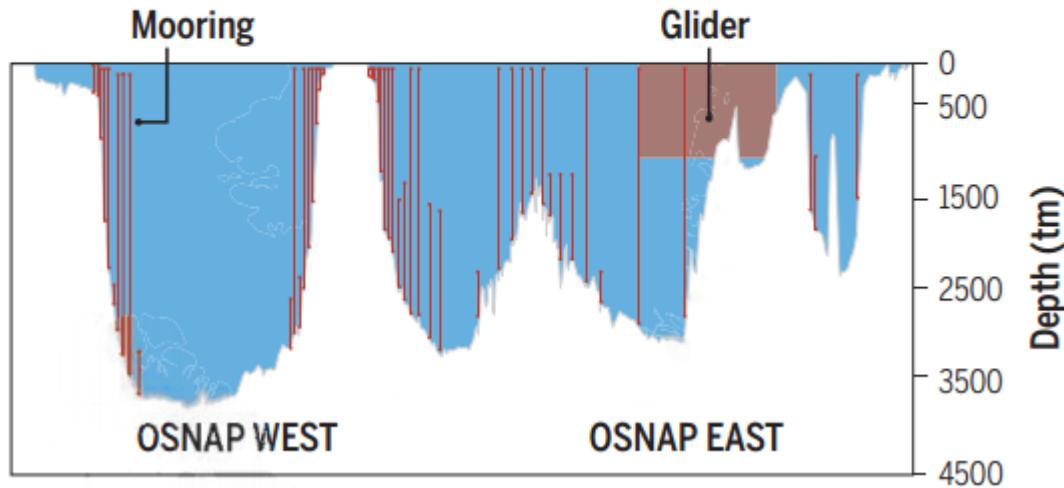
Oslabienie THC? Może trochę..



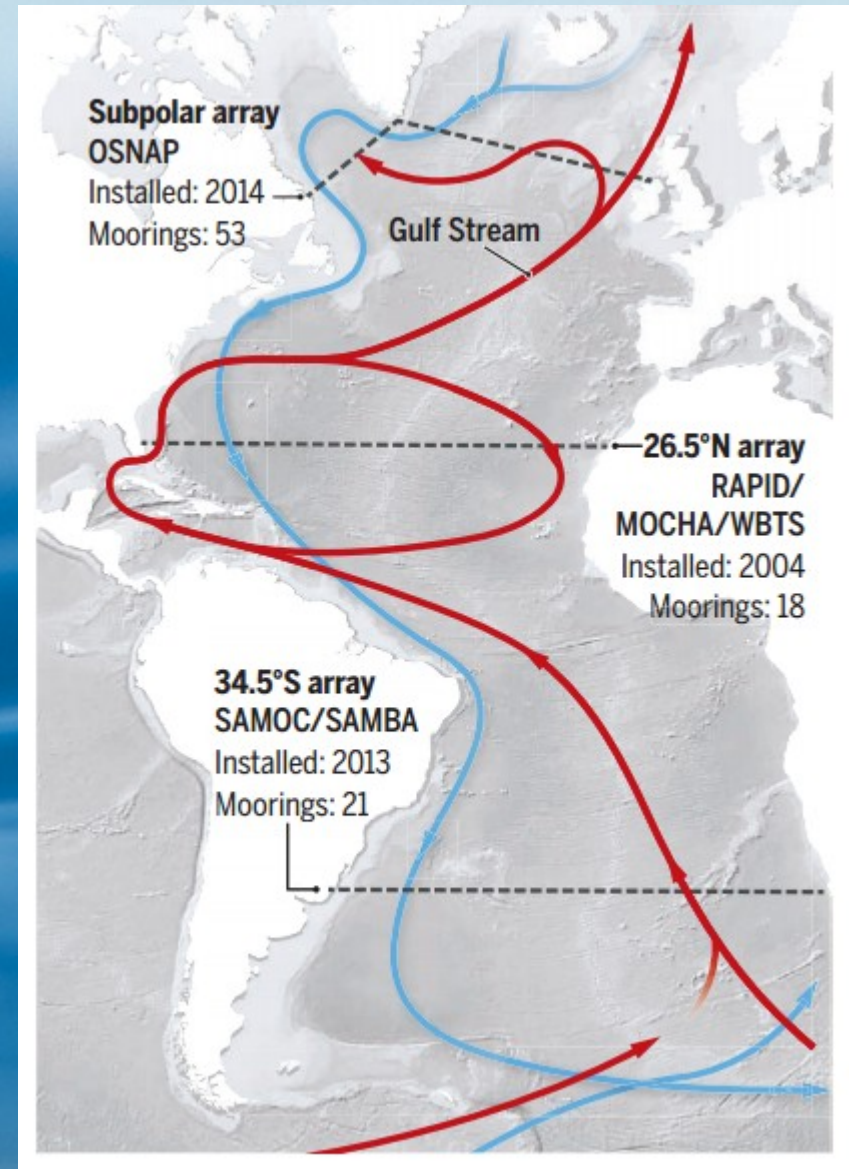
Pomiary z boi programu RAPID/MOCHA (26.5° N) zgadzają się z satelitarnymi pomiarami z misji GRACE i mogą świadczyć o pewnym spadku cyrkulacji termohalinowej w subtropikach w ostatnich latach. Jednak za wcześnie jest aby stwierdzić czy to początek dłuższego trendu czy część zmienności wielonakładowej (patrz następny wykład).

Jak badamy zmiany THC / AMOC?

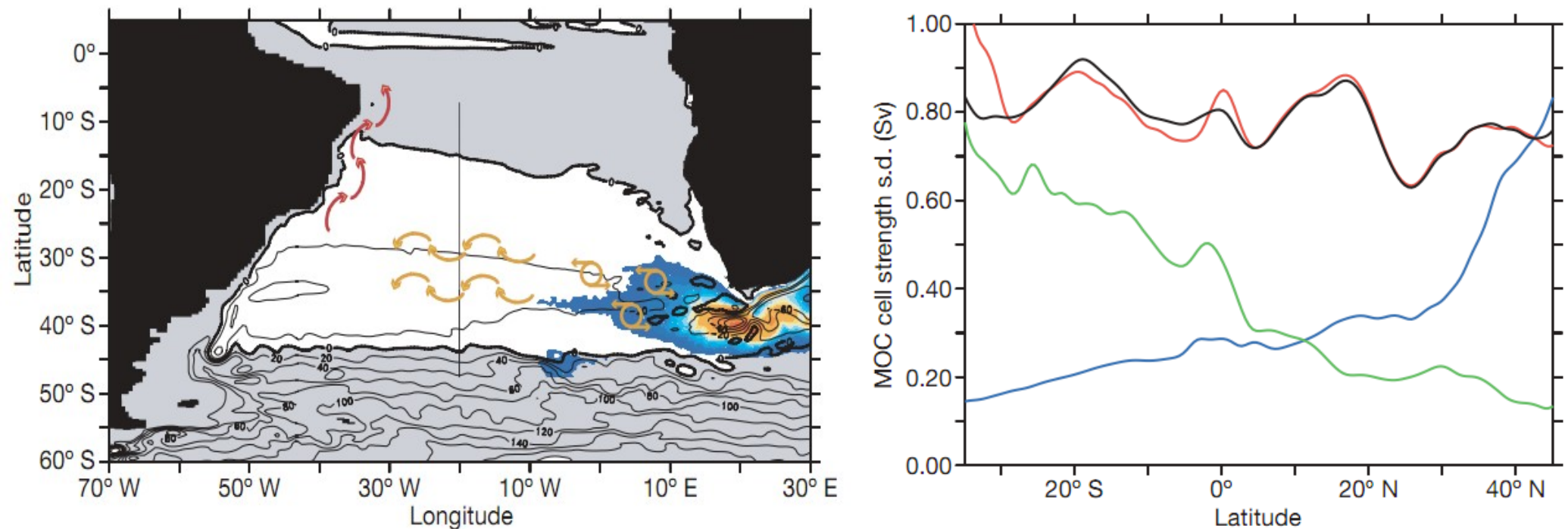
Three arrays are monitoring a conveyor belt of powerful currents in the Atlantic, in which shallow warm waters move north (red), while deep, cold water moves south (blue).



Obecnie oprócz boi programu RAPID/RAPID (26.5° N) mamy jeszcze dwie inne linie pomiarowe: subpolarną OSNAP oraz pierwszą na półkuli południowej, SAMOC/SAMBA (34.5° S). Jednak na wyniki dotyczące trendów trzeba będzie kilka lat poczekać.



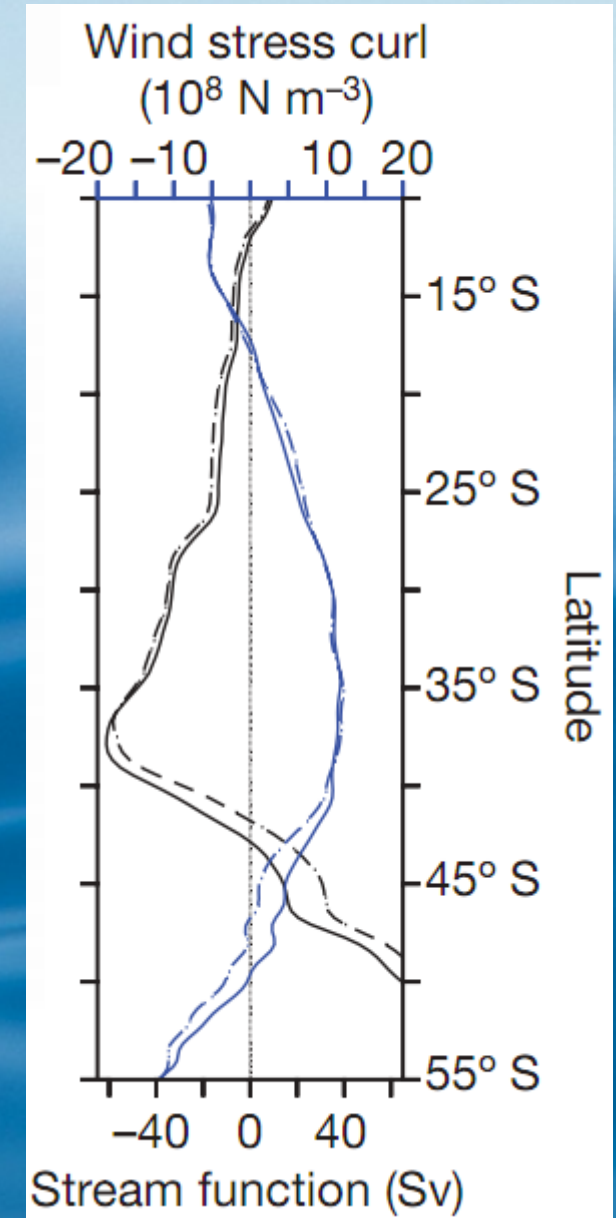
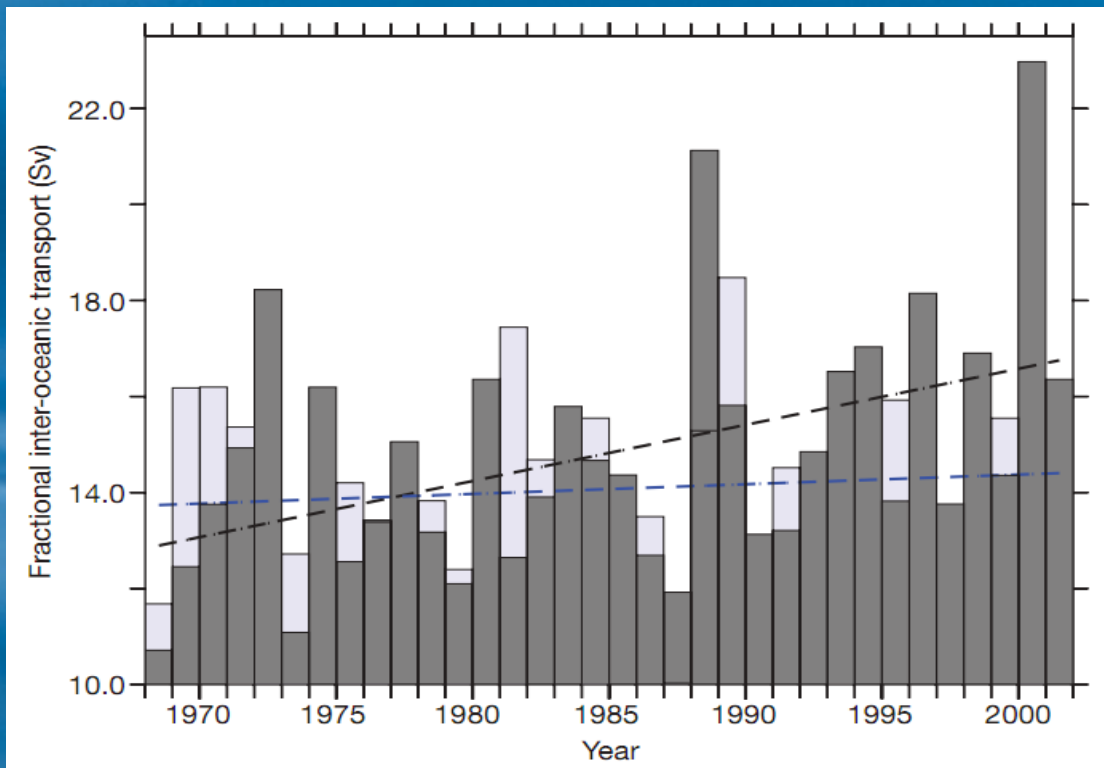
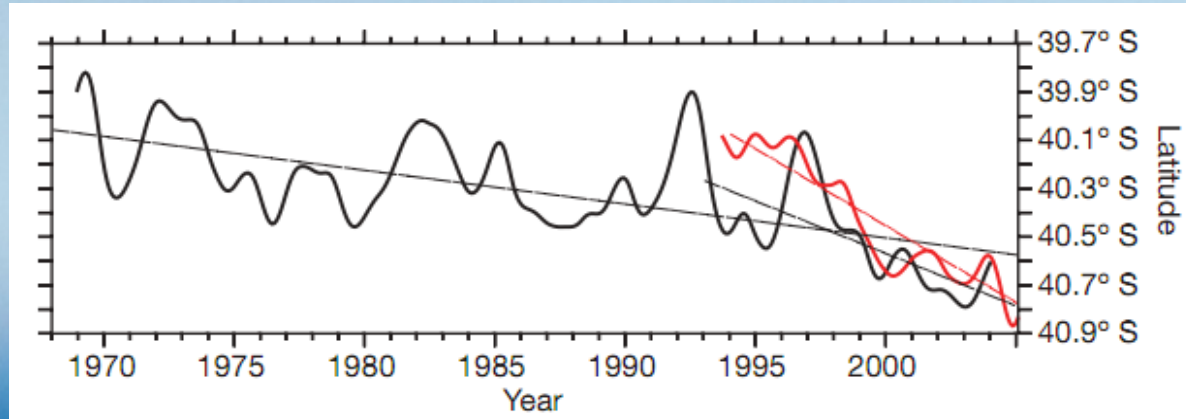
Nowy gracz: prąd Agulhas



“Wyciek” Prądu Agulhas z Oceanu Indyjskiego na Atlantycki wpływa na AMOC dostarczając mu dużej części słonych wód powierzchniowych, podróżujących później na północ z Prądem Brazylijskim (lewy panel). Wyniki modelowania pokazują, że odchylenie standardowe (miara zmienności między-roczonej) AMOC w funkcji szerokości geograficznej z (czerwone) i bez (czarne) wycieku Agulhas nie różni się Jednak odchylenie standardowe różnicy wartości AMOC w obu eksperymentach jest duże na południu (zielone) a zmienności produkcji wód głębinowych w Morzach Nordyckich (niebieskie) na północy.

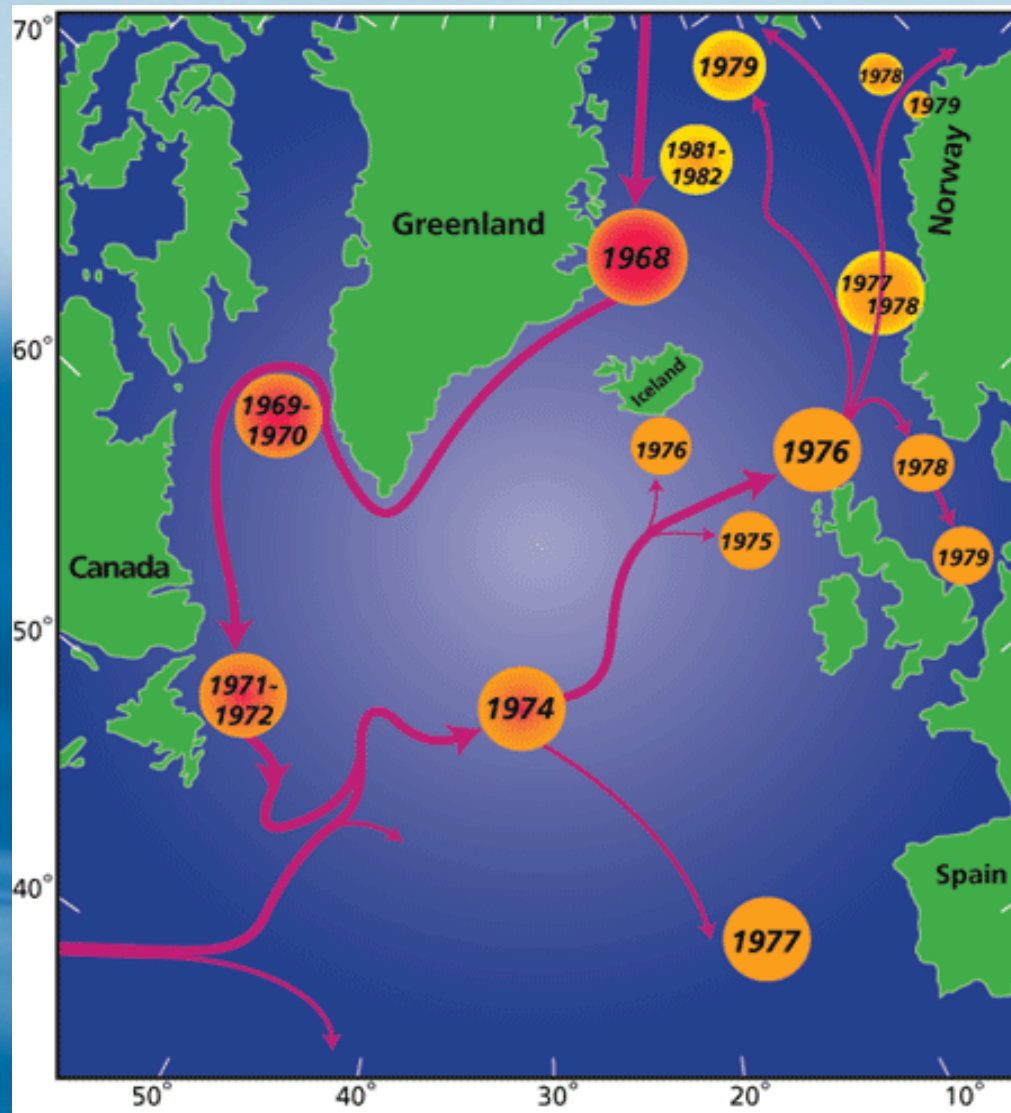
Biastoch Boning Lutjeharms 2008 (Nature)

Wyciek Agulhas coraz silniejszy?



Zmiany szerokości geograficznej wycieku z danych sat. (czerwone) i modelu; zmiany wiatrów (niebieski) i strumienia prądu; modelowana zmiana wycieku przy zmianie wiatrów (ciemne) i bez (jasne). *Biaśtoch Boning Lutjeharms 2008 (Nature)*

„Wielka Anomalia Zasolenia”



Tzw. „Wielka Anomalia Zasolenia” była wpływem na Atlantyk wody ze stopionego lodu arktycznego, którego trajektoria dała się śledzić przez ponad 10 lat. Mimo swej nazwy była ona jedynie krótkotrwałym zaburzeniem, mniejszym niż międzydekadowa zmienność zasolenia.

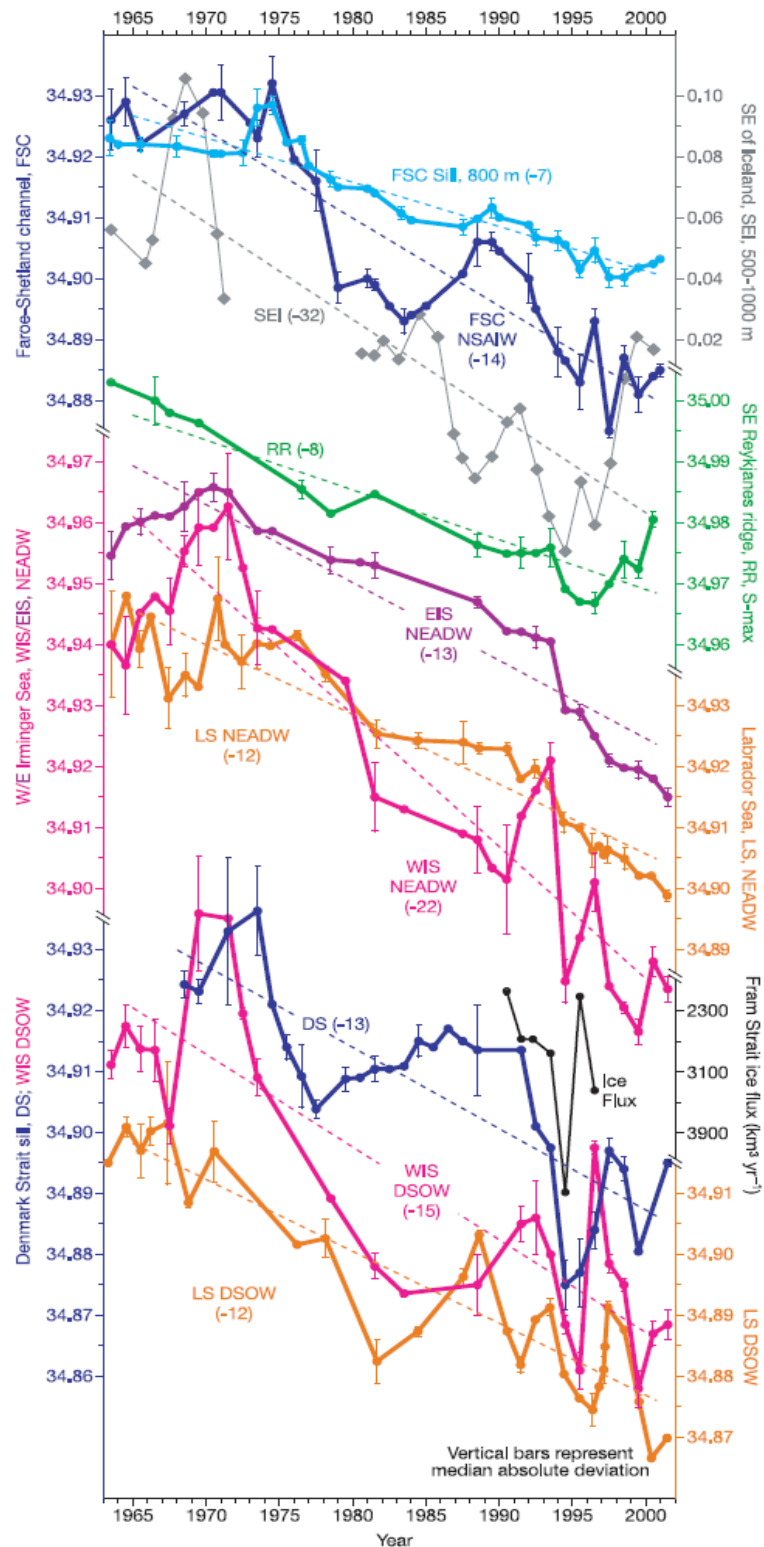
Za: Belkin et al. 1998

Północny Atlantyk staje się coraz mniej słony?

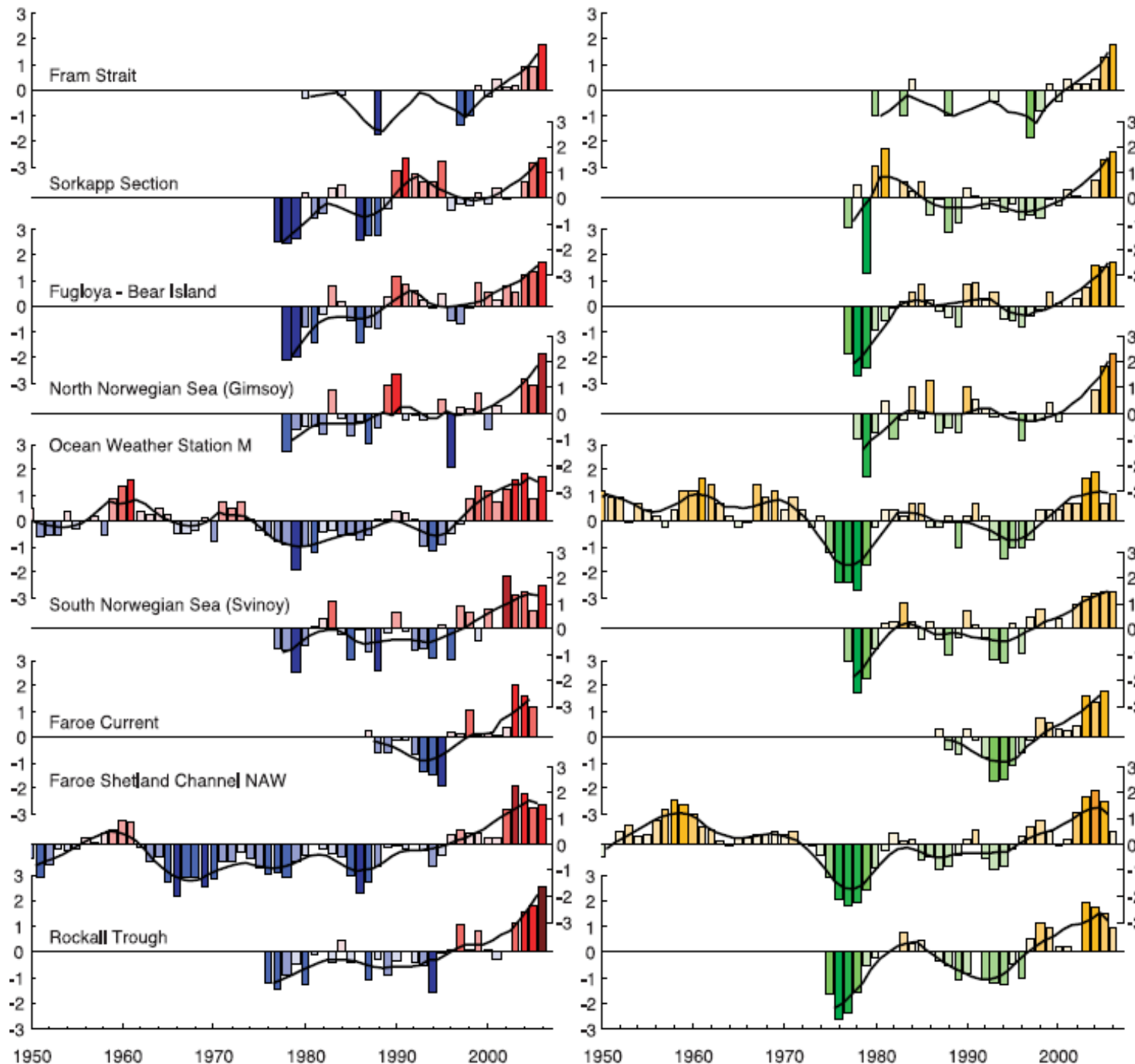
Wody głębinowe Północnego Atlantyku stają się coraz słodsze od co najmniej 40 lat.

Jest to związane z równoczesnym wypełnianiem się Oceanu Arktycznego wodami atlantyckimi (Wykład 10).

Nie jakim stopniu wpłynie to na wielkość produkcji wód głębinowych? W chwili obecnej jeszcze tego nie wiadomo.



A może jednak nie?

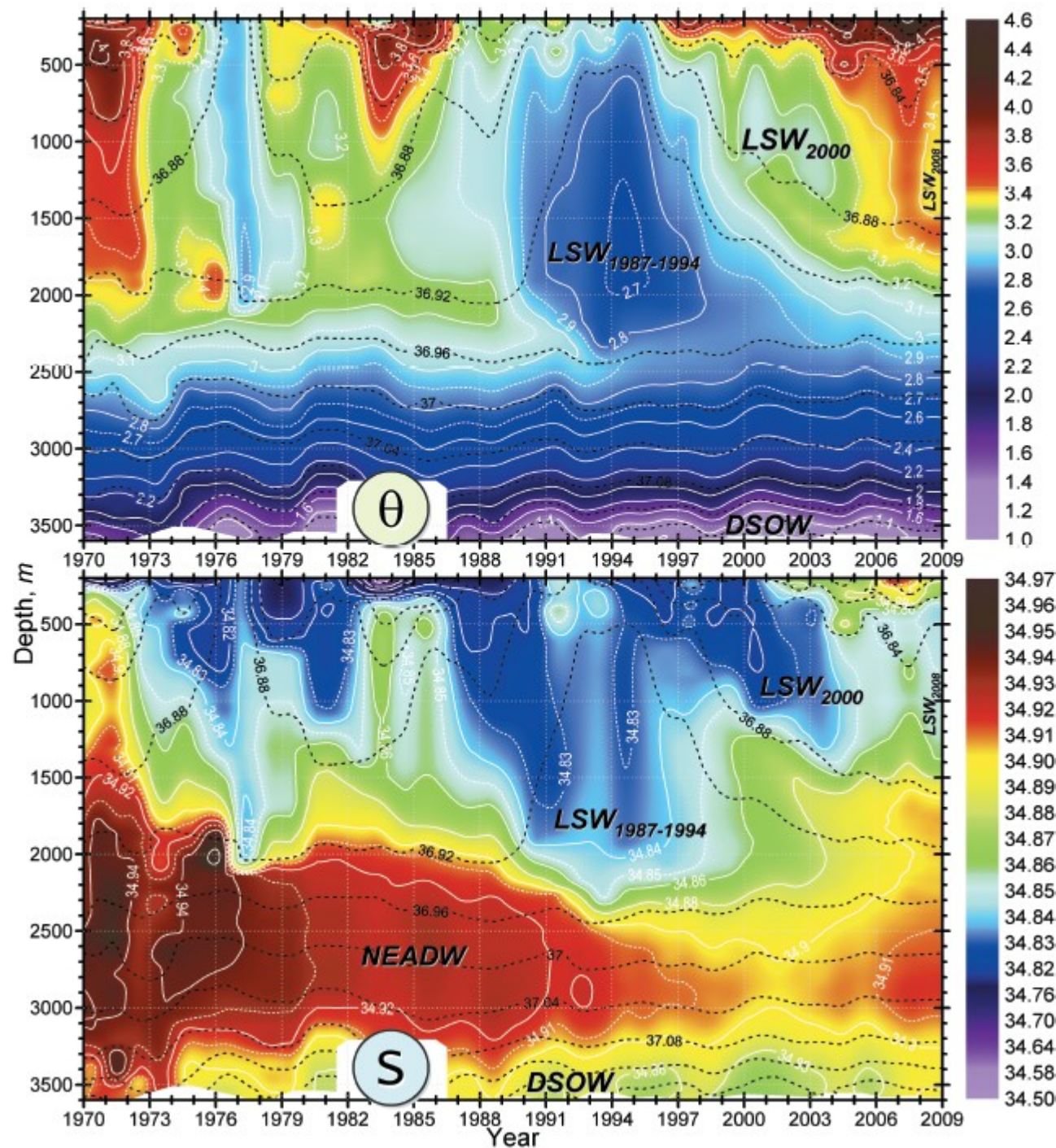


Anomalie
temperatury (lewy)
i zasolenia
(prawy panel)
Wody Atlantycznej
1950-2006.

Widać ponowne
zwiększenie
zasolenia
płynących na
północ Wód
Atlantycznych po
roku 2000.

*Halliday et al.
2008 (GRL)*

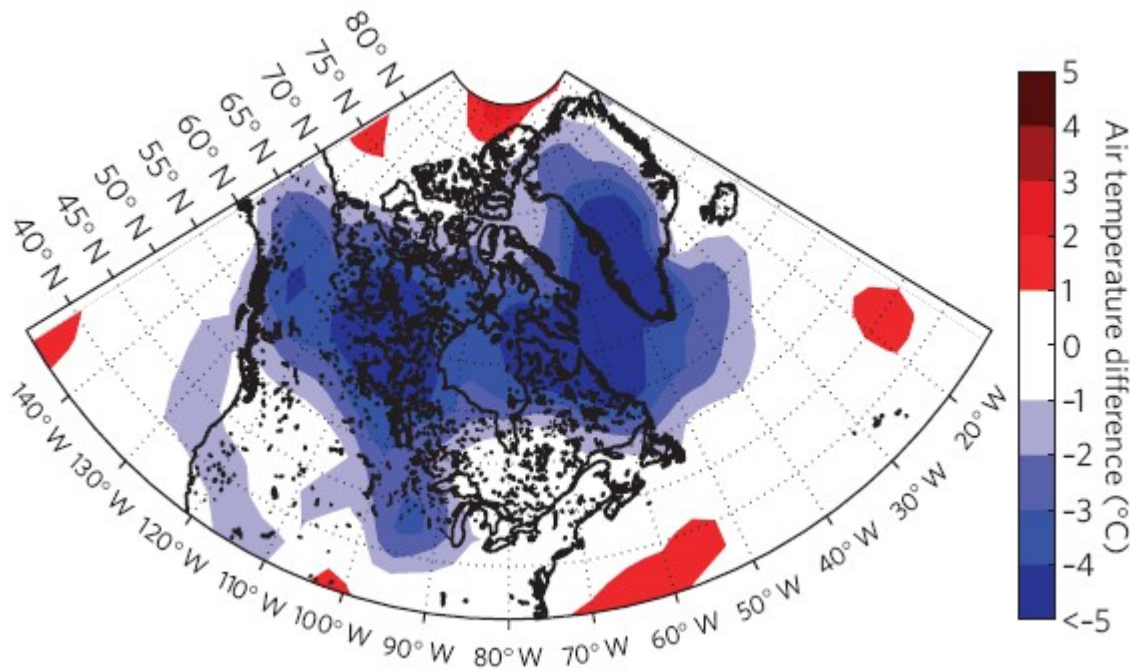
Niespodziewany powrót...



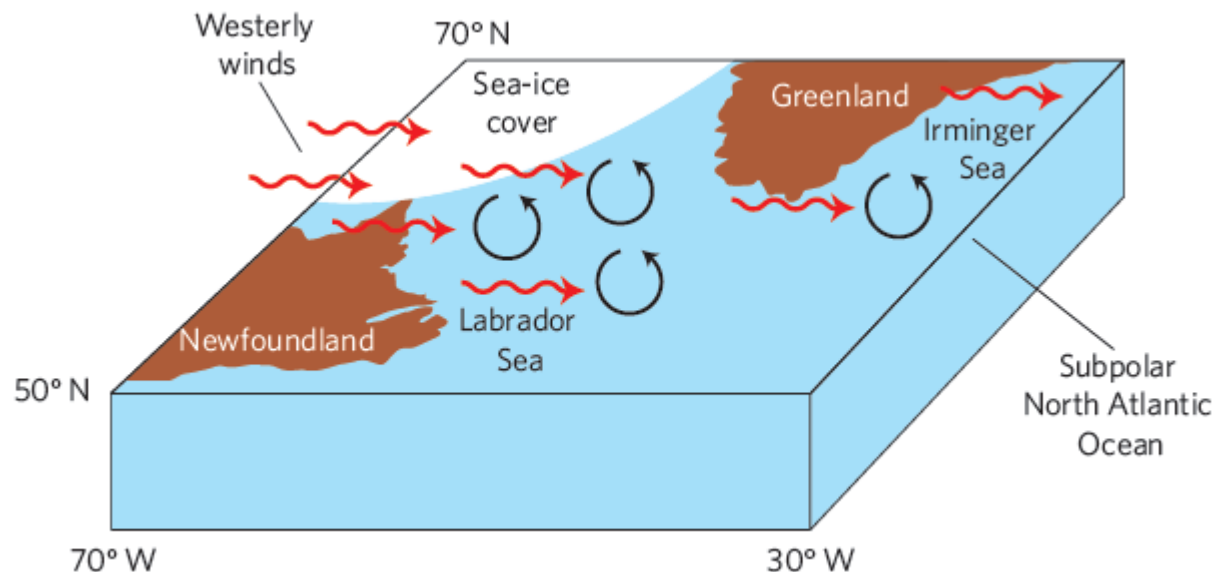
Powrót głębokiej (do 1600 m) konwekcji na Morzu Labradorским w 2008 roku - najgłębszej od 1994 r.

Temperatura potencjalna i zasolenie w środkowej części M. L. na podstawie rocznych rejsów oraz sond ARGO (od 2002).

Przyczyna? Oddziaływanie ocean-atmosfera

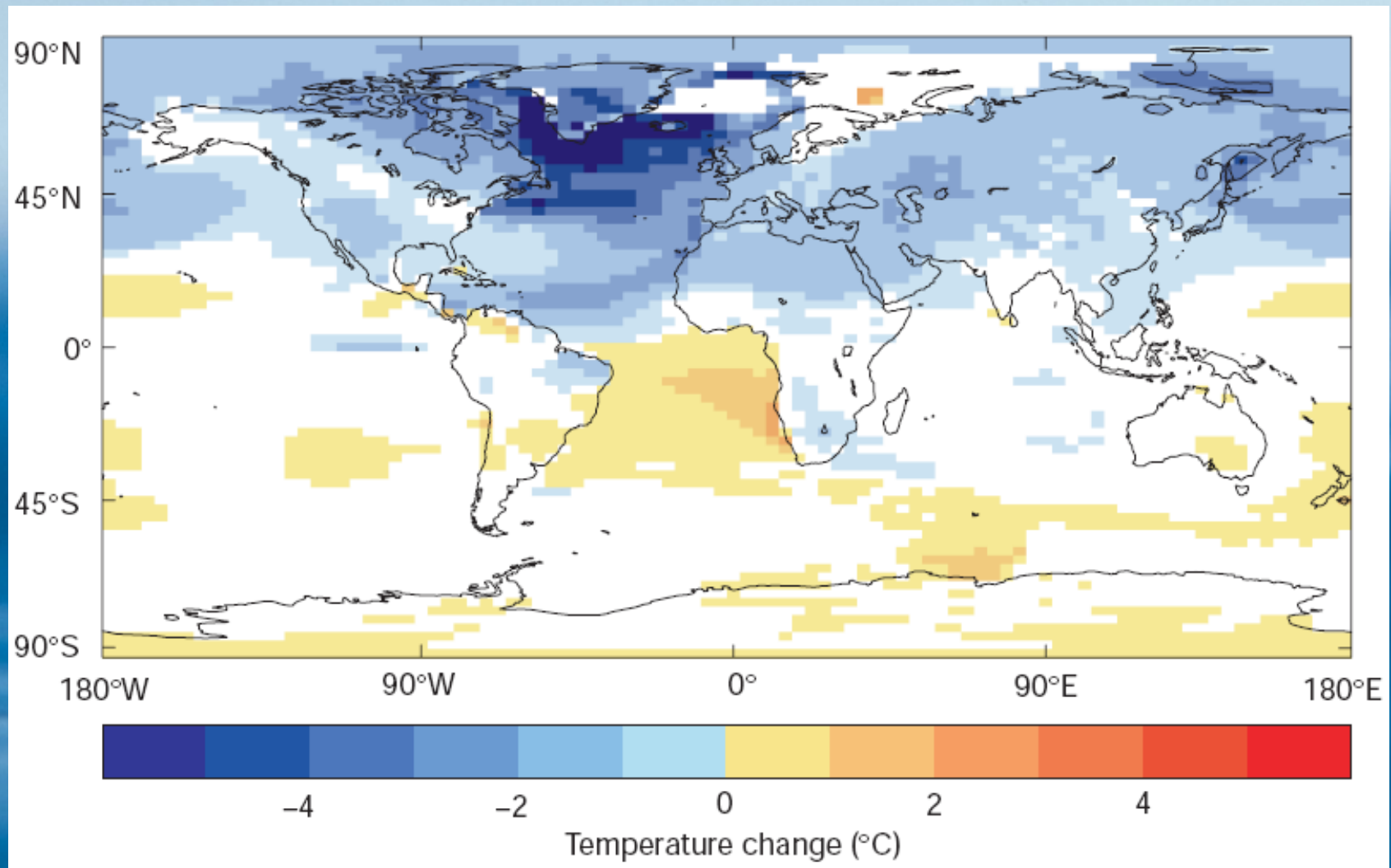


Napływ lodu z Oceanu Arktycznego i szczególnie zimna zima nad Pn. Ameryką (górny rysunek) spowodowały zalodzenie Pn. Morza Labradorskiego pozwalające wyjątkowo zimnemu powietrzu napłynąć nad jego środkową część. Wywołało to wystarczające wychłodzenie powierzchniowych warstw wody dla uruchomienia głębokiej konwekcji.



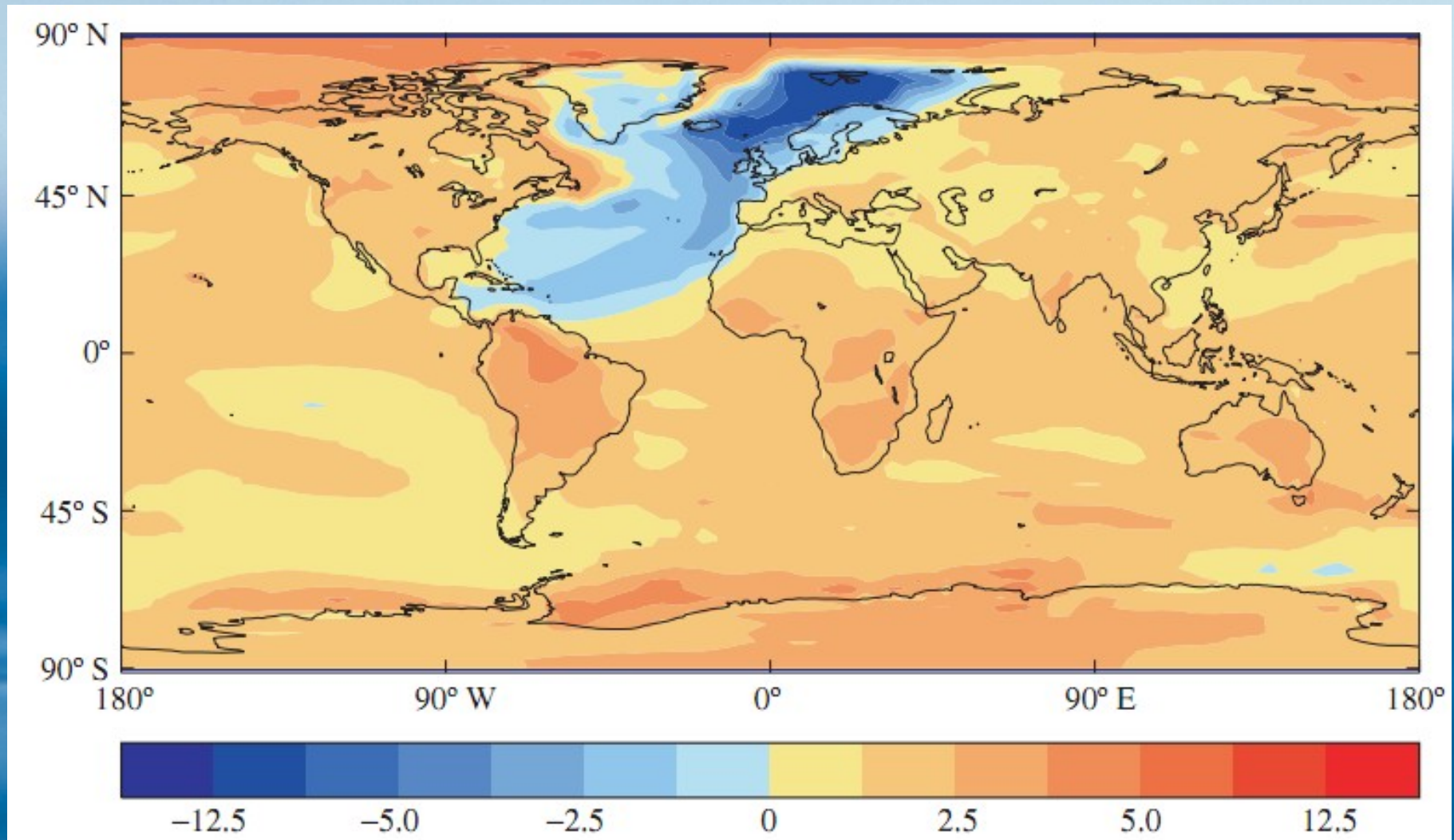
Vage et al. 2009 (Nature Geoscience)
Lozier 2009 (Nature Geoscience)

Wpływ cyrkulacji termohalinowej na klimat



Wyniki modelowania (model HadCM3) pokazują że ewentualne zatrzymanie THC wywołałoby znaczne oziębienie półkuli północnej, a szczególnie rejonu Północnego Atlantyku, przy jednoczesnym ogrzaniu półkuli południowej.

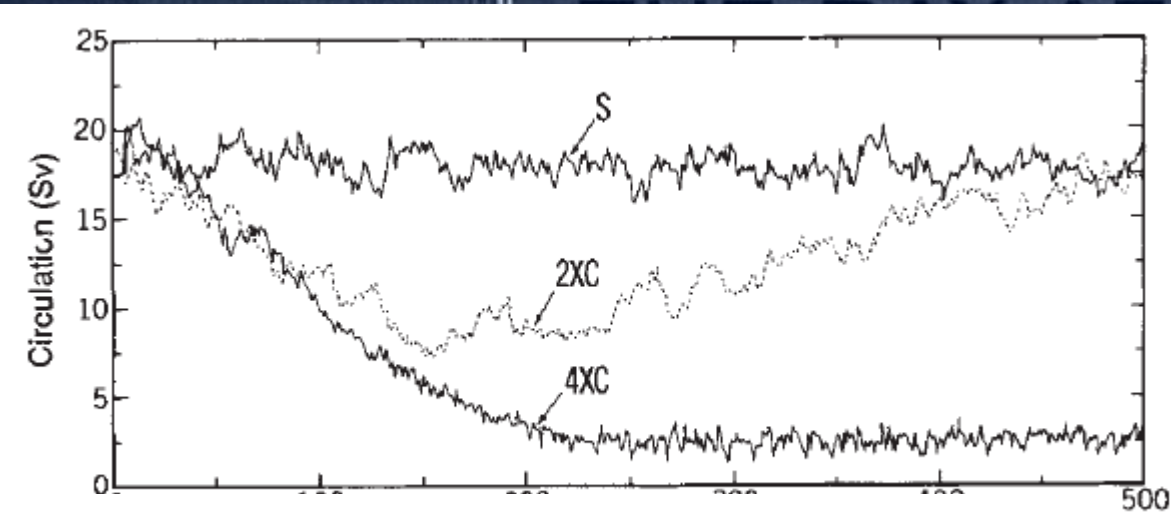
A gdybyśmy zatrzymali THC w roku 2049?



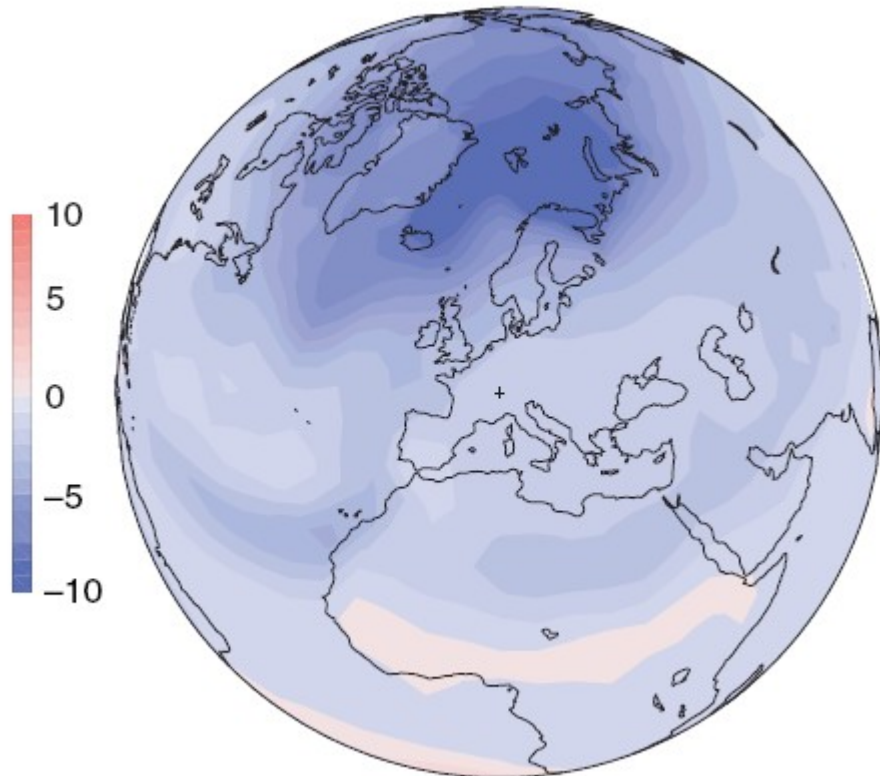
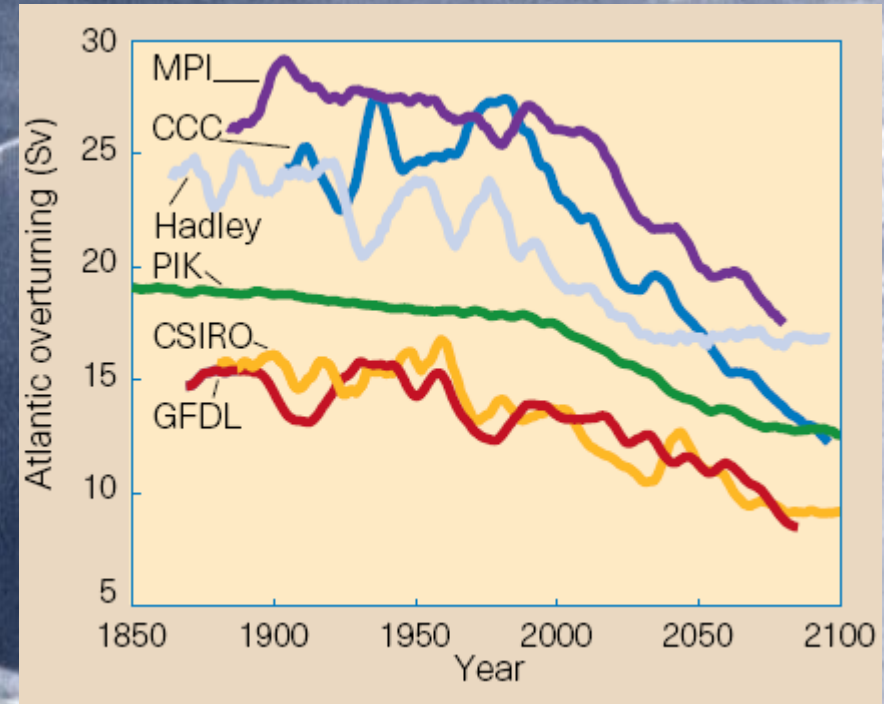
Wyniki modelowania (model HadCM3) pokazują że ewentualne zatrzymanie THC w połowie wieku wywołałoby jedynie lokalne oziębienie w rejonie Pn. Atlantyku.

Wood Velling Thorpe 2003 (Phil. Trans. R. Soc. Lond. A)

Czy nam to grozi? Modelowanie przyszłej cyrkulacji termohalinowej



WATER TOMORROW
WORLDWIDE 28 MAY 2004

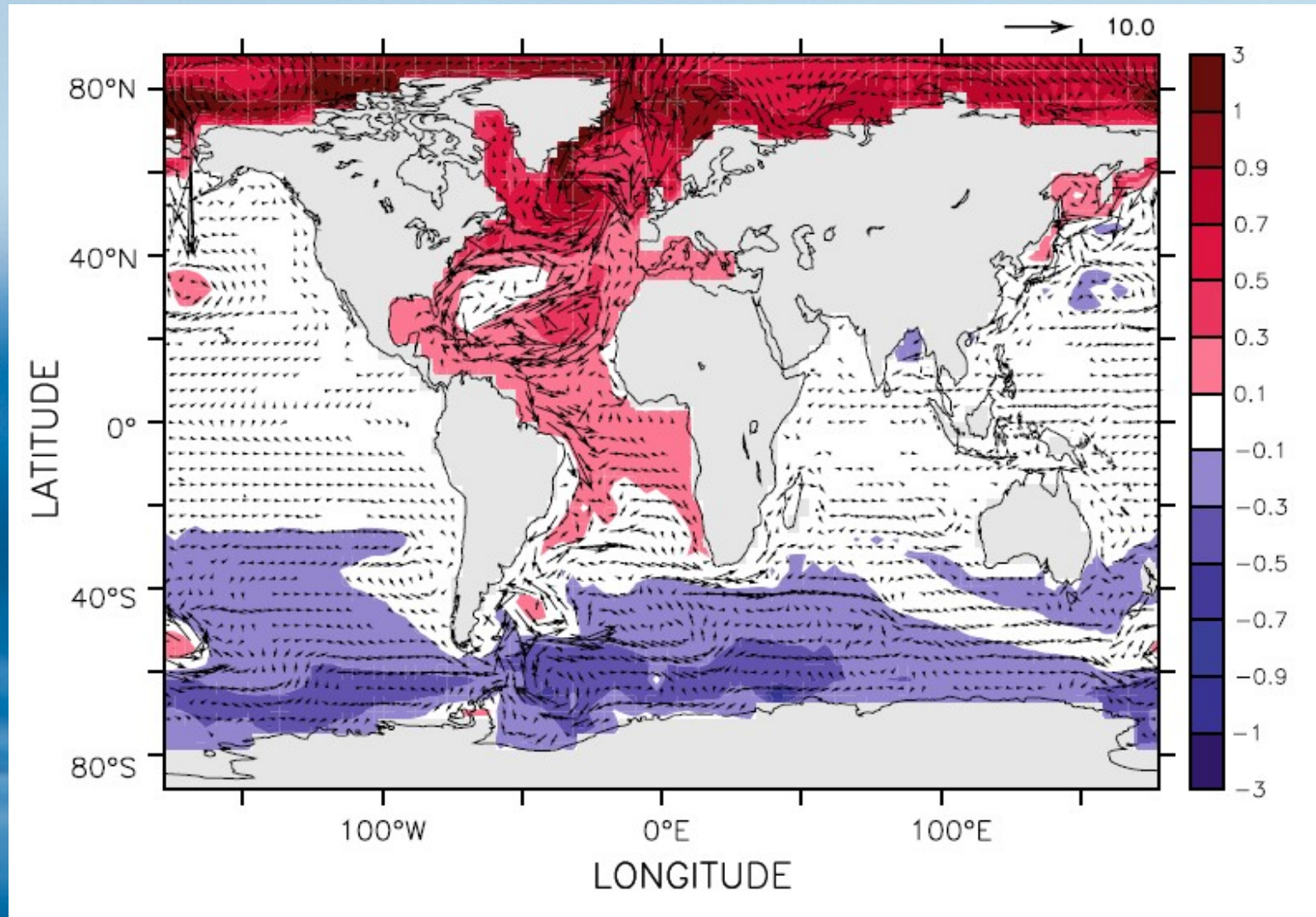


Wyniki modelowania: produkcja wody
głębinowej wobec efektu cieplarnianego i
zmiany temperatury przy wyłączeniu
cyrkulacji termohalinowej.

WHERE WILL YOU BE?

Manabe i Stoufer 1993; Rahmstorf 1999; Stocker 2002

Efekt wstrzymania THC na zmianę poziomu morza



Efekt zatrzymania cyrkulacji termohalinowej na poziom morza (*uwaga na nieliniową skalę!*) oraz zmiany w prądach (strzałki). Poziom Północnego Atlantyku i mórz przyległych byłyby nawet do 1 m wyżej niż obecnie. Wynik ten należy dodać do przyszłych zmian związanych ze zmianą klimatu.

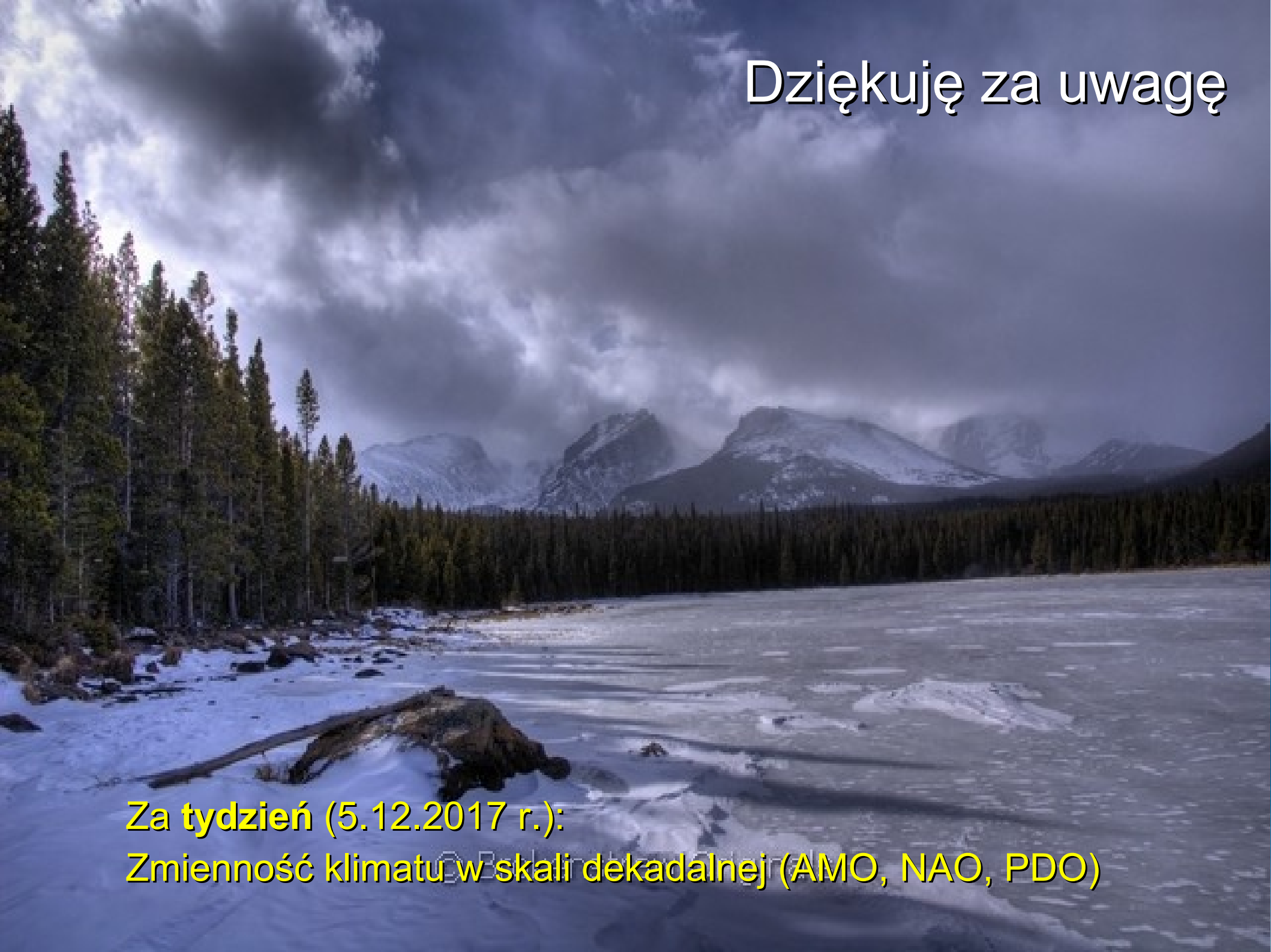
Levermann et al. 2005 (Climate Dynamics)

Podsumowanie 2/2

- Cyrkulacja termohalinowa była słabsza w epoce lodowej. Wielkość produkcji wód głębinowych malała podczas zdarzeń Heinricha. W tym samym czasie malał transport słodkiej wody z tropikalnego Atlantyku do Pacyfiku. Co jest tu przyczyną?
- W okresie Małej Epoki Lodowej atlantycka THC była o 10-30% słabsza niż obecnie, co tłumaczy szczególnie zimny klimat Europy. Czy mała aktywność słońca wpłynęła na przesunięcie ITCZ na południe zmniejszając cyrkulację termohalinową Atlantyku?
- Szybkie osłabnięcie THC z powodu topienia lodowców Grenlandii chyba nam nie grozi chociaż pewien efekt może być wyczuwalny. Szczególnie groźne może być geostroficzne zmiany poziomu morza (nie dopływ słodkiej!)
- Na razie wyraźnego trendu malejącego THC nie stwierdzono.



„Pojutrze” na pewno się nie zdarzy. Jednak wyłączenie THC może sprawić kłopoty... z poziomem morza

A dramatic landscape photograph of a frozen lake. The foreground is covered in snow and ice, with a large, dark, fallen log lying horizontally. To the left, a dense forest of tall evergreen trees stands. In the background, a range of rugged mountains is visible under a heavy, cloudy sky. The overall tone is cold and atmospheric.

Dziękuję za uwagę

Za tydzień (5.12.2017 r.):

Zmienność klimatu w skali dekadalnej (AMO, NAO, PDO)