

ИКИ РАН, Москва, 14 ноября 2023

Открытие Атлантической экваториальной водной массы на основе данных Арго



Журбас, К.В. Лебедев, Н.П. Кузьмина

По материалам статьи Zhurbas V., Lebedev K., and Kuzmina N., 2023. Is there the Equatorial Water mass in the Atlantic Ocean?, *Geophysical Research Letters*, 50, e2023GL104866.
<https://doi.org/10.1029/2023GL104866>

План

- **Plain language summary**
- **Введение**: некоторые сведения о водных массах из классической монографии Свердруп и др. 1942 года
- **Подход**: построение объемометрических TS диаграмм - термохалинных портретов океанов по данным Арго
- **Результаты**: обнаружение Атлантической экваториальной водной массы: ее свойства, географическое расположение, связь с процессами циркуляции и перемешивания, гипотетический механизм формирования
- **Почему** Атлантическая экваториальная водная масса была обнаружена на 80 лет позже, чем Тихоокеанская и Индийская экваториальные водные массы?
- **Выводы**

Plain language summary

Одним из самых удивительных свойств океанской воды является наличие тесной связи между температурой и соленостью, когда вертикальные профили температуры и солености, измеренные на расстоянии сотен и даже тысяч километров, характеризуются аналогичной зависимостью температуры от солености. Объем океанской воды, демонстрирующий аналогичную зависимость температуры от солености, считается отдельной водной массой. В Мировом океане водные массы различаются в зависимости от их географического положения и происхождения. Водные массы океана активно изучаются с 1930-х годов и, казалось бы, о них известно все. Однако в 1998 году была запущена программа Арго. Буи Арго дрейфуют вместе с океанскими течениями на глубине 1000–2000м, периодически всплывая на поверхность для передачи данных измерений на спутник. К настоящему времени с помощью буев Арго собрано более 2 млн вертикальных профилей температуры и солености, более-менее однородно распределенных по площади океана. Повторное изучение водных масс с использованием огромного массива профилей Арго позволило выделить ранее незамеченную водную массу в главном термоклине Экваториальной Атлантики и тем самым завершить феноменологическую картину основных водных масс Мирового океана.

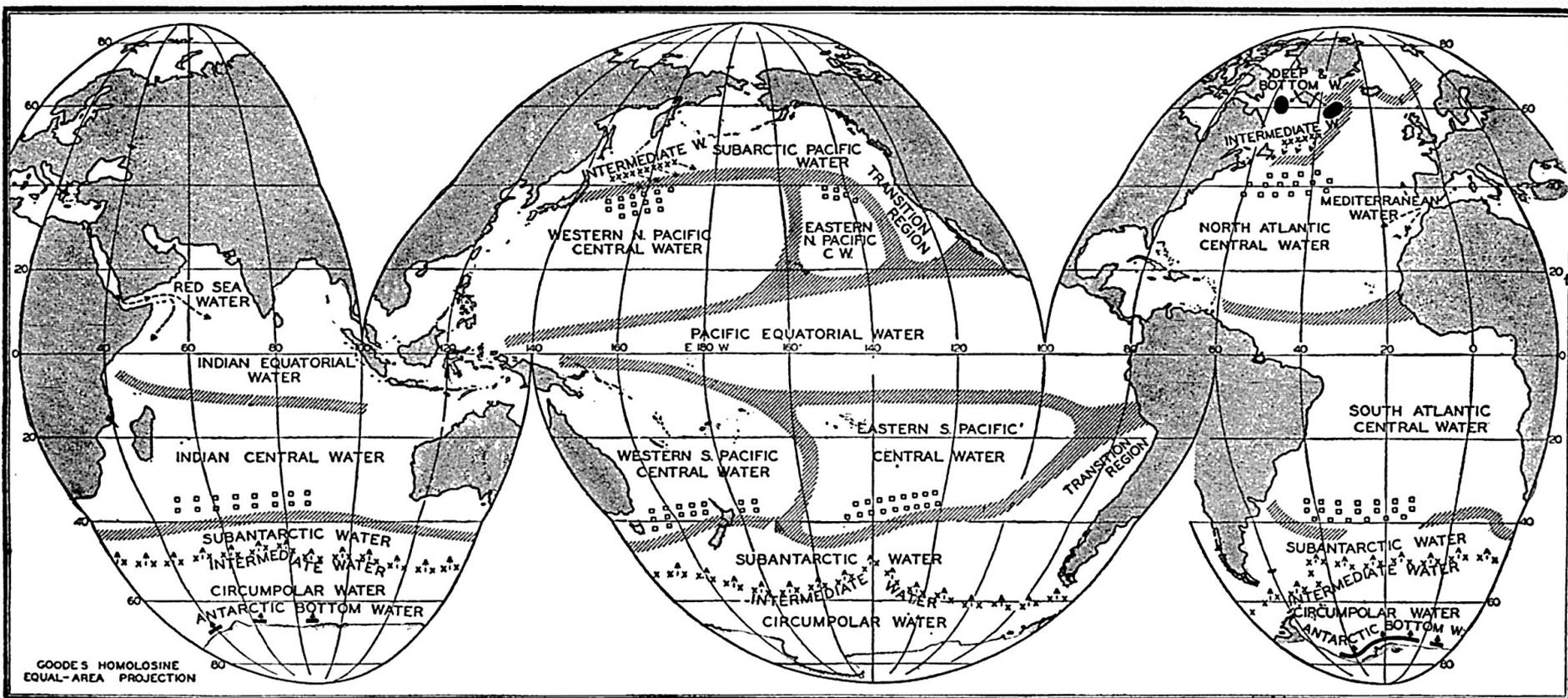
Введение: некоторые сведения о водных массах из классической монографии Sverdrup et al. (1942) *The Oceans, Their Physics, Chemistry, and General Biology*

- **Определение** водной массы: объем воды, имеющий общую историю формирования в определенном районе океана и физико-химические свойства, отличные от свойств окружающей воды (Helland-Hansen, 1916; Sverdrup et al., 1942);
- Свойства включают в себя не только традиционные величины температуры и солености, но также другие консервативные и неконсервативные трассеры, такие как изотопные отношения, содержание кислорода, силикатов, нитратов, фосфатов и др.;
- Основные водные массы Мирового океана были описаны в монографии Sverdrup et al. (1942). Они включают поверхностные воды, воды верхнего деятельного, промежуточного и глубинного слоев. Впоследствии имело место лишь уточнение свойств, ареалов распространения, механизмов формирования, обнаружение региональных водных масс;
- В верхнем деятельном слое океана в низких и средних широтах (т.е. в главном термоклизе) выделяют Центральные и Экваториальные водные массы (ЦВ и ЭВ или на англ. CW and EW); и те, и другие характеризуются убыванием температуры и, как правило, солености с глубиной;
- ЦВ располагается в главном термоклизе в субтропических антициклонических круговоротах и формируется в конце зимы на поверхности океана в зонах субтропической конвергенции механизмом Экмановской накачки;

Введение: некоторые сведения о водных массах из классической монографии Sverdrup et al. (1942) *The Oceans, Their Physics, Chemistry, and General Biology*

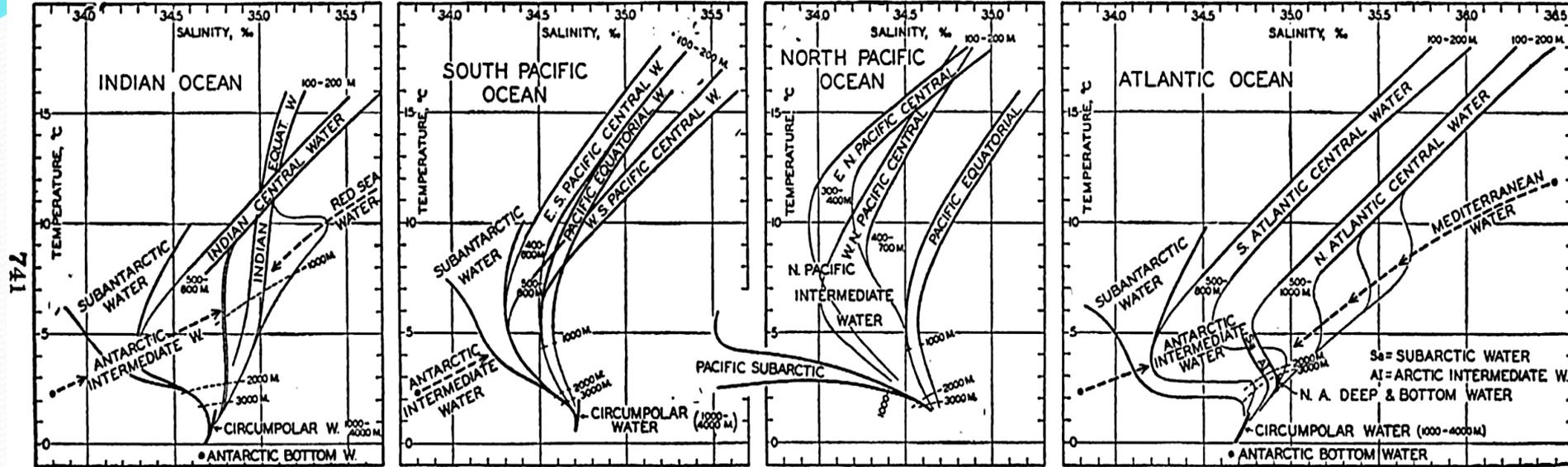
- Субтропические круговороты включают в себя западные пограничные течения (Гольфстрим, Куроисио, Бразильское, Восточно-Австралийское, Мозамбикское/Восточно-Мадагаскарское/Агульясское течения) и соответственно существуют ЦВ Северной и Южной Атлантики (NACW и SACW), Северной и Южной Пацифики (NPCW и SPCW) и южной части Индийского океана (SICW);
- В отличие от ЦВ, ЭВ формируются не на поверхности, а в толще океана из-за процессов перемешивания иных водных масс (например, ЦВ);
- Согласно Sverdrup et al. (1942), ЭВ выделяют только в Тихом и Индийском океанах (PEW и IEW). **В Атлантическом океане ЭВ (AEW) не выделяется (отсутствует), а ее место в главном термоклине экваториальной Атлантики вплоть до 10° с.ш. занимает Центральная вода южной Атлантики (SACW).**

Введение: некоторые сведения о водных массах из классической монографии Sverdrup et al. (1942) *The Oceans, Their Physics, Chemistry, and General Biology*



Приблизительные границы водных масс верхнего слоя по Sverdrup et al. (1942).

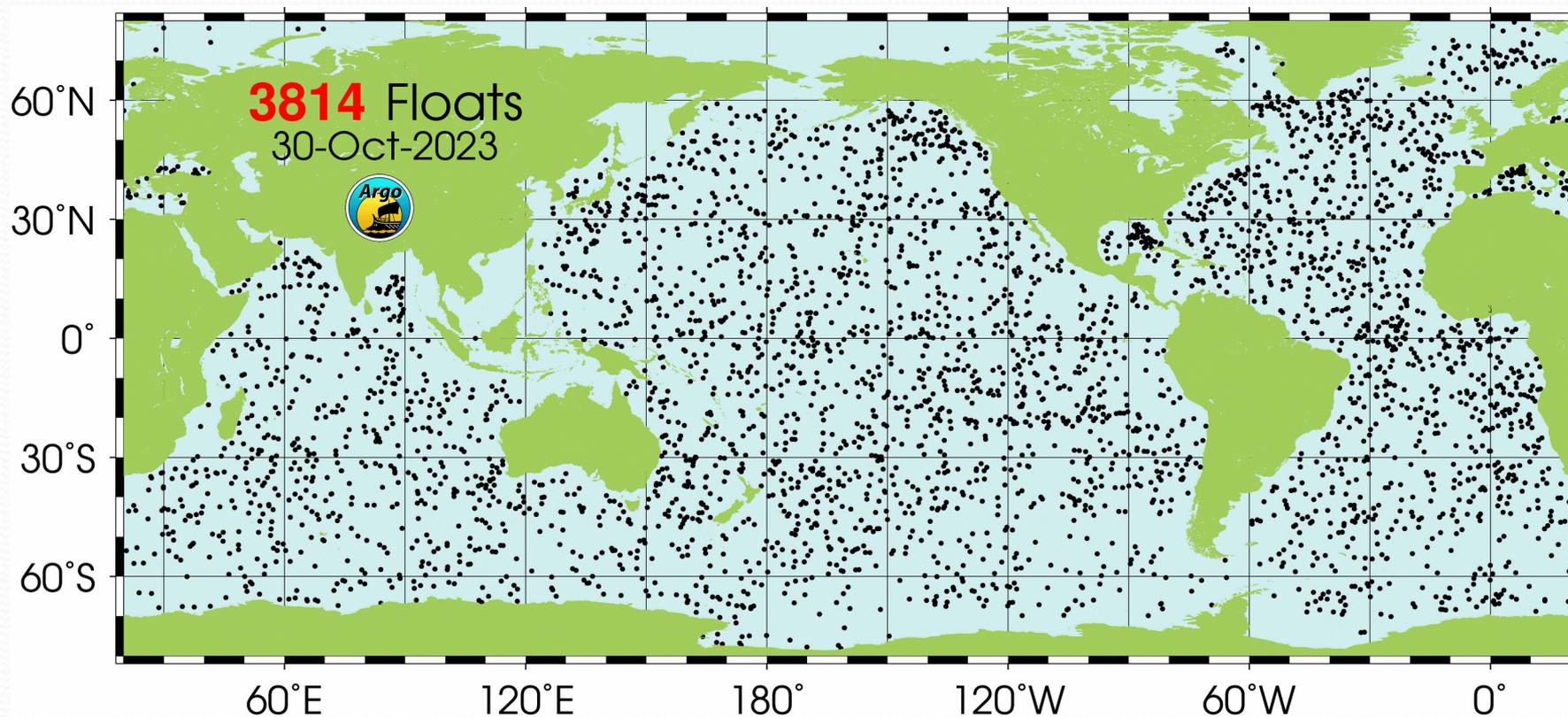
Введение: некоторые сведения о водных массах из классической монографии Sverdrup et al. (1942) *The Oceans, Their Physics, Chemistry, and General Biology*



Зависимости температуры от солености основных водных масс Мирового океана по Sverdrup et al. (1942).

Резонный вопрос: почему ЭВ выделяется в Тихом и Индийском океанах, но отсутствует в Атлантическом океане, если динамика и процессы перемешивания в экваториальной зоне всех трех океанов похожи? (Система зональных течений и противотечений, Экваториальные подповерхностные противотечения Кромвелла, Ломоносова, Тареева, экваториальные волны Россби и Кельвина...). Более того, именно Индийский океан имеет специфику относительно Атлантики и Пацифики, т.к. в нем нет симметрии относительно экватора (северный субтропический круговорот и соответственно северная ЦВ отсутствуют), из-за муссона экваториальное подповерхностное противотечение существует только зимой и весной Северного полушария. Было бы более логично, чтобы ЭВ отсутствовала в Индийском океане...

Подход: построение объемометрических TS диаграмм по данным Арго

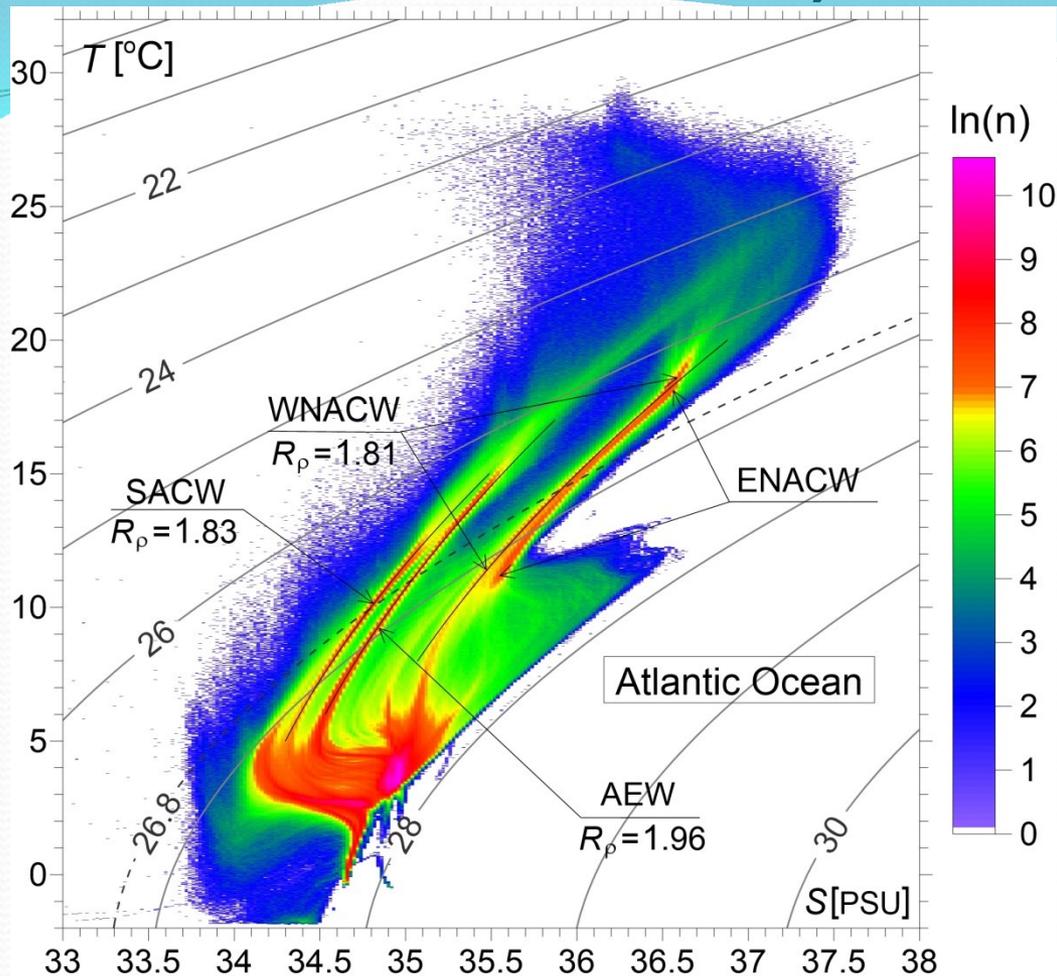


Текущее расположение дрейфтеров Арго – около 4000 штук. Такое количество дрейфтеров Арго в океане поддерживается с 2005 г. Всего собрано более 2 млн TS профилей.

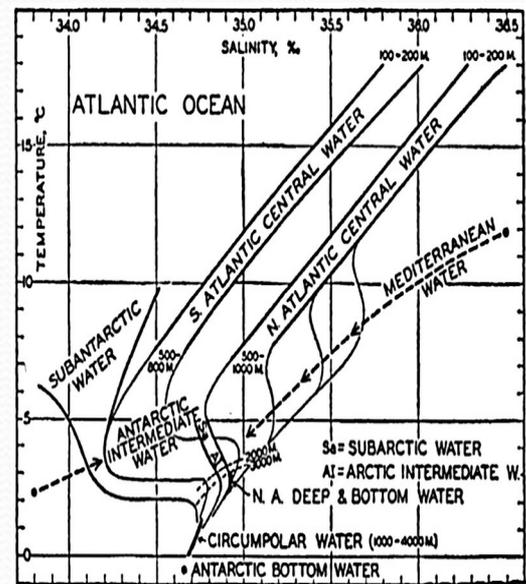
Подход: построение объемометрических TS диаграмм - термохалинных портретов океанов по данным Арго

- Объемометрическая TS диаграмма (volumetric TS diagram or VTS diagram) представляет собой распределение объема воды (в море, океане, части океана) на TS плоскости: ось x – соленость, ось y – потенциальная температура, ось z – соответствующий объем воды. Идея не нова (Montgomery, 1958; Cochrane, 1958; Pollak, 1958; Worthington, 1981), но мы эту идею применили к огромному, невиданному ранее массиву TS профилей программы Арго (более 2 млн);
- Пошаговая инструкция:
- В квадратах $1^\circ \times 1^\circ$ равной площади отбираем равное количество TS профилей (реально 20 профилей на квадрат на широте экватора) в слое 0–2000 м с равным шагом по глубине (5 м), равномерно распределенных по площади квадрата. При этом получается, что каждая пара TS значений на отобранных профилях соответствует элементарному объему воды $60 \times 1852 \times 60 \times 1852 \times 5 / 20 \text{ м}^3 \approx 3 \text{ км}^3$.
- Считаем количество TS пар, $n(T,S)$, попавших в элементарные ячейки размером $[\delta T, \delta S] = [0.02^\circ\text{C}, 0.02\text{psu}]$ на TS плоскости;
- Строим двумерную зависимость $\ln(n)$, $n \geq 1$, от температуры и солености; берется логарифм n , чтобы на графике можно было увидеть изменчивость объема в широком диапазоне $1 \leq n \leq 10000$.
- Были построены и проанализированы VTS диаграммы Атлантического, Индийского и Тихого океанов; здесь мы демонстрируем только результат для Атлантики, т.к. он показался нам наиболее неожиданным и впечатляющим.

Результаты



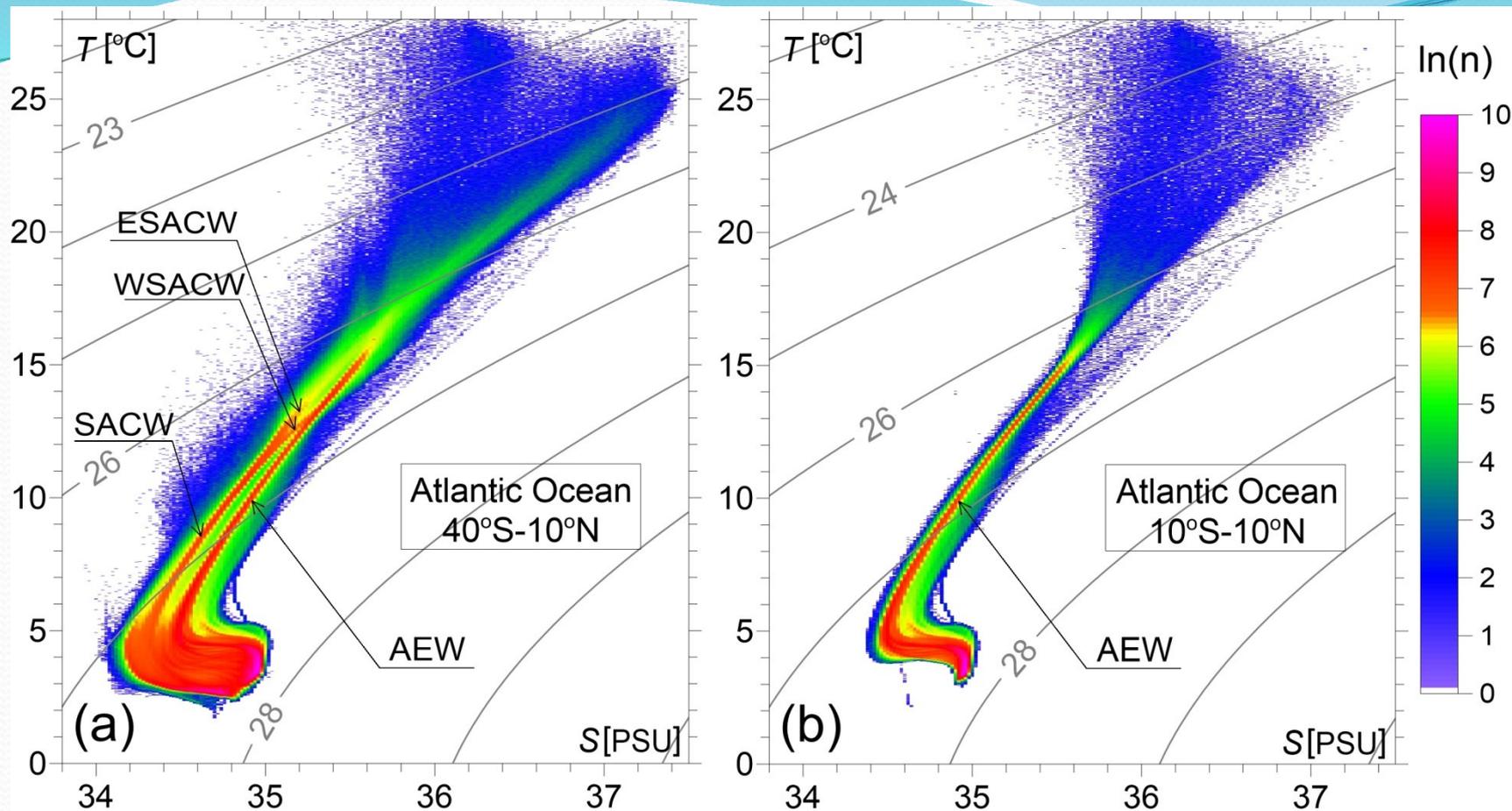
VTS диаграмма верхнего 2000 м слоя Атлантики по данным Арго.



Распределение водных масс Атлантики на TS плоскости по Sverdrup et al. (1942).

Там, где по Sverdrup et al. (1942) располагается SACW, на VTS диаграмме по данным Арго четко выделяются две водные массы с различными TS зависимостями (2 тонкие красные полосы, обозначенные как SACW и AEW). Это основной результат, остальное - дело техники.

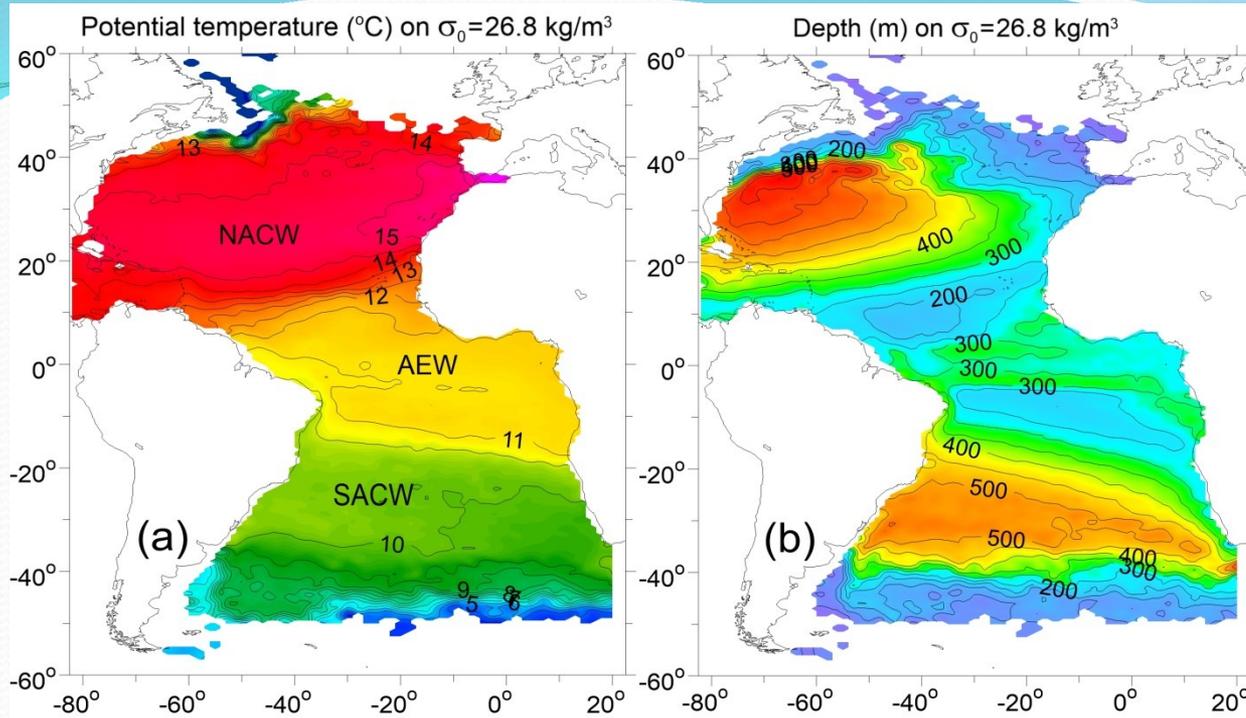
Результаты



VTS диаграммы верхнего 2000 м слоя Атлантики в диапазоне широты 40°ю.ш.–10°с.ш. (a) и 10°ю.ш.–10°с.ш. (b).

Вывод однозначен: в главном термоклине экваториальной зоны Атлантики в диапазоне 10°ю.ш.–10°с.ш. находится водная масса (AEW) с TS зависимостью, которая четко отличается от TS зависимости водной массы в южном субтропическом круговороте в диапазоне 40°ю.ш.–10°ю.ш. (SACW).

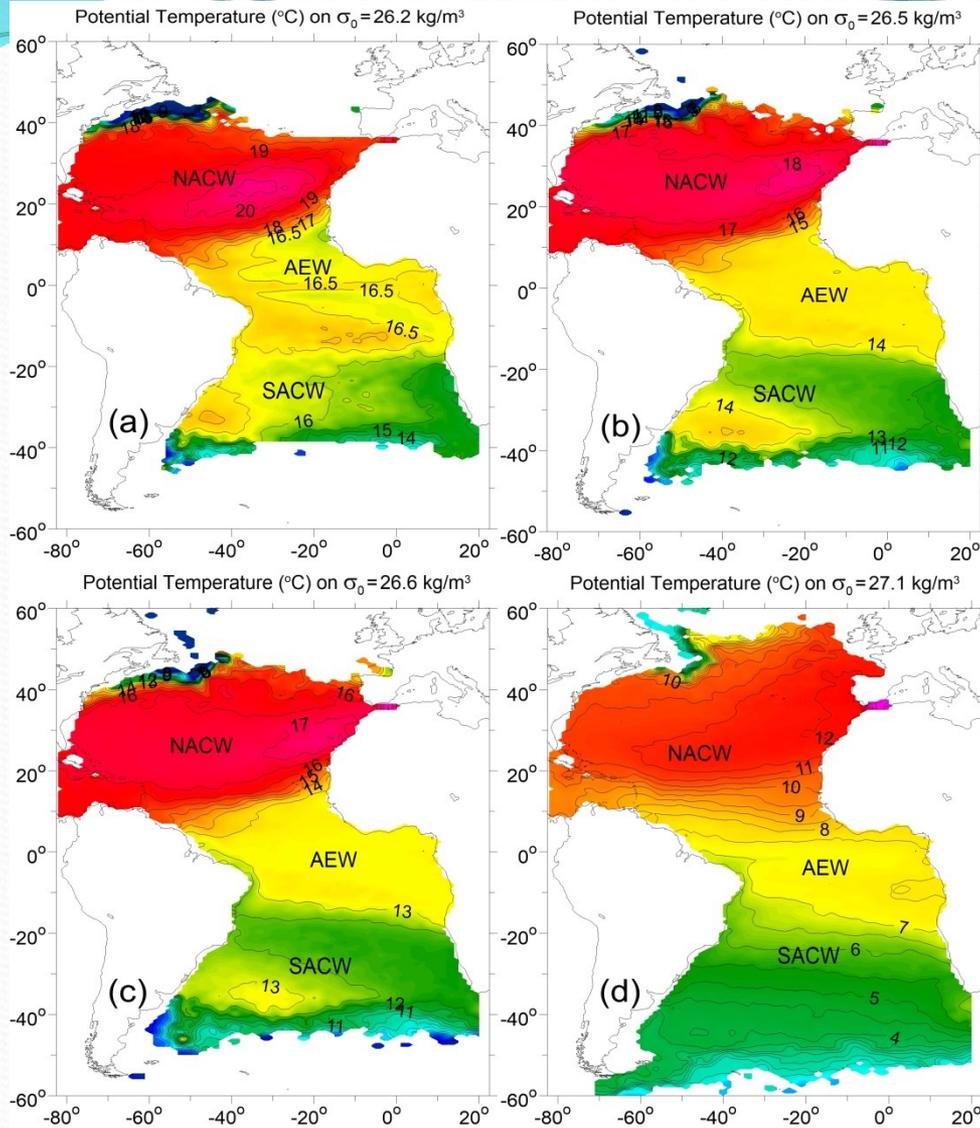
Результаты: географическое расположение АЕВ и связь с процессами циркуляции



Потенциальная температура на изопикнической поверхности $\sigma_0 = 26.8 \text{ kg/m}^3$ (а) и глубина залегания изопикны (б)

- АЕВ занимает слой $\sim 150\text{--}500$ м главного термоклина в области низких широт между северным и южным субтропическими антициклоническими круговоротами (чашеобразные углубления изопикнической поверхности в диапазоне широты $10^\circ\text{--}40^\circ$ в обоих полушариях);
- АЕВ характеризуется низкой термоклинностью (постоянством температуры на изопикнических поверхностях);
- На боковых границах АЕВ-SACW и NACW-AEW существуют термохалинные фронты с изопикническими перепадами температуры 1°C и 3.5°C соответственно;
- Топография изопикнических поверхностей в низких широтах свидетельствует о наличии системы разнонаправленных зональных экваториальных течений/противотечений;

Результаты: географическое расположение АЕВ и связь с процессами циркуляции



- Термохалинный фронт между АЕВ и SACW с изопикническим перепадом температуры $\sim 1^\circ\text{C}$ четко прослеживается в диапазоне изопикн $\sigma_0 = 26.5 - 26.8 \text{ kg/m}^3$ и менее четко в более широком диапазоне $26.2 - 27.1 \text{ kg/m}^3$, т.е. в главном термоклине в слое $\sim 150 - 500 \text{ м}$;

Потенциальная температура на изопикнах $\sigma_0 = 26.2, 26.5, 26.6, 27.1 \text{ kg/m}^3$

Результаты: географическое расположение АЕВ и связь с процессами циркуляции

Схема течений в тропической Атлантике в слое ЦВ 100-500м (Stramma & Schott, 1999)

sSEC, cSEC, eSEC, nSEC – southern, central, equatorial, and northern branches of South Equatorial Current;

NEC – North Equatorial Current;
SECC – South Equatorial CounterCurrent

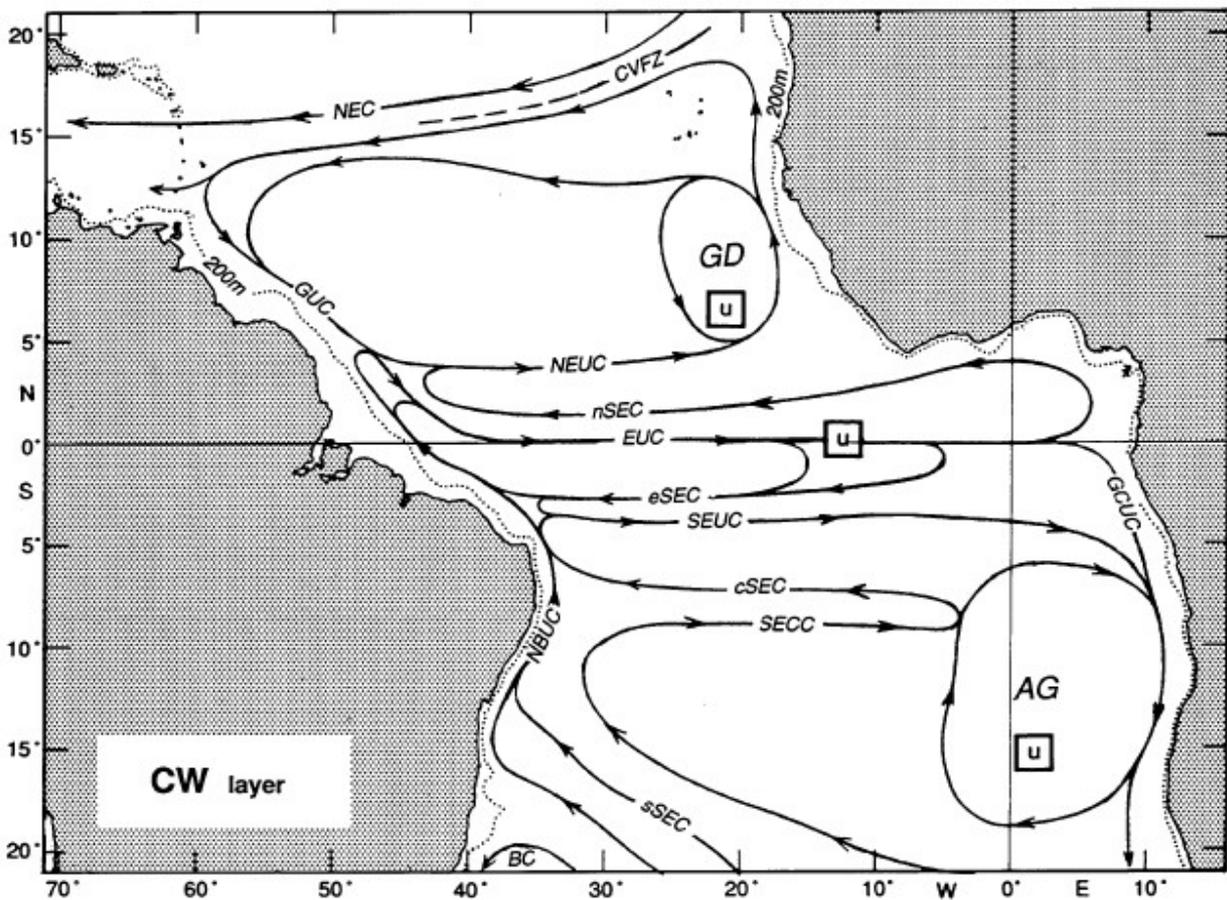
SEUC – South Equatorial UnderCurrent;

EUC – Equatorial UnderCurrent (течение Ломоносова);

NEUC – North Equatorial UnderCurrent

NBUC – North Brazil UnderCurrent

GUC – Guiana UnderCurrent

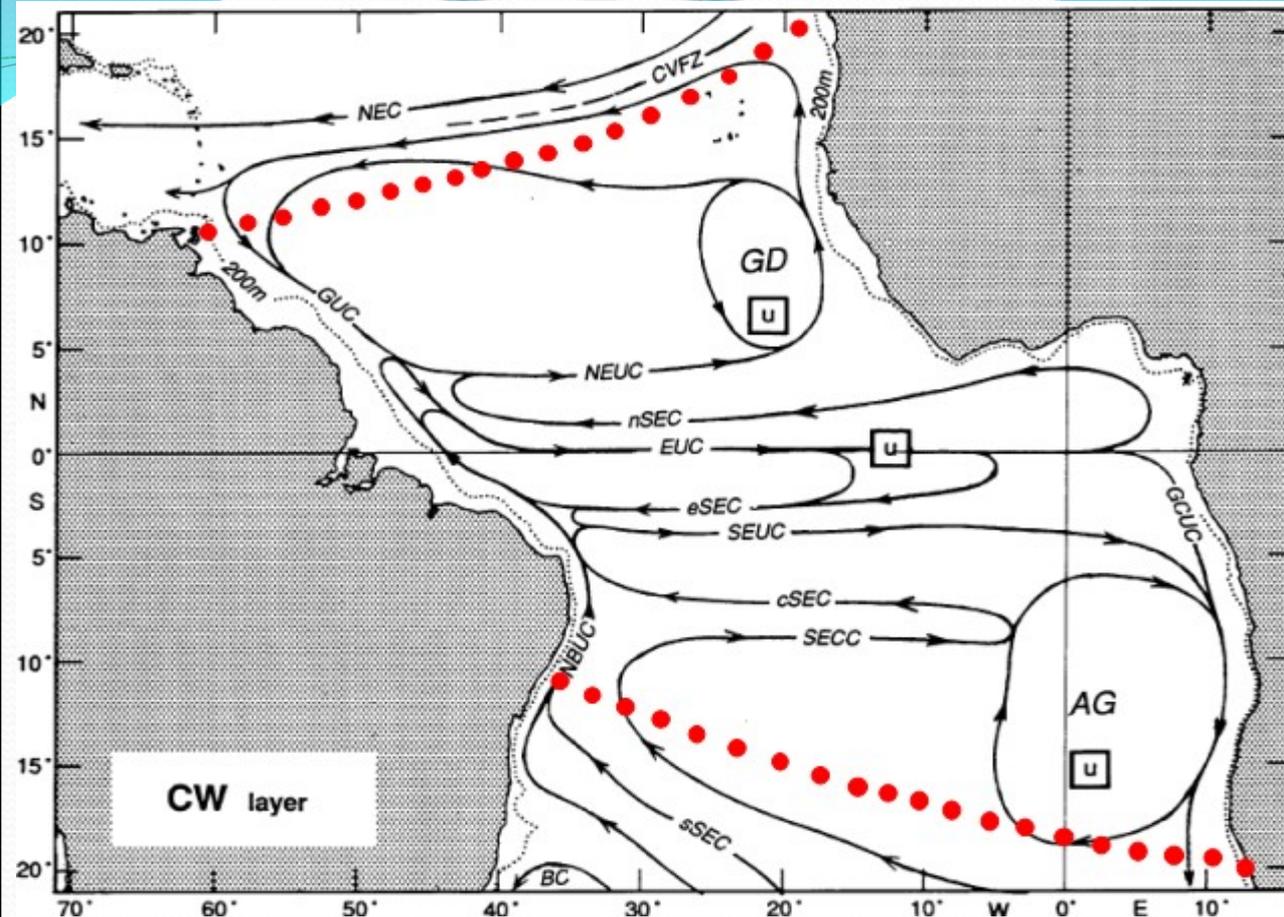


- Термохалинные фронты между АЕВ и SACW и между NACW и АЕВ расположены в области течений sSEC и NEC, которые замыкают южный и северный субтропические антициклонические круговороты со стороны экватора;
- Согласно схеме течений, ЦВ может поступать в экваториальную зону с юга с Северным бразильским подповерхностным противотечением (NBUC) и с севера с Гвианским подповерхностным противотечением (GUC).

Результаты: гипотетический механизм формирования АЕВ

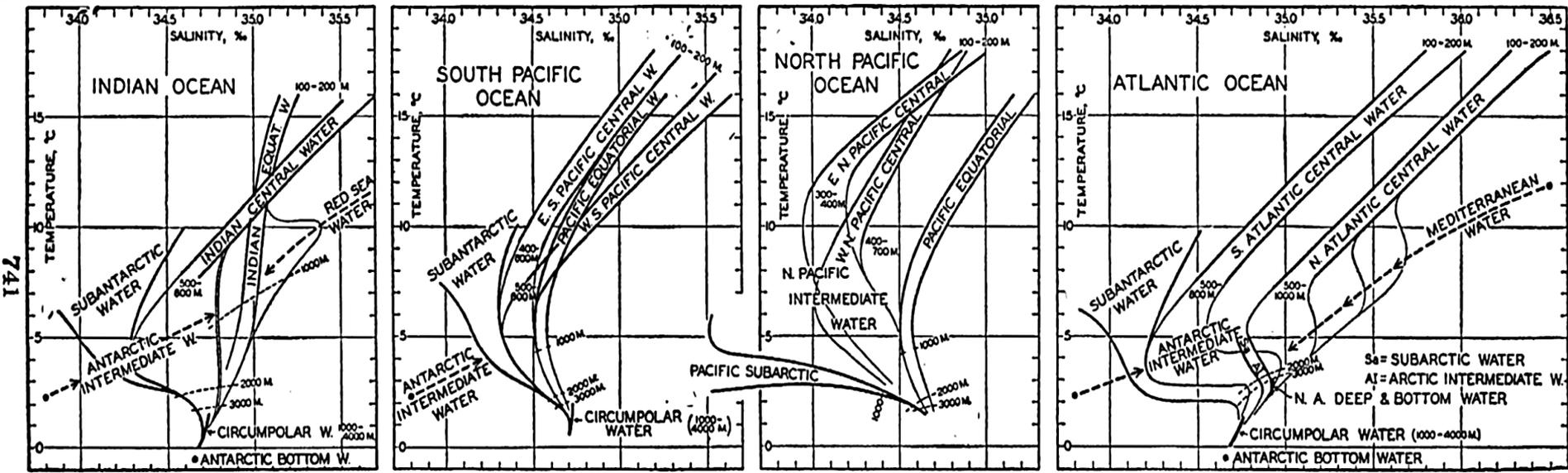
Красный пунктир – южная и северная границы АЕВ.

Южная и северная ЦВ (SACW и NACW) поступают в экваториальную зону вдоль западного берега Атлантики с Северным Бразильским подповерхностным противотечением (NBUS) с юга и с Гвианским подповерхностным противотечением (GUC) с севера в пропорции 3.5:1 и питают экваториальные подповерхностные противотечения (SEUC, EUC, NEUC);



- Подобно мезомасштабным вихрям, система многочисленных разнонаправленных зональных течений и противотечений создает эффект увеличения эффективного коэффициента изопикнического перемешивания. Как следствие, поступившая в экваториальную зону ЦВ (SACW и NACW) изопикнически перемешивается, образуя изопикнически однородную экваториальную водную массу (АЕВ) и термохалинные фронты на ее боковых границах с юга и севера.

Почему Атлантическая экваториальная водная масса была обнаружена на 80 лет позже, чем Тихоокеанская и Индийская экваториальные водные массы?



Зависимости температуры от солености основных водных масс Мирового океана по Sverdrup et al. (1942).

- **Объективная причина:** в Индийском и Тихом океанах наклон TS кривой в ЭВ отличен от наклонов TS кривых в ЦВ. Поэтому ЭВ можно было идентифицировать по одиночным вертикальным TS профилям. В Атлантическом океане TS кривые в ЦВ (SACW и NACW) и ЭВ (AEW) параллельны, причем TS кривая AEW намного ближе к SACW чем к NACW. Поэтому, чтобы различить AEW и SACW, нужно было располагать множеством TS профилей, плотно покрывающих площадь океана.
- **Субъективная причина:** к концу 20 века по программе WOCE было собрано достаточно TS профилей для идентификации AEW. Нужно было лишь усомниться в выводах монографии-библии Sverdrup et al. (1942) и провести целенаправленную обработку данных.
- В случае массива профилей Арго нам не нужно было ничего целенаправленно искать: из построенной VTS диаграммы Атлантического океана AEW вылезла сама, как шило из мешка.

Выводы

- VTS диаграмма Атлантического океана, построенная по данным Арго, показала, что главный термоклин в экваториальной зоне в слое 150–500 м характеризуется уникальной TS зависимостью, четко отличающейся от TS зависимостей в центральных водных массах южной и северной Атлантики: есть все основания идентифицировать новую водную массу – Атлантическую экваториальную воду (AEW);
- Область AEW характеризуется постоянством температуры на изопикнических поверхностях и термохалинными фронтами на боковых границах с центральными водными массами на юге и на севере;
- AEW предположительно формируется в результате поступления центральных водных масс в пропорции 3.5:1 в экваториальную зону из южного и северного субтропического круговоротов с Северным бразильским и Гвианским подповерхностными противотечениями и последующего изопикнического перемешивания, производимого разнонаправленными зональными экваториальными течениями-противотечениями.



Спасибо за внимание!