

УДК 551.465

СТРУКТУРА ВОД И ЕЕ ИЗМЕНЧИВОСТЬ В ПРОХОДЕ КЕЙН ЭКВАТОРИАЛЬНОЙ АТЛАНТИКИ

© 2025 г. А. Н. Демидов^{1,*}, К. В. Артамонова^{1,2}, С. Б. Крашенинникова^{1,3},
академик РАН С. А. Добролюбов¹

Поступило 29.06.2024 г.

После доработки 04.09.2024 г.

Принято к публикации 09.09.2024 г.

В работе представлены новейшие результаты исследования структуры вод малоизученного района восточного бассейна тропической части Атлантики (проход Кейн) по данным 63 рейса НИС “Академик Иоффе” 2022 г., а также изменчивость среднемесячных характеристик этих вод по реанализу GLORYS12v1 за 1993–2022 гг. Показано, что промежуточные воды на разрезе представлены смесью Антарктической промежуточной воды (ААПВ) и Средиземноморской воды (доля последней достигает 26%). Установлено, что комплекс Североатлантической глубинной воды (САГВ) представлен двумя слоями: Верхней САГВ с максимумом солёности и Средней САГВ с максимумом кислорода. В слое донных вод присутствует смесь Антарктической донной воды (ААДВ), Нижней и Средней составляющих САГВ. Эту смесь, поступающую главным образом из района разлома Вима, правильно называть Донной водой Северо-восточной Атлантики (СВАДВ). Её верхняя граница соответствовала изотерме 1.95 °C и соотношению Si/P, равному 33. В работе по консервативному показателю РО рассчитана доля ААДВ в СВАДВ, которая составляла около 20%. По реанализу GLORYS12v1 на сезонном масштабе в придонном слое установлена значимая отрицательная связь между изменчивостью потенциальной температуры и меридиональной скоростью течений. Выявлена значимая тенденция увеличения среднегодовых значений потенциальной температуры (на 0.06 °C) и уменьшения солёности (на 0.005 епс) в целом за период 1993–2022 гг.

Ключевые слова: водные массы, гидролого-гидрохимические характеристики, квазиконсервативный показатель РО, Североатлантические глубинные воды, Антарктические донные воды, межгодовые изменения, океанический реанализ

DOI: 10.31857/S2686739725010151 EDN: GVQAMG

ВВЕДЕНИЕ

Механизмы взаимодействия и трансформации водных масс, распространяющихся через океанические проливы и проходы — плохо изученная проблема современной

океанологии, которая ввиду сложного подводного рельефа и неполноты имеющихся данных натурных наблюдений неадекватно разрешается даже океанскими реанализами. Глубоководных экспедиционных исследований в восточной тропической части Атлантики очень мало. В предлагаемой работе представлены результаты анализа структуры вод, выполненные на океанологическом разрезе вдоль глубоководного прохода Кейн, соединяющего части котловин Зеленого мыса и Сьерра-Леоне между горами Гримальди и материковым склоном африканского континента (рис. 1). Район исследования располагался вблизи разреза НИС “Академик Иоффе” 2000 г. [1] и широтного разреза A06

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Москва, Россия

² Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии, Москва, Россия

³ Федеральный исследовательский центр Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского Российской Академии наук, Севастополь, Россия

* E-mail: tuda@mail.ru

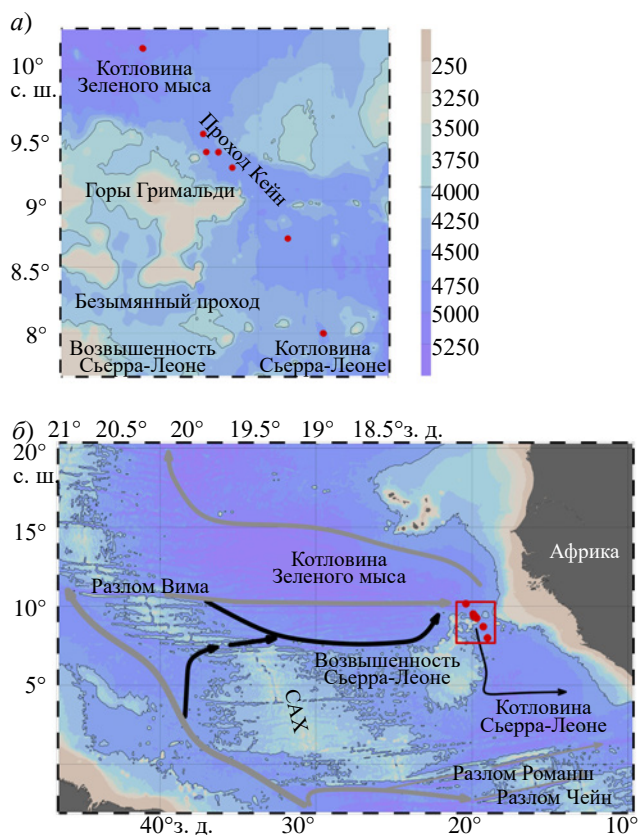


Рис. 1. Положение станций в 63-м рейсе НИС “Академик Иоффе” (АИ-63) в проходе Кейн. *а* – картосхема прохода Кейн, красными точками – положение станций; *б* – картосхема района исследования со схемой циркуляции донных вод. Красным квадратом показан район исследования, а точками – положение станций, серыми стрелками показана схема циркуляции Антарктической донной (ААДВ) и Донной воды северо-восточной Атлантики (СВАДВ) по [7, 9] для котловины Зелёного мыса. Чёрными стрелками – путь СВАДВ в район исследования, восстановленный по реанализу GLORYS12v1

WOCE, выполненного вдоль 7.5° с. ш. в 1993 и 2000 гг.

Анализ водных масс и циркуляции вод в экваториальной части Атлантики представлен в работах [2–4]. Однако, до сих пор в структуре глубинных и придонных вод остаётся много неясного. Так, количество выделяемых компонентов Североатлантических глубинных вод (САГВ) и их границы, а также источники их формирования, различаются у разных авторов [5, 6]. В работах [3, 7] показано, что не происходит распространения САГВ как единого целого: каждый компонент несёт особенности водных масс, от которых он происходит, и все

компоненты имеют различные пути распространения, взаимодействуют с разными по характеристикам водами и в итоге формируют свои уникальные особенности. Именно этим объясняется несовпадение положения по вертикали экстремумов различных характеристик, присущих одной и той же водной массе, но сами различия между компонентами не такие существенные, чтобы выделять их как самостоятельные водные массы. В классической работе [5] показано, что в слое Северо-атлантических глубинных вод следует различать три слоя – верхние САГВ, источником которых являются Средиземноморские воды [5, 2], средние САГВ, которые происходят от Лабрадорских вод (ЛВ) [6], и нижние САГВ, основным источником которых являются воды Датского пролива [5, 6]. Иногда САГВ разделяется на четыре составляющие [6], где средние САГВ делятся на два слоя с минимумом и максимумом кислорода соответственно. При этом составляющие САГВ в более поздних работах представлены уже смесью Средиземноморских, Лабрадорских, Исландско-Шетландских, вод Датского пролива и Антарктических донных вод (ААДВ) в разных пропорциях [2, 6]. А для донных вод восточной части Тропической Атлантики, которые поступают главным образом через разлом Вима и по своим характеристикам отличаются от вод, приходящих через разломы Романш и Чейн [7], в литературе до сих пор нет даже единого названия.

Исследование внутригодовой изменчивости скоростей течений и потенциальной температуры в проходе Кейн проводились ранее с помощью самописцев в течение года [8]. Были выделены гармоника и установлена связь положительных аномалий температуры с течениями юго-восточного направления. Но на климатическом масштабе сведений об изменении характеристик в этом проходе в литературе до сих пор не существует.

В связи с этим цель данной работы – анализ структуры вод и её изменчивости на межгодовых масштабах в слабоизученном районе прохода Кейн на основе собственных данных и реанализа.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Описание данных измерений. В работе использовались данные, полученные в 63-м рейсе НИС “Академик Иоффе” с 29.09.2022 по 10.12.2022 г. на продольном разрезе, проходящем через проход Кейн (в дальнейшем АИ-63).

Непосредственно в проходе Кейн измерения проводились 19–21 октября 2022 г.

Гидрологические измерения в рейсе проводились CTD-зондом высокой точности от поверхности до дна. Для отбора проб воды использовались батометры Нискина на 10 л, размещённые на зондирующем комплексе. Гидрохимический анализ включал определение содержания растворённого в воде кислорода и концентрации биогенных веществ (фосфатов, нитритов, нитратов, силикатов). Пробы воды обрабатывались непосредственно после их отбора в судовой лаборатории, согласно стандартным методикам [10].

Кроме того, был рассчитан квазиконсервативный гидрохимический показатель РО, предложенный в работе [11]:

$$PO = 135[PO_4] + O_2, \quad (1)$$

где PO_4 и O_2 — измеренные концентрации фосфатов и растворенного кислорода в $\mu\text{M}/\text{кг}$.

В работе процент содержания водных масс, для случая смешения двух водных масс, был рассчитан как:

$$f_{\text{BM1}} = |(PO - PO_1)/(PO_2 - PO_1)| * 100\%. \quad (2)$$

Для случая смешения трёх водных масс f_{BM} была составлена система линейных уравнений по формулам аналогичным (2):

$$\begin{cases} f_{\text{BM1}} = |(PO - PO_1)/(PO_2 - PO_1)| * 100\%/3 \\ f_{\text{BM2}} = |(PO - PO_2)/(PO_3 - PO_2)| * 100\%/3, \\ f_{\text{BM3}} = |(PO - PO_3)/(PO_1 - PO_3)| * 100\%/3 \end{cases} \quad (3)$$

где РО — рассчитанная концентрация (по формуле 1) по измеренным концентрациям фосфатов и растворенному кислороду; PO_1 , PO_2 и PO_3 — значения РО в источниках водных масс, рассчитанные по исходным значениям из работы [4].

Для промежуточных и глубинных вод по показателю РО была рассчитана доля каждой из вод в смеси. В слое ниже 500 м рассматривались Антарктические промежуточные, Средиземноморские, Лабрадорские, Исландско-Шетландские глубинные и Антарктические донные воды (ААПВ, СПВ, ЛВ, ИШГВ и ААДВ, соответственно). Причём ставилось ограничение на присутствие тех или иных вод в смеси ниже и выше ядра граничащих вод исходя из структурных особенностей, так что максимальное количество вод в смеси составляло три. Так,

в слое 500–1200 м рассматривалась смесь ААПВ и СПВ, в слое 1200–2000 м к ним добавлялась ЛВ. В слое глубинных вод 2000–3500 м оценивалась доля СПВ, ЛВ и ИШГВ, а в придонном — смесь САГВ и ААДВ.

Для анализа гидрологических характеристик и описания их изменчивости на сезонном и межгодовом масштабах в проходе Кейн Тропической Атлантики использовался реанализ GLORYS12v1 с шагом сетки $1/12^\circ$ за период 1993–2022 г. и анализировались температура, солёность и компоненты скорости течений на придонном горизонте 4405 м в координатах прохода.

Из исходных рядов среднемесячных значений реанализа GLORYS12v1 вычитался линейный тренд и проводился спектральный анализ. Полученные детрендированные ряды представлялись в виде совокупности гармонических функций с различными периодами и амплитудами с помощью быстрого преобразования Фурье. Исходные ряды межгодовых значений, анализируемых параметров сначала преобразовывались в ряды кратные 2^N , при $N = 10$. Полученные ряды преобразованных данных проверялись на нормальность распределения по критерию Колмогорова-Смирнова (>0.05). Далее анализировались периодограммы и выделялись периоды, вносящие наибольший вклад в суммарную дисперсию исходного ряда. С помощью полосно-пропускающего оконного фильтра Хэмминга выделялись соответствующие периоды (0.5–1, 2–4, 10–30 лет). К исходным и фильтрованным рядам применялся корреляционный анализ. Оценивалась значимость полученных результатов по t-критерию Стьюдента. Для среднемесячных характеристик значимые корреляции на 5% доверительном интервале лежали в диапазоне от -0.3 до 0.3 . Значимость долговременных тенденций исходных рядов среднемесячных и среднегодовых скоростей течений, а также потенциальной температуры воды за 1993–2022 гг. оценивалась по критерию Манна-Кендалла.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Структура вод в проходе Кейн. Для района прохода Кейн характерна структура вод, типичная для восточной части Тропической Атлантики. На разрезе АИ-63 в проходе Кейн нами были выделены следующие водные массы (рис. 2).

Поверхностные воды были представлены верхним квазиоднородным слоем (до глубины 30 м), в котором температура варьировала от 28 до 29°C , содержание растворенного кислорода изменялось в пределах $200\text{--}203 \mu\text{M}/$

кг, а процентное его насыщение во всём слое было более 100%. Этот слой также характеризовался низкими концентрациями биогенных элементов.

Глубже верхнего перемешанного слоя располагались Центральные воды (ЦВ), в которых происходила аккумуляция биогенных элементов с активным потреблением растворённого кислорода. На глубине 350–450 м содержание растворённого кислорода, достигала своего минимума (40–60 $\mu\text{M}/\text{кг}$), а концентрации биогенных элементов, наоборот, резко возрастали и в минимуме кислорода изменялись в пределах: фосфаты – 1.8–2.0 $\mu\text{M}/\text{кг}$; силикаты – 14–26 $\mu\text{M}/\text{кг}$; нитраты – 31–34 $\mu\text{M}/\text{кг}$. Нижней границей этих вод можно считать положение минимума кислорода на глубине 400–460 м.

Ниже этой границы до 1050 м, залегали промежуточные воды, главным образом представленные Антарктической промежуточной водной массой (ААПВ), с ядром – минимумом солёности (около 34.7 епс) на глубине 800–900 м. Нижняя граница ААПВ близка к изотерме $\theta = 5^\circ\text{C}$ и находилась на глубине 1050 м. ААПВ характеризовалась низким содержанием растворённого кислорода (110–120 $\mu\text{M}/\text{кг}$), а также максимумом биогенных элементов, достигающим в ядре очень высоких концентраций: фосфаты – до 2.24 $\mu\text{M}/\text{кг}$, нитраты – до 34 $\mu\text{M}/\text{кг}$; силикаты – до 30 $\mu\text{M}/\text{кг}$ (см. рис. 2). В нижнем слое ААПВ по нашим расчётам присутствует значительная доля Средиземноморских вод – от 17 до 26%.

Глубже промежуточного слоя залегал комплекс Североатлантических глубинных вод (САГВ), представленный в проходе Кейн верхним и средним компонентами. Верхняя Североатлантическая глубинная водная масса (ВСАГВ) выделялась на разрезе по максимуму солёности (более 34.97 епс) и по минимуму силикатов (21–35 $\mu\text{M}/\text{кг}$), а также по минимумам фосфатов (1.33–1.40 $\mu\text{M}/\text{кг}$) и нитратов (19–21 $\mu\text{M}/\text{кг}$) в слое 1050–2700 м. Нижняя граница этих вод, рассчитанная по максимуму вертикальных градиентов гидролого-гидрохимических характеристик [12], была близка к изотерме $\theta = 2.7^\circ\text{C}$. Кроме того, для ВСАГВ было характерно увеличение с глубиной концентрации растворённого кислорода, содержание его увеличивалось от верхней границы ВСАГВ (230 $\mu\text{M}/\text{кг}$) до нижней (248 $\mu\text{M}/\text{кг}$), соответственно. Мы предполагаем, что в районе прохода Кейн ВСАГВ представлена смесью Лабрадорских, Антарктических промежуточных и Средиземноморских вод. Доля Лабрадорских вод составляла по нашим расчётам, в соответствии с формулой (2) около

30%, (с максимумом в слое 2500–2700 м), Антарктических промежуточных – 24–50% (вблизи верхней границы), а Средиземноморских – 10–34%. Благодаря Средиземноморским водам этот слой характеризовался максимумом солёности, при этом основная их доля сосредоточена в слое 1000–2000 м.

Как отмечено выше, для нижележащих компонентов САГВ до сих пор в мировой литературе нет чёткого понимания о количестве составляющих и их происхождении, т.к. положение экстремумов различных характеристик не совпадает по глубине. В табл. 1 мы приводим имевшиеся ранее сведения об источниках компонентов глубинных вод в этом районе в сравнении с полученными в работе результатами.

На разрезе в слое 2700–4100 м выделялись средние САГВ (ССАГВ) по максимуму растворённого кислорода (245–249 $\mu\text{M}/\text{кг}$). Эти воды с повышенным значением кислорода, возможно, приходят в исследуемый район с запада. Мы предполагаем, что в районе прохода Кейн происходит трансформация вод, главным образом представленных смесью Исландско-Шетландских и Лабрадорских (доли 40–70% и 30–40% соответственно), к которым после прохождения разломов в Срединно-Атлантическом хребте (САХ) на $5\text{--}11^\circ$ с. ш. в котловине Зелёного мыса добавляются сильно трансформированные глубинные воды с низким содержанием кислорода. Этот минимум формируется в районе материкового склона Африки в результате минерализации большого количества органического вещества в акватории Канарского апвеллинга [14].

Придонный слой в исследуемом районе занимали Донные воды северо-восточной Атлантики (СВАДВ). Варианты названия и граница СВАДВ в сравнении с предшествующими работами представлены в табл. 2. Эти воды на разрезе характеризовались минимумами потенциальной температуры (1.85–1.95 $^\circ\text{C}$) и солёности (менее 34.88 епс), более низким содержанием растворённого кислорода (241–245 $\mu\text{M}/\text{кг}$), а также более высокими концентрациями силикатов (50–56 $\mu\text{M}/\text{кг}$), фосфатов (1.5–1.62 $\mu\text{M}/\text{кг}$) и нитратов (20–22 $\mu\text{M}/\text{кг}$), чем выше лежащие САГВ. СВАДВ, вероятно, представляет собой смесь ССАГВ, НСАГВ и ААДВ, взаимодействующих по мере прохождения разломов в САХ. Эти воды поступают с глубинным течением из разлома Вима в котловину Зелёного мыса и по своим характеристикам отличаются от вод, поступающих через разломы Романш и Чейн. (см. рис. 1). Причём перенос, согласно реанализу, направлен

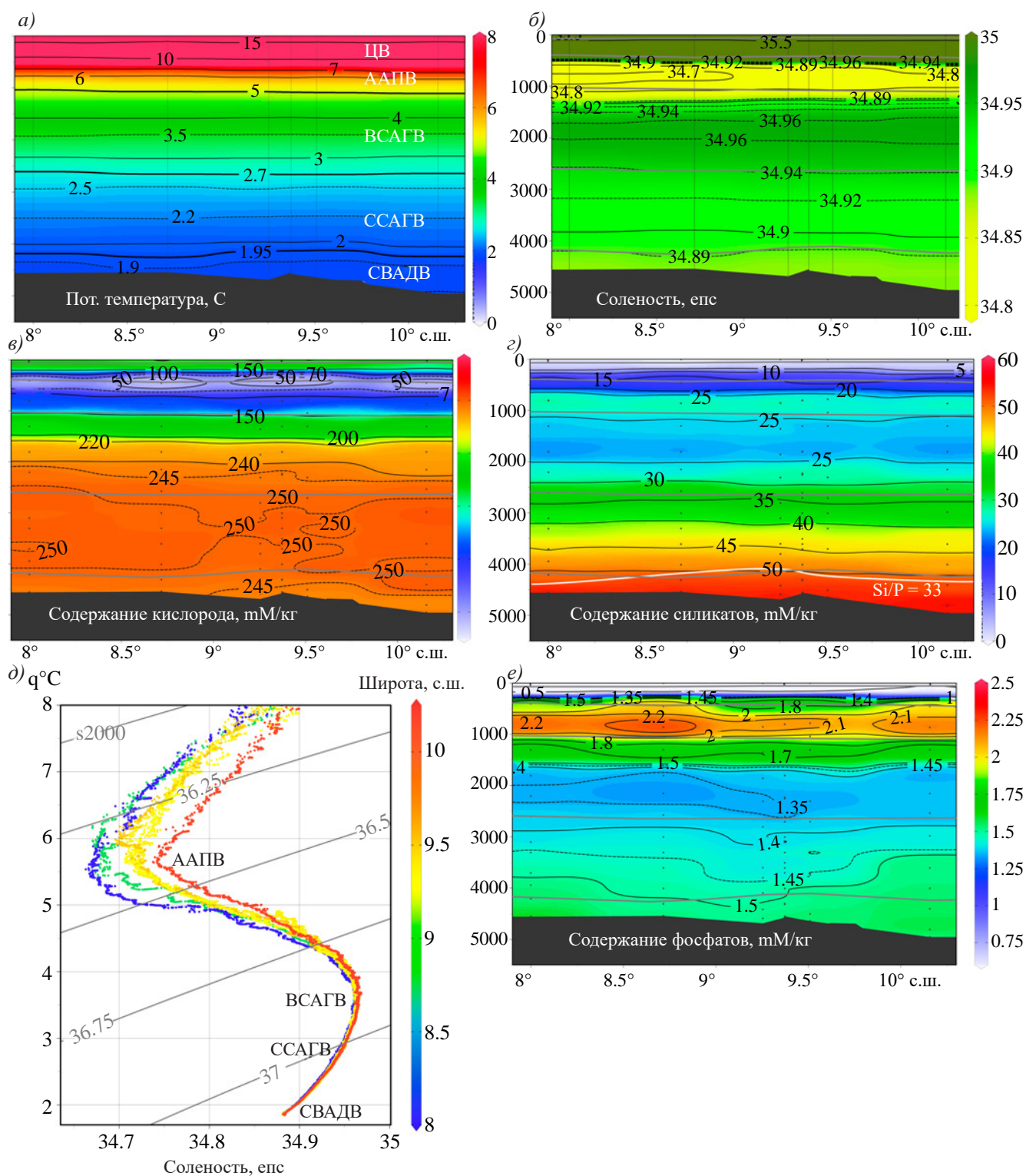


Рис. 2. Распределения потенциальной температуры, °C (a), солёности, eps (b), содержание растворённого кислорода, μM/kg (c), силикатов, μM/kg (d), θ -S-диаграмма (d), и содержание фосфатов, μM/kg (e) на разрезе АИ63 в проходе Кейн. Серыми линиями даны границы водных масс, белой линией на (d) – положение $\text{Si/P} = 33$

Таблица 1. Составляющие компонентов глубинных вод тропической части Атлантики по мнению разных авторов

| | Wust 1935 [5] | Tsuchiya et al., 1992* | Rhein et al., 1995 [6] | Schmitz, 1996* | Andrie et al., 1998 [2] | Liu, Tanhua, 2019 [4] | de Carvalho Ferreira, Kerr, 2017 [13] | Настоящая работа |
|------------------------|---------------|------------------------|------------------------|----------------|-------------------------|-----------------------|---------------------------------------|------------------|
| ВСАГВ | СПВ | СПВ + ЛВ | верхняя ЛВ | ЛВ + СПВ | ЛВ | ИШВ + ЛВ | | ЛВ, ААПВ, СПВ |
| ССАГВ | ЛВ | ИШГВ + ВДВ + ДПВ | ЛВ ЧГВ | ИШГВ + ААДВ | ЦВ + ЛВ + ИШГВ | ИШГВ + ДПВ + (ЛВ) | ЛВ + ДПВ + ИШГВ + (СПВ) | ИШГВ, ЛВ, СВАДВ |
| НСАГВ (западная часть) | ДПВ | ААДВ + ДПВ | ДПВ | ДПВ + ААДВ | ДПВ | | ДПВ + УГВ | ЧГВ, ААДВ, ДПВ |

Примечание. ААПВ – Антарктические промежуточные, СПВ – Средиземноморские промежуточные, ЛВ – Лабрадорские, ИШГВ – Исландско-Шетландские глубинные, ЧГВ – воды разлома Чарли-Гиббс, ДПВ – воды Датского пролива, УГВ – глубинные воды моря Уэдделла, ААДВ Антарктические донные воды, ВДВ – донные воды восточного бассейна, СВАДВ – донные воды Северо-восточной Атлантики. В скобках подразумевается незначительное количество воды в смеси. Звёздочкой (*) помечены результаты, взятые из работы [7].

не напрямую от разлома Вима, как это считалось ранее [9], а зонально вдоль южной оконечности котловины. В районе прохода Кейн СВАДВ взаимодействуют с местными глубинными водами с низким содержанием растворённого кислорода и высокими концентрациями биогенных элементов [14], а затем через этот проход распространяются далее на юг. Правда, как показано в работе [8], по данным самописцев течений и по реанализу (см. врезку рис. 3), в придонном слое прохода Кейн фиксируются разнонаправленные течения как южного, так и северного направления, что говорит о нестационарном характере этого переноса. Как свидетельствуют новейшие данные рельефа GEBCO 15', к югу от гор Гримальди располагается безымянный глубоководный проход (глубины над седловинами более 4000 м), через который также может проходить СВАДВ.

Верхняя граница СВАДВ в проходе Кейн по нашим оценкам соответствовала максимальным вертикальным градиентам солёности и кислорода, соотношению Si/P, равному 33 [15]

и концентрации силикатов 50 $\mu\text{M}/\text{кг}$. Выделенная граница совпадала с изотермой $\theta = 1.95^\circ\text{C}$, предложенной [4], что немного ниже “классической” границы 2°C [5].

Наибольший интерес связан с долей ААДВ в СВАДВ из-за трансформации антарктических донных вод при прохождении разломов САХ из западной части Атлантического океана в восточную. В проходе Кейн по консервативному показателю РО рассчитанная доля ААДВ в СВАДВ составила около 20%. В районе самого прохода их доля была ниже 15%, тогда как в близлежащих котловинах доля ААДВ составляла чуть более 20%. Таким образом, мы разделяем мнение большинства исследователей (см. табл. 2), что ААДВ в восточной Атлантике в чистом виде нет, их доля здесь составляет менее 25%. Если же принять за 100% содержание ААДВ в донных водах на входе в разлом Вима, то на выходе из него в восточную Атлантику доля ААДВ составляет уже около 60% от тех вод, которые подошли к разлому с запада.

Таблица 2. Название и характеристики Донных вод восточной части Атлантики

| Название | Верхняя граница, θ , °C | Авторы |
|---|--------------------------------------|--|
| Антарктическая донная вода (ААДВ/AABW) | 2 | Wust, 1935 [5] |
| | 1.9 (4–11° с. ш.) 2.0 (36° с. ш.) | McCartney et al., 1991 [9] |
| | 1.8 (11° с. ш.), 1.9 (36° с. ш.) | Macdonald, 1998* |
| Донная (абиссальная) вода восточного бассейна (ВДВ/EBW) | – | Добролюбов и др., 1995* |
| | 1.8–2.0 (0° с. ш.) | Morozov et al., 2010 [7] |
| | 1.8 | Stephens, Marshall, 2000* |
| Нижняя глубинная водная масса (LDW) | 1.8 | Van Aken, 2007 [16] |
| Глубинная вода северо-восточной Атлантики (INEADW) | 1.98±0.03 | Garcia-Ibanez et al., 2015 [17] |
| Донная вода северо-восточной Атлантики (СВАДВ/NEABW) | 1.95 | Liu, Tanhua, 2019 [4], Настоящая работа |

Примечание. Звёздочкой (*) помечены взятые из работы [7].

МЕЖГОДОВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ. СПЕКТРАЛЬНЫЙ И КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ

Наибольший интерес в проходе Кейн, ввиду отсутствия океанологических разрезов для сравнения, представляет изменение температуры и скорости течений на главной седловине. В работе сравнивались измерения среднемесячных значений потенциальной температуры и меридиональной компоненты скорости течений, полученные разными авторами и с помощью реанализа *GLORYS12v1*. Использовались значения в точке 9.333° с. ш., 19.833° з. д. на горизонте 4405 м, характеризующие придонный слой мощностью около 400 м (табл. 3, рис. 4). Также эти характеристики сравнивались с данными самописцев в проходе Кейн на глубинах 4350–4570 м. в ноябре 2010 г. – октябре 2011 г. [8].

Сравнение реанализа и самописцев показало удовлетворительное соответствие ежемесячных изменений температуры воды и плохое воспроизведение скоростей течений (см. рис. 3). Совпадения по направлению меридиональной компоненты скорости выявлены лишь эпизодически (декабрь 2010, январь, март, май 2011). В целом можно отметить, что периоды повышения температуры соответствуют юго-восточным направлениям течений (из котловины Зелёного мыса в сторону котловины Сьерра-Леоне).

Это подтверждается максимальными значениями потенциальной температуры, полученными по реанализу (более 2 °C), которые наблюдались в январе–марте 1996 г., апреле–сентябре 1999 г., январе–марте 2003 г., феврале – ноябре 2010 г., декабре 2011 г., январе–июне 2020 г. при течениях юго-восточного направления. Минимальные температуры по реанализу (~1.8 °C) наблюдались в июле–октябре 1995 г., декабре 2004 г., июне 2005 г. при усилении скоростей течений противоположного северо-западного направления. Правда, в июне–ноябре 1996 г., январе–феврале 1997 г., феврале–марте 2013 г., июне–июле 2014 г., были выявлены периоды пониженной температуры (~1.85 °C) как раз при течениях юго-восточного направления. Таким образом, по реанализу периоды повышения/понижения температуры не всегда соответствуют закономерностям, выделенным по самописцам.

Анализ периодограммы на рис. 4 показал, что в изменчивости меридиональной скорости течений выделяются годовая (1 год) и полугодовая (0.5 года) гармоника, а также период 2–4 года. Амплитуда годовой гармоника меридиональной скорости течений равна 0.045 м/с. В изменчивости температуры и солёности выделяются периоды 1, 2–4, 10 лет. Амплитуды гармоника температуры равны 0.007, 0.015, 0.027 °C, соответственно.

Спектральный анализ данных рядов потенциальной температуры и придонной скорости течений в разломе Романш также показал важную роль полугодовой и годовой гармоника

Таблица 3. Потенциальная температура (θ) и меридиональная компонента скорости течения (V) над седловиной прохода Кейн

| Авторы | Годы | Месяцы | Глубина, м | θ , °C | V , см/с | Направление потока |
|--|------|--------|------------------|---------------|-------------|--------------------|
| Morozov et al., 2010 [7] | 2009 | 4 | 4552 / 4405 | 1.856 / 1.914 | –10 / –3 | ЮВ / ЮВ |
| Morozov et al., 2013 [18] | 2009 | 10 | 4536–4567 / 4405 | 1.846 / 1.983 | 5...10 / 4 | СЗ / С |
| | 2010 | 10 | 4444–4545 / 4405 | 1.836 / 1.968 | 2 / –15 | СЗ / ЮВ |
| | 2011 | 10 | 4387–4566 / 4405 | 1.855 / 1.921 | –5...5 / 15 | 0 / СЗ |
| | 2012 | 10 | 4284–4558 / 4405 | 1.832 / 1.924 | 5 / 10 | СЗ / СЗ |
| Наши данные (2 рейс НИС “Ак. Трешников”) | 2014 | 5 | 4424 / 4405 | 1.877 / 1.825 | – / –13 | – / ЮВ |
| Наши данные (63 рейс НИС “Ак. Иоффе”) | 2022 | 10 | 4550 / 4405 | 1.858 / 1.878 | – / –12 | – / ЮВ |

Примечание. Вверху — по данным измерений разных лет, внизу — по реанализу GLORYS12v1 за 1993–2022 гг. (Положительное значение скоростей течений указывает направление на север).

[19]. На 26° с. ш. для ААДВ аналогично выделялась годовая гармоника переноса с амплитудой 0.6 Св и амплитудой потенциальной температуры 0.01°C [20].

Сопоставление рис. 3 и рис. 4 в, г показывает преобладание скорости течения юго-восточного направления в 2006, 2008, 2019, 2022 гг. и северо-западного направления в 1996, 2005, 2009, 2018, 2020, 2021 гг.

Мы проанализировали также корреляционные связи между исходными рядами среднемесячных значений солёности, потенциальной температуры, меридиональной и зональной скоростей течений за период 1993–2022 гг. (табл. 4). Установлена значимая отрицательная связь меридиональной и зональной компонент скорости течений ($r = -0.92$) для придонных вод, что свидетельствует о доминировании в проходе Кейн либо течений северо-западного (43% случаев), либо — юго-восточного направлений (50% случаев). Наибольшие отрицательные связи меридиональной и зональной скоростей течений наблюдаются на масштабе 2–4 года ($r = -0.94$). На низкочастотном периоде 10–30 лет появляется отрицательная связь

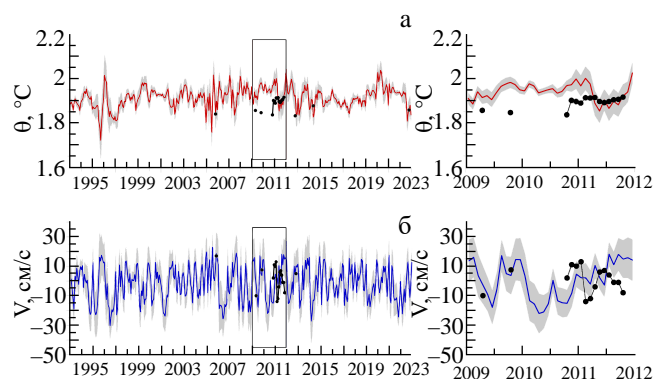


Рис. 3. Межгодовая изменчивость среднемесячных значений потенциальной температуры (θ , °C) (а), меридиональной скорости течений (V , см/с) (б) в проходе Кейн по океаническому реанализу GLORYS12v1 за все месяцы 1993–2022 гг. На врезке (справа) увеличен фрагмент 2009–2012 гг. Чёрные точки — по оценкам разных авторов из табл. 4. Серая заливка — среднеквадратические отклонения для рядов среднемесячных значений реанализа GLORYS12v1, рассчитанные за 11 месяцев скользящим окном (+5 и – 5 месяцев от центрального значения)

температуры с меридиональной компонентой скорости ($r = -0.34$) (табл. 4). Таким образом, при северо-западном направлении течений потенциальная температура в проходе Кейн уменьшается, что подтверждает результаты [8].

При анализе многолетних трендов изменения гидрологических характеристик в проходе Кейн за 1993–2022 гг. по критерию Манна-Кендалла выявлены значимая тенденция уменьшения солёности (на 0.005 епс) и увеличения потенциальной температуры воды (на 0.03 °C). Значимых тенденций изменений скоростей течений за указанный период выявлено не было.

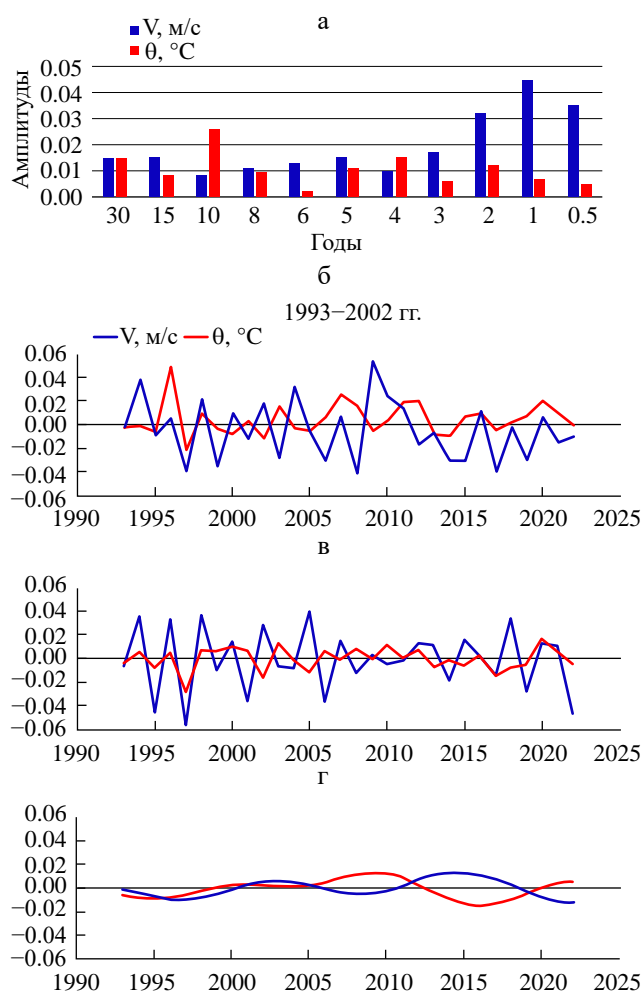


Рис. 4. Периодограмма среднемесячных рядов (а) и изменчивость фильтрованных детрендированных среднемесячных значений меридиональной скорости течения (V , м/с, синим) и потенциальной температуры (θ , °C, красным), на периодах 0.5–1 (б); 2–4 года (в), 10–30 лет (г) в проходе Кейн по океаническому реанализу GLORYS12v1

Таблица 4. Корреляционная матрица исходных рядов, фильтрованных среднемесячных рядов (0.5–1, 2–4, 10–30 лет) потенциальной температуры воды (θ), зональной (U) и меридиональной скорости течений (V) на глубине 4405 м по реанализу GLORYS12v1 в 1993–2022 гг. Значимые корреляции на 5% доверительного интервала лежат в диапазоне $-0.3 > r > 0.3$

| Параметры | θ , °C | V , м/с | U , м/с |
|---------------|---------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|
| θ , °C | — | –0.14, 0.05, 0.20, –0.34 | 0.19, 0.05, 0.20, 0.46 |
| V , м/с | –0.14, 0.05, 0.20, –0.34 | — | –0.92, –0.82, –0.94, –0.68 |
| U , м/с | 0.19, 0.05, 0.20, 0.46 | –0.92, –0.82, –0.94, –0.68 | — |

ВЫВОДЫ

Анализ данных 63-го рейса НИС “Академик Иоффе” в 2022 г. показал, что для района прохода Кейн характерна структура вод, типичная для восточной части Тропической Атлантики.

Получено, что в нижнем слое промежуточных вод, представленных главным образом ААПВ, по нашим расчётам присутствует от 17 до 26% доли Средиземноморских вод.

Установлено, что в восточной части тропической Атлантики комплекс САГВ представлен двумя слоями: ВСАГВ с максимумом солёности и ССАГВ – с максимумом кислорода. По нашим расчётам, ВСАГВ – это смесь вод, состоящая из Лабрадорских вод (доля до 30%), Антарктических промежуточных (до 50% у верхней границы) и Средиземноморских (до 34%) вод.

В районе прохода Кейн происходит трансформация ССАГВ, которые представляют собой смесь Исландско-Шетландских глубинных и Лабрадорских вод, а после прохождения разломов 7–12° с. ш. к ним добавляются сильно трансформированные глубинные воды с низким содержанием кислорода, приходящие из района материкового склона Африки.

Получено, что ААДВ в восточной части Атлантики в чистом виде нет (расчётная доля менее 25%). Для вод, проходящих через разломы САХ в котловину Зелёного мыса и распространяющихся глубже САГВ, введён термин

Северо-восточная донная вода (СВАДВ), её верхняя граница близка к изотерме $\theta = 1.95^\circ\text{C}$.

Выявлена отрицательная связь меридиональной скорости течений и потенциальной температуры (-0.34) только на масштабе 10–30 лет, т.е. при северо-западном направлении потока температура в проходе Кейн будет уменьшаться, а при юго-восточном — увеличиваться.

Получена значимая тенденция уменьшения среднегодовых значений солёности (на 0.005 епс) и увеличения значений потенциальной температуры воды (на 0.03°C) в придонном слое прохода Кейн за 1993–2022 гг.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят Ф.Н. Гиппиуса, С.А. Бабича, Н.Ю. Родионову, а также весь экипаж и научный состав НИС “Академик Иоффе” и НЭС “Академик Трешников”, которые помогали в проведении экспедиционных исследований.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках государственных заданий по темам госзаданий МГУ № 121031900090-6, ФИЦ ИнБЮМ № 124030100137-6. При поддержке гранта РНФ № 23-17-00032 были выполнены описания гидролого-гидрохимических характеристик.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sarafanov A., Sokov A., Demidov A. Water mass characteristics in the equatorial North Atlantic: A section nominally along 6.5°N , July 2000 // *Journal of Geophysical Research*. 2007. 112(C12). C12023. <https://doi.org/10.1029/2007JC004222>
2. Andrié C., TERNON J. F., Messias M. J., Memery L., Boulès B. Chlorofluoromethane distributions in the deep equatorial Atlantic during January–March 1993 // *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. 1998. V. 45. № 6. P. 903–930.
3. Herrford J., Brandt P., Zenk W. Property changes of deep and bottom waters in the Western Tropical Atlantic // *Deep-Sea Research. Part I*. 2017. V. 124. P. 103–125.
4. Liu M., Tanhua T. Water masses in the Atlantic Ocean: characteristics and distributions // *Ocean Science*. 2021. V. 17. P. 463–486.
5. Wüst G. The stratosphere of the Atlantic Ocean // *Wiss. Ergebn. Dtsch. Atlant. Exped. Meteor*. 1935. V. 6.
6. Rhein M., Stramma L., Send U. The Atlantic Deep Western Boundary Current: Water masses and

- transports near the equator // *Journal of Geophysical Research*. 1995. 100(C2). 2441. <https://doi.org/10.1029/94JC02355>
7. Morozov E. G., Demidov A. N., Tarakanov R. Yu., Zenk W. Abyssal Channels in the Atlantic Ocean. Water Structure and Flows // Springer Science + Business Media. 2010. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-9358-5>
 8. Van Haren H., Morozov E., Gostiaux L., Tarakanov R. Convective and shear-induced turbulence in the deep Kane Gap // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2013. V. 118. № 11. P. 5924–5930. <https://doi.org/10.1002/2013JC009282>
 9. McCartney M. S., Bennett S. L., Woodgate-Jones M. E. Eastward Flow through the Mid-Atlantic Ridge at 11°N and Its Influence on the Abyss of the Eastern Basin // *Journal of Physical Oceanography*. 1991. 21(8). 1089–1121. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1991\)021](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1991)021)
 10. Сапожников В. В., Агамова А. И., Аржанова Н. В., Мордасова Н. В., Лапина Н. М., Зубаревич В. Л., Лукьянова О. Н., Торгунова Н. И. Руководство по химическому анализу морских и пресных вод при экологическом мониторинге рыбохозяйственных водоёмов и перспективных для промысла районов Мирового океана. М.: Изд-во ВНИРО, 2003. 202 с.
 11. Broecker W. “NO” a conservative water-mass tracer // *Earth and Planetary Science Letters*. 1974. V. 23. P. 100–107.
 12. Демидов А. Н. О выделении промежуточных и глубинных водных масс в Южной Атлантике // *Океанология*. 2003. Т. 43. № 2. С. 165–175.
 13. de Carvalho Ferreira M. L., Kerr R. Source water distribution and quantification of North Atlantic deep water and Antarctic bottom water in the Atlantic Ocean // *Progress in Oceanography*. 2017. V. 153. P. 66–83.
 14. Oudot J., Merlin F. X., Pinvidic P. Weathering rates of oil components in a bioremediation experiment in estuarine sediments // *Marine Environmental Research*. 1998. V. 45. № 2. P. 113–125. [https://doi.org/10.1016/s0141-1136\(97\)00024-x](https://doi.org/10.1016/s0141-1136(97)00024-x)
 15. Аржанова Н. В., Артамонова К. В. Гидрохимическая структура вод в районах промысла антарктического криля *Euphausia superba* Dana // *Труды ВНИРО*. 2014. Т. 152. С. 118–132.
 16. Van Aken H. M. The Oceanic Thermohaline Circulation: an introduction / Springer Science & Business Media. 2007. V. 39. P. 135–182.
 17. Garcia-Ibanez et al. Structure, transports and transformations of the water masses in the Atlantic Subpolar Gyre // *Progress in oceanography*. 2015. V. 135. P. 18–36.

18. Morozov E. G., Tarakanov R. Y., Van Haren H. Transport of Antarctic bottom water through the Kane Gap, tropical NE Atlantic Ocean // *Ocean Science*. 2013. V. 9. № 5. P. 825–835.
<https://doi.org/10.5194/os-9-825-2013>
19. Thierry V., Mercier H., Treguier A.-M. Seasonal fluctuations in the deep central equatorial Atlantic Ocean: A data-model comparison // *Ocean Dynamics*. 2006. V. 56. P. 5–6.
20. Krasheninnikova S. B., Demidov A. N., Ivanov A. A. Variability of the Characteristics of the Antarctic Bottom Water in the Subtropical North Atlantic // *Oceanology*. 2021. V. 61. Iss. 2. P. 151–158.
<https://doi.org/10.1134/S0001437021020090>

WATER MASS-STRUCTURE AND VARIABILITY OF THE KANE GAP IN THE EQUATORIAL ATLANTIC OCEAN

© 2025 A. N. Demidov^{a, #}, K. V. Artamonova^{a, b}, S. B. Krasheninnikova^{a, c},
Academician of the RAS S. A. Dobrolyubov^a

^a*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russia*

^b*Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography, Moscow, Russia*

^c*A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia*

[#]*E-mail: tuda@mail.ru*

The results of a study of the water mass structure in a poorly studied area of the eastern basin of the Tropical Atlantic (Kane Gap) according to data from the 63rd cruise of P/V “Akademik Ioffe” in 2022 are presented in the paper. Variability of the average monthly characteristics of these waters using the GLORYS12v1 reanalysis for 1993–2022 is shown. Intermediate waters in the section are represented by a mixture of Antarctic intermediate water (AAIW) and Mediterranean water (the share of the latter reaches 34%). It has been established that the North Atlantic Deep Water (NADW) is represented by two layers: the Upper NADW with a maximum of salinity and the Middle NADW with a maximum of oxygen. The bottom water layer contains a mixture of Antarctic Bottom Water (AABW), the Lower and Middle components of the NADW. This mixture, coming primarily from the Vema Fracture zone region, is properly to call Northeast Atlantic Bottom Water (NEABW). Its upper limit corresponded to the isotherm of 1.95°C and the Si/P ratio equal to 33. In this work, using the conservative PO, the proportion of AABW in NEABW, which is about 20%, was calculated. According to the GLORYS12v1 on a seasonal scale in the bottom layer, a significant negative relationship was established between the variability of potential temperature and the meridional speed of currents. Significant trend for an increase in the average annual potential temperature (by 0.06 °C) and a decrease in salinity (by 0.005 psu) in general for the period 1993–2022 was revealed.

Keywords: water masses, physical and hydrochemical properties, PO, North Atlantic Deep Water, Antarctic Bottom Water, interannual variability, ocean reanalysis