

УДК 551.466

СТРУКТУРА ПРИДОННЫХ ПОТОКОВ В АБИССАЛЬНЫХ КАНАЛАХ АТЛАНТИКИ: СУДОВЫЕ И АВТОНОМНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ В КАНАЛЕ ВИМА, РАЗЛОМЕ РОМАНШ И ПРОХОДЕ КЕЙН

© 2023 г. О. С. Мехова^{1, 2, *}, Д. А. Смирнова^{1, 3}, Д. И. Фрей^{1, 4}¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия²Санкт-Петербургский государственный Университет, Санкт-Петербург, Россия³Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия⁴Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

*e-mail: osmeh@yandex.ru

Поступила в редакцию 06.11.2022 г.

После доработки 29.11.2022 г.

Принята к публикации 16.12.2022 г.

Проведено сравнение данных измерений в глубоководных каналах Атлантики, полученных в результате двух различных методов: CTD/LADCP-зондирований с научно-исследовательских судов и данных автономных заякоренных буйковых станций. Проведенное сравнение показало, что несоответствия между данными, полученными двумя разными методами, могут существенно превышать инструментальную точность приборов. Этот результат подчеркивает важность выбора точек для заякоренных станций в условиях существенных пространственных градиентов измеряемых характеристик. Результаты анализа показали, что на протяжении всего пути распространения антарктических вод несоответствия измерений имеют одинаковые порядки величин, то есть полученные выводы могут быть справедливы для всех абиссальных каналов с интенсивным потоком Антарктической донной воды.

Ключевые слова: Антарктическая донная вода, канал Вима, разлом Романш, проход Кейн, CTD, LADCP, автономные заякоренные станции

DOI: 10.31857/S0030157423040093, **EDN:** YJFXJQ

1. ВВЕДЕНИЕ

Антарктическая донная вода (ААДВ) формируется в основном в море Уэдделла и имеет потенциальную температуру менее 2°C [32]. Часть водной массы, которая имеет потенциальную температуру ниже 0.2°C, является глубинной водой моря Уэдделла [3, 27]. ААДВ распространяется вдоль западной части Атлантического океана. Достигая района экватора, часть этих вод попадает в восточную Атлантику через глубоководные разломы Срединно-Атлантического хребта [21, 22, 24]. Другая часть антарктических вод продолжает свое движение в западной части Атлантики на север [8, 20, 28]; в трансформированном виде ААДВ попадает в Северо-Западную Атлантику. Исследования течений ААДВ важно для понимания циркуляции придонных вод Атлантики, так как их распространение влияет на тепловой баланс в океане, что, в свою очередь, оказывает влияние на климат Земли [23].

В работе рассматриваются потоки, которые распространяются из Аргентинской котловины через канал Вима в Бразильскую котловину, про-

должают движение к экватору и пересекают Срединно-Атлантический хребет через разлом Романш. Далее, попадая в котловину Сьерра-Леоне, продолжают движение через проход Кейн в котловину Зеленого Мыса [25] (рис. 1). Канал Вима, имея протяженность более 700 км, является основным глубоководным каналом, по которому происходит движение ААДВ из Аргентинской в Бразильскую котловину [7, 29]. Менее существенный перенос вод между этими котловинами обеспечивается каналом Хантер и потоками над плато Санта-Катарина (Сантос) [9, 13, 17]. Разлом Романш является самым глубоководным каналом в районе экватора, длиной около 800 км и шириной от 10 до 40 км. По разлому Романш ААДВ попадает из западной части Атлантического океана в восточную [22]. Проход Кейн, соединяя котловины Сьерра-Леоне и Зеленого мыса, является наиболее глубоководным каналом, соединяющим эти котловины [6]. В данной работе рассматривается путь распространения ААДВ в Северо-Восточную Атлантику через обозначенные каналы — канал Вима, разлом Романш и проход Кейн (рис. 1).

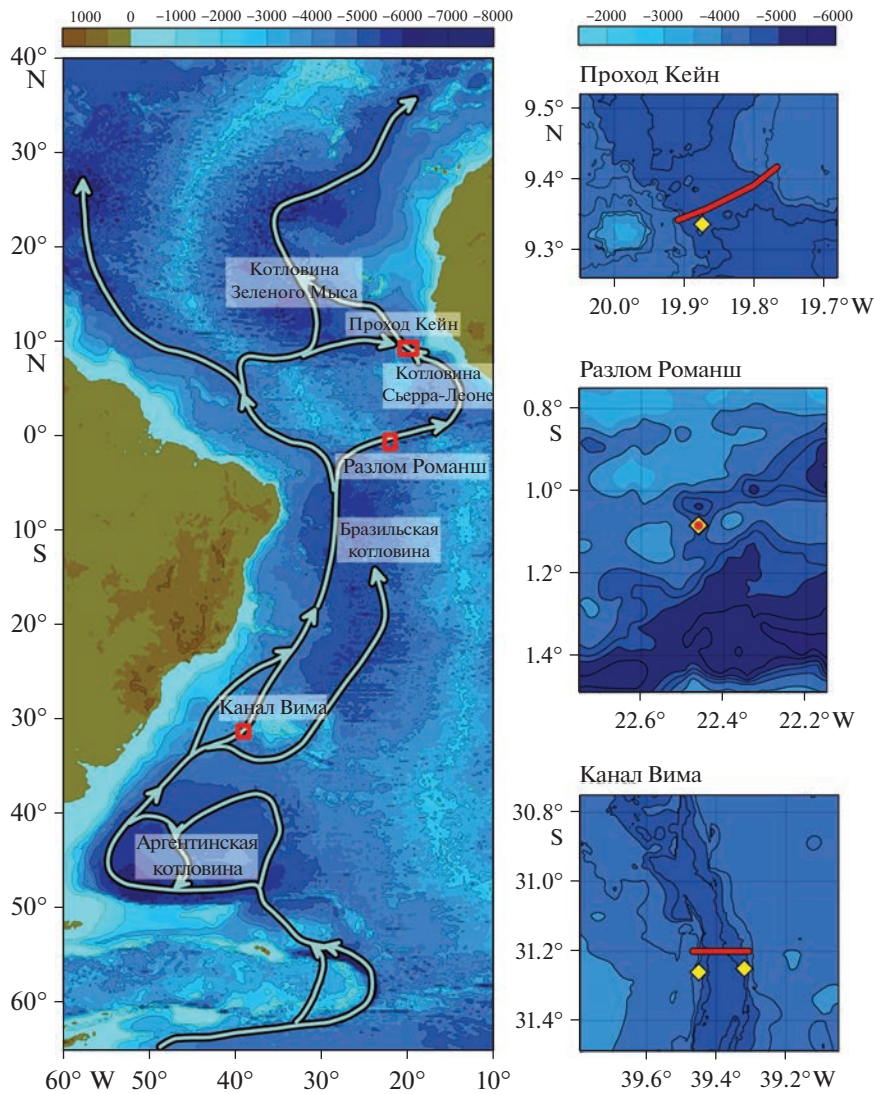


Рис. 1. Топография дна района исследования, схема распространения ААДВ по дну Атлантики (белыми стрелками) и ключевые пороги на пути распространения антарктических вод. Желтые ромбы – заякоренные станции, красным цветом показаны разрезы, выполненные погружными приборами. Топография дна представлена по данным GEBCO 2021 [15].

Работы по исследованию глубоководных частей океана сложны и дорогостоящи и, как правило, требуют непосредственного участия научно-исследовательских судов. Измерения со спутников затрагивают только поверхностный слой океана; численное моделирование, за редким исключением [11, 12, 31], более широко используется для исследования верхнего слоя океана; работы на основе буев Deep Argo также пока малочисленны [18] и не позволяют исследовать структуру потоков в узких абиссальных каналах. Что касается судовых наблюдений, существуют два способа измерений, позволяющие получить данные по течениям в абиссальных каналах. Первый метод заключается в профилировании с научно-исследо-

вательских судов с одновременным использованием STD-зондов (Conductivity, Temperature, Depth) и погружных акустических доплеровских профилографов течений (LADCP – Lowered Acoustic Doppler Current Profiler). Вторым методом – это постановки заякоренных автономных буйковых станций с измерителями температуры и скоростей течений. В работах разных авторов данные, полученные STD-зондированием, в основном используются для определения распространения водной массы, ее потенциальной температуры, солёности [23]. Данные, полученные профилографами течений, дают возможность определять скорость и направления водных потоков, оценивать перенос донных вод между отдельными кот-

ловинами. STD- и LADCP-измерения проводились во многих абиссальных каналах. Однако, для того чтобы исследовать изменчивость придонных потоков на протяжении длительного времени, необходимо использовать заякоренные автономные буйковые станции. В работе [33] представлены результаты анализа температурного режима на основе измерений, которые проводились с 1998 по 2000 гг. в канале Вима. Особенности распределения ААДВ в канале Вима на основе STD/LADCP-измерений рассмотрены в работах [5, 26]. Измерения, выполненные в разломе Вима, позволили подробно рассмотреть движение и выполнить оценку переноса ААДВ [1]. В работе [2] проанализировано распространение ААДВ в проходе Дискавери. Также на основе данных с заякоренных станций были рассмотрены долгопериодные температурные изменения в канале Вима в работах [10, 34]. Проводился анализ статистических характеристик временных рядов по данным с заякоренных станций с 1979 по 2007 гг. в работе [35]. В разломе Романш по данным STD/LADCP и автономных заякоренных станций были исследованы динамические процессы в районе интенсивного затока вод в разлом [16, 30].

Несмотря на большой ряд работ как отдельно по данным профилирования, так и по данным заякоренных станций, до сих пор практически не было выполнено исследований по сравнению данных, получаемых двумя различными методами. В работе [10] приведены данные как STD-зондирования, так и данных заякоренной станции в канале Вима. В этой работе показано, что два подхода могут давать заметно различный результат в определении долговременных трендов изменения температуры. В частности, это связано с большим горизонтальным поперечным градиентом температуры в придонном слое канала Вима. Измерения STD-зондом на протяжении многих лет проводились около восточной стенки канала для сравнения в разные годы. Буйковая станция стояла в центре канала, где температура была немного выше за счет горизонтального градиента температуры. Известно, что оценки переноса ААДВ в абиссальных каналах, выполненные двумя разными методами, имеют достаточные существенные несоответствия [4, 23]. Точные количественные сравнения между данными STD/LADCP и данными автономных измерений в абиссальных каналах Атлантики ранее не проводились. Поэтому в данной работе сравниваются одномоментные измерения температуры донных вод и скорости течений, полученные с помощью STD/LADCP-профилографов, и данные, полученные с заякоренных станций. Для работы были выбраны канал Вима, разлом Романш и проход Кейн, где работы погружным оборудованием совпадали по времени с работой заякоренных станций.

2. ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

Параллельное использование STD- и LADCP-зондов для погружных станций, так же как и использование набора из датчиков температуры, давления и акустических измерителей течений в заякоренных станциях является современным способом получения информации о гидрофизических процессах в абиссальном слое океана. Ниже представлена подробная информация по используемым STD/LADCP-зондам (раздел 2.1), оборудованию на автономных заякоренных станциях (раздел 2.2), а также использованным для сравнения данным (раздел 2.3).

2.1. STD/LADCP-зондирования

STD-зондирования выполнялись с помощью зонда SBE 19 plus SEACAT фирмы SeaBird, предназначенного для работы на глубинах до 6800 м. Прибор позволяет получить вертикальный профиль температуры и электропроводности. На основе этих физических величин рассчитываются глубина, потенциальная температура, соленость, потенциальная плотность и другие необходимые параметры. SBE 19 plus работал непрерывно, со скоростью четыре сканирования в секунду (4 Hz).

Параллельно с STD-зондом для измерения вертикального профиля скоростей использовался погружной акустический доплеровский профилограф течений LADCP модели Workhorse Sentinel 300 kHz. Прибор работал в погружном режиме (lowered), в режимах “bottom track” и “water track”. В режиме “water track” прибор измеряет скорость движения воды относительно прибора по сигналу, испускаемому на рабочей частоте с некоторой дискретностью по времени. В режиме “bottom track” измеритель автоматически определяет положение прибора относительно дна на расстоянии до 300 м по дополнительному импульсу, испускаемому на вдвое меньшей частоте и с большей дискретностью по времени. STD/LADCP-зонды монтировались на один комплекс SBE 32 Carousel Water Sampler (розетку). Профили температуры, солёности и скорости течения получают параллельно за одно зондирование.

2.2. Автономные буйковые заякоренные станции

Буйковые заякоренные станции были оснащены измерителями течений и серией датчиков температуры на тросе, натянутом между якорем на дне и глубоководной плавучестью. Измерения течений велись автономно с интервалом от 10 мин до 2 ч. Так как это долговременные станции, то полученные данные дают возможность анализировать изменения, происходившие в водных массах за все время работы станций.

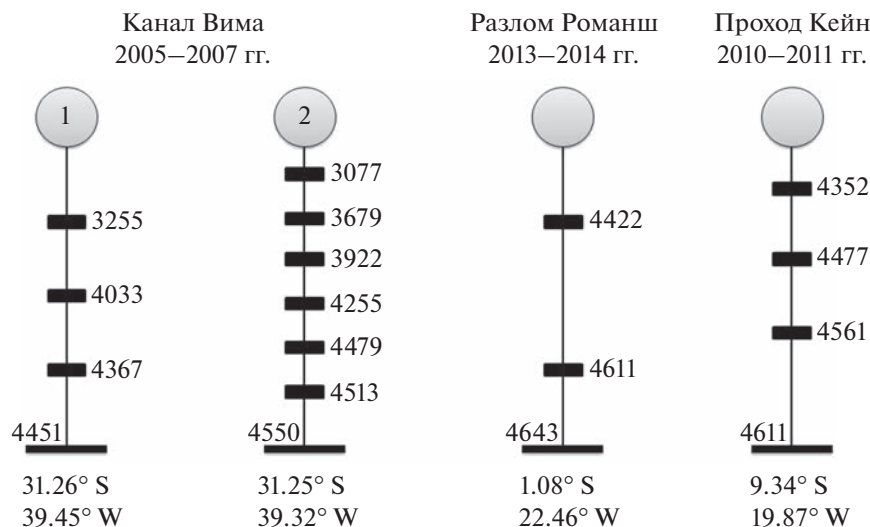


Рис. 2. Схемы, координаты, время работы буйковых заякоренных станций в канале Вима, разломе Романш, проходе Кейн. Серыми кружками обозначены элементы плавучести. Цифрой 1 обозначена автономная станция у западного склона канала Вима, цифрой 2 — у восточного. Черными прямоугольниками показаны датчики температуры и акустические профилографы скорости течений, цифрами справа от них указаны горизонты их постановки. Внизу схемы обозначены глубины постановки автономных буйковых станций. Под схемами даны координаты постановки буйковых станций.

Оба способа измерений имеют свои преимущества и недостатки. В целом, отдельные зондирования позволяют относительно быстро получать информацию о пространственной структуре придонного потока в определенном районе. Автономные заякоренные станции позволяют исследовать временную изменчивость течений. При анализе данных, полученных этими методами, важно понимать ограничения обоих методик. В частности, заякоренные станции отражают изменчивость скорости потока только в отдельно выбранной точке, и таких точек мало. Выбор координат постановки автономных заякоренных станций становится особенно важным в относительно широких проходах, где меандрирование потока может быть трактовано как ослабление или усиление придонного потока. Самая быстрая струя может проходить мимо измерителя течений. Разрез LADCP лучше покрывает пространство, но не дает изменчивости потока во времени. В таких случаях совместное использование данных CTD/LADCP-зондирований и данных автономных станций становится особенно актуальным.

2.3. Используемые данные

В работе используются данные, полученные по пяти CTD/LADCP-зондированиям, выполненным в канале Вима в 2005 г., по пяти CTD/LADCP-зондированиям, выполненным в 2006 г., и по двум заякоренным станциям, которые работали в этот период в районе выполнения разрезов. Разрезы имеют четкое зональное направление

и располагаются перпендикулярно направлению движения потока, поэтому основное значение имеет меридиональная составляющая скорости.

В разломе Романш используются данные с одиночных погружных станций, выполненных в 2013 и в 2014 гг., и с заякоренной станции, координаты которой совпадают с координатами зондирований. Разлом Романш ориентирован с запада на восток. Однако исследуемая седловина находится в районе залива антарктических вод в разлом в его западной части. Поток ААДВ в придонном слое здесь ориентирован меридионально, с юга на север. Следовательно, в данной работе мы будем анализировать меридиональную компоненту измеренной скорости.

В проходе Кейн используются данные погружных и заякоренной станции за 2010 и 2011 гг. Канал имеет направление 330°. Разрезы выполнены перпендикулярно потоку. Для сравнительного анализа измерений были взяты данные с автономных буйковых заякоренных станций и ближайших CTD/LADCP-зондирований.

Для определения потенциальной температуры на буйковых станциях были взяты значения солёности, полученные с помощью интерполяции данных CTD-зондирований в точки, соответствующие местоположению датчиков заякоренных станций. Координаты и время проведения измерений представлены в табл. 1, расположения станций показаны на рис. 1. Измерения с судов проводились от поверхности до дна. Схемы буйковых станций показаны на рис. 2.

Таблица 1. Координаты, глубины и время CTD/LADCP-зондирований и автономных станций в канале Вима, разломе Романш и проходе Кейн

Канал Вима			
дата	станция	координаты	нижний горизонт, м
25.10.2005	1703	31°12.0' ю.ш., 39°18.3' з.д.	4360
26.10.2005	1704	31°12.0' ю.ш., 39°19.7' з.д.	4460
26.10.2005	1705	31°12.0' ю.ш., 39°21.9' з.д.	4520
26.10.2005	1706	31°12.0' ю.ш., 39°23.8' з.д.	4560
26.10.2005	1707	31°12.0' ю.ш., 39°26.3' з.д.	4540
11.11.2006	1860	31°12.0' ю.ш., 39°18.4' з.д.	4400
12.11.2006	1861	31°12.0' ю.ш., 39°20.1' з.д.	4500
12.11.2006	1862	31°11.9' ю.ш., 39°23.4' з.д.	4580
12.11.2006	1863	31°12.0' ю.ш., 39°26.3' з.д.	4560
12.11.2006	1864	31°12.0' ю.ш., 39°28.0' з.д.	4120
30.05.2005–18.05.2007	Заякоренная станция	31°15.6' ю.ш., 39°27.0' з.д.	3255, 4033, 4367
31.05.2005–18.05.2007	Заякоренная станция	31°15.0' ю.ш., 39°19.2' з.д.	3077, 3679, 3922, 4255, 4479, 4513
Разлом Романш			
8.10.2013	2513	1°5.2' ю.ш., 22°27.8' з.д.	4688
16.04.2014	2537	1°5.0' ю.ш., 22°27.7' з.д.	4688
8.10.2013–16.04.2014	Заякоренная станция	1°5.0' ю.ш., 22°27.7' з.д.	4422, 4611
Проход Кейн			
20.10.2010	2423	9°20.5' с.ш., 19°54.2' з.д.	4504
20.10.2010	2424	9°21.1' с.ш., 19°52.8' з.д.	4464
20.10.2010	2425	9°22.2' с.ш., 19°50.9' з.д.	4568
21.10.2010	2426	9°23.3' с.ш., 19°48.6' з.д.	4560
18.10.2011	2461	9°25.0' с.ш., 19°46.0' з.д.	4384
18.10.2011	2462	9°23.5' с.ш., 19°48.0' з.д.	4544
19.10.2011	2463	9°22.4' с.ш., 19°50.1' з.д.	4560
19.10.2011	2464	9°21.5' с.ш., 19°52.0' з.д.	4536
19.10.2011	2465	9°20.5' с.ш., 19°54.5' з.д.	4488
21.10.2010–18.10.2011	Заякоренная станция	9°20.1' с.ш., 19°52.5' з.д.	4352, 4477, 4561

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Термохалинная структура Антарктической донной воды изменяется по мере продвижения из Южного полушария в Северное за счет перемешивания с вышележащей Северо-Атлантической глубинной водой. На построенных разрезах для описания структуры водных масс были определены границы Антарктической донной воды и границы глубинных вод моря Уэдделла; границы водных масс определялись по изотермам потенциальной температуры 2 и 0.2°C соответственно. Несоответствия температуры и компоненты скорости течений, измеренных разными методами, анализируются в трех различных диапазонах глубин: внутри канала, над каналом в слое ААДВ и выше изотермы 2°C. Для сравнения измерений, полученных CTD/LADCP-зондированиями, с из-

мерениями заякоренных станций в табл. 2, 3, 4, 5 собраны данные по температуре T , потенциальной температуре θ , U - и V -компонентам скорости течений автономных станций, данные по температуре и потенциальной температуре с CTD-зондов, зональной (U) и меридиональной (V) составляющих скорости с погружных акустических доплеровских профилографов течений (LADCP). Также в таблицах есть значения разницы между измерениями зондов и датчиков автономных станций.

3.1. Канал Вима

В канале Вима в 2005 и 2006 гг. были выполнены зональные разрезы по 31°12' ю.ш. поперек абиссального потока. Распределения потенциаль-

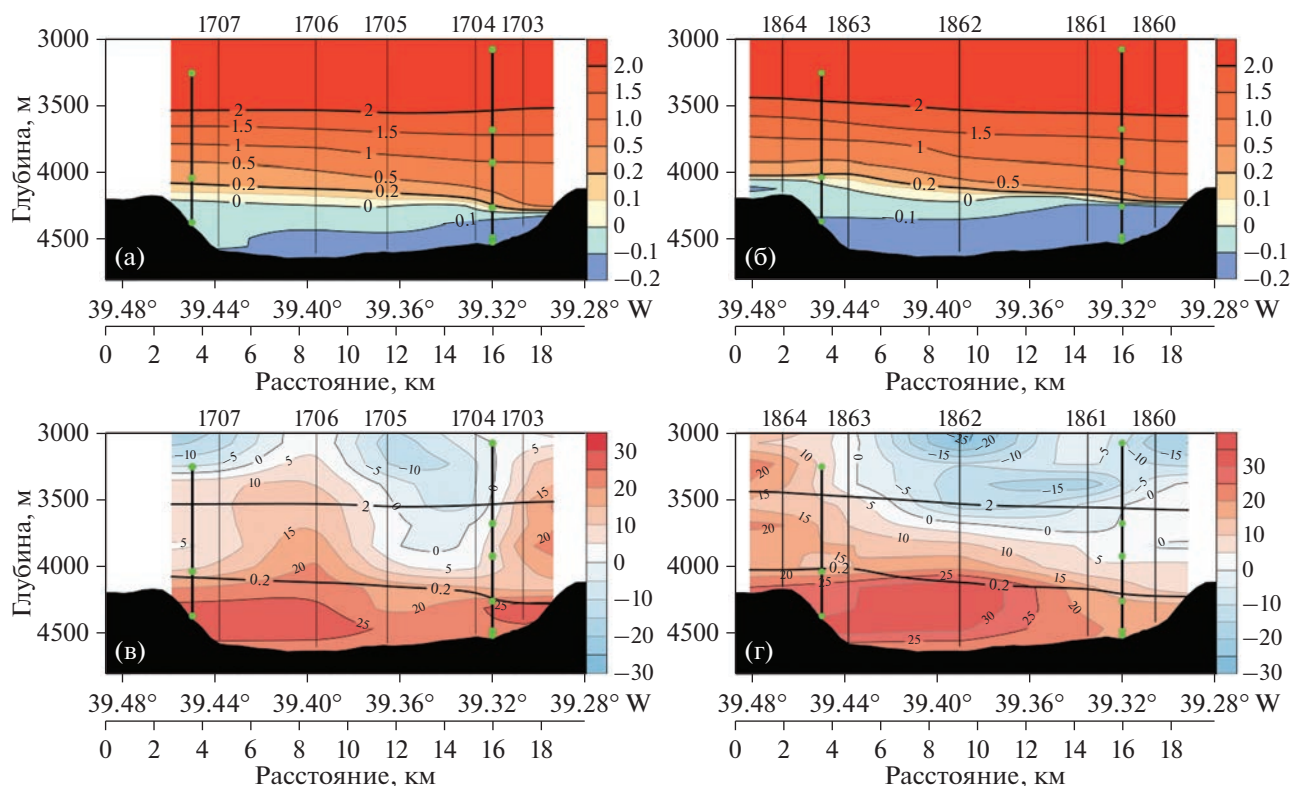


Рис. 3. Зональные разрезы в канале Вима, выполненные в 2005 (а, в) и 2006 (б, г) гг. На рисунках (а) и (б) показаны распределения потенциальной температуры в °С, на рисунках (в) и (г) — меридиональная составляющая скорости в см/с для 2005 и 2006 гг. соответственно. Жирными горизонтальными черными линиями показаны изотермы 2 и 0.2°С, определяющие слои ААДВ и глубинных вод моря Уэдделла соответственно. Зеленые кружки показывают горизонты, на которых были установлены датчики температуры и измерители скорости течений на закоренных буйковых станциях (жирные вертикальные линии). Положительные значения меридиональной компоненты соответствуют направлению на север.

ной температуры и меридиональной составляющей скорости течения представлены на рис. 3.

На рис. 3а и 3б можно отметить, что наиболее холодные воды, имеющие потенциальную температуру ниже -0.1°C , проходят по дну канала. Это явление хорошо известно и объясняется влиянием экмановского трения, которое в Южном полушарии смещает воду в придонном слое вправо от основного потока [14, 19]. У восточной стенки канала поток холодной воды поднимается до 4250–4300 м в оба года. Однако есть разница в ее распределении в западной части канала. В 2005 г. изотерма -0.1°C доходит до подножия западного склона на глубине 4550 м. В 2006 г. она поднимается выше, примерно до середины западной стенки канала на глубину 4350 м. При этом и в 2005, и в 2006 гг. изотерма, характеризующая границу глубинных вод моря Уэдделла ($\theta = 0.2^{\circ}\text{C}$), располагается у восточной стенки канала Вима на глубине 4200–4250 м и свободно проходит над его западным склоном на глубине 4000 м. Следовательно, объемный перенос этих вод в оба года практически одинаковый, но в 2006 г. средняя потенциальная тем-

пература придонного слоя ниже. Изотерма 2°C , которая принята для определения границы ААДВ, проходит, в среднем, на глубине 3500 м. При рассмотрении меридиональной составляющей скорости потока (рис. 3в и 3г) видно, что внутри стенок канала поток движется на север. В 2005 г. есть два ядра скорости: одно находится у западного склона в 50–350 м от дна и распространяется до середины канала, второе, меньших размеров, мощностью 150 м — у восточного склона. Максимальные скорости в этих потоках — 26–27 см/с. В 2006 г. наблюдается только одно ядро скорости, оно начинается у западного склона и охватывает больше половины ширины канала. Ядро приподнято на 100 м от дна, охватывает слой толщиной до 400 м и имеет максимальное значение скорости 34 см/с. На глубинах более 3000 м также видны противотечения, которые частично захватывают ААДВ. В 2005 г. изменение направления движения потока происходит на глубине 3900 м. В 2006 г. изменение направления потока располагается на глубине 3700 м над центральной и восточной частями канала. Максимальные значения скорости в этих потоках располагаются выше

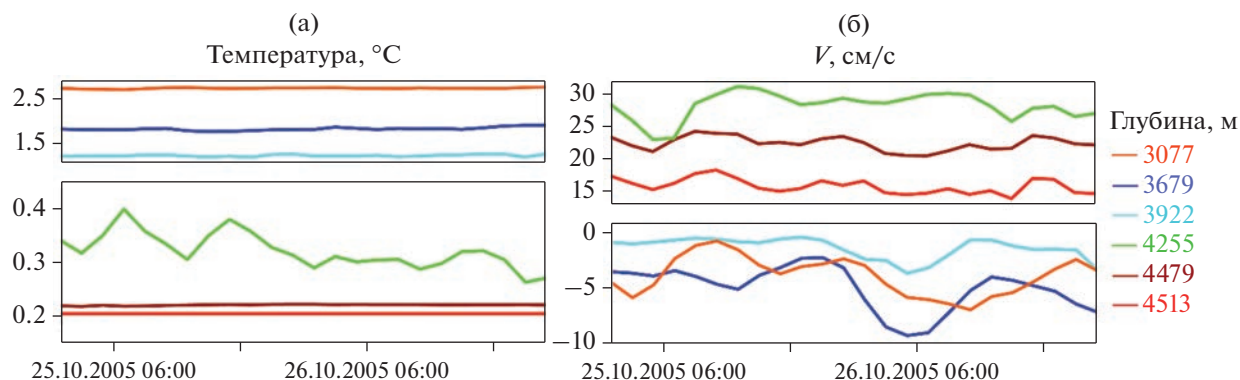


Рис. 4. Временная изменчивость температуры (а) и меридиональной компоненты скорости (б). Данные взяты с датчиков автономной заякоренной станции, находящейся у восточного склона канала Вима. Рассматривается период с 01:00 25 октября 2005 г. по 23:00 26 октября 2005 г.; в этот же период проходили измерения на поперечном CTD/LADCP-разрезе. Положительные значения меридиональной компоненты соответствуют направлению на север.

изотермы 2°C . В 2005 г. $10\text{--}11\text{ см/с}$ — на глубине 3200 м, а в 2006 г. 25 см/с на — глубине 3000 м.

Для определения изменчивости температуры и меридиональной компоненты скорости были построены временные ряды измерений на автономных станциях (рис. 4).

На заякоренной станции измерения выполнялись каждые два часа. Датчики на горизонтах 3077, 3679, 3922 (датчики 6, 5, 4) находятся выше стенок канала. На самом глубоком горизонте (4513 м) за весь рассматриваемый период не было зафиксировано изменений температуры. Возможно, это произошло из-за технического сбоя прибора, или изменения температуры были меньше погрешности прибора. На глубине 4479 м амплитуда колебаний температуры составляла 0.004°C . Самые большие колебания температуры наблюдались на третьем от дна датчике, на глубине 4255 м (верхняя граница канала), и на пятом датчике на глубине 3679 м, в диапазонах 0.135 и 0.137°C соответственно. На горизонте 3922 м (четвертый датчик) амплитуда колебаний достигала 0.072°C , в то время как на самом верхнем горизонте (3077 м) — 0.056°C .

На рис. 4б положительные значения меридиональной компоненты соответствуют направлению на север. Верхние датчики, находящиеся над каналом, показывают направление потока на юг, внутри канала — на север. На горизонтах 4513 и 4479 (самые глубокие датчики) зафиксирована максимальная амплитуда значений V -компоненты в 4 см/с . Третий и пятый датчик показали самые большие амплитуды, 8 и 7 см/с соответственно. На горизонте 3922 — 3 см/с , а на самом верхнем горизонте — 6 см/с .

Можно сделать вывод, что в придонном слое наблюдаются наименьшие колебания как по температуре, так и по скорости. Большие колебания этих значений наблюдаются в зоне высоких гра-

диентов на верхней границе канала и над каналом. По всей видимости, низкие вариации исследуемых характеристик в канале объясняются слабой вертикальной стратификацией вод, а также относительной стабильностью потока ААДВ по сравнению с потоками над каналом.

Сравнение измерений, полученных в ходе CTD/LADCP-зондирований, с измерениями на заякоренных станциях в 2005 г. в канале Вима показало, что измерения температуры с CTD-зонда практически на всех рассматриваемых горизонтах дают завышение значений (табл. 2).

Наилучшая сходимость значений зафиксирована для придонных измерений у восточного склона на горизонте 4479 м ($\Delta T = 0.000^{\circ}\text{C}$). С уменьшением глубины расхождения в измерениях увеличиваются. На глубине 4255 м расхождения составляют тысячные доли градуса ($\Delta T = 0.006^{\circ}\text{C}$), выше глубины 3900 м и до верхней границы ААДВ они становятся близки к 0.1°C . В точке, находящейся выше изотермы 2°C , над восточным склоном на горизонте 3077 м, разница между данными CTD-зонда и датчика с заякоренной станции уменьшается до 0.06°C . Измерения, проведенные у западного склона, показывают, что в слое ААДВ лучшее сходжение данных — у придонных измерений на горизонте 4367 м, но даже тут разница составляет -0.021°C . Это единственное измерение, в котором значения с CTD-зонда меньше по сравнению с датчиком заякоренной станции. Различия на горизонте 4033 м, который также находится в слое Антарктической донной воды, уже равно 0.144°C . На глубине 3255 м (выше изотермы 2°C) расхождения в значениях ΔT становятся меньше и составляют 0.014°C .

Канал Вима имеет меридиональное направление, поэтому V -компонента скорости является основной и должна быть значительно больше U -компоненты. Измерения показали, что это

Таблица 2. Данные по температуре, потенциальной температуре, U - и V -компонентам скорости в канале Вима по результатам STD/LADCP-зондирований (станция 1704 располагается в восточной части канала, станция 1707 – у западного склона) и по измерениям двух заякоренных станций. Приведены разницы между значениями STD/LADCP и датчиками заякоренных станций. Измерения проводились в 2005 г. Прочерком показано отсутствие данных

№ станций	Канал Вима, 2005 г.							
	1704				1707			
Горизонты, м	3077	3679	3922	4255	4479	3255	4033	4367
T (буй), °C	2.733	1.850	1.224	0.307	0.223	2.710	0.414	0.261
T (STD), °C	2.793	1.956	1.319	0.313	0.223	2.724	0.558	0.240
θ (буй), °C	2.476	1.550	0.913	-0.014	-0.120	2.435	0.115	-0.071
θ (STD), °C	2.534	1.652	1.006	-0.006	-0.119	2.448	0.255	-0.089
ΔT , °C	0.060	0.106	0.095	0.006	0.000	0.014	0.144	-0.021
$\Delta\theta$, °C	0.058	0.102	0.093	0.008	0.001	0.013	0.140	-0.018
U (буй), см/с	2.2	3.9	3	-2	–	0.2	-2.6	2.3
U (LADCP), см/с	-2	10.6	7.2	-6	–	-2.7	2.9	-2.4
V (буй), см/с	-6.4	-7.2	-1.9	30.1	–	0.3	15.9	20.8
V (LADCP), см/с	-2	-1.2	3.6	25.2	–	-2.6	6.4	28.5
ΔU , см/с	-4.2	6.7	4.2	-4	–	-2.9	5.5	-4.7
ΔV , см/с	4.4	6	5.5	-4.9	–	-2.9	-9.5	7.7

условие практически всегда выполняется, кроме горизонтов 3679 и 3922 м у восточного склона, где U -компонента в 2 раза и более превышает V -компоненту. Это может быть связано с тем, что измерения попали в слой перемешивания двух противоположно направленных потоков. Наибольшие значения меридиональной компоненты скорости зафиксированы на самых близких ко дну горизонтах; это показывают и LADCP, и измерители скорости на заякоренных станциях. Разница между данными скоростей, полученных разными методами, в слое ААДВ увеличивается с уменьшением глубины: от -4 до 6.7 см/с для U -компоненты и от -4.9 до 6 см/с для V -компоненты скорости у восточного склона; от -4.7 до 5.5 см/с и 7.7 до -9.5 см/с для U - и V -компонент, соответственно, у западного склона. В точках, находящихся выше 3500 м, т.е. выше слоя ААДВ, разница между значениями компонент скорости уменьшается. Над восточной стенкой канала она принимает значения -4.2 и 4.4 см/с для U - и V -компонент соответственно, над западной стенкой становится равной -2.9 см/с для обеих компонент.

Сравнение данных по температуре, полученных в 2006 г., так же, как и в 2005 г., показывают частое завышение значений с STD-зондов (табл. 3).

Измерения температуры в восточной и западной частях канала Вима имеют наименьшую разность измеряемых параметров на горизонтах, которые находятся ближе всего ко дну. У восточного склона на горизонте 4255 м разница температур составляет $\Delta T = -0.029^\circ\text{C}$. У западного склона на

горизонте 4367 м эта разница меньше и составляет $\Delta T = -0.010^\circ\text{C}$. В слое ААДВ с уменьшением глубины разница в показаниях приборов увеличивается. У восточного склона, на горизонте 3922 м, она составляет $\Delta T = 0.044^\circ\text{C}$, на горизонте 3679 м – уже $\Delta T = 0.142^\circ\text{C}$. У западного склона на горизонте 4033 м $\Delta T = 0.132^\circ\text{C}$. На горизонтах выше изотермы 2°C расхождения в измерениях уменьшаются и принимают значения $\Delta T = 0.052^\circ\text{C}$ над восточным склоном (глубина 3077 м) и $\Delta T = 0.005^\circ\text{C}$ над западным (глубина 3255 м).

При сравнении компонент скорости видно, что в самых глубоких точках наибольшие расхождения наблюдаются у меридиональной компоненты скорости. В восточной части канала на горизонте 4255 м расхождение составляет -12.1 см/с, в западной части – -7 см/с. С уменьшением глубины эта разница становится меньше. Над восточным склоном на горизонтах 3922 и 3679 м различия составляют -2.3 и 2.3 см/с соответственно. Над западным склоном на глубине 4033 м разница также невелика, $\Delta V = -2.5$ см/с. Зональные компоненты, в отличие от меридиональных, в самых глубоких точках имеют меньшие расхождения в 3.4 см/с у восточной стенки канала и -5 см/с у западной. С уменьшением глубины разница в измерениях LADCP и буйковых станций становится в несколько раз больше. В восточной части канала на горизонтах 3922 м $\Delta U = 19.5$ см/с, на 3679 м $\Delta U = 17.7$ см/с. Именно в этих точках по измерениям LADCP и профилографов автономных станций зафиксировано превышение в несколько раз величины меридиональной компо-

Таблица 3. Данные по температуре, потенциальной температуре, U - и V -компонентам скорости в канале Вима по результатам STD/LADCP-зондирований (станция 1704 располагается в восточной части канала, станция 1707 – у западного склона) и по измерениям двух заякоренных станций. Приведены разницы между значениями STD/LADCP и датчиками заякоренных станций. Измерения проводились в 2006 г.

№ станций	Канал Вима, 2006 г.						
	1860				1863		
Горизонты, м	3077	3679	3922	4255	3255	4033	4367
T (буй), °C	2.694	1.965	1.426	0.225	2.641	0.330	0.230
T (STD), °C	2.746	2.107	1.470	0.196	2.646	0.462	0.220
θ (буй), °C	2.438	1.661	1.110	-0.093	2.367	0.033	-0.101
θ (STD), °C	2.488	1.799	1.153	-0.120	2.371	0.162	-0.109
ΔT , °C	0.052	0.142	0.044	-0.029	0.005	0.132	-0.010
$\Delta\theta$, °C	0.050	0.138	0.043	-0.027	0.004	0.129	-0.008
U (буй), см/с	3	-1.9	-4.2	-1.4	-1.7	-6	-4.7
U (LADCP), см/с	2.3	15.8	15.3	2	-2.9	-16.1	-9.7
V (буй), см/с	-8.7	0	5.5	28.8	-13.7	22	31.5
V (LADCP), см/с	-18.9	2.2	3.2	16.7	0.8	19.5	24.5
ΔU , см/с	-0.7	17.7	19.5	3.4	-1.2	-10.1	-5
ΔV , см/с	-10.2	2.2	-2.3	-12.1	14.5	-2.5	-7

ненты скорости над зональной. В западной части на горизонте 4033 м $\Delta U = -10.1$ см/с. Сравнение данных в точках с глубинами меньше 3500 м (выше потока ААДВ) показывает минимальное расхождение примерно в 1 см/с.

В канале Вима в 2005 г. наименьшие абсолютные ошибки температуры и U , V -компонент скорости наблюдаются внутри канала и выше слоя ААДВ. В 2006 г. различия температуры и зональной компоненты скорости распределяются так же, как в 2005 г. Расхождение у меридиональной компоненты скорости минимально над каналом внутри слоя ААДВ.

3.2. Разлом Романш

В разломе Романш в 2013 и 2014 гг. были сделаны серии измерений. В этой работе анализируются данные, полученные с STD/LADCP на станциях 2513 (2013 г.) и 2537 (2014 г.), выполненных на седловине в западной части разлома. Измерения на этих станциях выполнялись при постановке и поднятии заякоренной буйковой станции. Профили потенциальной температуры, U - и V -составляющих скорости показаны на рис. 5.

По профилям потенциальной температуры видно, что ААДВ ($\theta < 2^\circ\text{C}$) распространяется в слое от дна до глубины 3750 м, минимальные значения потенциальной температуры у дна составляют 0.52°C . Глубинные воды моря Уэдделла ($\theta < 0.2^\circ\text{C}$) в разлом не доходят (рис. 5а). Этот процесс объясняется перемешиванием донных вод

по ходу их распространения на север и наличием орографических барьеров на этом пути.

В верхних слоях разлома Романш антарктические воды движутся медленнее и могут менять направление. Максимальные скорости потока ААДВ наблюдаются в придонном слое, не превышающем 200 м. Происходит резкое увеличение скорости с глубины 4400 до 4600 м. Ниже 4600 м скорости быстро уменьшаются при приближении ко дну (рис. 5б, 5в). Данные, полученные в 2013 г., показали изменения направления меридиональной составляющей скорости на глубине 4350 м с южного на северное. Максимальное значение V -компоненты скорости составляет 39 см/с. В 2014 г. меридиональная составляющая скорости в потоке ААДВ направлена на север и имеет максимальное значение 48 см/с. Зональные составляющие скорости имеют малые значения не только в верхних слоях ААДВ, но и в придонном слое (рис. 5б, 5в).

Для сравнения измерений, полученных в процессе STD/LADCP-зондирований, и измерений на заякоренных станциях в разломе Романш рассматриваются два горизонта внутри канала (4422 и 4611 м). Оба горизонта находятся в слое ААДВ. Выполнение STD/LADCP-зондирований совпало по времени с моментами постановки и поднятия автономной заякоренной станции. На придонном горизонте 4611 м $\Delta T = 0.03^\circ\text{C}$, на горизонте 4422 м $\Delta T = -0.037^\circ\text{C}$ (табл. 4). В 2014 г. на придонном горизонте (4611 м) разница в измерениях составляет 0.015°C , но на горизонте 4422 м она резко увеличивается до 0.183°C .

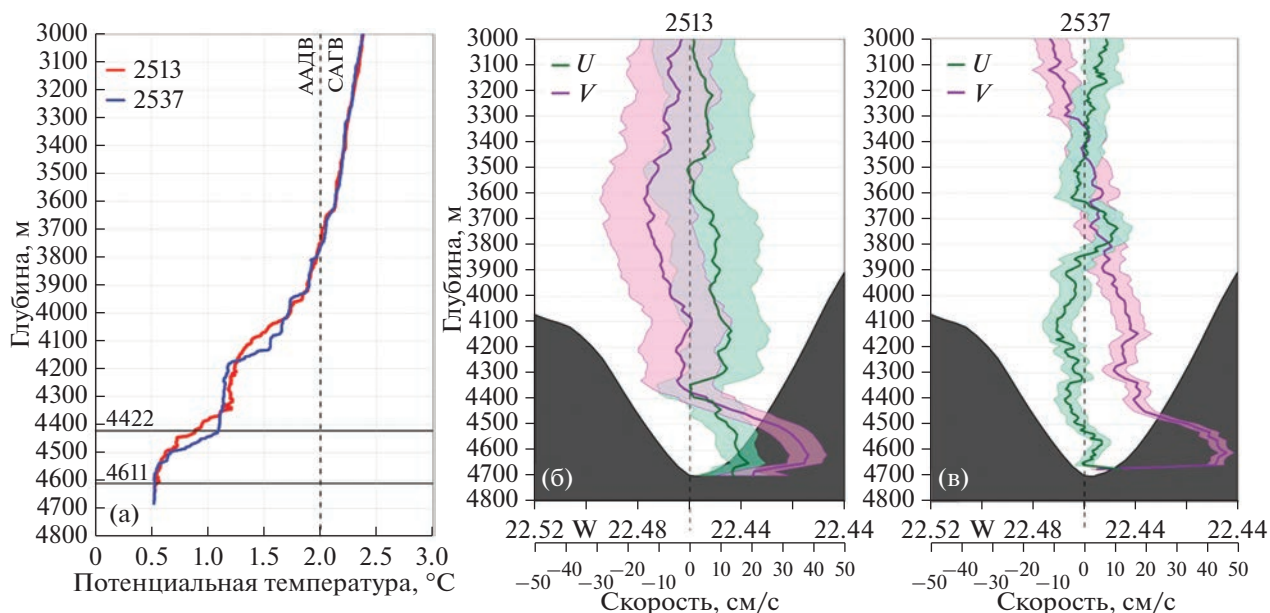


Рис. 5. Профили потенциальной температуры, полученные с CTD-зондирований на станциях 2513 (красная линия) и 2537 (синяя линия) (а). Сплошными черными линиями отмечены горизонты, на которых были поставлены датчики на заякоренной станции, подписаны их глубины; пунктирной линией — изотерма потенциальной температуры 2°C . Графики зональной (зеленые линии) и меридиональной (розовые линии) компонент скорости потока и оценки ошибок, выполненные алгоритмом обработки LADCP-данных LDEO (области, выделенные светло-зеленым и светло-розовым цветом), показаны по данным погружного LADCP на станциях 2513 (б) и 2537 (в), выполненных в разломе Романш в 2013 и 2014 гг. соответственно. Положительные значения зональной компоненты соответствуют направлению на восток, положительные значения меридиональной компоненты — направлению на север.

Самые большие значения компонент скорости и в 2013 и в 2014 гг. зафиксированы на наиболее глубоком горизонте (4611 м). В 2013 г. несоответствия между двумя методами измерения скорости увеличиваются с уменьшением глубины. На го-

ризонте 4611 м $\Delta U = 3.3$ см/с и $\Delta V = -9.8$ см/с, к глубине 4422 м эти значения увеличиваются до $\Delta U = 17.7$ см/с и $\Delta V = -10.2$ см/с. В 2014 г. эти несоответствия становятся существенно меньшими. На придонном горизонте $\Delta V = 0.9$ см/с, а на

Таблица 4. Данные по температуре, потенциальной температуре, U - и V -компонентам скорости в канале Вима по результатам CTD/LADCP-зондирований (станция 1704 располагается в восточной части канала, станция 1707 — у западного склона) и по измерениям двух заякоренных станций. Приведены разницы между значениями CTD/LADCP и датчиками заякоренных станций. Измерения проводились в 2013 и 2014 гг.

№ станций	Разлом Романш 2013 г.		Разлом Романш 2014 г.	
	2513		2537	
Горизонты, м	4422	4611	4422	4611
T (буй), $^{\circ}\text{C}$	1.290	0.890	1.280	0.890
T (CTD), $^{\circ}\text{C}$	1.253	0.921	1.463	0.905
θ (буй), $^{\circ}\text{C}$	0.920	0.511	0.911	0.511
θ (CTD), $^{\circ}\text{C}$	0.886	0.543	1.090	0.527
ΔT , $^{\circ}\text{C}$	-0.037	0.031	0.183	0.015
$\Delta\theta$, $^{\circ}\text{C}$	-0.034	0.032	0.179	0.016
U (буй), см/с	-9.6	12.5	-2.4	9.7
U (LADCP), см/с	8.1	15.8	-5.5	2.8
V (буй), см/с	20.1	47.8	19.7	45.2
V (LADCP), см/с	9.9	38	16.9	46.1
ΔU , см/с	17.7	3.3	-3.1	-6.9
ΔV , см/с	-10.2	-9.8	-2.8	0.9

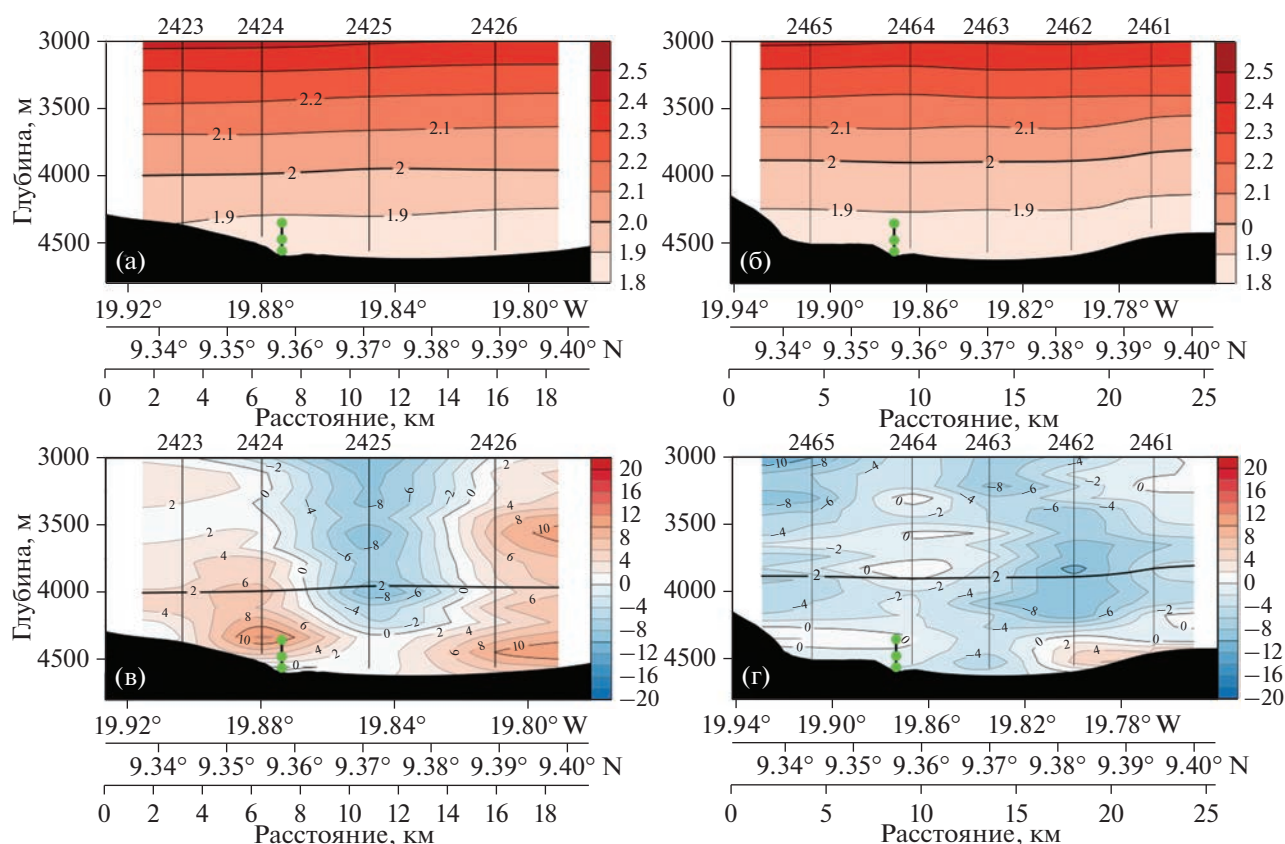


Рис. 6. Разрезы в проходе Кейн, выполненные в 2010 (а, в) и 2011 (б, г) гг. На рисунках (а) и (б) показано распределение потенциальной температуры в °С, на рисунках (в) и (г) – скорости потока в см/с для 2010 и 2011 гг. соответственно. Положительные скорости имеют направления вдоль прохода (330°). Обозначения на рисунке аналогичны рис. 3.

горизонте 4422 м $\Delta V = -2.8$ см/с. Расхождения в измерениях зональной компоненты становятся меньше с увеличением расстояния от дна (от -6.9 до -3.1 см/с).

3.3. Проход Кейн

В проходе Кейн в 2010 и 2011 гг. были проведены прямые измерения термохалинной структуры вод и скоростей течений (рис. 6).

Распределение потенциальной температуры в проходе Кейн говорит о том, что слой ААДВ в этом районе имеет толщину более 500 м, изотерма 2°C находится на глубине 4000 м в 2010 г. и на глубине 3800–3900 м в 2011 г. При анализе скорости движения потока водной массы в проходе Кейн видно, что в разные годы она имеет противоположные направления. В 2010 г. наблюдались два ядра скорости, направленные в сторону котловины Зеленого мыса. У западного склона ядро имеет максимальную скорость 12 см/с, у восточного склона – 10 см/с. Максимальные значения скоростей наблюдаются в придонном слое. Между этими потоками находится струя, которая имеет противоположное направление. Изменение на-

правления потока происходит на глубине 4300 м, а максимальные скорости зафиксированы на глубине 4000 м, что соответствует верхней границе ААДВ. В 2011 г. наблюдается совсем небольшая струя, направленная в сторону котловины Зеленого мыса у восточного склона; ее вертикальный размер составляет около 100 м, максимальные скорости – 5 см/с. Основная водная масса имеет противоположное направление. Этот поток неоднороден по скорости, значения в нем меняются от 0 до 10 см/с.

В проходе Кейн закоренная станция стояла в 2010–2011 гг. При ее постановке и снятии выполнялись STD/LADCP-зондирования (табл. 1). Не соответствия в измерениях датчиков температуры на горизонте 4352 м в оба года составляли около 0.01°C . На более глубоком горизонте (4477 м) в 2011 г. расхождение в показаниях датчиков увеличилось до $\Delta T = -0.023^\circ\text{C}$ (табл. 5).

В 2010 г. на горизонте 4352 м разница в измерениях меридиональной компоненты скорости составляла 8.1 см/с, а зональной – -7.6 см/с. По данным 2011 г. можно сказать, что с уменьшением глубины ΔU и ΔV увеличиваются. ΔU изменяется с -0.7 до 8.9 см/с, ΔV – с 7 до 9.3 см/с.

Таблица 5. Данные по температуре, потенциальной температуре, U - и V -компонентам скорости в канале Вима по результатам STD/LADCP-зондирований (станция 1704 располагается в восточной части канала, станция 1707 – у западного склона) и по измерениям двух заякоренных станций. Приведены разницы между значениями STD/LADCP и датчиками заякоренных станций. Измерения проводились в 2010 и 2011 гг.

№ станций	Проход Кейн, 2010 г.	Проход Кейн, 2011 г.	
	2424	2464	
Горизонты, м	4352	4352	4477
T (буй), °C	2.270	2.260	2.290
T (STD), °C	2.261	2.273	2.267
θ (буй), °C	1.880	1.870	1.883
θ (STD), °C	1.870	1.882	1.861
ΔT , °C	–0.009	0.013	–0.023
$\Delta \theta$, °C	–0.010	0.012	–0.022
U (буй), см/с	4.3	–8.4	–0.3
U (LADCP), см/с	–3.3	0.5	–1
V (буй), см/с	2.6	–8.5	–6.9
V (LADCP), см/с	10.7	0.8	0.1
ΔU , см/с	–7.6	8.9	–0.7
ΔV , см/с	8.1	9.3	7

4. ВЫВОДЫ

По данным STD/LADCP-зондирований верхняя граница ААДВ ($\theta = 2^\circ\text{C}$) в потоке через канал Вима, разлом Романш, проход Кейн постепенно опускается с 3500 м в первом глубоководном канале до 3750 м во втором и до 4000 м в третьем. Придонная температура при этом увеличивается по пути следования антарктических вод. Глубоководные воды моря Уэдделла с потенциальной температурой ниже 0.2°C не проходят дальше Бразильской котловины. Максимальные скорости потоков зафиксированы внутри каналов, в среднем в 100–300 м от дна. Измерения, сделанные автономной станцией в канале Вима, показали, что наименьшие колебания температуры и скорости потока наблюдаются внутри канала. На верхней границе канала и над ним эти колебания резко увеличиваются.

Сравнение данных по температуре и скорости, полученных с заякоренных буйковых станций и данных STD/LADCP-зондирований, показало несоответствия в измеренных значениях, достигающих 0.183°C и 17.7 см/с в придонном слое внутри каналов, 0.144°C и 19.5 см/с в слое ААДВ над каналами и 0.14°C и 14.5 см/с в более верхних слоях Северо-Атлантической глубинной воды. Это может быть связано как с инструментальными ошибками приборов, так и с пространственной и временной изменчивостью; при этом проведенный анализ показывает, что в отдельных точках пространственная изменчивость вносит существенно больший вклад, чем ошибки приборов. Только в разломе Романш измерения проводились в одной точке с заякоренной станцией.

В канале Вима и в проходе Кейн были взяты ближайшие по дистанции к заякоренным станциям точки, в которых проводились STD/LADCP-зондирования. Несоответствия, наблюдаемые в канале Вима, разломе Романш и проходе Кейн, имеют один порядок величины. Это говорит о том, что полученные качественные результаты, вероятно, применимы для любых абиссальных каналов с интенсивными придонными потоками ААДВ. Проведенное сравнение также показывает, что временная изменчивость температуры и скорости внутри каналов на масштабе от нескольких часов до суток в большинстве случаев вносит меньший вклад, чем пространственная изменчивость. Этот факт объясняется в первую очередь большими градиентами температуры и скоростей в поперечном придонном потоке направлении. При этом на больших временных масштабах изменчивость по времени становится существенной и должна приниматься во внимание при анализе STD/LADCP-зондирований, проводимых в отдельно взятые моменты времени. Большие горизонтальные градиенты характеристик придонных потоков обуславливают критичность корректного выбора мест установки заякоренных станций; малое смещение этих станций в пространстве может сильно влиять на получаемые результаты и должно приниматься во внимание при анализе данных.

Источники финансирования. Исследование проведено в рамках госзадания № FMWE-2021-0002 (судовые измерения) и при поддержке гранта РНФ № 21-77-20004 (анализ натуральных данных и интерпретация).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демидов А.Н., Добролюбов С.А., Морозов Е.Г., Тараканов Р.Ю. Перенос придонных вод через разлом Вима Срединно-Атлантического хребта // Доклады РАН. 2007. Т. 416. № 3. С. 395–399.
2. Капустина М.В., Кречик В.А. Распространение Антарктической донной воды в глубоководном проходе Дискавери (Северо-Восточная Атлантика) по данным натурных измерений 2019 г. // Океанология. 2021. Т. 61. № 5. С. 690–701. <https://doi.org/10.31857/S0030157421050051>
3. Морозов Е.Г., Демидова Т.А., Лапто С.С. и др. Распространение Антарктической донной воды через проход Вима // ДАН. 2003. Т. 390. № 3. С. 402–405.
4. Морозов Е.Г., Демидов А.Н., Тараканов Р.Ю. Перенос Антарктических вод в глубоководных каналах Атлантики // Доклады РАН. 2008. Т. 422. № 6. С. 815–818.
5. Морозов Е.Г., Тараканов Р.Ю. Вытекание Антарктической донной воды из канала Вима в Бразильскую котловину // Доклады РАН. 2014. Т. 456. № 2. С. 227–230. <https://doi.org/10.7868/S0869565214140217>
6. Морозов Е.Г., Тараканов Р.Ю., Демидов А.Н. Перенос придонных вод в проходе Кейн // Доклады Академии наук. 2010. Т. 433. № 4. С. 544–548.
7. Морозов Е.Г., Фрей Д.И., Нейман В.Г. и др. Экстремальные скорости переноса Антарктической донной воды в глубоководном канале Вима // Доклады Академии наук. 2019. Т. 486. № 4. С. 485–488. <https://doi.org/10.31857/S0869-56524864485-488>
8. Тараканов Р.Ю., Морозов Е.Г. Поток Антарктической донной воды на выходе из канала Вима // Океанология. 2015. Т. 55. № 2. С. 173–181. <https://doi.org/10.7868/S0030157415010165>
9. Borisov D., Frey D., Levchenko O. Sediment waves on the Santa Catarina plateau (western South Atlantic) // J. S. Am. Earth Sci. 2020. V. 102, 102698. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102698>
10. Campos E.J.D., van Caspel M.C., Zenk W. et al. Warming trend in Antarctic Bottom Water in the Vema Channel in the South Atlantic // Geophysical Research Letters. 2021. V. 48. № 19, e2021GL094709. <https://doi.org/10.1029/2021GL094709>
11. Frey D., Borisov D., Fomin V. et al. Modeling of bottom currents for estimating their erosional-depositional potential in the Southwest Atlantic // Journal of Marine Systems. 2022. 230(1), 103736. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2022.103736>
12. Frey D.I., Fomin V.V., Diansky N.A. et al. New model and field data on estimates of Antarctic Bottom Water flow through the deep Vema Channel // Doklady Earth Sciences. 2017. 474(1). P. 561–564. <https://doi.org/10.1134/S1028334X17050026>
13. Frey D.I., Fomin V.V., Tarakanov R.Y. et al. Bottom water flows in the Vema channel and over the Santos plateau based on the field and numerical experiments // In: Velarde M.G., Tarakanov R.Y., Marchenko A.V. (Eds.). The Ocean in Motion: Circulation, Waves, Polar Oceanography. Springer International Publishing, Cham, 2018. P. 475–485. https://doi.org/10.1007/978-3-319-71934-4_29
14. Frey D.I., Morozov E.G., Fomin V.V. et al. Regional modeling of Antarctic Bottom Water flows in the key passages of the Atlantic // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2019. V. 124. <https://doi.org/10.1029/2019JC015315>
15. GEBCO Compilation Group. 2021. GEBCO 2021 Grid. <https://doi.org/10.5285/c6612cbe-50b3-0cff-e053-6c86abc09f8f>
16. van Haren H., Goustaix L., Morozov E., Tarakanov R. Extremely long Kelvin Helmholtz billow trains in the Romanche fracture zone // Geophysical Research Letters. 2014. V. 41. № 23. P. 8445–8451. <https://doi.org/10.1002/2014GL062421>
17. Hogg N., Siedler G., Zenk W. Circulation and variability at the southern boundary of the Brazil Basin // Journal of Physical Oceanography. 1999. V. 29. P. 145–157. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1999\)029<0145:CAVATS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1999)029<0145:CAVATS>2.0.CO;2)
18. Johnson G.C., Cadot C., Lyman J.M. et al. Antarctic Bottom Water warming in the Brazil Basin: 1990s through 2020, from WOCE to Deep Argo // Geophysical Research Letters. 2020. V. 47, e2020GL089191. <https://doi.org/10.1029/2020GL089191>
19. Jungclauss J., Vanicek M. Frictionally modified flow in a deep ocean channel: Application to the Vema Channel // Journal of Geophysical Research. 1999. V. 104(C9). P. 21,123–21,136. <https://doi.org/10.1029/1998jc900055>
20. Klein B., Molinari R.L., Muller T.J., Seidler G. A transatlantic section at 14.5° N: Meridional volume and heat fluxes // Journal of Marine Research. 1995. V. 53. P. 929–957. <https://doi.org/10.1357/0022240953212963>
21. Mantyla A.W., Reid J.L. Abyssal characteristics of the World Ocean waters // Deep-Sea Research. 1983. V. 30(8). P. 805–833. [https://doi.org/10.1016/0198-0149\(83\)90002-X](https://doi.org/10.1016/0198-0149(83)90002-X)
22. Mercier H., Speer K.G. Transport of bottom water in the Romanche Fracture Zone and the Chain Fracture Zone // Journal of Physical Oceanography. 1998. V. 28(5). P. 779–790. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1998\)028%3c0779:TOBWIT%3e2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1998)028%3c0779:TOBWIT%3e2.0.CO;2)
23. Morozov E.G., Tarakanov R.Y., Frey D.I. Bottom Gravity Currents and Overflows in Deep Channels of the Atlantic. Observations, Analysis, and Modeling. Springer Nature: Berlin/Heidelberg, Germany, 2021. 483 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-83074-8>
24. 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. 2018. V. 74(2). P. 147–167. <https://doi.org/10.1007/s10872-017-0445-x>
25. Morozov E.G., Tarakanov R.Y., van Haren H. Transport of Antarctic Bottom Water through the Kane Gap, tropical NE Atlantic Ocean // Ocean Sci. 2013. V. 9. P. 825–835. <https://doi.org/10.5194/os-9-825-2013>
26. Morozov E.G., Zuev O.A., Frey D.I., Krechik V.A. Antarctic Bottom Water jets flowing from the Vema Channel // Water (MDPI). 2022. V. 14(21), 3438. <https://doi.org/10.3390/w14213438>

27. Orsi A.H., Johnson G.C., Bullister J.L. Circulation, mixing, and production of antarctic bottom water // *Prog. Oceanogr.* 1999. V. 43. P. 55–109.
[https://doi.org/10.1016/S0079-6611\(99\)00004-X](https://doi.org/10.1016/S0079-6611(99)00004-X)
28. Rhein M., Stramma L., Krahnemann G. The spreading of Antarctic Bottom Water in the tropical Atlantic // *Deep Sea Research Part I.* 1998. V. 45. P. 507–527.
[https://doi.org/10.1016/s0967-0637\(97\)00030-7](https://doi.org/10.1016/s0967-0637(97)00030-7)
29. Speer K.G., Zenk W. The flow of Antarctic Bottom Water into the Brazil Basin // *Journal of Physical Oceanography.* 1993. V. 23. P. 2667–2682.
[https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1993\)023<2667:TFOABW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1993)023<2667:TFOABW>2.0.CO;2)
30. Tarakanov R.Y., Morozov E.G., van Haren H. et al. Structure of the deep spillway in the western part of the Romanche Fracture Zone // *Journal of Geophysical Research: Oceans.* 2018. V. 123. № 11. P. 8508–8531.
<https://doi.org/10.1029/2018JC013961>
31. Wadley M., Bigg G. Abyssal channel flow in ocean circulation models with application to the Vema Channel // *Journal of Physical Oceanography.* 1995. V. 26. P. 38–48.
[https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1996\)026<0038:acfiog>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1996)026<0038:acfiog>2.0.co;2)
32. Wüst G. Schichtung und Zirkulation des Atlantischen Ozeans (ed. Defant A.) *Wissenschaftliche Ergebnisse, Deutsche Atlantische Expedition auf dem Forschungs- und Vermessungsschiff "Meteor" 1925–1927* // Berlin. 1936. Walter de Gruyter & Co. 6(1).
33. Zenk W. Temperature fluctuations and current shear in Antarctic Bottom Water at the Vema Sill // *Progress in Oceanography.* 2008. V. 77. № 4. P. 276–284.
<https://doi.org/10.1016/j.pocean.2006.05.006>
34. Zenk W., Morozov E.G. Decadal warming of the coldest Antarctic Bottom Water flow through the Vema Channel // *Geophysical Research Letters.* 2007. V. 34. L14607.
<https://doi.org/10.1029/2007GL030340>
35. Zenk W., Visbeck M. Structure and evolution of the abyssal jet in the Vema Channel of the South Atlantic // *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography.* 2013. V. 85. P. 244–260.
<https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2012.07.033>

Structure of Bottom Flows in Abyssal Channels of the Atlantic: Comparison of Autonomous and Vessel Observations in the Vema Channel, Romanche Fracture Zone, and Kane Gap

O. S. Mekhova^{a, b, #}, D. A. Smirnova^{a, c}, D. I. Frey^{a, d}

^a*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

^b*St. Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia*

^c*Moscow State University, Moscow, Russia*

^d*Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia*

[#]*e-mail: osmeh@yandex.ru*

Oceanographic data from measurements in deep-water channels of the Atlantic Ocean were analyzed. Data from two different methods were compared: CTD/LADCP measurements from research vessels and data from autonomous mooring stations. The comparison showed that discrepancies between the data obtained by two different methods can significantly exceed the instrumental accuracy of the instruments. This result highlights the importance of correct selection of mooring station locations in conditions of significant spatial gradients in measured characteristics. The results of the analysis showed that throughout the Antarctic waters pathway, the measurement differences are of the same orders of magnitude. Therefore, the conclusions can be valid for all abyssal channels with intense AABW flows.

Keywords: Antarctic bottom water, Vema Channel, Romanche Fracture Zone, Kane Gap, CTD, LADCP, autonomous mooring stations