

УДК 551.46

Е.В. Краюшкин<sup>1</sup>, А.Н. Демидов<sup>2</sup>

## ГЛОБАЛЬНОЕ ИЗМЕНЕНИЕ ТЕРМОХАЛИННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОМЕЖУТОЧНЫХ, ГЛУБИННЫХ И ДОННЫХ ВОДНЫХ МАСС В ЮЖНОЙ АТЛАНТИКЕ<sup>3</sup>

По данным повторяющихся трансатлантических разрезов в Южной Атлантике показано, что на фоне общего потепления толщи вод глубже 500 м основные водные массы региона имеют разнонаправленные тенденции векового изменения средней температуры и солёности. Показано увеличение средней температуры Антарктической промежуточной водной массы в Южной Атлантике, в то время как средняя температура Антарктической донной водной массы уменьшается с начала века. Определены оптимальные параметры интерполяции средних значений температуры и солёности вод по данным измерений трансатлантических экспедиций в начале и середине XX в.

*Ключевые слова:* изменение климата, водные массы, Атлантический океан, интерполяция океанологических данных.

**Введение.** В глобальном плане зафиксировано изменение средней температуры воздуха Земли на  $0,61 \pm 0,16$  °C с 1861 по 2000 г. [11]. Значительное увеличение средней температуры поверхности планеты во многом объясняется естественными колебаниями климатической системы Земли. При этом известно, что на естественную составляющую глобальных изменений климата планеты накладывается и антропогенная составляющая. Внутренняя динамика климатической системы обусловлена прежде всего взаимодействием атмосферы с океаном, в глубинных слоях которого возможны межгодовые колебания характеристик. Эта проблема приобрела актуальность в конце XX в. при разработке концепции глобального меж океанского конвейера [9] и осознании вклада глубинной циркуляции вод в глобальное перераспределение тепла и влаги на планете [5].

**Постановка проблемы.** Одной из первых глобальных исследований, посвящённых выявлению многолетней изменению теплозапаса вод Мирового океана, стала работа [16] с последующим переизданием [17], в которой выявлено значительное потепление толщи вод 0—3000 м в Мировом океане на  $0,037$  °C, в частности в Южной Атлантике на  $0,056$  °C с середины XX в. Однако впоследствии этот вывод был подвергнут сомнению в работе [15] из-за значимых погрешностей обрывных зондов (ХВТ). Потепление поверхностного и подповерхностного слоя вод Мирового океана начиная с конца XX в. выявлено и в работах [7, 19]. В работах [6, 20] рассмотрены отдельные водные массы антарктического происхождения в Атлантическом

океане и опять же установлено увеличение температуры вод.

В настоящее время активно разрабатывается метод оценки изменения температуры и солёности глубинных вод с применением натуральных экспедиционных измерений на повторяющихся трансатлантических разрезах [10, 21]. В работе [13] по данным повторяющихся разрезов показано, что на фоне общего потепления поверхностной и промежуточной структурной зон Атлантического океана средние значения температуры глубинных и донных вод имеют тенденцию к уменьшению. По результатам эксперимента в Экваториальной Атлантике [18] показано, что Антарктические донные воды испытывают незначительное уменьшение температуры в начале XXI в., хотя для канала Вима ( $32^\circ$  ю.ш.) характерна тенденция к повышению температуры за этот период [20].

На настоящий момент не существует единого мнения о характере многолетнего изменения температуры и теплозапаса глубинных вод как Мирового океана в целом, так и Атлантического в частности. В большинстве опубликованных работ выявлено потепление всей толщи вод Атлантического океана, однако в некоторых исследованиях [13, 15, 18] показано, что с начала XX в. и по настоящее время тенденции изменения средней температуры отдельных глубинных слоев Мирового океана не согласуются с общим выявленным трендом.

Основная цель работы заключается в определении тенденций многолетнего изменения средней температуры и солёности водных масс и всей толщи вод

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра океанологии, аспирант; e-mail: box\_evk@mail.ru

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра океанологии, ст. науч. с., канд. геогр. н.; e-mail: tuda@mail.ru

<sup>3</sup> Работа выполнена в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009—2013 годы (Соглашение № 8327 от 20.8.2012), а также при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 11-05-00634, 13-05-00972) и РГО-РФФИ (грант № 13-05-41374).

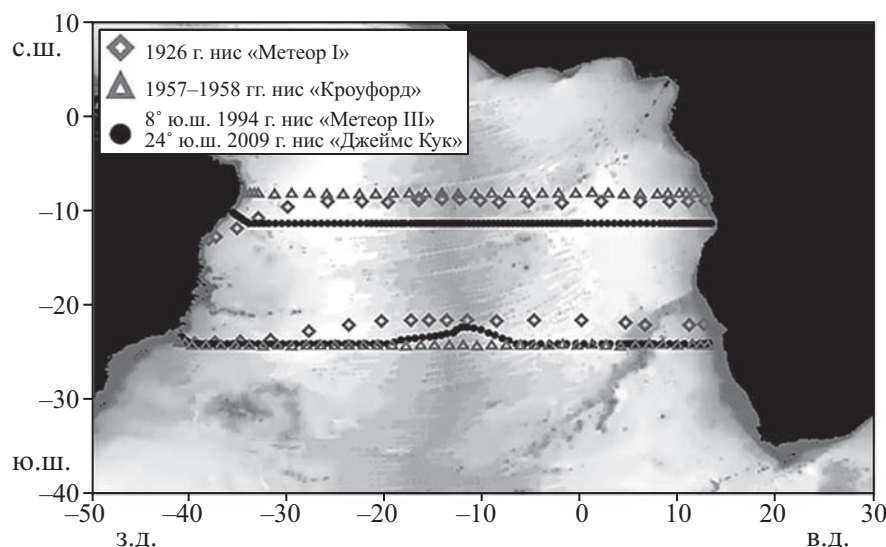


Рис. 1. Схема расположения станций изученных трансатлантических разрезов

ниже 500 м по данным экспедиционных измерений, проведенных в Южной Атлантике.

**Материалы и методы исследования.** Расчет средних значений термохалинных характеристик водных масс проводился по данным трансатлантических разрезов, выполненных в Южной Атлантике в пределах 8–11° и 22–24° ю.ш. (рис. 1).

В пределах 8–11° ю.ш. были выполнены 3 трансатлантических разреза: на научно-исследовательских судах (НИС) “Метеор I” в 1927 г., “Кроуфорд” в 1957 г. в течение Международного геофизического года (МГГ) и в 1994 г. на НИС “Метеор III” в рамках международного проекта “World Ocean Circulation Experiment” (WOCE). В широтном интервале 22–24° ю.ш. также выполнены 3 разреза: на НИС “Метеор I” в 1926 г., “Кроуфорд” в 1957 г. в ходе МГГ и в 2009 г. на НИС “Джеймс Кук” в рамках WOCE. Все представленные данные находятся в открытом доступе в базе данных World Ocean Database 2009 (WOD09) [8].

В ходе экспедиций в начале века на НИС “Метеор I” температуру в толще вод определяли при помощи пары опрокидывающихся термометров, срабатывавших одновременно, с градуировкой через 0,05 °С для измерений в глубинной части профиля. Пробы воды отбирали батометрами Нансена, а величину солености определяли методом титрования азотнокислым серебром с погрешностью  $\pm 0,01\text{‰}$  [13]. Измерения температуры на НИС “Кроуфорд” также проводили при помощи опрокидывающихся термометров с погрешностью  $\pm 0,01$  °С, а погрешность измерения солености с использованием титрования составляла  $\pm 0,005\text{‰}$  в диапазоне солености 34,0–36,0‰ [12]. Измерения в конце XX — начале XXI в. с использованием современных STD-зондов и стандартизированных методик отбора проб, а также единой шкалы зависимости удельного сопротивления датчиков зонда от температуры и электропроводности вод (Международная шкала температуры 1990 г., МШТ-90 и

Шкала практической солености 1978 г., ШПС-78) позволили уменьшить погрешности измерений температуры до  $\pm 0,002$  °С и солености до  $\pm 0,003$  епс (единицы практической солености) [11]. (Смена методики измерений солености от прямого определения массы солей, содержащихся в морской воде, на косвенное определение через электрическое сопротивление чувствительного элемента повлекла за собой смену единиц измерения солености от промилле к единицам практической солености.)

Немаловажная проблема при сопоставлении современных и исторических массивов данных заключалась в несовпадении шкал определения термохалинных параметров. Однако по результатам работ зарубежных авторов возможное расхождение из-за несоответствия современной шкалы солености ШПС-78 с измерениями солености при помощи титрования не превышает 0,01‰ (в среднем 0,0016‰), что на порядок ниже точности определения солености во время экспедиций на НИС “Метеор I” и “Кроуфорд”. Разница между МШТ-90 и шкалой, использовавшейся для приведения измерений ртутными термометрами для вод с температурой  $< 10$  °С, не превышает 0,003 °С [13]. Вышеприведенные погрешности измерений в дальнейшем использовали для расчета доверительных интервалов средних рассчитанных значений температуры и солености изучаемых водных масс. Так как инструментальная погрешность измерения представляет собой случайную величину, то и ошибка определения среднего значения будет подчиняться нормальному закону распределения.

**Водные массы.** В работе рассмотрены основные водные массы Южной Атлантики: Антарктическая промежуточная (ААПВ), Североатлантическая глубинная (САГВ) и Антарктическая донная (ААДВ). ААПВ формируется на периферии субантарктического фронта в Южном полушарии во всех океанах. ААПВ в Южной Атлантике повсеместно отождествляется

с минимумом солености и максимумом содержания биогенных элементов [3]. В южной части Атлантического океана можно выделить также Верхнюю циркумполярную водную массу с локальным минимумом температуры, однако из-за незначительности толщины ее слоя (~100 м) авторами статьи она отнесена к слою ААПВ.

САГВ в Южной Атлантике представляет собой продукт смешения и трансформации вод, периодически опускающихся в море Лабрадор, и более плотных вод, поступающих в Атлантический океан через Исландско-Шетландские, Фареро-Шетландские пороги и Датский пролив. Смешиваясь и распространяясь на юг, они испытывают существенное влияние Средиземноморских вод и консолидируются в единую водную массу с отличительным локальным максимумом солености в ядре.

ААДВ в Южной Атлантике к северу от 30–40° ю.ш. представляет собой собирательное название смеси наиболее плотных вод открытой части Мирового океана — глубинных вод моря Уэдделла и Нижней циркумполярной водной массы. ААДВ имеет пониженную соленость и минимальное значение температуры вод у дна [20].

Границы водных масс в регионе исследования определяли методом локализации максимальных вертикальных градиентов температуры и солености вод в поле нейтральной плотности ( $\gamma_n$ ) на разрезах WOCE. ААПВ расположена в слое с  $\gamma_n = 27,25 \div 27,76$ ; САГВ —  $\gamma_n = 27,76 \div 28,16$  в Западном бассейне Атлантического океана и  $\gamma_n = 27,76 \div 28,15$  в Восточном. ААДВ расположена только в Западном бассейне ниже изопикны  $\gamma_n = 28,16$ . Положение границ водных масс согласуется с результатами работы [3].

**Метод определения средних значений.** Основную трудность в работе с историческими массивами данных для определения по ним средних значений термохалинных характеристик водных масс представляет не большая погрешность исторических измерений, а их недостаточное пространственное разрешение (рис. 2).

Во время экспедиций на НИС “Метеор I” и “Круфорд” пробы отбирали батометрами, измерения имеют грубое пространственное разрешение как по глубине, так и по частоте станций. Как видно на рис. 2, в 1958 г. измерений глубже слоя с  $\gamma_n = 27,25$  было существенно больше, чем в 1926 г. (691 против 273), однако в обоих случаях измерений на порядки меньше, чем при современном CTD-зондировании после применения алгоритмов приведения данных (160 958 измерений на разрезе). Недостаточное пространственное разрешение ведет к появлению значительных погрешностей при определении средних параметров из-за трудоемкости интерполяции по недостаточному объему данных и появление систематических погрешностей. Так как у дна измерения батометрами отсутствуют, то эти области не учитываются при определении среднего значения или в зависимости от выбранного метода получаются в результате экстраполяции, что, в частности, ведет к завышению значений средней температуры Антарктической донной водной массы.

В настоящее время для нахождения многолетнего изменения термохалинных параметров значение определяется непосредственно в ядре водной массы, как, например, в [21]. Однако при использовании данных исторических разрезов с малым пространственным разрешением невозможно точно установить, попали ли точки измерений в область наиболее выраженного ядра водной массы, тем более в глубинной части профиля. Авторы статьи многолетнее изменение определяли путем нахождения средних значений термохалинных параметров во всем слое распространения изучаемой водной массы, ограниченном изопикническими поверхностями. Для расчета средних значений применяли программный пакет Golden Software Surfer 8 [22], в котором можно проводить интерполяцию значений неравномерно распределенных измерений в узлы регулярной сетки с последующим расчетом средних значений величин.

По данным работ [1, 4] наиболее подходящим методом интерполяции океанологических полей ока-

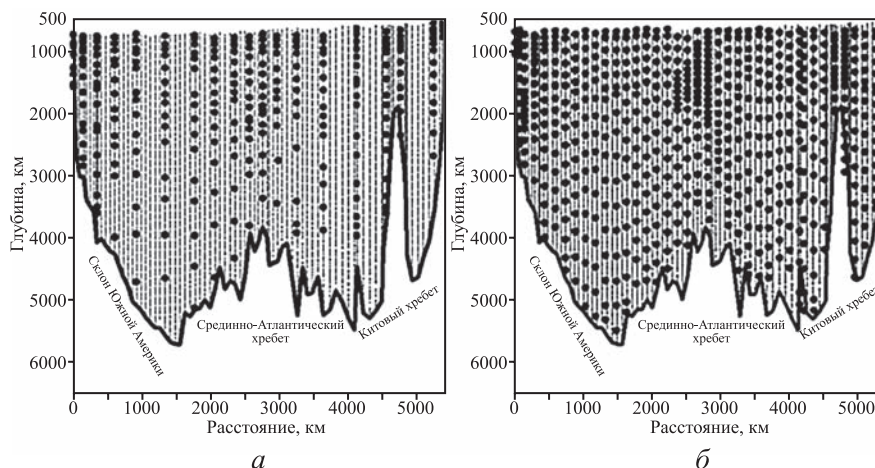


Рис. 2. Пространственное распределение всех точек CTD-измерений в 2009 г. на 24° ю.ш. и точек CTD-измерений в координатах отбора проб при помощи батометров (черные кружки) в пределах 500 м — дно: а — в 1926 г. б — в 1957 г.

зался метод крайгинга. Наиболее полное математическое описание этого метода представлено в работе [2], метод имеет несколько входных параметров, и их варьирование значительно меняет расчетное среднее значение. Отсюда первостепенной задачей при расчете средних значений было нахождение наиболее оптимальных параметров интерполяции для измерений в точках взятия проб батометрами и расчета возникающих погрешностей интерполяции. Для определения ошибки интерполяции выполнены тестовые расчеты, в которых изначально определяли среднее значение по всем данным STD-измерений и принимали его в качестве истинной величины.

Затем из данных STD-зондирования выбирали точки измерений, совпадающие по глубине и долготе с измерениями в рейсах на НИС “Метеор I” и “Кроуфорд” (рис. 2, черные кружки). По данным STD-измерений только в координатах измерений на заданных горизонтах, выполненных батометрами, проводили те же самые тесты с варьированием параметров интерполяции и определяли возникающую погрешность, при которой расчетное значение средней температуры и солёности находится ближе всего к принятому истинному значению по всем STD-измерениям.

В некоторых случаях подобрать параметры интерполяции с получением истинного значения не удалось, и при дальнейших расчетах средних значений по измерениям 1926 и 1957 гг. вводились установленные погрешности интерполяции, что позволяет говорить об отсутствии ошибки интерполяции при определении средних параметров в 1926 и 1957 гг., за исключением неточности определения истинного значения, для температуры не превышающего 0,001 °С, а для солёности — 0,005 епс.

На первом этапе исследованию подверглись параметры интерполяции метода крайгинга, т.е. число узлов расчетной сетки, радиусы интерполяции, параметры секторов поиска и минимальное число точек измерений, участвующих в интерполяции. Исследования проводили на всем разрезе без разбиения на водные массы. В дальнейшем выполняли тестовые расчеты определения погрешностей интерполяции в каждой из изучаемых водных масс. Результаты проведенных тестов представлены в табл. 1 и 2.

Результаты тестов показали, что изменение параметров расчетной сетки после превышения частоты 200×200 узлов практически не влияет на качество расчета среднего значения. Намного больше влияет параметр радиуса эллипса поиска точек: при уменьшении

Таблица 1

**Пример определения оптимальных параметров интерполяции для расчета среднего значения температуры и солёности вод для всего разреза, выполненного на НИС “Метеор I” в 1926 г. и “Кроуфорд” в 1958 г. на 22–24° ю.ш.**

| Расчетная сетка<br>(число точек<br>в двух<br>плоскостях)          | Радиус интерполяции<br>(по горизонтали км / по вертикали м) | Параметры секторов<br>поиска (число секторов /<br>минимально необходимое<br>число данных) | Температура,<br>°С | Солёность,<br>епс | Погрешность<br>температуры, % | Погрешность<br>солёности, % |
|-------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|-------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| Расчет 100%-го значения по всем STD-измерениям в 2009 г.          |                                                             |                                                                                           |                    |                   |                               |                             |
| 200×200                                                           | 200 / 200                                                   | 4 / 8                                                                                     | <b>2,706</b>       | <b>34,775</b>     | <b>0,0</b>                    | <b>0,00</b>                 |
| Расчет значений по STD-измерениям в координатах измерений 1926 г. |                                                             |                                                                                           |                    |                   |                               |                             |
| 200×200                                                           | 200 / 200                                                   | 4 / 8                                                                                     | 4,293              | 34,426            | 37,0                          | 1,01                        |
| 200×200                                                           | 700 / 700                                                   | 4 / 8                                                                                     | 3,143              | 34,759            | 14,0                          | 0,05                        |
| 600×600                                                           | 700 / 700                                                   | 4 / 8                                                                                     | 3,141              | 34,760            | 14,0                          | 0,05                        |
| 200×200                                                           | 700 / 700                                                   | 1 / 1                                                                                     | 2,805              | 34,775            | 4,0                           | 0,01                        |
| 200×200                                                           | 500 / 500                                                   | 1 / 1                                                                                     | 2,781              | 34,776            | 3,0                           | 0,01                        |
| 200×200                                                           | 3000 / 300                                                  | 1 / 1                                                                                     | <b>2,780*</b>      | <b>34,775</b>     | <b>2,7</b>                    | <b>0,01</b>                 |
| Расчет значений по STD-измерениям в координатах измерений 1957 г. |                                                             |                                                                                           |                    |                   |                               |                             |
| 200×200                                                           | 400 / 400                                                   | 1 / 1                                                                                     | 2,717              | 34,777            | 0,5                           | 0,01                        |
| 200×200                                                           | 500 / 500                                                   | 1 / 1                                                                                     | 2,717              | 34,777            | 0,5                           | 0,01                        |
| 200×200                                                           | 2000 / 500                                                  | 1 / 1                                                                                     | 2,724              | 34,777            | 0,7                           | 0,01                        |
| 200×200                                                           | 3000 / 300                                                  | 1 / 1                                                                                     | <b>2,712</b>       | <b>34,776</b>     | <b>0,3</b>                    | <b>0,01</b>                 |
| 200×200                                                           | 4000 / 1000                                                 | 1 / 1                                                                                     | 2,715              | 34,776            | 0,4                           | 0,01                        |

\* Полужирным выделено 100%-е значение STD-измерений и наиболее близкие к нему значения интерполяции по данным батометров.

Таблица 2

**Определение погрешностей интерполяции с использованием найденных оптимальных параметров интерполяции для расчета среднего значения температуры и солености вод с разбиением на водные массы для всего разреза, выполненного на НИС “Метеор I” в 1926 г. и “Кроуфорд” в 1958 г. на примере широтного интервала 22—24° ю.ш.**

| Водная масса    | 100%-е значение по всем STD-измерениям |                   | Погрешности определения в 1957 г. |                   | Погрешности определения в 1926 г. |                   |
|-----------------|----------------------------------------|-------------------|-----------------------------------|-------------------|-----------------------------------|-------------------|
|                 | Западный бассейн                       | Восточный бассейн | Западный бассейн                  | Восточный бассейн | Западный бассейн                  | Восточный бассейн |
| Температура, °C |                                        |                   |                                   |                   |                                   |                   |
| ААПВ            | 4,472                                  | 4,316             | 0,000                             | 0,021             | 0,132                             | 0,258             |
| САГВ            | 2,642                                  | 2,447             | 0,001                             | 0,000             | –0,013                            | –0,047            |
| ААДВ            | 0,762                                  | —                 | –0,075                            | —                 | –0,042                            | —                 |
| Соленость, епс  |                                        |                   |                                   |                   |                                   |                   |
| ААПВ            | 34,449                                 | 34,474            | –0,003                            | –0,003            | 0,000                             | 0,003             |
| САГВ            | 34,880                                 | 34,858            | 0,000                             | 0,000             | 0,005                             | 0,002             |
| ААДВ            | 34,754                                 | —                 | –0,005                            | —                 | 0,005                             | —                 |

числа точек измерений радиус интерполяции должен увеличиваться, а наилучшие результаты получены на переопределенной величине горизонтального радиуса (до 3000 км). Значительный вклад вносит также и минимальное число точек, при котором происходит интерполяция. Для сильно разреженных данных необходимо учитывать все точки измерений, даже если только всего одна из них попала в эллипс поиска.

Для широтного интервала 8—11° ю.ш. применяли аналогичные параметры интерполяции. В результате удалось получить сходные величины относительной погрешности после проведения интерполяции по недостаточному объему данных — для 1926 г. 2,7% по температуре и 0,01% по солености; для 1957 г. 0,3% по температуре и 0,01% по солености.

На заключительном этапе работы рассчитаны погрешности для каждого разреза. Ошибки при расчете среднего значения включают в себя инструментальную случайную ошибку измерений и систематическую ошибку несовпадения шкал измерений в исторических массивах данных, а при современных STD-измерениях еще и случайную ошибку определения среднего значения по этим измерениям. Квадратические значения случайных ошибок складывали и к ним добавляли систематическую ошибку на несовпадение шкал измерений, в результате чего определяли доверительные интервалы средних значений температуры и солености. Инструментальная погрешность составляет 60—70% от общей погрешности, поправка на несовпадение шкал измерений вносит 20—30%. Ошибка определения 100%-го значения параметра, по новейшим STD-данным, составляет около 10%.

После расчета величины среднего значения параметра по слою по данным исторических массивов вводили поправку на интерполяции (табл. 2). Ошибка интерполяции для температуры вод в большинстве случаев равна инструментальной ошибке измерений,

однако для отдельных водных масс она составляет 200—300% от величины инструментальной погрешности. Возможная ошибка интерполяции среднего значения солености не превышает величину инструментальной погрешности измерений солености по историческим массивам данных.

Нами впервые для такого рода работ рассчитана ошибка, возникающая вследствие несовпадения положения станций разрезов (рис. 1) и наличия градиента температуры и солености между разрезами, выполненными на разных широтах. Поправку на широтный градиент на протяжении линии разреза определяли при помощи Климатического атласа Мирового океана [14], из которого выбирали многолетние среднеклиматические значения температуры и солености в рассматриваемых точках измерений на всех разрезах в пределах широтного интервала, а затем вводили поправку в расчеты величины изменения. Другими словами, разрезы в пределах одного широтного интервала номинально приводили к одной широте с учетом соответствующих среднеклиматических градиентов (табл. 3). Полученные результаты показывают, что разница температуры и солености в результате несовпадения линий разрезов, как будет показано ниже, вносит значительную погрешность, в некоторых случаях равную величине многолетнего изменения или даже превышающее.

**Результаты исследований и их обсуждение.** Расчет многолетнего изменения средних параметров водных масс выполняли отдельно для Западного и Восточного бассейнов Атлантического океана. Западный бассейн характеризуется более интенсивной динамикой вод и большим изменением параметров, чем Восточный. Также необходимо отметить, что на рассматриваемых разрезах Антарктическая донная водная масса присутствует только в Западном бассейне.

Таблица 3

**Широтные градиенты изменения температуры и солёности для основных водных масс Южной Атлантики номинально на 8° и 24° ю.ш. за разные периоды (с учетом поправки на широтный градиент)**

| Широта, годы                                  | ААПВ             |                   | САГВ             |                   | ААДВ             |
|-----------------------------------------------|------------------|-------------------|------------------|-------------------|------------------|
|                                               | Западный бассейн | Восточный бассейн | Западный бассейн | Восточный бассейн | Западный бассейн |
| Изменение температуры, °С                     |                  |                   |                  |                   |                  |
| 8° ю.ш., 1926—1957                            | 0,192            | 0,036             | −0,045           | −0,060            | −0,104           |
| 8° ю.ш., 1957—1994                            | 0,038            | −0,145            | 0,038            | 0,202             | −0,063           |
| 24° ю.ш., 1926—1958                           | 0,068            | −0,009            | 0,016            | 0,062             | −0,066           |
| 24° ю.ш., 1958—2009                           | 0,034            | −0,004            | 0,009            | −0,029            | −0,076           |
| Изменение солёности, епс                      |                  |                   |                  |                   |                  |
| 8° ю.ш., 1926—1957                            | 0,031            | 0,047             | −0,009           | 0,009             | −0,020           |
| 8° ю.ш., 1957—1994                            | −0,015           | 0,000             | −0,007           | 0,012             | 0,001            |
| 24° ю.ш., 1926—1958                           | 0,030            | 0,008             | 0,005            | 0,008             | −0,004           |
| 24° ю.ш., 1958—2009                           | −0,012           | 0,002             | −0,001           | −0,008            | −0,015           |
| Поправка на широтный градиент температуры, °С |                  |                   |                  |                   |                  |
| 8° ю.ш., 1926—1957                            | −0,012           | −0,031            | −0,002           | −0,036            | 0,015            |
| 8° ю.ш., 1957—1994                            | −0,011           | −0,012            | −0,018           | −0,084            | 0,017            |
| 24° ю.ш., 1926—1958                           | 0,020            | 0,000             | 0,019            | 0,011             | −0,033           |
| 24° ю.ш., 1958—2009                           | −0,006           | −0,003            | 0,010            | 0,033             | 0,034            |
| Поправка на широтный градиент солёности, епс  |                  |                   |                  |                   |                  |
| 8° ю.ш., 1926—1957                            | −0,012           | −0,001            | −0,001           | −0,001            | 0,002            |
| 8° ю.ш., 1957—1994                            | −0,027           | −0,001            | −0,002           | −0,018            | 0,002            |
| 24° ю.ш., 1926—1958                           | −0,016           | −0,024            | 0,016            | 0,013             | −0,003           |
| 24° ю.ш., 1958—2009                           | 0,006            | 0,005             | 0,000            | 0,005             | 0,003            |

Результаты расчетов изменения показаны на рис. 3 и 4. В слое ААПВ в Западном бассейне наблюдается устойчивый рост температуры вод на обоих разрезах. На 8° ю.ш. прослеживается тенденция к увеличению средней температуры вод с 1926 по 1994 г. на  $+0,279 \pm 0,01$  °С, для 24° ю.ш. также наблюдается увеличение средней температуры ААПВ на  $+0,124 \pm 0,01$  °С с 1926 по 2009 г. в расчете на 100 лет. В Восточном бассейне явной тенденции к увеличению или уменьшению температуры ААПВ не выявлено, а ее изменение сопоставимо с точностью определения средней температуры. Результаты расчетов работы [6] также показывают повышение средней температуры ААПВ, однако величина изменения составляет  $+0,402$  °С на 8° ю.ш. и  $+0,391$  °С на 24° ю.ш. Изменение солёности в ААПВ в Западном бассейне не имеет явно выраженного тренда, однако на обоих параллелях характер изменения одинаков: в последнее столетие средняя солёность вод увеличилась незначительно — на  $+0,019 \pm 0,01$  епс на 8° ю.ш. и на  $+0,022 \pm 0,01$  епс на 24° ю.ш.

В Восточном бассейне на 8° ю.ш. отмечается существенное увеличение средней солёности ААПВ — на  $+0,058 \pm 0,01$  епс, однако на 24° ю.ш. изменение средней солёности находится в пределах точности измерений.

Изменение средней температуры САГВ в Западном бассейне не имеет явно выраженной тенденции и находится в пределах точности измерений. В Восточном бассейне на 8° ю.ш. с 1926 по 1994 г. прослеживается значительное увеличение температуры на  $+0,171 \pm 0,01$  °С, однако для середины XX в. отмечено незначительное уменьшение средней температуры. Изменение солёности САГВ лежит в пределах точности определения среднего значения, поэтому невозможно говорить об опреснении или осолонении вод на обоих параллелях как в Западном, так и в Восточном бассейне.

ААДВ, прослеживаемая только в Западном бассейне, имеет явно выраженную тенденцию к уменьшению средней температуры с начала XX в. на обоих разрезах. На 24° ю.ш. температура уменьшилась на

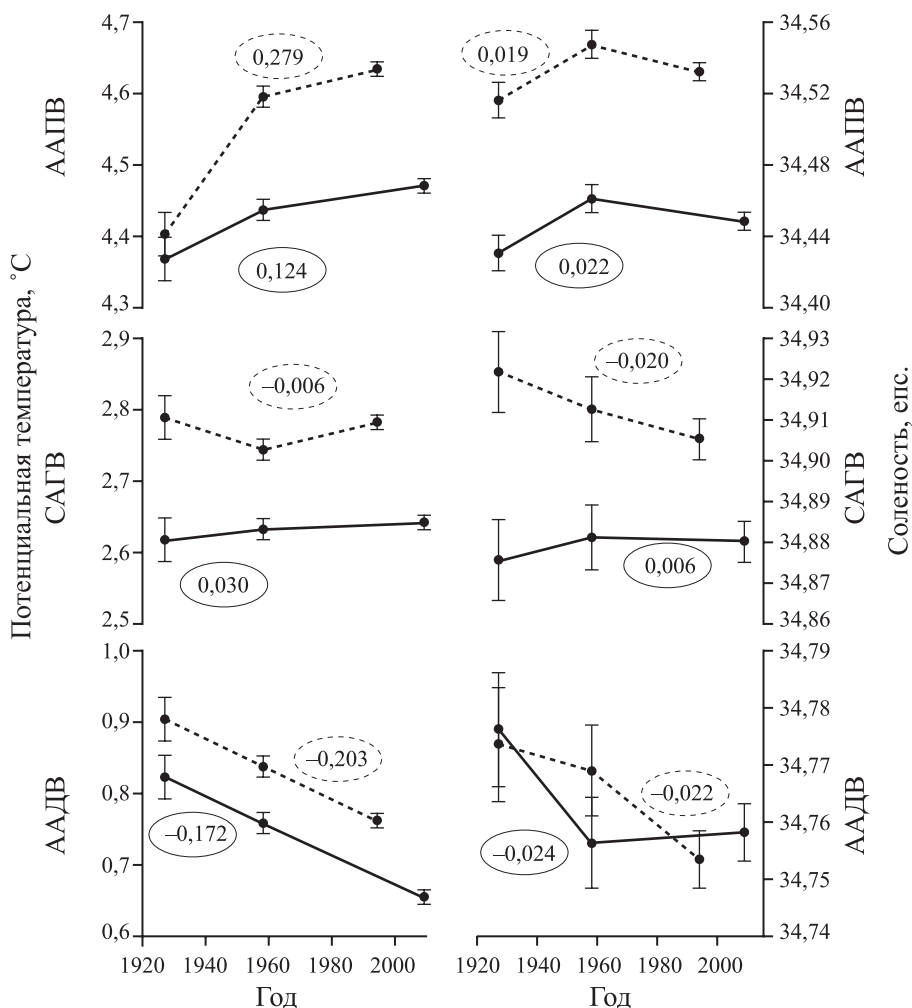


Рис. 3. Многолетнее изменение температуры и солености ААПВ, САГВ, ААДВ в Западном бассейне Атлантического океана. Сплошная линия — расчет для 24° ю.ш., пунктирная — для 8° ю.ш. В кругах нанесена величина изменения параметров между новейшими измерениями и данными НИС "Метеор" в расчете за 100 лет

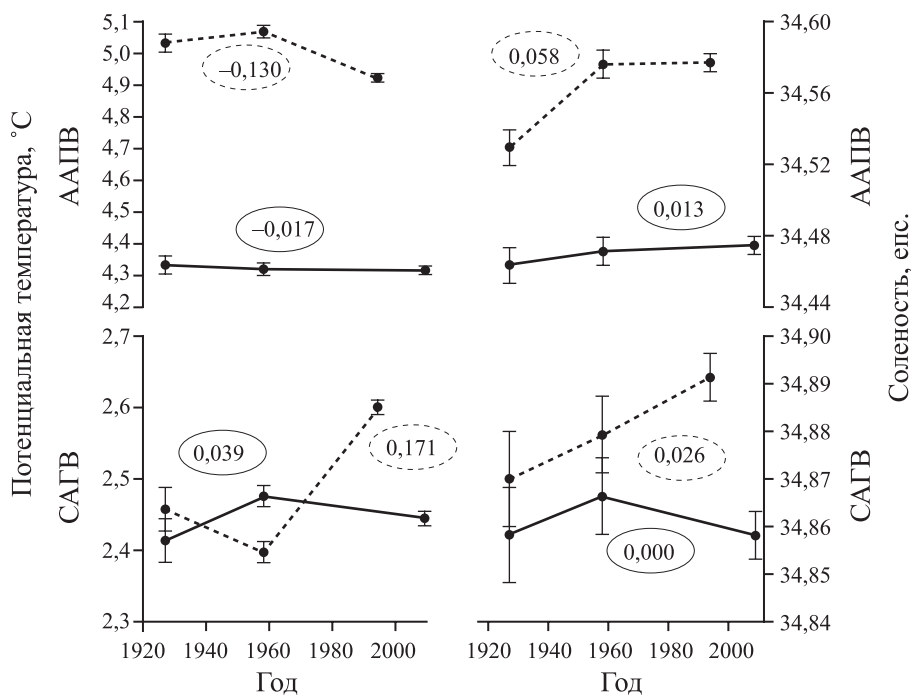


Рис. 4. Многолетнее изменение температуры и солености основных водных масс в Восточном бассейне Атлантического океана. Обозначения см. на рис. 3

$-0,172 \pm 0,01$  °C, а на  $8^\circ$  ю.ш. — на  $-0,203 \pm 0,01$  °C. Соленость ААДВ (в отличие от температуры вод) не имеет четко выраженной тенденции к изменению и расположена в пределах точности определения среднего значения. Величины изменения представлены в табл. 3.

В общем весь промежуточный, глубинный и донный слои вод Южной Атлантики имеют тенденцию к потеплению на  $+0,065$  °C на  $8^\circ$  ю.ш. и осолонению на  $+0,008$  епс; на  $24^\circ$  ю.ш. увеличение средней температуры этих слоев вод составило  $+0,012$  °C, а солености — на  $+0,002$  епс.

Выявленные тенденции в вековом изменении средних значений океанологических параметров можно объяснить несколькими причинами: во-первых, изменением климатических условий в районе образования водной массы и способностью водных масс нести в себе “законсервированный” климатический сигнал тех атмосферных условий, которые были в момент их образования. Однако помимо изменения климатических условий на многолетнее изменение средней температуры и солености промежуточных, глубинных и донных вод могут влиять косвенные причины, а именно разные скорость и время распространения воды от источника образования до исследуемого региона, а также интенсивность трансформации вод глубинной части Мирового океана в процессе перемешивания с окружающими водными массами.

#### Выводы:

— судовые измерения на повторяющихся разрезах в настоящее время представляют собой один из наиболее эффективных методов оценки многолетнего изменения термохалинных характеристик водных масс глубинной структурной зоны океана из-за полного отсутствия каких-либо других типов измерений, пересекающих весь океан и охватывающих практически вековой период;

— показана важность определения широтного градиента из-за несовпадения положения разрезов, что для подобного рода работ сделано впервые. В отдельных случаях значение широтного градиента сопоставимо со значением изменения и даже превышает его;

— определены оптимальные параметры интерполяции значений исторических измерений в узлы регулярной сетки при помощи программного пакета

Golden Software Surfer с последующим получением наиболее достоверных средних значений океанологических параметров. Наиболее оптимальным методом интерполяции оказался метод крайгинга со следующими параметрами: расчетная сетка с числом узлов  $200 \times 200$ , вертикальный радиус 300 м, горизонтальный 3000 км. Результаты тестов свидетельствуют о том, что при расчете среднего значения температуры по слою в глубинной части океана, по историческим данным, необходимо дополнительно вводить поправку на погрешность интерполяции (величина относительной ошибки определения среднего значения без учета поправки может достигать 3—4% и в несколько раз превышать инструментальную погрешность измерений). Однако использование оптимальных параметров интерполяции пригодно для восстановления среднего значения солености по слою в глубинных водах без дополнительного внесения поправки на интерполяцию, так, величина возникающей ошибки не превышает 0,01%, что находится в пределах точности измерения солености в то время;

— установлены вековые тенденции изменения термохалинных характеристик, т.е. все значения приведены в пересчете на 100 лет. Выявлено потепление Антарктической промежуточной водной массы в Западном бассейне Атлантического океана на  $+0,279 \pm 0,01$  °C на  $8^\circ$  ю.ш. и на  $+0,124 \pm 0,01$  °C на  $24^\circ$  ю.ш. Эти результаты согласуются с выводами других авторов [6, 13, 17, 21] и свидетельствуют о наличии потепления промежуточных вод Атлантики;

— выявлено уменьшение средней температуры Антарктической донной водной массы на  $24^\circ$  ю.ш. на  $-0,172 \pm 0,01$  °C и на  $8^\circ$  ю.ш. на  $-0,203 \pm 0,01$  °C. Этот вывод противоречит данным многих предшествующих работ, например [20]. Однако данные наиболее современной работы [18] подтверждают уменьшение средней температуры Антарктической донной водной массы. Изменение температуры Североатлантических глубинных вод незначительно на всех рассмотренных разрезах и не демонстрирует какой-либо тенденции. В целом по результатам исследования вся толща вод глубже 500 м на  $8^\circ$  ю.ш. потеплела на  $+0,065$  °C и осолонилась на  $+0,008$  епс; на  $24^\circ$  ю.ш. увеличение средней температуры вод составило  $+0,012$ , а солености —  $+0,002$  епс.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Архипкин В.С., Баулин А.В. Об интерполяции океанологических полей // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 1994. № 3. С. 27—32.
- Девис Д. Статистика и анализ геологических данных. Т. 2. М.: Мир, 1977. 572 с.
- Демидов А.Н. О выделении промежуточных и глубинных водных масс в Южной Атлантике // Океанология. 2003. Т. 43, № 2. С. 165—175.
- Демидов А.Н., Беседин Д.Е. Об интерполяции полей характеристик на океанологических разрезах // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2003. № 6. С. 22—27.
- Добролюбов С.А., Соков А.В. Роль глубинных вод Северной Атлантики в изменчивости теплообмена океана и

- атмосферы // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2002. № 6. С. 42—48.
- Arbic B., Owens B. Climatic Warming of Atlantic Intermediate Waters // J. Phys. Oceanography. 2001. Vol. 14. P. 4091—4108.
- Barnett T.P., Pierce D.W., Schnur R. Detection of anthropogenic climate change in the World Oceans // Science. 2001. Vol. 292. P. 270—273.
- Boyer T.P., Antonov J.I., Garcia H. et al. World ocean database 2009. 1 // Introduction, NOAA Atlas NESDIS. 2009. Vol. 66. Silver Spring, Md. WOD2009.
- Broecker W.S. The great ocean conveyor // Oceanography. 1985. Vol. 4, N 2. P. 79—89.

10. *Cunningham S.A., Alderson S.* Transatlantic temperature and salinity changes at 24.5 N from 1957 to 2004 // *Geophys. Res. Lett.* 2007. Vol. 34. L14606. doi: 10.1029/2007GL029821.
11. *Folland C.K., Rayner N.A., Brown S.J.* et al. Global temperature change and its uncertainties since 1861 // *Geophys. Res. Lett.* 2001. Vol. 28. P. 2621—2624.
12. *Fuglister F.C.* Atlantic Ocean Atlas from the International Geophysical Year of 1957—1958 // Vol. 1. Woods Hole press, 1960.
13. *Gouretski V., Jungclauss J.H., Haak H.* Revisiting the Meteor 1925—1927 hydrographic dataset reveals centennial full-depth changes in the Atlantic Ocean // *Geophys. res. lett.* 2013. Vol. 40. P. 1—6. doi: 10.1002/grl.50503.
14. *Gouretski V., Koltermann K.P.* WOCE global hydrographic climatology // *Berl. Bundesamt Seeschiffahrt Hydrogr. Rep.* 2004. Vol. 35. 52 p.
15. *Gouretski V., Koltermann K.P.* How much is the ocean really warming? // *Geophys. Res. Lett.* 2007. Vol. 34. L01610. doi: 10.1029/2006GL027834.
16. *Levitus S.* Interpentadal variability of temperature and salinity in the deep North Atlantic, 1970—1974 versus 1955—1959 // *J. Geophys. Res.* 1989. Vol. 94, N C11. P. 16—125. doi: 10.1029/JC094iC11p16125.
17. *Levitus S., Antonov J.I., Boyer T.P.* et al. World ocean heat content and thermosteric sea level change (0—2000 m), 1955—2010 // *Geophys. Res. Lett.* 2012. Vol. 39. L10603.
18. *Limeburner R., Whitehead J., Cenedese C.* Variability of Antarctic bottomwater flow into the North Atlantic // *Deep-Sea Res. II.* 2005. Vol. 52. P. 495—512.
19. *Lyman J.M., Good S.A., Gouretski V.V.* et al. Robust warming of the global upper ocean // *Nature.* 2010. Vol. 465. P. 20. doi: 10.1038/nature09043.
20. *Morozov E., Demidov A., Tarakanov R., Zenk W.* Abyssal Channels in the Atlantic Ocean. Moscow: Springer, 2010. 266 p.
21. *Sarafanov A., Sokov A., Demidov A.* Water mass characteristics in the equatorial North Atlantic: a section nominally along 6.5N, July 2000 // *J. Geophys. Res.* 2007. Vol. 112. C12023. doi: 10.1029/2007JC004222.
22. *Surfer 8.00* — Surfer mapping system. Golden Software, 1993.

Поступила в редакцию  
08.08.2013

**E.V. Krayushkin, A.N. Demidov**

#### **GENERAL CHANGES OF THERMOHALINE PARAMETERS OF INTERMEDIARY AND BOTTOM WATER MASSES IN THE SOUTH ATLANTIC**

Analysis of the data of repeated transatlantic sections in the South Atlantic showed the general warming of water masses below 500 m and the multidirectional centennial changes of mean temperature and salinity of principal water masses in the region. The mean temperature of the Antarctic intermediary water mass in the South Atlantic increases while that of the Antarctic bottom water mass decreases since the beginning of the century. Optimal parameters for the interpolation of mean temperature and salinity values measured during the transatlantic expeditions in the beginning and the middle of the 20th century are determined.

*Key words:* water masses, temperature, salinity, South Atlantic.