

УДК 551.465

ПЕРЕНОС ГЛУБИННЫХ И ДОННЫХ ВОД ЧЕРЕЗ СРЕДИННО-АТЛАНТИЧЕСКИЙ ХРЕБЕТ В РАЗЛОМЕ ВИМА

© 2020 г. А. Н. Демидов^{1,*}, А. А. Иванов¹,
Ф. Н. Гиппиус¹, член-корреспондент РАН С. А. Добролюбов¹

Поступило 16.06.2020 г.
После доработки 06.07.2020 г.
Принято к публикации 07.07.2020 г.

Работа посвящена исследованию изменения переноса Антарктических донных вод в разломе Вима на основе прямых измерений и реанализа Glorgys12v1. В 45-м рейсе НИС “Академик Николай Страхов” в ноябре 2019 г. проведены инструментальные измерения течений и основных гидрологических характеристик. По результатам измерений скоростей течений в 2019 г. перенос в разломе Вима составляет 0.9 Св, причем по распределению растворенного кислорода установлено, что за верхнюю границу Антарктической донной воды правильнее принять изотерму 1.7°C, а не 2°C. Реанализ показал очень хорошее соответствие с прямыми измерениями. Перенос донных вод в среднем за период реанализа составляет 0.66 Св. В целом за 25-летний период для реанализа наблюдаются тенденции роста переноса и увеличения температуры. Измерения придонной температуры за 20 последовательных зондирований показали суточные изменения в пределах 1.36–1.41°C. Этот интервал практически перекрывает весь диапазон изменения значений предыдущих лет.

Ключевые слова: разлом Вима, Антарктическая донная вода, перенос донных вод, реанализ, Glorgys12v1, 45 рейс НИС “Академик Николай Страхов”, перенос водных масс

DOI: 10.31857/S2686739720090066

ВВЕДЕНИЕ

Вопрос об основном пути переноса Антарктических донных вод (ААДВ) в восточную часть Атлантики долгое время оставался не до конца выясненным. Если в западной части распространение ААДВ происходит практически беспрепятственно, то проникновение этих вод в восточную часть происходит через трансформные разломы Вима, Романш и Чейн Срединно-Атлантического хребта в его экваториальной части [2].

Прямые измерения скоростей серией измерителей течений в разломах Романш и Чейн, приведенные в работе [6], выявили соизмеримый перенос ААДВ, равный 0.66 и 0.56 Св (1 Св = 10⁶ м³/с). Большинство предшествующих работ [1, 7, 9] свидетельствует о переносах в разломе Вима 0.5–2 Св, что сопоставимо с этими величинами.

В последнее время появились оценки потока ААДВ, в том числе через разлом Вима, в моделях циркуляции океана [3, 11]. В отличие от эпизодических контактных измерений, моделирование позволяет оценить изменения переноса в течение

длительного времени (до 20–30 лет) с помощью создания ретроспективных массивов модельных данных – реанализов. К недостаткам этого метода следует отнести недостаточное разрешение по пространству и глубине (1–3 горизонта глубже 4000 м). Тем не менее совместное использование данных наблюдений и реанализов позволяет более корректно оценить перенос ААДВ и даже воссоздать ход параметров в периоды, когда натурные измерения отсутствовали.

Цель настоящей работы – определить перенос ААДВ через разлом Вима по данным собственных натурных измерений в 2019 г. и океанских реанализов, а также оценить возможные изменения этой величины.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Инструментальные измерения течений и основных гидрологических характеристик были выполнены в ноябре 2019 г. во время 45-го рейса НИС “Академик Николай Страхов” (организатор ИО РАН) с помощью акустического доплеровского измерителя течений Nortek Aquadopp 6000 и STD-зонда SBE19plus.

В восточной части разлома Вима было выполнено 8 станций (рис. 2). На ст. 34, расположенной

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия
*E-mail: alik1@mail.ru

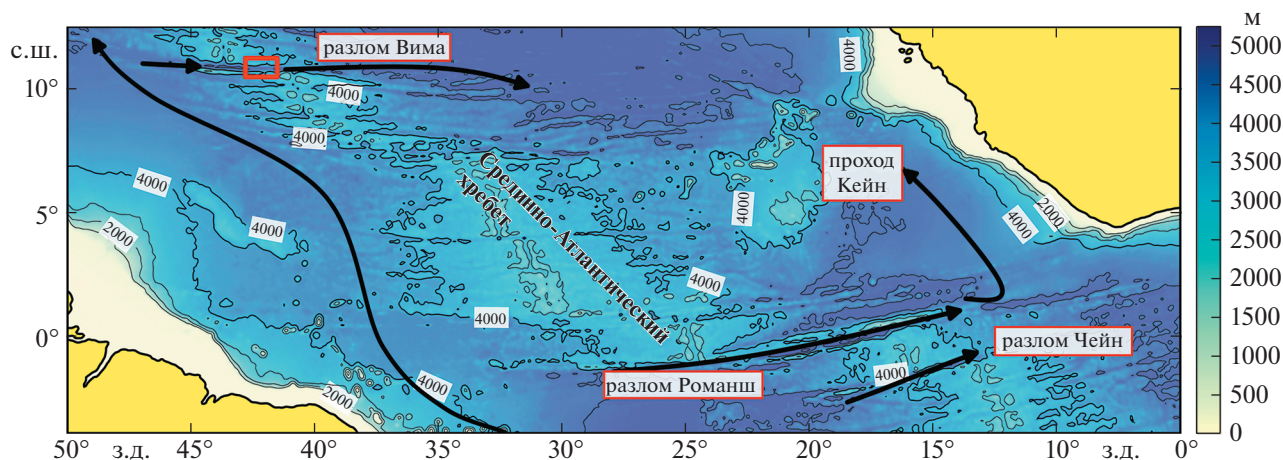


Рис. 1. Основные пути распространения Антарктической донной воды в экваториальной части Атлантики. Прямоугольником отмечен район расположения измерений экспедиции 2019 г. в районе главной седловины разлома Вима.

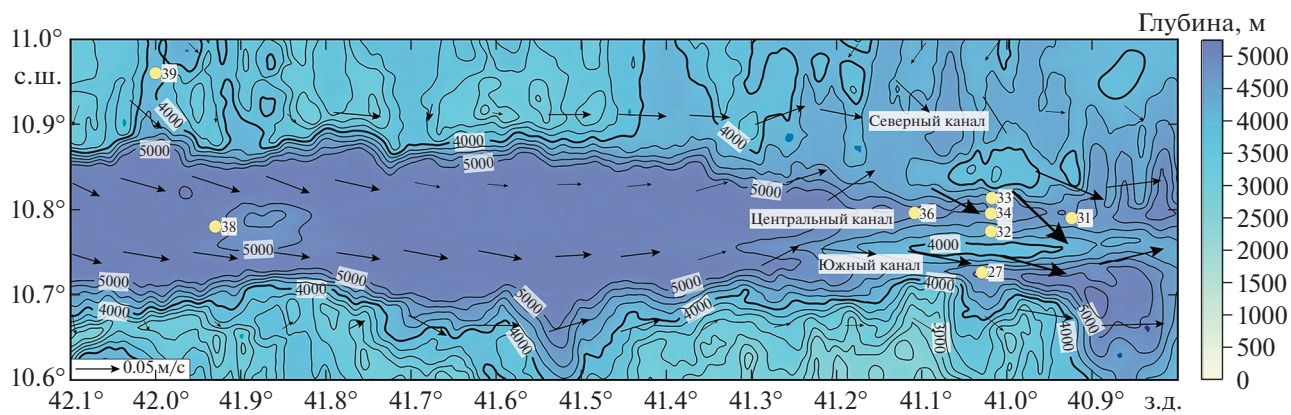


Рис. 2. Схема расположения станций в разломе Вима. Стрелками показаны придонные скорости по реанализу Glorys12v1.

на главной седловине разлома, выполнялось определение суточной изменчивости параметров, для чего в слое ниже 3700 м последовательно выполнено 20 зондирований с интервалом около 50 мин.

Для сравнения с натурными данными 2019 г. мы использовали ежемесячные модельные оценки интегральных переносов, рассчитанные на основе океанических реанализов Glorys12v1, Mercatorpsy4v3 (в дальнейшем обозначим как G12 и Merc, взят только за дату измерений), Glorys2v4, GREP-V2, Armor-3d с 1993 по 2015–2018 гг. [12]. У этих реанализов высокое разрешение – от 1/4° с 30–75 вертикальными уровнями до 1/12° (около 8 км) и 50 уровнями в G12 и Merc. В разломе Вима последний горизонт реанализов расположен на глубине 4000–4300 м, что значительно выше фактических глубин у дна. Также использовались данные о рельефе [10] с пространственным разрешением около 100 м.

СТРУКТУРА ГЛУБИННЫХ ВОД И ГРАНИЦА АНТАРКТИЧЕСКИХ ДОННЫХ ВОД

В разломе Вима, ниже глубины 1200 м, находятся Северо-Атлантические глубинные воды (САГВ), характеризующиеся локальным максимумом солёности и содержания кислорода. САГВ состоит из трех компонентов, называемых верхними, средними и нижними (ВСАГВ, ССАГВ и НСАГВ) [13], хотя по другой классификации [9] компонентов четыре. ССАГВ и НСАГВ выделяются по собственным локальным максимумам концентрации кислорода [13] и фреонов. По [9], ССАГВ, в свою очередь, делятся еще на два слоя, с максимумом и минимумом содержания этих характеристик. Придонное положение в разломе занимает Антарктическая донная водная масса (ААДВ) с минимумом потенциальной температуры (θ).

Для оценки переноса донных вод критически важно определение границы между НСАГВ и

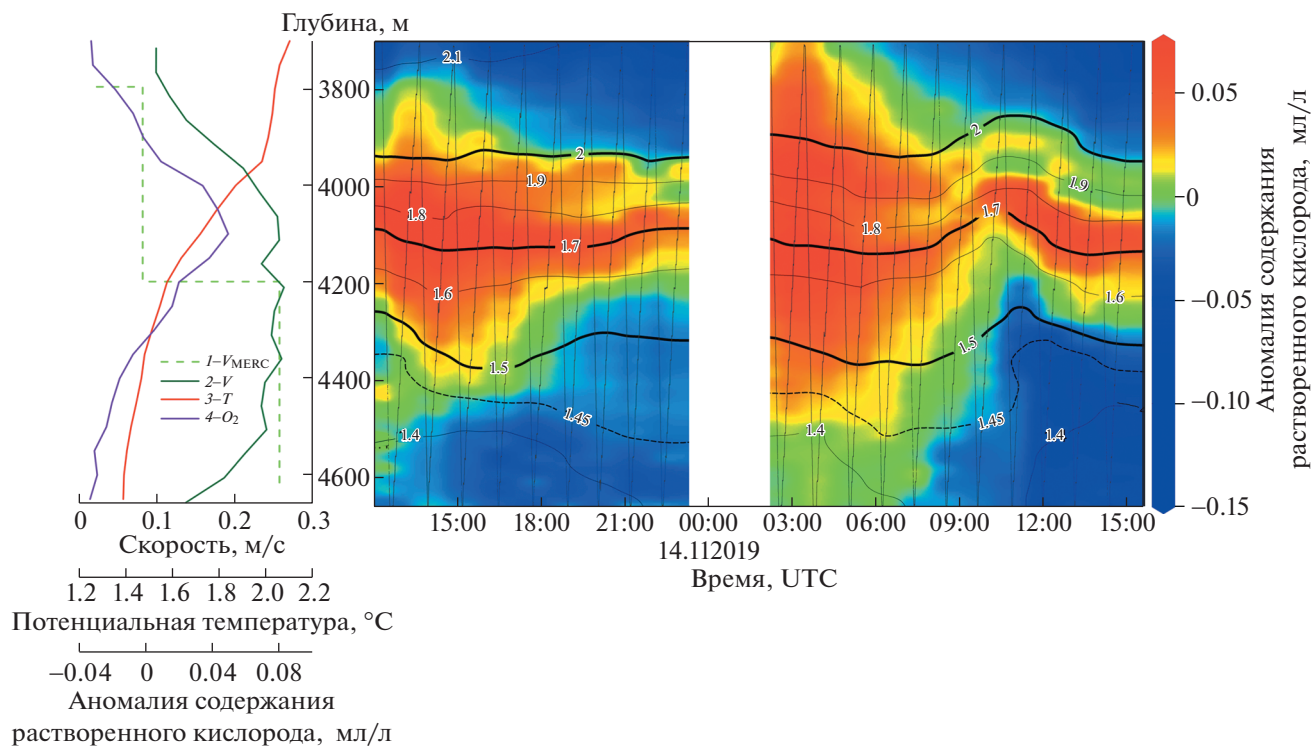


Рис. 3. Потенциальная температура, скорость течения и аномалии содержания растворенного кислорода на станции 34 в 2019 г. Слева: вертикальное распределение осредненных за сутки значений: зональная компонента скорости по реанализу Мерс (1) и по измерениям (2); потенциальная температура °С (3); аномалии содержания растворенного кислорода (4). Справа: аномалии содержания растворенного кислорода (мл/л, максимум показан затемнением) и изотермы θ (°С, изолинии) на станции 34 за 20 последовательных зондирований в 2019 г. Тонкими линиями показана глубина положения зонда со временем.

ААДВ. Начиная с работы [13], верхней границей ААДВ предложено считать изотерму $\theta = 2^\circ\text{C}$, но авторы [9] указывают, что эта граница плохо соответствует гидрологической структуре, так как включает ядро и большую часть слоя НСАГВ с максимумами содержания кислорода и фреонов. Слишком высокое положение границы приводит к завышению суммарного переноса ААДВ в 2–3 раза [9].

Варианты положения верхней границы ААДВ хорошо видны на рис. 3. Исходя из анализа содержания растворенного кислорода, верхней границей ААДВ правильнее считать изотерму $\theta = 1.7^\circ\text{C}$, примерно соответствующую глубине 4100 м, что близко к значениям из работы [9]. По измерениям скоростей течений в районе 4400 м ($\theta = 1.5^\circ\text{C}$) в экспедиции 2019 г. на ряде станций фиксируется локальный минимум значений зональной скорости течения, отделяющий самую холодную часть слоя ААДВ.

Интересная особенность потока в глубинном слое в районе главной седловины разлома Вима — при едином направлении распространения НСАГВ и ААДВ ядро ААДВ прижато к северному склону Центрального канала, что подтверждается минимальными значениями температуры. При этом

ядро НСАГВ прижато, наоборот, к южному склону, именно там наблюдается повышенное содержание растворенного кислорода.

ИЗМЕНЧИВОСТЬ ТЕМПЕРАТУРЫ В РАЗЛОМЕ

Косвенным показателем, отражающим изменения переноса ААДВ, могут служить значения температуры. Данные прямых измерений температуры в разломе Вима крайне эпизодичны и, в отсутствие заякоренных измерителей течений, единственным инструментом с достаточной дискретностью для характеристики многолетней и сезонной изменчивости могут быть только океанские реанализы. Недостатки реанализов — большое расстояние между узлами у дна и их фактическое осреднение по значительному слою. Именно по этим причинам измеренные значения придонной температуры существенно ниже аналогичных в реанализах (табл. 1). Среди недостатков всех рассмотренных реанализов можно также отметить “эффект баротропизации”, приводящий к синхронным изменениям температуры и переносов со временем для разных глубинных слоев и водных масс.

Таблица 1. Значения придонной температуры по данным измерений на главной седловине разлома Вима [7, 8], дополненные результатами экспедиции 2019 г.

Месяц, год	Придонная θ , °C	Глубина, м	θ , °C, реанализ G12 4405 м
12.2000	1.35	4755	1.78
10. 2006	1.36–1.39	4809–4932	1.77
10.2014	1.43	4688	1.82
09.2015	1.46	4648	1.79
04.2016	1.42	4663	1.80
10.2016	1.41	4680	1.83
11.2019	1.36–1.41	4686–4716	

Первое зондирование в районе главной седловины описано в работе [9] и в дальнейшем многократно повторено в российских экспедициях [7, 8]. До 2015 г. здесь отмечалась тенденция роста температуры, затем сменившаяся ее падением. С другой стороны, измерения θ на суточной станции в 2019 г. (ст. 34) показали изменения в интервале 1.36–1.41°C. Этот интервал практически перекрывает весь диапазон значений предыдущих лет.

Температура тесно связана с величиной переноса, понижение температуры соответствует усилению потока, что видно на рис. 4. Тенденция роста температуры, аналогичная табл. 1, прослеживается на придонном горизонте G12 в 2012–2014 гг., а позднее произошло некоторое понижение. В целом же за весь период для G12 наблюдаются тенденции роста переноса и увеличения температуры.

Изотермы, близкие к дну (например, $\theta = 1.45^\circ\text{C}$), в течение суток могут смещаться до 300 м

по глубине, а изотерма $\theta = 2^\circ\text{C}$ смещается на 150 м. Все это свидетельствует о сложности однозначной интерпретации факта о прохождении ААДВ через другие экваториальные разломы по единичным измерениям.

Таким образом, помимо неопределенности задания границы ААДВ, фактор суточной изменчивости, а возможно изменчивости и больших периодов, создает проблемы при интерпретации факта проникновения ААДВ по единичным измерениям.

ПЕРЕНОС ГЛУБИННЫХ И ДОННЫХ ВОД

Перенос ААДВ сильно зависит от метода определения их границы и, как видно из табл. 2, может различаться в разы. Хотя разница положения границ $\theta = 1.7$ и 2°C составляет около 200 м, разница площадей изотерм в плоскости поперек канала составляет 38%.

Как видно из табл. 2, лучше других перенос ААДВ воспроизводит реанализ G12. Остальные рассмотренные реанализы дают результаты в 2–4 раза меньше и слой с $\theta < 1.5^\circ\text{C}$ в них вообще отсутствует. Поэтому в дальнейшем реанализы, кроме G12, не рассматривались.

Полученные нами переносы сравнивались со среднемноголетними значениями реанализа. Перенос по реанализу оказался ниже наших натурных оценок на 20–30%, а максимальные значения переносов по G12 за весь период наблюдений, в свою очередь, на 15% выше. Примечательно, что перенос ААДВ по G12 может быть направлен и в западном (обратном) направлении, хотя инструментально такая ситуация ни разу не фиксировалась. Реанализ Мегс, единственный, совпадаю-

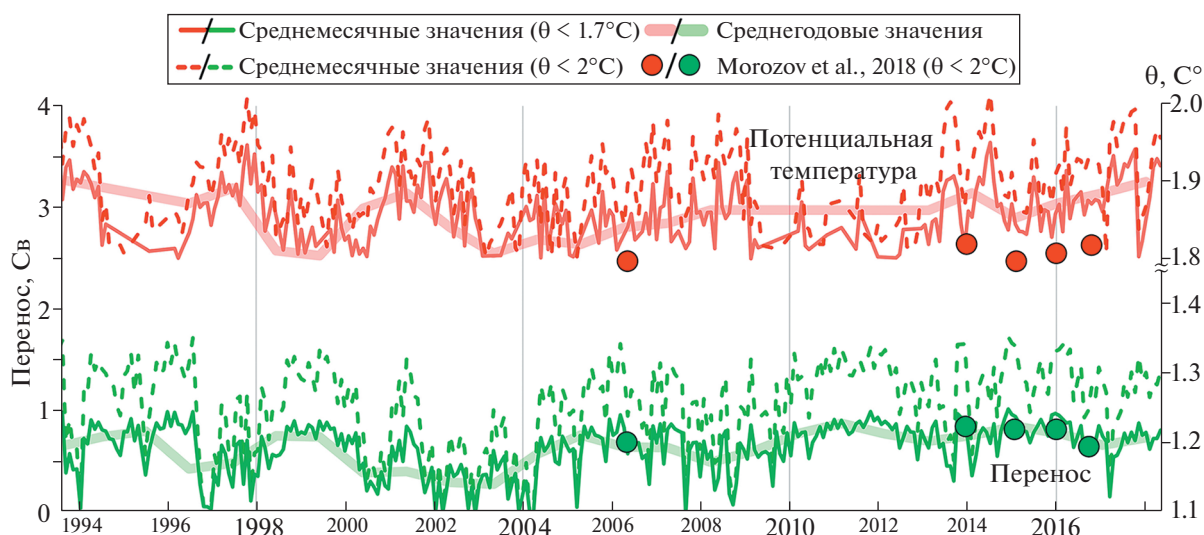


Рис. 4. Изменение переноса ААДВ (зеленым) и придонной температуры (красным) по реанализу G12. Точками показаны результаты расчетов переноса и значения придонной температуры по натурным измерениям [8].

Таблица 2. Перенос Антарктических донных вод в разломе Вима в восточном направлении. Буквами Ц, Ю, С обозначены Центральный, Южный и Северный каналы соответственно. Указан только первый автор работы

Автор	Граница ААДВ, θ , °С/район	Перенос, Св	Комментарий
Vangreishem по [7]	1.5	0.05–0.46	Измеритель течений
Shlitzer по [7]		0.0–0.7	Бокс-модель
McCartney [5]	2 1.5	2.08–2.24 0.46	Расчет геострофических скоростей
Fischer [4]	2	2.1–2.4	Совмещение геострофического переноса и данных LADCP. В районе станции 38 2019 г.
Rhein [9]	$\theta \approx 1.7$	1.1	Уточнение результатов [4] в связи с включением в слой ААДВ части НСАГВ
Stephens [11]	1.8	2	Численная модель
Демидов [1]	1.5/Ц+Ю	0.01–0.04	Измерения LADCP. Центральный и Южный канал
Morozov [7]	1.8–2/Ц+Ю	0.11–0.64	Измерения LADCP.
Morozov [8]	2/Ц 2/Ю 2/С 2/Ц+Ю+С	0.52–0.86 0.1–0.3 0.05–0.2 0.7–1.2	Измерения LADCP. Все каналы. 4 съемки в разные годы (мин.–макс.)
Фрей [3]	2/Ц+Ю	0.61	Модель INMOM с повышенным разрешением по вертикали у дна
Настоящая работа. Реанализы. среднегодулетний (мин.–макс.). Ц+Ю	2 (3900 м) 1.7 (4100 м) 1.5 (4400 м)	1.1 (–0.25–1.73) 0.66(–0.21–1) 0.23 (–0.1–0.35)	Glorys12v1 (G12)
	2 1.7 1.5	0.42 (–1.24–1.2) 0.15(–0.33–0.42) –	Glorys2v4
	2 1.7 1.5	0.67 (0.1–1.1) 0.45 (0.04–0.36) –	GREP-V2
	2 1.7 1.5	0.07(–0.24–0.27) – –	Armor-3d
	2 1.7 1.5	1.02 0.66 0.25	Mercatorpsy4v3 (Мерс) на дату измерений
Настоящая работа. Измерения	2 Ц Ю	0.7–0.92 0.57	С учетом суточных изменений
	1.7 Ц Ю	0.51–0.61 0.3	
	1.5 Ц Ю	0.09–0.2 0.02	

щий по дате с измерениями, показал близкие результаты переноса.

Как показано в работе [8], в районе главной седловины, помимо основной части разлома, называемой Центральным каналом, существует па-

раллельный ему Южный канал, отделенный медианным хребтом (рис. 2), и проход в “северной стене” разлома, называемом авторами “Северным каналом”, с переносом 0.05–0.2 Св. По оценкам [8], на Центральный канал прихо-

дится 70–74% суммарного расхода, тогда как на Южный канал 10–22%. По результатам измерений 2019 г. можно судить о более значимом вкладе потока через Южный канал, приблизительно вдвое меньше, чем через Центральный. По средненным значениям реанализа G12 в этом месте поток через “северную стену” направлен на юг, т.е. в противоположную сторону по сравнению с потоком из работ [3, 8]. Кроме этого района, перенос ААДВ через “северную стену” возможен в районе станции 39, западнее главной седловины, где зафиксирована придонная $\theta = 1.59^\circ\text{C}$, при этом перенос ААДВ направлен в южном направлении.

Перенос вод в слое с локальным максимумом содержания кислорода 3700–4100 м (нижней части НСАГВ или OLNADW по классификации [9]) в районе главной седловины составляет 1 Св по оценке [9]. По реанализу G12 получены переносы вод этого слоя 0.8 Св на восток.

Окончательно за общую оценку переноса ААДВ (с границей $\theta = 1.7^\circ\text{C}$) можно принять 0.9 Св, если прибавить к измеренным в 2019 г. значениям перенос ~ 0.1 Св через “северную стену” [8]. Суточные изменения переносов за 20 последовательных зондирований составляют до 20% от этого значения.

В целом реанализ G12 показал хорошее соответствие с прямыми измерениями. Перенос ААДВ в среднем за период 1993–2018 гг. по реанализу составляет 0.66 Св, за эти годы наблюдаются тенденции роста переноса и увеличения температуры.

При планировании последующих измерений переноса ААДВ в разломе необходимы определения содержания растворенного кислорода для локализации точного положения границы ААДВ, а также учет суточной изменчивости как положения границы ААДВ, так и величины переноса.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны В.В. Машуре, А.С. Бичу и остальным участникам 45-го рейса НИС “Академик Николай Страхов” за помощь в получении данных.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Обработка и анализ данных осуществлены при поддержке проекта РФФ 19–17–00110.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демидов А.Н., Добролюбов С.А. // ДАН. 2007. Т. 416. № 3. С. 395–399.
2. Демидов А.Н., Морозов Е.Г., Нейман В.Г. // ДАН. 2006. Т. 410. № 3. С. 401–405.
3. Фрей Д.В., Морозов Е.Г., Фомин В.В., Дианский Н.А. // Изв. РАН. ФАО. 2018. Т. 54. № 6. С. 727–732.
4. Fischer J., Rhein M., Schott F., et al. // Deep-Sea Res. 1996. V. 43. № 7. P. 1067–1074.
5. McCartney M.S., Bennet S.L., Woodgate-Jones M.E. // J. Phys.Oceanogr. 1991. V. 21. № 8. P. 1089–1121.
6. Mercier H., Speer K.G. // J. Phys.Oceanogr. 1998. V. 28. P. 779–790.
7. Morozov E., Demidov A., Tarakanov R., Zenk W. Abyssal Channels in the Atlantic Ocean: Water Structure and Flows. Springer, 2010. P. 266.
8. Morozov E., Tarakanov R., Frei D., Demidova T., Makarenko N. // J. Oceanogr. 2018. V. 74. P. 147–167.
9. Rhein M., Stramma L., Krahlmann G. // Deep-Sea Res. 1998. V. 45. P. 507–527.
10. Ryan W.B., Carbotte S.M., Coplan J.O., et al. // Geochim. Geophys. Geosyst. 2009. № 10.
11. Stephens J.C., Marshall D.P. // J.Phys.Oceanogr. 2000. V. 30. № 3. P. 622–640.
12. Le Traon P.Y., Ali A., Alvarez Fanjul E., et al. // Mercator oc. J. 2017. № 56.
13. Wüst G. / 1936. Deutsche Atlantische Expedition “Meteor” 1925–1927. 6 (1). Berlin. 411.

TRANSPORT OF DEEP AND BOTTOM WATERS THROUGH THE MID-ATLANTIC RIDGE IN THE VEMA FRACTURE ZONE

A. N. Demidov^{a, #}, A. A. Ivanov^a, F. N. Gippius^a, and Corresponding Member of the RAS S. A. Dobroliubov^a

^a Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

[#] E-mail: alik1@mail.ru

This article is devoted to the study of changes in the transport of Antarctic bottom waters (AABW) through the Vema Fracture Zone. It is based on direct measurements and data of the Glorys12v1 reanalysis. Instrumental measurements of currents and other principal hydrological characteristics were carried out in the 45th cruise of the R/V “Akademik Nikolaj Strakhov” in November 2019. According to the current velocity measurements in 2019, the transport in the Vema Fracture Zone is 0.9 Sv, and, based on the distribution of dissolved oxygen, we found that it is more correct to consider the isotherm 1.7°C rather than 2°C as the upper boundary of the AABW. The reanalysis showed very good agreement with direct measurements. The average transport of bottom water during the reanalysis period is 0.66 Sv. Overall, there is a tendency toward an increase in both transport and temperature over the 25-year period covered by reanalysis. 20 consecutive samplings of bottom water temperature showed changes from 1.36 to 1.41°C within a day. This interval almost completely covers the entire range of the previous years' values.

Keywords: Vema Fracture Zone, Antarctic bottom waters (AABW), transport of bottom waters, reanalysis, Glorys12v1, the 45th cruise of the R/V “Akademik Nikolaj Strakhov”, water transport