




ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЛУБИННЫХ И ДОННЫХ ВОД В РАЗЛОМАХ СЕВЕРО-АТЛАНТИЧЕСКОГО ХРЕБТА

А. М. Селиверстова^{1,*} , О. А. Зуев¹  и К. А. Ефимова² 

¹Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, Россия

²Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

* **Контакт:** Анна Михайловна Селиверстова, 201219941315ann@gmail.com

В работе исследованы свойства глубинных и придонных вод в четырёх ранее неизученных трансформных разломах Северо-Атлантического хребта, находящихся между 24° с. ш. и 36° с. ш. На основе новых натурных данных изучена пространственная изменчивость термохалинной и гидрохимической структуры в каждом из разломов. В меридиональном направлении подтверждено уменьшение температуры и концентрации кислорода, а также увеличение концентрации биогенных элементов с севера на юг по обе стороны Северо-Атлантического хребта. Показано отсутствие перетока придонной воды из Восточной Атлантики в Западную, что в главной степени обусловлено большим количеством орографических препятствий внутри разломов и положительным горизонтальным градиентом плотности. Установлено наличие глубинного водообмена между разными частями Атлантики во всех разломах. В северных разломах поток направлен преимущественно на запад на глубинах 2200–2800 м, в южных – преобладает восточный перенос на глубинах 3100–4400 м. Таким образом происходит обновление глубинных вод внутри разломов, а также их перенос через Северо-Атлантический хребет.

Ключевые слова: трансформный разлом, растворенный кислород, биогенные элементы, водные массы, придонный поток, термохалинная структура.

Цитирование: Селиверстова А. М., Зуев О. А., Ефимова К. А. Гидрохимические характеристики глубинных и донных вод в разломах Северо-Атлантического хребта // Russian Journal of Earth Sciences. — 2025. — Т. 25. — ES5024. — DOI: 10.2205/2025es001092 — EDN: SSMNGI

Введение

В Атлантике хорошо развита система меридионального обмена водой, известная как Атлантическая меридиональная опрокидывающая циркуляция, которая обеспечивает постоянное перераспределение тепла и массы между высокими и низкими широтами. При этом в широтном направлении глубинный, а тем более придонный, водообмен между Западной и Восточной Атлантикой значительно ограничен по причине наличия естественного орографического барьера в виде Срединно-Атлантического хребта (САХ). При средних глубинах большинства котловин Атлантики около 5000 м САХ имеет глубину порядка 2500–3000 м, тем самым разделяя собой глубинный слой воды более 2000 м от дна. Именно этим обстоятельством объясняется различия в характеристиках воды по разные стороны от САХ. Однако в САХ имеется большое количество поперечных трансформных разломов, некоторые из которых достаточно широкие и глубокие для проникновения воды из одной части Атлантики в другую. Самыми изученными являются разлом Романш [Mercier and Speer, 1998; Messias et al., 1999] и разлом Вима [Morozov et al., 2023], по которым из Западной Атлантики в Восточную попадает большая часть Антарктической донной воды (ААДВ). Помимо этих двух разломов существует большое количество других, с менее интенсивным потоком вод. Большинство из этих разломов слабо изучены, во многих измерения единичны либо отсутствуют вовсе.

<https://elibrary.ru/SSMNGI>

Получено: 18 ноября 2025 г.

Принято: 1 декабря 2025 г.

Опубликовано: 9 декабря 2025 г.



© 2025. Коллектив авторов.

Во многом это объясняется незначительным объемом воды, проходящим по каждому из них [Morozov et al., 2017]. Тем не менее, благодаря своему количеству все вместе они вносят ощутимый вклад в придонный водообмен, а глубоководный водообмен может осуществляться в еще большем объеме. Помимо возможности обмена водой между Восточной и Западной Атлантикой исследования в разломах САХ важны для изучения процессов перемешивания водных масс в быстродвижущемся глубоководном потоке [Hall et al., 1997]. В некоторых работах было показано, что такие гидрохимические параметры как растворенный кислород и кремний являются не только трассерами отдельных водных масс, но и могут отражать локальные гидродинамические процессы на границах этих водных масс [Holfort and Siedler, 2001; Krechik et al., 2023; Zuev and Seliverstova, 2024]. Таким образом, термохалинная и гидрохимическая структура воды дают возможность исследовать изменения ее свойств в ходе распространения вдоль трансформного разлома, а также сравнивать характеристики по обе стороны от САХ.

Основной водной массой по обе стороны от САХ является Северо-Атлантическая глубинная вода (САГВ). Ее главными компонентами являются плотные воды, образованные в ходе глубокой конвекции в морях Ирмингера и Лабрадора [Pickart et al., 2003], а также Норвежском и Гренландском морях [Koltermann et al., 1999]. Менее плотные воды, преодолевая подводный хребет между Исландией и Фарерскими островами, перемешиваются с водами Северо-Атлантического течения, формируя верхнюю Северо-Атлантическую глубинную воду (вСАГВ) [Tsuchiya et al., 1992], которая распространяется с обеих сторон САХ. Наиболее плотная вода проходит через Датский пролив, перемешивается с Лабрадорскими водами и формирует нижнюю Северо-Атлантическую глубинную воду (нСАГВ) [Harvey and Arhan, 1988]. Большая часть нСАГВ распространяется в Западной Атлантике, а в Восточную попадает через разлом Вима и смешиваясь с ААДВ движется на север [Van Aken, 2000]. Обе североатлантические водные массы отличаются повышенными соленостью и кислородом, при этом в вСАГВ абсолютные значения выше. В свою очередь ААДВ приходит с юга и в Западной Атлантике распространяется в двух основных направлениях: на восток через разлом Вима [Morozov et al., 2023] и на северо-запад через систему абиссальных каналов, в первую очередь канал Видал [Frey et al., 2025]. В результате диапикнического перемешивания ААДВ и нСАГВ в Восточной Атлантике образуется Северо-восточная Атлантическая донная вода (СВАДВ) с большим содержанием биогенных элементов и малым растворенного кислорода [Liu and Tanhua, 2021].

Исследуемый нами регион Северной Атлантики (рис. 1) хорошо изучен. Основные измерения, наиболее пространственно близкие к изучаемым разломам САХ, проводились в ходе проекта TOPOGULF в 1983–1984 гг. В результате были описаны основные водные массы, вносящие вклад в САГВ по обе стороны от САХ [Harvey and Arhan, 1988], и показана их циркуляция вдоль САХ [Gana and Provost, 1993]. Также подтверждено влияние вод Южной Атлантики на большую часть придонного слоя Северо-Восточной Атлантики [McCartney et al., 1991]. Подробно изучен меридиональный перенос тепла, растворенного кислорода и биогенных элементов через широтный разрез по 24,5° з. д. [Frajka-Williams et al., 2011; Hernández-Guerra et al., 2014; Lavín et al., 2003]. Особый интерес представляют наблюдения за изменением температуры глубинных вод Атлантики, тенденции в которых неоднозначны и влияют на климат всей планеты [Johnson and Purkey, 2024]. Последние исследования показывают, что в этих изменениях велика роль разломов САХ [Frey, 2025]. При этом характеристики вод внутри исследуемых разломов до сих пор практически не изучались, измерения в них единичны и не дают возможности проанализировать термохалинную и гидрохимическую структуру вдоль разломов.

Целью настоящей работы является изучение свойств воды в четырех разломах САХ: Океанографер, Хайес, Атлантис и Кейн. По распределению гидрофизических и гидрохимических параметров вдоль каждого разлома анализируются водные массы, поступающие сюда с обеих сторон САХ. Исследуется возможность водообмена между Восточной и Западной Атлантикой через трансформные разломы, а также пространственная изменчивость характеристик воды в широтном и меридиональном направлениях.

Материалы и методы

Работы в 69-й экспедиции на НИС «Академик Иоффе» проводились с 10 ноября 2024 г. по 5 декабря 2024 г. и включали четыре разреза через следующие разломы САХ: Океанографер (четыре станции), Хайес (шесть станций), Атлантик (восемь станций) и Кейн (девятнадцать станций) (рис. 1). Для определения гидрохимических параметров была выбрана равномерная сетка горизонтов отбора от глубин 1600 м, с небольшим учащением ко дну.

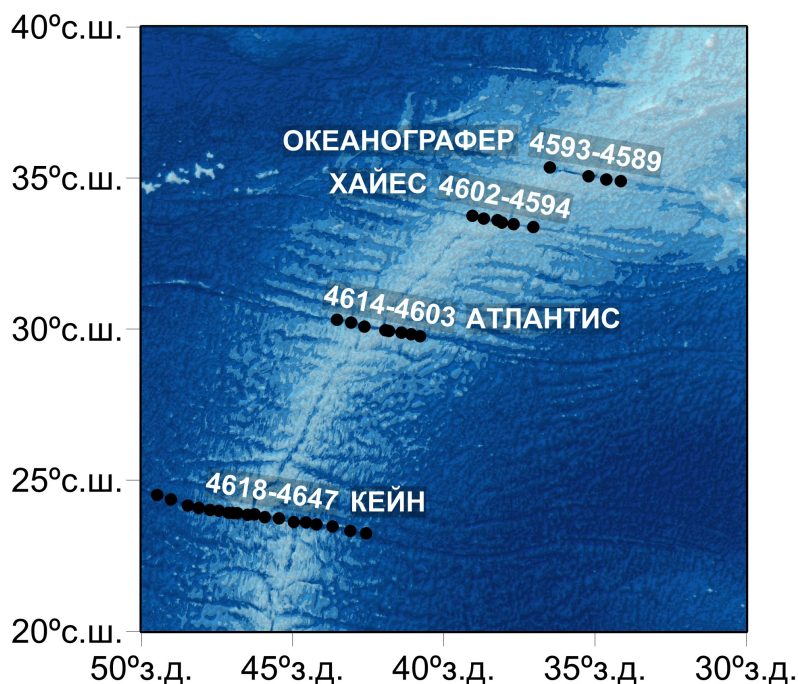


Рис. 1. Карта-схема расположения станций АИ-69. Рельеф дна здесь и далее показан в соответствии с GEBCO 2024 [GEBCO Bathymetric Compilation Group 2024, 2024].

Работы велись с помощью зонда Idronaut OCEAN SEVEN 320Plus опускаемого на кабель-тросе и измеряющего вертикальное распределение температуры, электрической проводимости и давления от поверхности до дна. Зондирующий комплекс укомплектован высокоточным температурно-скомпенсированным датчиком давления (РА-10Х), имеющим точность 0,01% и разрешение 0,002% на полный диапазон измерения (0–100 МПа), двумя дублирующими датчиками температуры, имеющими диапазон измерения от –5 до 45 °С, первоначальную точность 0,001 °С, разрешение 0,0001 °С. Два дублирующих датчика электропроводности имеют диапазон измерения от 0 до 70 мСм/см, первоначальная точность 0,001 мСм/см, разрешение 0,0001 мСм/см. Для дополнительной точности и проверки данных параллельно использовался автономный зонд AML-3 LGR CTD 6000 m. Зонд имеет датчик температуры с диапазоном измерений от –5 до 45 °С, первоначальную точность 0,005 °С, разрешение 0,001 °С, датчик электропроводности с диапазоном измерений от 0 до 90 мСм/см, первоначальная точность 0,01 мСм/см, разрешение 0,001 мСм/см.

Определение растворенного кислорода (O_2) проводилось по методу Винклера [Methods..., 1999]; растворенного кремния (Si) по методу Королёва, по голубому кремнемолибденовому комплексу [Methods..., 1999]; минерального фосфора (PO_4) по методу Морфи-Райли [Бордовский и Чернякова, 1992]; азота нитратов (NO_3) – методом восстановления в кадмиевых колонках до нитритов, с последующим колориметрированием «единым» цветным реактивом [Бордовский и Чернякова, 1992]. Пробы отбирались непосредственно после подъема на палубу в соответствии с принятыми методиками. Анализ проводился в судовой лаборатории в течение 6–12 часов после отбора проб.

Величины основных определяемых параметров для придонного слоя вод в таких ключевых точках разрезов, как крайние станции и самые глубокие на разрезе, вынесены в табл. 1.

Таблица 1. Основные измеренные параметры в придонном слое вод для ключевых станций каждого разреза – самой западной, самой восточной и самой глубокой

Разлом	Станции	Глубина, м	Потенциальная температура, °C	Соленость	Аномалия потенциальной плотности, кг/м ³	O ₂ , μM	Si, μM	PO ₄ , μM	NO ₃ , μM
Океано-графер	4593	3145	2,64	34,92	45,77	264	26,91	1,19	19,10
	4591	3800	2,58	34,93	45,79	265	27,16	1,22	18,69
	4589	3338	2,56	34,93	45,79	257	32,32	1,26	20,37
Хайес	4602	3190	2,44	34,92	45,81	262	29,14	1,25	19,41
	4599	4500	2,41	34,92	45,82	255	36,29	1,43	21,05
	4594	3740	2,47	34,92	45,80	255	34,33	1,37	20,13
Атлантис	4614	4025	2,00	34,89	45,87	260	39,71	1,41	–
	4612	5230	2,16	34,90	45,85	259	37,45	1,40	–
	4603	4150	2,14	34,90	45,85	247	44,78	1,42	–
Кейн	4618	5940	1,63	34,85	45,91	255	54,79	1,55	22,09
	4636	5950	1,84	34,88	45,89	254	47,89	1,49	20,75
	4642	5969	1,95	34,88	45,87	255	46,18	1,41	20,74
	4647	5670	1,93	34,89	45,88	247	49,60	1,53	21,79

Результаты

Термохалинная структура

Потенциальная температура в исследуемом районе в большей мере изменялась с глубиной и широтой (рис. 2). Так в придонном слое с севера на юг значения уменьшались в среднем с 1,83 до 2,60 °C (в самых глубоких точках разрезов от 1,63 °C (ст. 4618, 5940 м) до 2,58 °C (ст. 4591, 3800 м), табл. 1). При этом на двух северных разрезах более плотная и холодная вода в придонном слое наблюдалась в восточной части, а на двух южных – в западной. На меньших глубинах (2000–2800 м) для всех разрезов преобладало увеличение плотности с запада на восток. В верхнем слое (1600–2000 м) потенциальная температура однородна в меридиональном направлении и немного понижалась в широтном. При этом на разрезе Кейн наблюдалась вода пониженной солености, на разрезе Атлантис – повышенной относительно двух северных разрезов. В глубинном слое наименьшая соленость отмечена на двух северных разрезах, а в придонном – в западной части разреза Кейн.

Растворенный кислород

Содержание растворенного кислорода на разрезах изменялось от 229 до 266 μM. Минимальные значения отмечены в верхних горизонтах разреза Кейн до глубин 2200 метров, максимальные – от 2200 м до дна в западной части разреза Океано-графер и на глубинах 2200–2500 м станции 4589, самой восточной данного разреза (рис. 3). Сравнивая восточные и западные части всех разрезов, можно отметить, что концентрация растворенного кислорода в придонных горизонтах восточных станций ниже, чем в западных, в среднем на 8,5 μM. Это хорошо видно по графикам крайних станций каждого разреза: с восточной стороны наблюдался сильный максимум на средних глубинах, тогда как с западной распределение практически не менялось с глубиной. При продвижении с юга на север, концентрация растворенного кислорода в придонном слое увеличивалась в среднем с 253 до 262 μM (в самых глубоких точках разрезов от 255 μM (ст. 4618, 5940 м) до 265 μM (ст. 4591, 3800 м), табл. 1).

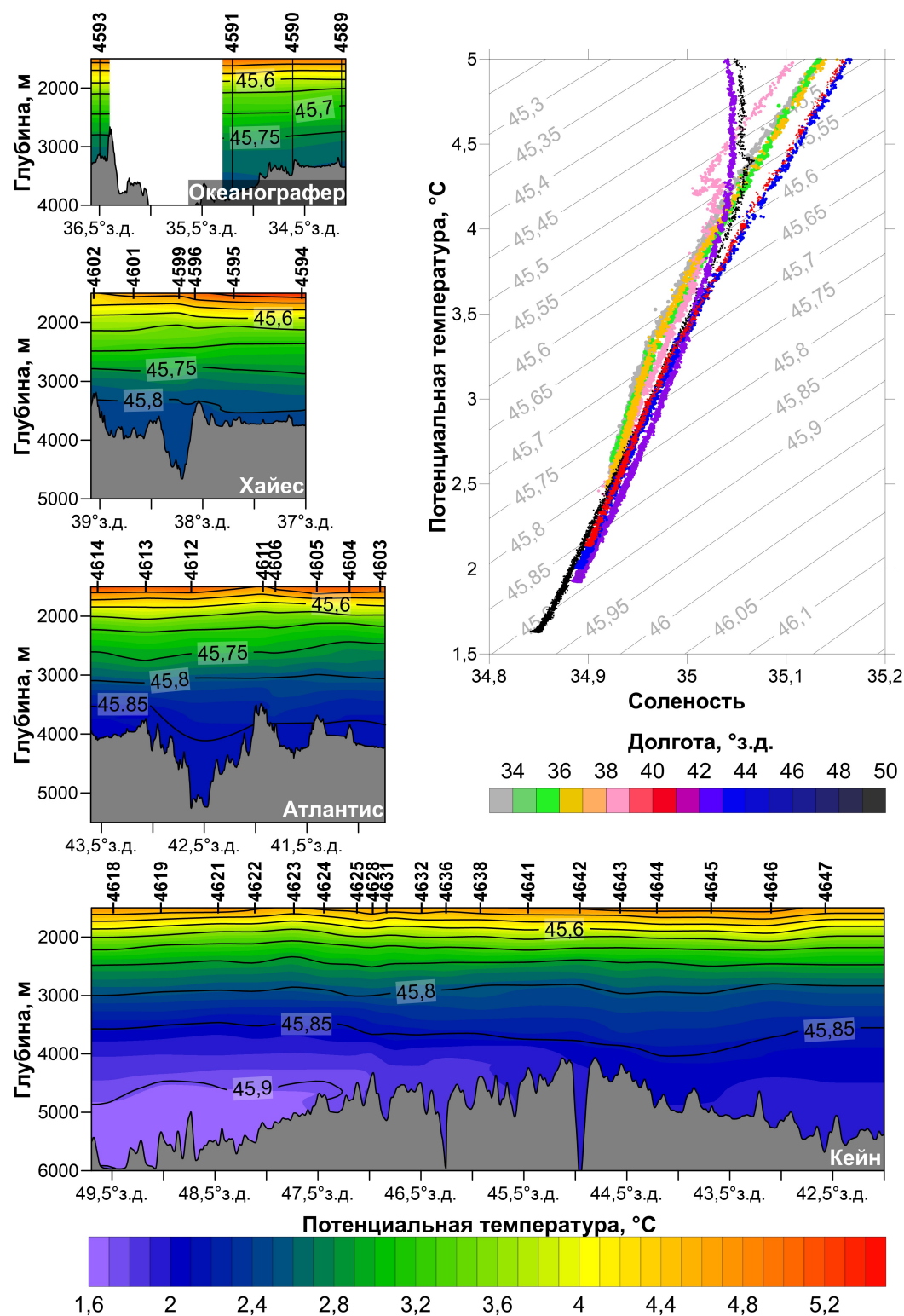


Рис. 2. Распределение потенциальной температуры в разломах Океанографер, Хайес, Атлантис и Кейн. Цветовая шкала единая для всех разрезов. Номера станций указаны сверху над каждым разрезом. Черными изолиниями показано распределение аномалии потенциальной плотности для 4000 дбар. Отдельно приведены графики зависимости практической солености от потенциальной температуры для крайних станций всех разрезов, цветом показана долгота каждой станции, серыми линиями обозначены изопикны.

Растворенный кремний

Величины растворенного кремния на разрезах изменялись в пределах от 11,18 до 54,85 μM (рис. 4). Практически на всех разрезах прослеживается преобладание концентрации силикатов в придонных горизонтах восточных частей над западными, однако максимальная концентрация отмечена на западных станциях разреза Кейн (в среднем 53,01 μM от глубин 4800 м до дна). Также в глубинном слое концентрация с западной стороны была несколько меньше, чем с восточной. При продвижении с юга на север, концентрация растворенного кремния в придонном слое уменьшалась в среднем с 48,91 до 28,76 μM (в самых глубоких точках разрезов от 54,79 μM (ст. 4618, 5940 м) до 27,16 μM (ст. 4591, 3800 м), табл. 1).

Фосфатный фосфор

Содержание фосфора фосфатов на исследуемых разрезах изменялось в пределах от 1,04 до 1,57 μM (рис. 5). Как и в распределении растворенного кремния, прослеживается уменьшение содержания фосфора в придонных горизонтах в среднем с 1,48 до 1,24 μM при продвижении с юга на север (в самых глубоких точках разрезов от 1,55 μM (ст. 4618, 5940 м) до 1,22 μM (ст. 4591, 3800 м), табл. 1). Стоит отметить, что несмотря на общую тенденцию к повышению концентрации фосфатов ко дну, максимальные их значения наблюдались не в придонных горизонтах станций 4636 и 4642 разлома Кейн, а в западной части разреза, как и в распределении растворенного кремния.

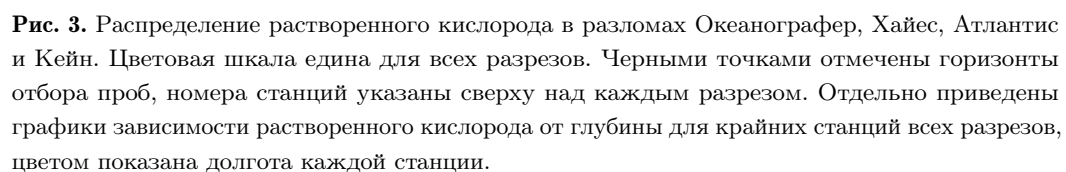
Азот нитратов

Величины содержания азота нитратов на разрезах изменялись в диапазоне от 16,20 до 22,26 μM (рис. 6). Широтное и долготное распределение нитратов схоже с распределением растворенного кремния и фосфора: среднее содержание нитратного азота в придонных горизонтах уменьшается с 21,34 до 19,28 μM при продвижении с юга на север (в самых глубоких точках разрезов от 22,09 μM (ст. 4618, 5940 м) до 18,69 μM (ст. 4591, 3800 м), табл. 1) и экстремумы отмечены не на самых глубоководных станциях, а в западной части разреза Кейн.

Водные массы

В разломе Океанографер по всей глубине происходит заток новых вод с восточного входа. Для глубинного слоя (2200–2800 м) это хорошо видно по повышенным значениям растворенного кислорода, который содержится в вСАГВ. При движении на запад поток постепенно заглубляется, но достигает выхода из разлома. По термохалинной структуре также наблюдается наклон изопикн на запад на данных глубинах, что позволяет потоку двигаться в западном направлении. В придонном слое повышенные значения биогенных элементов и пониженные кислорода говорят о попадании в разлом СВАДВ, которая прослеживается до середины разлома. Далее большая часть СВАДВ попадает в глубокую локальную котловину на 36° з. д., при этом перемешиваясь с встречным придонным затоком с запада, наблюдаемым по повышенному кислороду. Таким образом через разлом Океанографер происходит переток вСАГВ из Восточной Атлантики в Западную, но придонный водообмен отсутствует.

В разломе Хайес структура вод схожа с разломом Океанографер, но более сложная и динамичная. Присутствует поток вСАГВ с восточной стороны, который хорошо прослеживается по максимуму кислорода на глубинах 2200–2800 м и наклону изопикны 45,7 $\text{кг}/\text{м}^3$. При этом под ним навстречу движется поток нСАГВ с запада, выделяемый по повышенному кислороду на глубинах 2800–3500 м и наклону изопикны 45,8 $\text{кг}/\text{м}^3$. Между ними наблюдается тонкая прослойка с локальным минимумом кислорода. В придонном слое в восточной части разлома хорошо видно присутствие СВАДВ с характерными повышенными значениями всех биогенных элементов. Данный поток по всей видимости не может преодолеть седловину на 38,1° з. д., и смешивается с идущей навстречу нСАГВ. Особенностью данного разлома является глубокая котловина на 38,2° з. д., которая заполнена наиболее плотной и холодной водой. В ней наблюдается



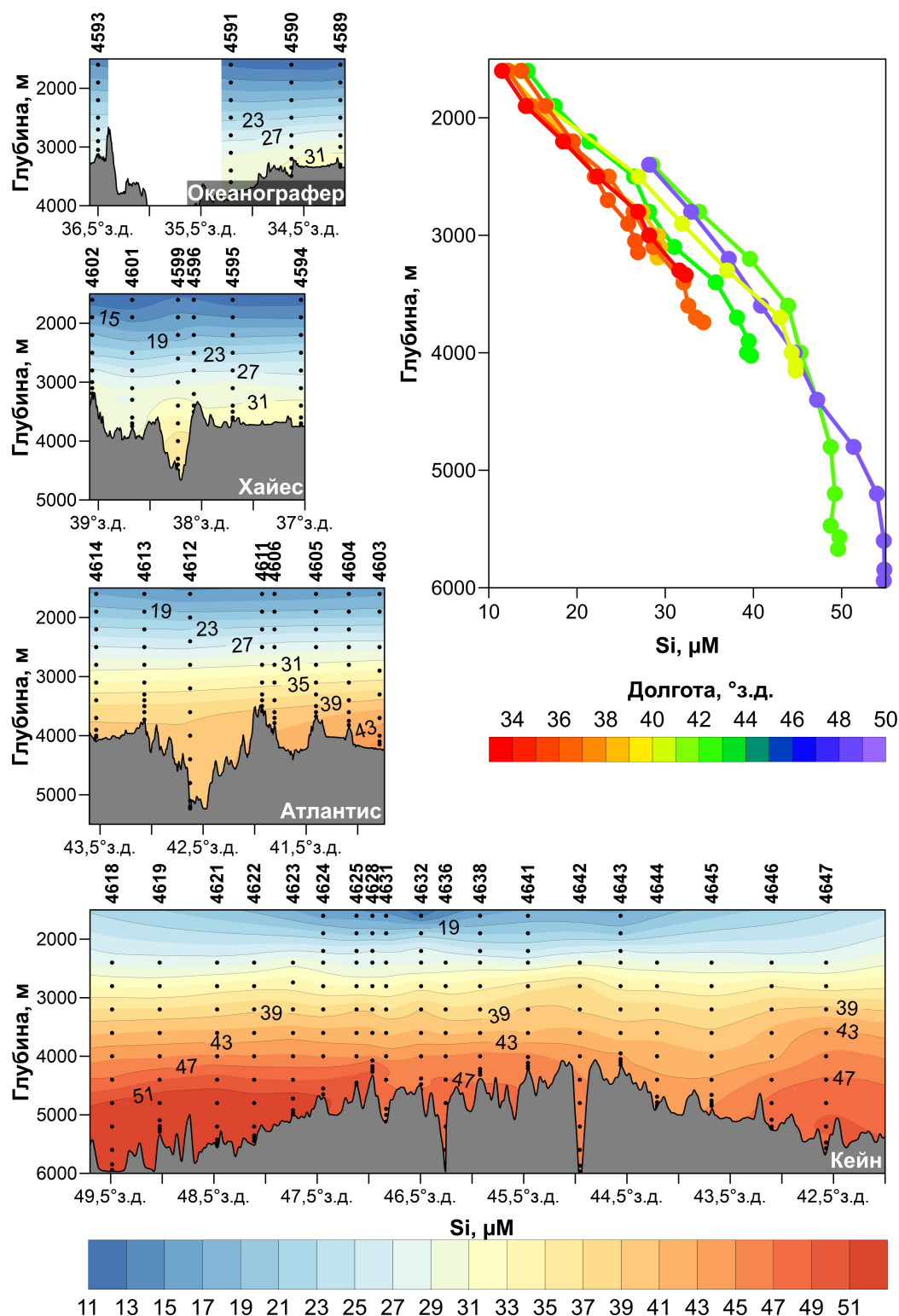


Рис. 4. Распределение растворенного кремния в разломах Океанографер, Хайес, Атлантик и Кейн. Цветовая шкала едина для всех разрезов. Черными точками отмечены горизонты отбора проб, номера станций указаны сверху над каждым разрезом. Отдельно приведены графики зависимости растворенного кремния от глубины для крайних станций всех разрезов, цветом показана долгота каждой станции.

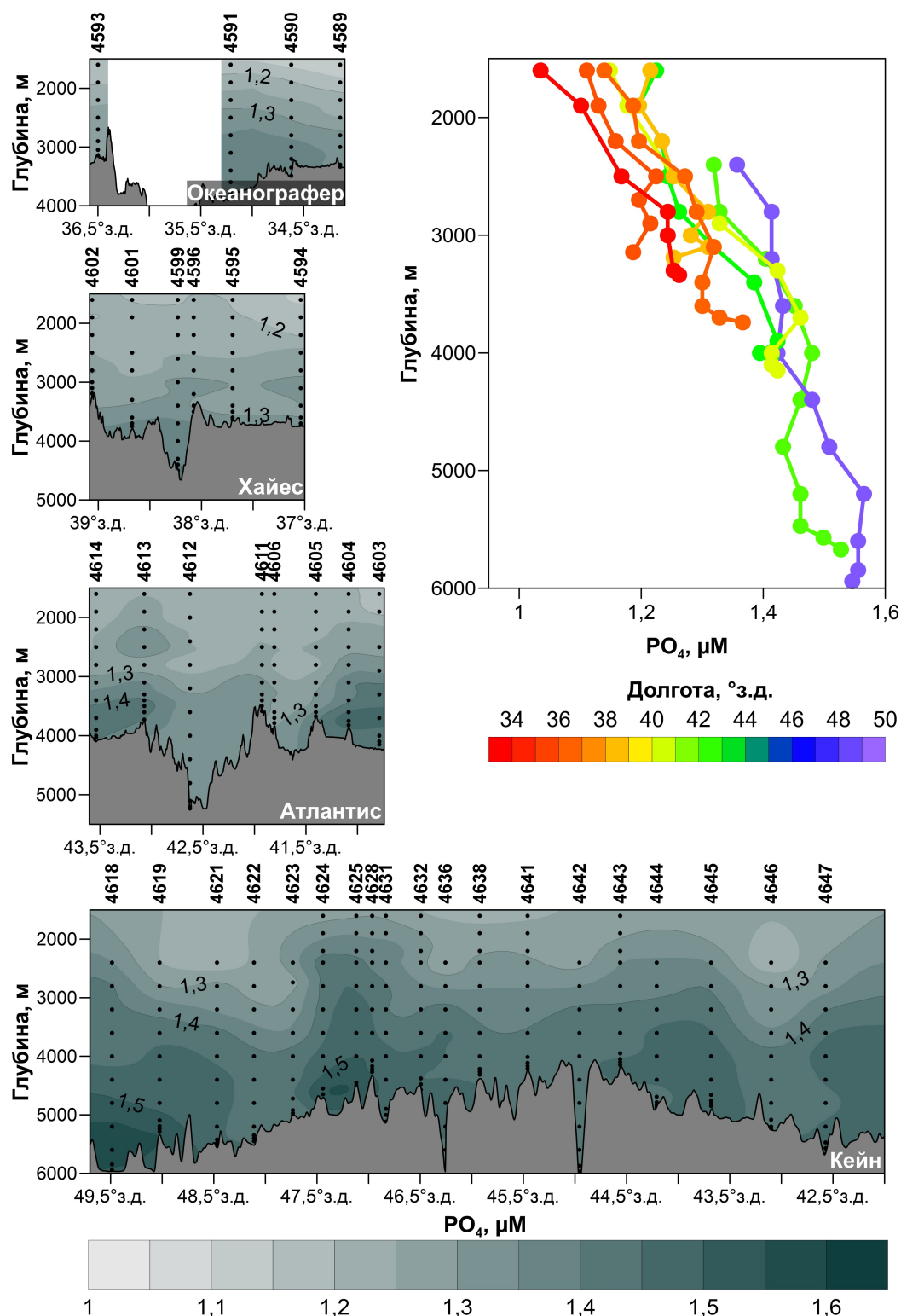


Рис. 5. Распределение фосфатного фосфора в разломах Океанограф, Хайес, Атлантис и Кейн. Цветовая шкала едина для всех разрезов. Черными точками отмечены горизонты отбора проб, номера станций указаны сверху над каждым разрезом. Отдельно приведены графики зависимости фосфатного фосфора от глубины для крайних станций всех разрезов, цветом показана долгота каждой станции.

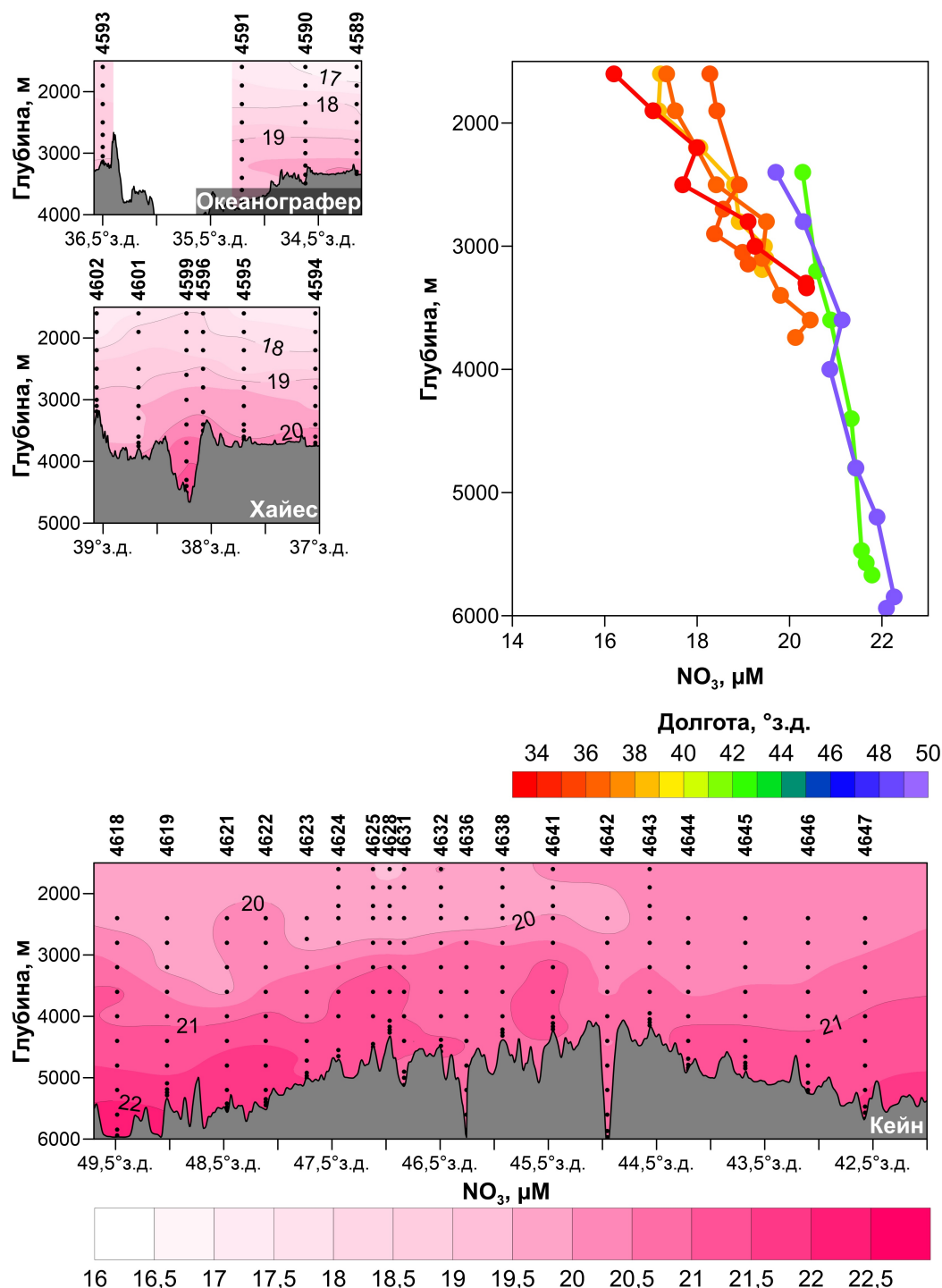


Рис. 6. Распределение азота нитратов в разломах Океанографер, Хайес и Кейн. По техническим причинам результаты измерений для разлома Атлантис отсутствуют. Цветовая шкала одина для всех разрезов. Черными точками отмечены горизонты отбора проб, номера станций указаны сверху над каждым разрезом. Отдельно приведены графики зависимости азота нитратов от глубины для крайних станций всех разрезов, цветом показана долгота каждой станции.

максимум по всем биогенным элементам и локальный минимум растворенного кислорода. Такая вода могла попасть сюда при сильном потоке придонных вод с восточного входа в разлом. Либо, что более вероятно, в данной котловине наблюдается застойная зона, куда практически не попадает новая вода и происходит аэробное разложение органического вещества с образованием минеральных форм биогенных веществ. Высокие значения дефицита растворенного кислорода также говорят о большом возрасте вод в котловине. Поток нСАГВ, заходящий в разлом с запада, движется по изопикне $45,8 \text{ кг/м}^3$ и не смешивается с более плотными нижележащими водами, что позволяет ему достичь восточной части разлома.

Абсолютные значения гидрохимических и гидрофизических параметров в разломе Атлантис достаточно сильно отличаются от двух более северных разломов, а величины плотности и растворенного кислорода даже ближе к более отдаленному южному разлому Кейн. В придонном слое с западного входа в разлом наблюдается заток самых плотных вод с высоким содержанием растворенного кислорода и повышенными фосфором и кремнием (нСАГВ). Однако большая часть этого потока попадает в глубокую котловину на $42,5^\circ \text{ з. д.}$, обновляя воды в ней. Менее плотные воды на глубинах 3100–3500 м могут преодолеть седловину на 42° з. д. и проложить свое движение на восток, где частично перемешиваются с встречным потоком СВАДВ, находящимся в придонном слое трех восточных станций разреза. На глубинах 2200–2500 м восточной части разлома располагается максимум кислорода и наклон изопикн к западу. Как и на двух северных разломах это слой вСАГВ, отделенный от нСАГВ локальным минимумом кислорода и незначительно заглубляющийся при своем движении на запад. В верхней части вСАГВ на глубинах 1600–2200 м также заметно влияние Средиземноморских вод с повышенной соленостью и малым содержанием кислорода, что практически отсутствует на северных разломах.

Разлом Кейн расположен значительно южнее относительно остальных разломов, глубины в нем достигают 6000 м и в нем проявляется влияние водных масс Южной Атлантики, в частности ААДВ. Это хорошо видно по высоким значениям кремния в придонном слое западной части разреза. Его величины здесь достигают $55 \text{ }\mu\text{М}$, что даже больше, чем с восточной стороны разлома. Самые холодные и плотные воды (менее $1,7^\circ \text{C}$ и более $45,9 \text{ кг/м}^3$) также находятся в западной придонной части. Однако большая часть этих вод не может преодолеть многочисленные орографические препятствия и градиент плотности. Так вода с температурой менее $1,9^\circ \text{C}$ достигает только первой глубокой котловины на $46,2^\circ \text{ з. д.}$, дальше проходит только более теплая и менее плотная вода. Именно в этом слое наблюдаются пониженные значения кислорода, повышенные фосфора и кремния, как и в котловине на $46,2^\circ \text{ з. д.}$ Над ним расположен слой нСАГВ с максимумом кислорода на глубинах около 4000 м. На этих же глубинах наблюдается инверсия по кремнию относительно восточной части разлома. Самая холодная (менее 2°C) часть этих вод заполняет глубокую котловину на 45° з. д. , а другая достигает восточной части разлома, резко заглубляется и частично перемешивается с придонным слоем. За 700 км разлома в ядре нСАГВ температура поднимается на $0,2^\circ \text{C}$, а кислород уменьшается на $10 \text{ }\mu\text{М}$. С восточной стороны в придонном слое в разлом проникают холодные плотные воды (менее 2°C и более $45,89 \text{ кг/м}^3$) с повышенным содержанием биогенных элементов мощностью около 700 м. Этот слой с характеристиками максимально близкими к источнику образования СВАДВ быстро теряет свои свойства и не проходит сколько-нибудь значительно вглубь разлома Кейн. На глубинах около 2800 м слабо заметен локальный максимум кислорода и несколько большие вертикальные градиенты биогенных элементов, что говорит о значительной доли вСАГВ в этом слое, распространение которого прослеживается к западу вдоль всего разлома. На глубинах 1600–2200 м центральной части разлома наблюдаются пониженные значения кислорода и солености, что говорит о влиянии Антарктической промежуточной воды здесь.

Для всех исследуемых трансформных разломов характерно сильное влияние сложного изрезанного рельефа на придонный слой воды. Многочисленные седловины и котловины отсекают самую плотную часть потока и способствуют быстрому перемешиванию с вышележащими слоями, что приводит к значительному изменению

гидрохимических и гидрофизических параметров придонного слоя при его продвижении вдоль разлома. Так поток СВАДВ прослеживается только в восточных частях во всех разломах и не достигает Западной Атлантики. Вероятно, обнаруженные фракции СВАДВ в Северо-Западной Атлантике [Liu and Tanhua, 2021] попадают туда только длинным путем, через высокие широты. В отличие от придонных вод САГВ распространяется через разломы в широком диапазоне глубин, сохраняет свои свойства и большей частью проходит вдоль всего разлома. Для северных разломов это преимущественно движение в западном направлении вСАГВ, которая попадает сюда через разлом Чарли-Гиббса [Álvarez et al., 2004; Gana and Provost, 1993] и далее через Восточно-Азорский хребет вдоль восточного склона САХ [Harvey and Arhan, 1988]. Для южных разломов более значителен поток в восточном направлении нСАГВ, идущий вдоль западного склона САХ с юга после рециркуляции в Гвианской котловине [Demidov et al., 2024; Mauritzen et al., 2002]. Таким образом в обоих случаях через разломы САХ в глубинном слое происходит распространение более свежей воды в обе части Атлантики.

Заключение

Каждый изученный разлом имеет свои особенности в термохалинной и гидрохимической структуре. Больше всего это проявляется в придонном слое, где сильно влияние рельефа дна. Так, в глубоких котловинах разломов находится разная вода: в Хайесе это застойная вода с повышенным содержанием биогенных элементов, в Атлантике наоборот свежая вода с повышенным содержанием растворенного кислорода, а в Кейне в западную котловину попадает придонная вода, а в восточную уже менее плотная глубинная. При этом в восточных частях всех разломов придонная вода имеет единое происхождение и распространяется преимущественно только до сильно возвышающихся седловин. Еще одна особенность, характерная для всех разломов, проявляется на меньших глубинах – двухслойная структура встречных потоков нижней и верхней Северо-Атлантических глубинных вод. По анализируемым нами данным для северных разломов превалирует западный перенос в верхнем слое, а для южных – восточный в нижнем. Однако для более точных оценок объемов этих переносов и их влияния на взаимодействие глубинных вод Атлантики по разные стороны от Срединно-Атлантического хребта требуются дальнейшие исследования.


Благодарности. Работа выполнена в рамках гранта РНФ № 24-27-00181.

Список литературы

- Бордовский О. К. и Чернякова А. М. Современные методы гидрохимических исследований океана. — Москва : ИО РАН, 1992. — 200 с.
- Álvarez M., Pérez F. F., Bryden H., et al. Physical and biogeochemical transports structure in the North Atlantic subpolar gyre // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. — 2004. — Vol. 109, no. C3. — <https://doi.org/10.1029/2003jc002015>.
- Demidov A. N., Artamonova K. V., Gippius F. N., et al. Water Masses of the Guiana Basin // *Water*. — 2024. — Vol. 16, no. 23. — P. 3494. — <https://doi.org/10.3390/w16233494>.
- Frajka-Williams E., Cunningham S. A., Bryden H., et al. Variability of Antarctic Bottom Water at 24.5°N in the Atlantic // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. — 2011. — Vol. 116, no. C11. — <https://doi.org/10.1029/2011jc007168>.
- Frey D. I. Asymmetry of abyssal warming in the Atlantic Ocean // *Global and Planetary Change*. — 2025. — Vol. 256. — P. 105132. — <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2025.105132>.
- Frey D. I., Zuev O. A., Mekhova O. S., et al. An 800-Km-Long Erosional Channel System as a Pathway for Antarctic Bottom Water Abyssal Flow Into the Northwest Atlantic // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. — 2025. — Vol. 130, no. 1. — e2024JC021846. — <https://doi.org/10.1029/2024jc021846>.
- Gana S. and Provost C. Circulation and fluxes of the Central North Atlantic in 1983/84 estimated by inverse analysis of "Topogulf" hydrographic data // *Journal of Marine Systems*. — 1993. — Vol. 4, no. 1. — P. 67–92. — [https://doi.org/10.1016/0924-7963\(93\)90020-m](https://doi.org/10.1016/0924-7963(93)90020-m).
- GEBCO Bathymetric Compilation Group 2024. The GEBCO_2024 Grid - a continuous terrain model of the global oceans and land. — 2024. — <https://doi.org/10.5285/1C44CE99-0A0D-5F4F-E063-7086ABC0EA0F>.

- Hall M. M., McCartney M. and Whitehead J. A. Antarctic Bottom Water Flux in the Equatorial Western Atlantic // Journal of Physical Oceanography. — 1997. — Vol. 27, no. 9. — P. 1903–1926. — [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1997\)027<1903:abwfit>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1997)027<1903:abwfit>2.0.co;2).
- Harvey J. and Arhan M. The Water Masses of the Central North Atlantic in 1983–84 // Journal of Physical Oceanography. — 1988. — Vol. 18, no. 12. — P. 1855–1875. — [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1988\)018<1855:twmotc>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1988)018<1855:twmotc>2.0.co;2).
- Hernández-Guerra A., Pelegrí J. L., Fraile-Nuez E., et al. Meridional overturning transports at 7.5N and 24.5N in the Atlantic Ocean during 1992–93 and 2010–11 // Progress in Oceanography. — 2014. — Vol. 128. — P. 98–114. — <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2014.08.016>.
- Holfort J. and Siedler G. The Meridional Oceanic Transports of Heat and Nutrients in the South Atlantic // Journal of Physical Oceanography. — 2001. — Vol. 31, no. 1. — P. 5–29. — [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(2001\)031<0005:tmotoh>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(2001)031<0005:tmotoh>2.0.co;2).
- Johnson G. C. and Purkey S. G. Refined Estimates of Global Ocean Deep and Abyssal Decadal Warming Trends // Geophysical Research Letters. — 2024. — Vol. 51, no. 18. — e2024GL111229. — <https://doi.org/10.1029/2024gl111229>.
- Koltermann K. P., Sokov A. V., Tereschenkov V. P., et al. Decadal changes in the thermohaline circulation of the North Atlantic // Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography. — 1999. — Vol. 46, no. 1/2. — P. 109–138. — [https://doi.org/10.1016/s0967-0645\(98\)00115-5](https://doi.org/10.1016/s0967-0645(98)00115-5).
- Krechik V. A., Kapustina M. V., Frey D. I., et al. Properties of Antarctic Bottom Water in the Western Gap (Azores-Gibraltar Fracture Zone, Northeast Atlantic) in 2021 // Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers. — 2023. — Vol. 202. — P. 104191. — <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2023.104191>.
- Lavín A. M., Bryden H. L. and Parrilla G. Mechanisms of heat, freshwater, oxygen and nutrient transports and budgets at 24.5°N in the subtropical North Atlantic // Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers. — 2003. — Vol. 50, no. 9. — P. 1099–1128. — [https://doi.org/10.1016/s0967-0637\(03\)00095-5](https://doi.org/10.1016/s0967-0637(03)00095-5).
- Liu M. and Tanhua T. Water masses in the Atlantic Ocean: characteristics and distributions // Ocean Science. — 2021. — Vol. 17, no. 2. — P. 463–486. — <https://doi.org/10.5194/os-17-463-2021>.
- Mauritzen C., Polzin K. L., McCartney M. S., et al. Evidence in hydrography and density fine structure for enhanced vertical mixing over the Mid-Atlantic Ridge in the western Atlantic // Journal of Geophysical Research: Oceans. — 2002. — Vol. 107, no. C10. — <https://doi.org/10.1029/2001jc001114>.
- McCartney M. S., Bennett S. L. and 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. — Vol. 21, no. 8. — P. 1089–1121. — [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1991\)021<1089:efttma>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1991)021<1089:efttma>2.0.co;2).
- Mercier H. and Speer K. G. Transport of Bottom Water in the Romanche Fracture Zone and the Chain Fracture Zone // Journal of Physical Oceanography. — 1998. — Vol. 28, no. 5. — P. 779–790. — [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1998\)028<0779:tobwit>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1998)028<0779:tobwit>2.0.co;2).
- Messias M. J., Andrié C., Mémery L., et al. Tracing the North Atlantic Deep Water through the Romanche and Chain fracture zones with chlorofluoromethanes // Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers. — 1999. — Vol. 46, no. 7. — P. 1247–1278. — [https://doi.org/10.1016/s0967-0637\(99\)00005-9](https://doi.org/10.1016/s0967-0637(99)00005-9).
- Methods of Seawater Analysis / ed. by K. Grasshoff, K. Kremling and M. Ehrhardt. — Weinheim (Germany) : Wiley, 1999. — 600 p. — <https://doi.org/10.1002/9783527613984>.
- Morozov E. G., Frey D. I., Zuev O. A., et al. Antarctic Bottom Water in the Vema Fracture Zone // Journal of Geophysical Research: Oceans. — 2023. — Vol. 128, no. 8. — e2023JC019967. — <https://doi.org/10.1029/2023jc019967>.
- Morozov E. G., Tarakanov R. Y., Frey D. I., et al. Bottom water flows in the tropical fractures of the Northern Mid-Atlantic Ridge // Journal of Oceanography. — 2017. — Vol. 74, no. 2. — P. 147–167. — <https://doi.org/10.1007/s10872-017-0445-x>.
- Pickart R. S., Straneo F. and Moore G. W. K. Is Labrador Sea Water formed in the Irminger basin? // Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers. — 2003. — Vol. 50, no. 1. — P. 23–52. — [https://doi.org/10.1016/s0967-0637\(02\)00134-6](https://doi.org/10.1016/s0967-0637(02)00134-6).
- Tschiya M., Talley L. D. and McCartney M. S. An eastern Atlantic section from Iceland southward across the equator // Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers. — 1992. — Vol. 39, no. 11/12. — P. 1885–1917. — [https://doi.org/10.1016/0198-0149\(92\)90004-d](https://doi.org/10.1016/0198-0149(92)90004-d).
- Van Aken H. M. The hydrography of the mid-latitude northeast Atlantic Ocean // Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers. — 2000. — Vol. 47, no. 5. — P. 757–788. — [https://doi.org/10.1016/s0967-0637\(99\)00092-8](https://doi.org/10.1016/s0967-0637(99)00092-8).
- Zuev O. A. and Seliverstova A. M. Spatial Variability of the Hydrochemical Structure in Bottom Gravity Current in the Vema Fracture Zone // Russian Journal of Earth Sciences. — 2024. — Vol. 24. — ES5002. — <https://doi.org/10.2205/2024es000945>.

HYDROCHEMICAL CHARACTERISTICS OF DEEP AND BOTTOM WATERS IN FRACTURE ZONES IN THE NORTH ATLANTIC RIDGE

A. M. Seliverstova^{1,**} , O. A. Zuev¹ , and K. A. Efimova² 

¹Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia

****Correspondence to:** Anna Seliverstova, 201219941315ann@gmail.com

The study investigates the properties of deep and bottom waters in four previously unexplored fracture zones of the North Atlantic Ridge located between 24° N and 36° N. Based on new field data, the spatial variability of thermohaline and hydrochemical structure in each of the fracture zones was studied. In the meridional direction, a decrease in oxygen and temperature and an increase in the concentrations of nutrients from north to south on both sides of the North Atlantic Ridge have been confirmed. The absence of bottom water flow from the Eastern Atlantic to the Western Atlantic was shown to be mainly due to the large number of orographic obstacles within the fracture zones and the positive horizontal density gradient. The presence of deep water exchange between different parts of the Atlantic in all fracture zones was established. In the northern fracture zones, the flow is directed mainly westward at depths of 2200–2800 m, while in the southern fracture zones, eastward transport prevails at depths of 3100–4400 m. Thus, deep waters are renewed within the fracture zones and transported across the North Atlantic Ridge.

Keywords: transform fracture zone, dissolved oxygen, nutrients, water masses, bottom flow, thermohaline structure.

Citation: Seliverstova A. M., Zuev O. A., and Efimova K. A. (2025), Hydrochemical Characteristics of Deep and Bottom Waters in Fracture Zones in the North Atlantic Ridge, *Russian Journal of Earth Sciences*, 25, ES5024, <https://doi.org/10.2205/2025ES001092>, EDN: SSMNGI

Received: November 18, 2025

Accepted: December 1, 2025

Published: December 9, 2025



© 2025. The Authors.

References

- Álvarez M., Pérez F. F., Bryden H., et al. Physical and biogeochemical transports structure in the North Atlantic subpolar gyre // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. — 2004. — Vol. 109, no. C3. — <https://doi.org/10.1029/2003jc002015>.
- Bordovsky O. K. and Chernyakova A. M. Modern methods of ocean hydrochemical investigations. — Moscow : USSR Academy of Sciences, IO RAS, 1992. — 199 p. — (In Russian).
- Demidov A. N., Artamonova K. V., Gippius F. N., et al. Water Masses of the Guiana Basin // *Water*. — 2024. — Vol. 16, no. 23. — P. 3494. — <https://doi.org/10.3390/w16233494>.
- Frajka-Williams E., Cunningham S. A., Bryden H., et al. Variability of Antarctic Bottom Water at 24.5°N in the Atlantic // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. — 2011. — Vol. 116, no. C11. — <https://doi.org/10.1029/2011jc007168>.
- Frey D. I. Asymmetry of abyssal warming in the Atlantic Ocean // *Global and Planetary Change*. — 2025. — Vol. 256. — P. 105132. — <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2025.105132>.
- Frey D. I., Zuev O. A., Mekhova O. S., et al. An 800-Km-Long Erosional Channel System as a Pathway for Antarctic Bottom Water Abyssal Flow Into the Northwest Atlantic // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. — 2025. — Vol. 130, no. 1. — e2024JC021846. — <https://doi.org/10.1029/2024jc021846>.
- Gana S. and Provost C. Circulation and fluxes of the Central North Atlantic in 1983/84 estimated by inverse analysis of "Topogulf" hydrographic data // *Journal of Marine Systems*. — 1993. — Vol. 4, no. 1. — P. 67–92. — [https://doi.org/10.1016/0924-7963\(93\)90020-m](https://doi.org/10.1016/0924-7963(93)90020-m).
- GEBCO Bathymetric Compilation Group 2024. The GEBCO_2024 Grid - a continuous terrain model of the global oceans and land. — 2024. — <https://doi.org/10.5285/1C44CE99-0A0D-5F4F-E063-7086ABC0EA0F>.
- Hall M. M., McCartney M. and Whitehead J. A. Antarctic Bottom Water Flux in the Equatorial Western Atlantic // *Journal of Physical Oceanography*. — 1997. — Vol. 27, no. 9. — P. 1903–1926. — [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1997\)027<1903:abwfit>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1997)027<1903:abwfit>2.0.co;2).

- Harvey J. and Arhan M. The Water Masses of the Central North Atlantic in 1983-84 // *Journal of Physical Oceanography*. — 1988. — Vol. 18, no. 12. — P. 1855–1875. — [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1988\)018<1855:twmotc>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1988)018<1855:twmotc>2.0.co;2).
- Hernández-Guerra A., Pelegrí J. L., Fraile-Nuez E., et al. Meridional overturning transports at 7.5N and 24.5N in the Atlantic Ocean during 1992-93 and 2010-11 // *Progress in Oceanography*. — 2014. — Vol. 128. — P. 98–114. — <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2014.08.016>.
- Holfort J. and Siedler G. The Meridional Oceanic Transports of Heat and Nutrients in the South Atlantic // *Journal of Physical Oceanography*. — 2001. — Vol. 31, no. 1. — P. 5–29. — [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(2001\)031<0005:tmotoh>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(2001)031<0005:tmotoh>2.0.co;2).
- Johnson G. C. and Purkey S. G. Refined Estimates of Global Ocean Deep and Abyssal Decadal Warming Trends // *Geophysical Research Letters*. — 2024. — Vol. 51, no. 18. — e2024GL111229. — <https://doi.org/10.1029/2024gl111229>.
- Koltermann K. P., Sokov A. V., Tereschenkov V. P., et al. Decadal changes in the thermohaline circulation of the North Atlantic // *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. — 1999. — Vol. 46, no. 1/2. — P. 109–138. — [https://doi.org/10.1016/s0967-0645\(98\)00115-5](https://doi.org/10.1016/s0967-0645(98)00115-5).
- Krechik V. A., Kapustina M. V., Frey D. I., et al. Properties of Antarctic Bottom Water in the Western Gap (Azores-Gibraltar Fracture Zone, Northeast Atlantic) in 2021 // *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. — 2023. — Vol. 202. — P. 104191. — <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2023.104191>.
- Lavín A. M., Bryden H. L. and Parrilla G. Mechanisms of heat, freshwater, oxygen and nutrient transports and budgets at 24.5°N in the subtropical North Atlantic // *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. — 2003. — Vol. 50, no. 9. — P. 1099–1128. — [https://doi.org/10.1016/s0967-0637\(03\)00095-5](https://doi.org/10.1016/s0967-0637(03)00095-5).
- Liu M. and Tanhua T. Water masses in the Atlantic Ocean: characteristics and distributions // *Ocean Science*. — 2021. — Vol. 17, no. 2. — P. 463–486. — <https://doi.org/10.5194/os-17-463-2021>.
- Mauritzen C., Polzin K. L., McCartney M. S., et al. Evidence in hydrography and density fine structure for enhanced vertical mixing over the Mid-Atlantic Ridge in the western Atlantic // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. — 2002. — Vol. 107, no. C10. — <https://doi.org/10.1029/2001jc001114>.
- McCartney M. S., Bennett S. L. and 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. — Vol. 21, no. 8. — P. 1089–1121. — [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1991\)021<1089:efttma>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1991)021<1089:efttma>2.0.co;2).
- Mercier H. and Speer K. G. Transport of Bottom Water in the Romanche Fracture Zone and the Chain Fracture Zone // *Journal of Physical Oceanography*. — 1998. — Vol. 28, no. 5. — P. 779–790. — [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1998\)028<0779:tobwit>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1998)028<0779:tobwit>2.0.co;2).
- Messias M. J., Andrié C., Mémery L., et al. Tracing the North Atlantic Deep Water through the Romanche and Chain fracture zones with chlorofluoromethanes // *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. — 1999. — Vol. 46, no. 7. — P. 1247–1278. — [https://doi.org/10.1016/s0967-0637\(99\)00005-9](https://doi.org/10.1016/s0967-0637(99)00005-9).
- Methods of Seawater Analysis / ed. by K. Grasshoff, K. Kremling and M. Ehrhardt. — Weinheim (Germany) : Wiley, 1999. — 600 p. — <https://doi.org/10.1002/9783527613984>.
- Morozov E. G., Frey D. I., Zuev O. A., et al. Antarctic Bottom Water in the Vema Fracture Zone // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. — 2023. — Vol. 128, no. 8. — e2023JC019967. — <https://doi.org/10.1029/2023jc019967>.
- Morozov E. G., Tarakanov R. Y., Frey D. I., et al. Bottom water flows in the tropical fractures of the Northern Mid-Atlantic Ridge // *Journal of Oceanography*. — 2017. — Vol. 74, no. 2. — P. 147–167. — <https://doi.org/10.1007/s10872-017-0445-x>.
- Pickart R. S., Straneo F. and Moore G. W. K. Is Labrador Sea Water formed in the Irminger basin? // *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. — 2003. — Vol. 50, no. 1. — P. 23–52. — [https://doi.org/10.1016/s0967-0637\(02\)00134-6](https://doi.org/10.1016/s0967-0637(02)00134-6).
- Tsuchiya M., Talley L. D. and McCartney M. S. An eastern Atlantic section from Iceland southward across the equator // *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*. — 1992. — Vol. 39, no. 11/12. — P. 1885–1917. — [https://doi.org/10.1016/0198-0149\(92\)90004-d](https://doi.org/10.1016/0198-0149(92)90004-d).
- Van Aken H. M. The hydrography of the mid-latitude northeast Atlantic Ocean // *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. — 2000. — Vol. 47, no. 5. — P. 757–788. — [https://doi.org/10.1016/s0967-0637\(99\)00092-8](https://doi.org/10.1016/s0967-0637(99)00092-8).
- Zuev O. A. and Seliverstova A. M. Spatial Variability of the Hydrochemical Structure in Bottom Gravity Current in the Vema Fracture Zone // *Russian Journal of Earth Sciences*. — 2024. — Vol. 24. — ES5002. — <https://doi.org/10.2205/2024es000945>.