УДК: 551.465

© *Д. И. Фрей*
Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия
dima.frey@gmail.com

МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ГЛУБОКОВОДНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ НА ПРИМЕРЕ ТЕЧЕНИЙ В АБИССАЛЬНЫХ КАНАЛАХ

Статья поступила в редакцию 16.12.2016, после доработки 06.05.2017.

Представлена методика обработки данных гидрофизических измерений, выполненных CTD и LADCP профилографами. Профили скорости, солености и температуры были измерены в разломе Вима (11° с.ш.) в северной части Срединно-Атлантического хребта на НИС «Академик Сергей Вавилов» в сентябре 2015 г. и апреле 2016 г. Целью является исследование термохалинных и динамических характеристик потока Антарктической донной воды через разлом Вима. Этот абиссальный канал соединяет глубоководные котловины Восточной и Западной Атлантики и играет ключевую роль в распространении Антарктической донной воды. Мы анализируем термохалинные свойства донных вод на 6 гидрофизических станциях. Для учета горизонтального движения измерительного комплекса при обработке скоростей используется линейный обратный метод расчета профилей скорости. Скорости течений корректируются по спутниковым альтиметрическим данным с учетом приливных скоростей, рассчитанных по модели TPXO Орегонского университета. Скорости течения основного потока через северный канал составляют более 40 см/с. В этой работе мы также используем данные глобальных моделей батиметрии и наших эхолотных промеров. Разрезы скорости, температуры и солености в перпендикулярном каналам направлении представлены для двух основных частей разлома Вима. Известные скорости и геометрия канала позволяют рассчитывать потоки донных вод между глубоководными котловинами Северной Атлантики.

Ключевые слова: CTD-измерения, профилограф течений ADCP, придонные течения, глубоководные каналы, распространение Антарктической донной воды.

D. I. Frey
P. P. Shirshov Institute of Oceanology of RAS, Moscow, Russia

DATA PROCESSING OF DEEP-SEA MEASUREMENTS APPLIED TO CURRENTS IN ABYSSAL CHANNELS

Received 16.12.2016, in final form 06.05.2017.

Data processing of hydrographic stations carried out by CTD and LADCP profilers is presented in detail. The CTD and current profiles were measured in the Vema Fracture Zone (11°N) of the Northern Mid-Atlantic Ridge onboard the R/V «Akademik Sergey Vavilov» in September 2015 and April 2016. The goal of these measurements is to study the thermohaline properties and velocities of the Antarctic bottom flow through the Vema FZ. This abyssal channel connects the deep basins of the East and West Atlantic and plays a crucial role in the propagation of Antarctic Bottom Water. We analyzed thermohaline properties of bottom waters at 6 hydrographic stations. In order to remove the effects of horizontal instrument motion from the LADCP measurements the velocity inversion method was applied. Current measurements were corrected by subtracting the tidal velocities using the TPXO model of the Oregon State University. Velocities of the main flow through the northern channel are more than 40 cm/s. In this study we also used the data of digital bathymetry and our echo-sounder measurements. Velocity, temperature and salinity sections across channels are presented for two main parts of the Vema FZ. Known velocities and geometry of the channel allow the calculation of bottom water transports between deep basins of the North Atlantic.

Key words: CTD-measurements, current profiler ADCP, near-bottom currents, deep-sea channels, propagation of Antarctic bottom water.

Ссылка для цитирования: *Фрей Д. И.* Методика обработки данных глубоководных измерений на примере течений в абиссальных каналах // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2017. Т. 10, № 2. С. 25—33.

For citation: *Frey D. I.* Data processing of deep-sea measurements applied to currents in abyssal channels. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika.* 2017, 10, 2, 25—33.

DOI: 10.7868/S2073667317020046.

Антарктическая донная вода (ААДВ, потенциальная температура $\theta < 2$ °C) представляет собой наиболее плотную воду, заполняющую придонный слой Атлантического океана. За счет перепада высот верхней границы ААДВ в высоких антарктических широтах и в тропической Атлантике возникают придонные гравитационные течения — более холодная и плотная Антарктическая донная вода распространяется на север по дну Атлантического океана под действием силы тяжести [1]. Донная вода медленно продвигается в больших океанских котловинах, а в узких каналах и разломах подводных хребтов, разделяющих эти котловины, поток резко сужается и ускоряется.

Исследования течений ААДВ в подобных понижениях в подводных хребтах важны для понимания придонной составляющей циркуляции Атлантики. Большие глубины не позволяют проводить измерения в автоматическом режиме с проходящих судов, дрейфующих буев и спутников, а малое количество экспериментальных данных о нижнем слое океана затрудняет численное моделирование придонных потоков. Это делает прямые измерения с научно-исследовательских судов основным источником информации об абиссальном слое океана.

Для исследования термохалинных характеристик морской воды применяются CTD-зонды [2], позволяющие измерять давление, температуру и электропроводность на всей глубине от поверхности до дна. Знание этих трех параметров позволяет рассчитать соленость, плотность и другие физические параметры воды.

Помимо указанных трех характеристик для изучения динамики водных масс необходимо измерять скорость течений. Один из методов определения скоростей — акустический. Погружной акустический доплеровский профилограф течений (Lowered Acoustic-Doppler Current Profiler, LADCP [3]) измеряет доплеровское смещение акустического сигнала, отраженного от различных частиц в морской воде и позволяет получать распределение горизонтальных и вертикальных скоростей на всей глубине станции.

Совместное применение CTD и LADCP зондов является стандартным современным методом для измерений на океанографической станции и позволяет всесторонне комплексно исследовать гидрологию происходящих процессов. Измеряемые с помощью указанных приборов данные требуют дальнейшей обработки, при этом процесс получения итоговых профилей температуры, солености и скоростей течения зачастую требует индивидуального подхода и не всегда может быть выполнен автоматически.

В литературе существует множество описаний работы с указанными приборами, как предоставленные изготовителями оборудования [4, 5], так и подробные обзоры по работе с ними других авторов [2, 3, 6]. Большая часть этих источников подробно описывает работу с выбранным типом оборудования, не представляя методику комплексных измерений. Целью данной работы является краткое описание основных принципов работ с комплексом глубоководного оборудования для измерения характеристик придонных течений.

В этой статье мы также обсуждаем результаты этих измерений, представляем термохалинную структуру придонных вод и динамические характеристики течений. Методика выполнения и обработки гидрологических станций представлена для шести станций в разломе Вима в северной части Срединно-Атлантического хребта. Данные были получены в 40 и 41 рейсах НИС «Академик Сергей Вавилов» в 2015—2016 гг.

Экспериментальное оборудование. Измерительные приборы для исследования характеристик водных масс на гидрологических станциях смонтированы на кассетном пробоотборнике SBE 32. Измерение профилей температуры и солености может производится с помощью различных CTD-профилографов [2]. В нашем случае измерения производятся с помощью профилографа SeaCat 19plus фирмы Sea-Bird Electronics [4]. Зонд может работать как в режиме прямого считывания online, так и в режиме записи во внутреннюю память. Связь с внешним компьютером через кабель-трос обеспечивается по 3-проводной линии в соответствии со стандартом RS232.

Для расчета солености, плотности и других характеристик морской воды важно, чтобы датчики температуры, электропроводности и давления измеряли эти параметры в одно и то же время и в одном и том же объеме воды. Однако в реальных условиях различия в постоянных времени различных датчиков и несинхронное измерение характеристик приводят к отклонениям параметров воды от истинных значений. Для устранения этих проблем в SBE 19plus используются: температурный датчик с быстрым откликом; датчик электропроводности с защищенной от внешних воздействий средой; точный кварцевый датчик давления. Кроме того, датчики температуры и электропроводности соединены трубкой,

позволяющей измерять параметры в одном и том же объеме воды. Одной из основных особенностей зондов фирмы Sea-Bird Electronics является помповая система прокачки воды через чувствительные элементы датчиков температуры и электропроводности [2].

Измерение скоростей течений производится с помощью акустического доплеровского профилографа Workhorse Sentinel 300 kHz версии 8.19 [5]. Принципом работы прибора является расчет скорости течения воды относительно своего положения по смещению фазы излучаемого и принимаемого акустических сигналов. Сигнал отражается от различных взвешенных частиц и планктона, находящегося в воде. В случае очень чистой воды, например на больших глубинах и в районах со слабой биологической продуктивностью, диапазон измерений прибора значительно сокращается.

Прибор имеет 4 излучателя, симметрично расположенных относительно вертикали под углом 20° к ней. Каждая из двух пар диаметрально расположенных излучателей измеряют вертикальную и одну горизонтальную составляющие скорости. Сравнение результатов измерения вертикальной скорости дает информацию об ошибке измерений. Ориентация прибора в момент измерений фиксируется магнитным компасом.

Прибор может использоваться как в погружаемом режиме, так и проводить измерения находясь в одной точке. При нахождении возле дна прибор фиксирует свое положение по дополнительному акустическому сигналу на вдвое меньшей частоте (т. н. «bottom track»).

Контроль расстояния комплекса до дна необходим, поскольку зондирование производится во всей толще океана непосредственно до дна. Для этого применяется пингер, изготовленный в лаборатории акустики ИО РАН. Для оперативной замены на комплексе также смонтирован еще один пингер фирмы Benthos. Пингер излучает короткие акустические сигналы длиной 10 мкс, частотой 12 кГц и интервалом в 1 с. Прямой и отраженный от дна сигналы принимаются антенной эхолота, по разности прихода этих сигналов вычисляется расстояние от комплекса до дна. Помимо пингера, для этих целей используется альтиметр Benthos модели PSA-916, который подключен к CTD-зонду и запрограммирован передавать цифровое значение расстояния при приближении ко дну на расстояние менее 100 м.

Одновременное использование пингера и альтиметра необходимо для надежности и точности позиционирования прибора относительно дна. Альтиметр дает точные показания расстояния, однако имеет малый диапазон измерений и его сигнал может пропадать на удалении от дна. Пингер обладает меньшей точностью, но при этом его сигнал стабилен и виден даже при нахождении прибора у поверхности. Кроме того, в отличие от альтиметра, пингер имеет круговую диаграмму направленности, позволяющую контролировать расстояние до боковых препятствий при горизонтальном смещении комплекса, например, до крутых склонов подводного рельефа. Комбинация этих двух приборов позволяет безопасно измерять гидрологические характеристики вплоть до расстояния в 3—5 м до дна.

Обработка данных CTD. Данные с датчиков CTD-профилографа могут как поступать по кабель-тросу на ПК в бортовую лабораторию в режиме реального времени, так и записываться во внутреннюю память прибора. В любом случае сырые данные сохраняются в бинарный файл, содержащий информацию в основном о частотах и напряжениях на физических датчиках прибора. Для получения итоговых термохалинных характеристик воды необходима дальнейшая обработка.

Обработка результатов CTD производится стандартным пакетом программ SBE Data Processing. Этот пакет разрабатывается производителем прибора Sea-Bird Electronics и позволяет обрабатывать данные, полученные всей линейкой CTD-профилографов этой фирмы. Он представляет собой набор модулей, выполняющих отдельные функции обработки данных. Помимо выполнения всех нижеперечисленных модулей с правильными параметрами обработки, важен порядок выполнения этих операций. Ниже приведены описания модулей в порядке их выполнения с используемыми нами параметрами.

Модуль Data Conversion осуществляет первый шаг обработки результатов. Он производит расчет необходимых характеристик морской воды на основе сырых данных и текущей калибровки датчиков, а также осуществляет их перевод в коды ASCII. На данном этапе производится конвертация только тех параметров, которые непосредственно измеряются датчиками — в нашем случае это температура, электропроводность и давление. Конфигурационный файл прибора должен содержать актуальную калибровку прибора. Полученные профили требуют дополнительной обработки.

Модуль Filter используется для сглаживания высокочастотных колебаний измеряемых характеристик. При сглаживании применяется фильтр с постоянными времени 1 с для профиля давления и 0.5 с для электропроводности.

Модуль Align CTD применяется для приведения измеренных характеристик к одному объему жидкости, что является необходимым для расчетов дополнительных параметров воды. При этом измеренные значения выстраиваются в порядке возрастания давления, вводится поправка на запаздывание датчика электропроводности, усредняются значения электропроводности и температуры, полученные при движении зонда вверх и вниз. В случае обработки данных зонда SBE SeaCat 19plus поправка на запаздывание датчика температуры принимается равной +0.5 с.

Модуль Cell Thermal Mass позволяет учесть поправку на расширение датчика электропроводности. Поправка вычисляется при рекомендуемых разработчиком параметрах, характерных для SBE SeaCat 19plus — «Thermal anomaly amplitude [alpha]» = 0.04, « Thermal anomaly time constant [1/beta]» = 8.0.

Модуль Loop Edit необходим для отбраковки измерений при движении зонда с малой скоростью (меньше 0.25 м/с), а также при его нахождении над водой. При этом также не учитываются измерения в верхнем поверхностном слое до начала монотонного опускания прибора (верхние 10 м). Данная процедура делается только после выполнения фильтрации (модуль Filter), поскольку в противном случае могут быть отбракованы в том числе качественные данные — из-за шума в данных давления и неправильного расчета скорости.

Модуль Derive позволяет вычислять произвольные требуемые параметры морской воды из измеренных характеристик — давления, электропроводности, температуры. В частности, могут быть вычислены соленость, плотность, глубина, скорость звука, потенциальная температура и другие. В основе расчета лежат уравнения практической шкалы солености (Practical Salinity Scale, 1978, [7]). Для расчета абсолютной солености и других характеристик по термодинамическим уравнениям морской воды 2010 г. [8] может использоваться модуль Derive TEOS-10. Выполнение этого пункта должно проводиться только после введения поправок 2—5.

Модуль Bin Average производит осреднение данных и представляет их с фиксированным шагом по интересующему параметру. Как правило, осреднение проводится по давлению с шагом в 1 дбар.

Примеры получаемых профилей потенциальной температуры и солености для абиссального слоя показаны на рис. 1. Измерения проводились на станциях в южной части разлома Вима Срединно-Атлантического хребта в 2015 и 2016 гг. Полученные профили позволяют разделить водные массы, находящиеся на различных горизонтах.

Выше описанные модули программного пакета SBE Data Processing позволяют получить качественные профили необходимых характеристик морской воды по всей глубине измерений. В частности, они необходимы при обработке данных погружного измерителя течений LADCP.

Обработка данных LADCP. Акустический доплеровский измеритель течений является полностью автономным прибором. Экспериментальные данные записываются в память прибора в процессе измерений и переписываются на ПК после подъема измерительного комплекса на палубу. Для просмотра результатов фирмой-изготовителем прибора RD Instruments разработана программа WinADCP. Программа рассчитывает три компоненты скорости течений относительно прибора в зависимости от времени. Возможен вывод направления и модуля скорости, ошибок измерений, амплитуды отраженного сигнала. Этих функций достаточно, если измеритель течений находится стационарно в одной точке. Однако в WinADCP невозможно получить зависимость скорости от глубины в случае использования прибора в режиме профилографа. Тем не менее, эта программа может использоваться для быстрой оценки качества полученных данных.

Существует как минимум три доступных программных пакета для расчета профиля горизонтальных скоростей на основе данных LADCP. Это пакет, разработанный в Гавайском Университете (http://currents.soest.hawaii.edu/, [9]) и две реализации, основанные на линейном обратном методе обработке данных ADCP [10] — пакет Мартина Висбека (http://www.ldeo.columbia.edu/~ant/LADCP) и пакет Gerd Krahmann (https://github.com/jgrelet/ladcp). Вертикальная составляющая скорости может быть найдена с помощью пакета LADCP_w [11].

В наших расчетах обработка данных LADCP осуществляется с помощью пакета Мартина Висбека (LDEO LADCP Software: version IX_10). Реализация метода выполнена на языке MatLab, для минимизации погрешности обработки используется метод наименьших квадратов. Для выполнения расчета необходима версия пакета обработки LADCP (http://www.ldeo.columbia.edu/~ant/LADCP). Процесс обработки данных подробно описан в [6]. Для получения итогового профиля скорости необходимы следующие данные.

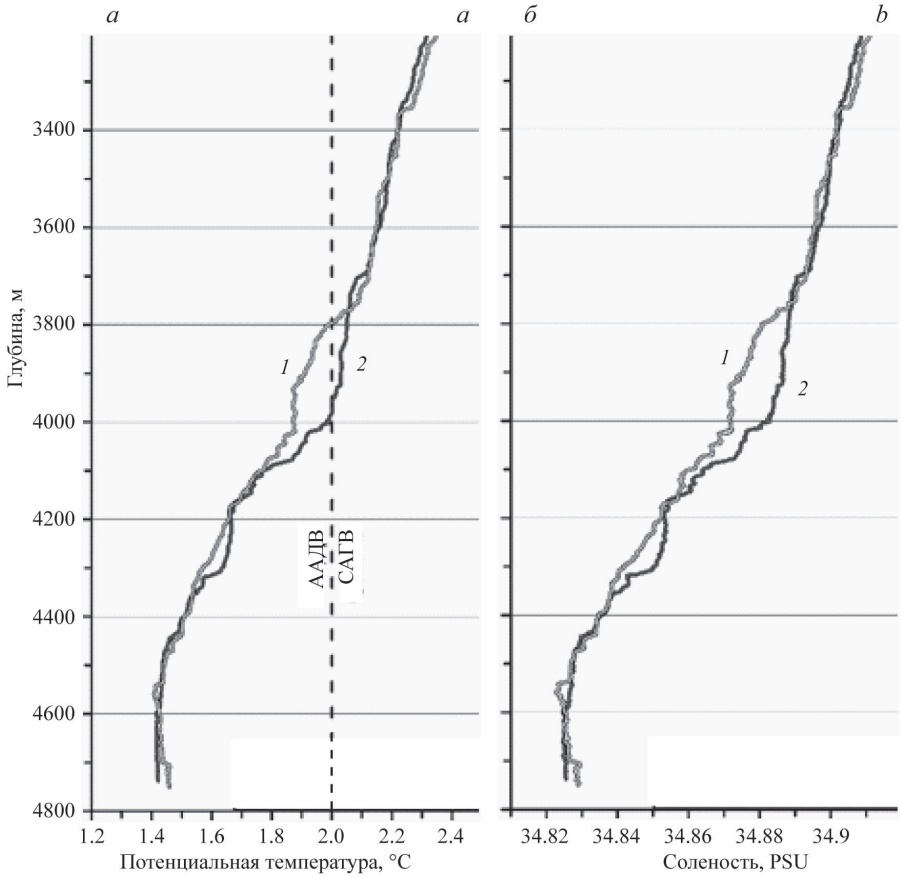

Рис. 1. Графики вертикального распределения потенциальной температуры (*а*) и солености (*б*) на станциях в разломе Вима: *1* — ст. 2570, 2015 г.; *2* — ст. 2609, 2016 г.

Fig. 1. Vertical distribution of potential temperature (*a*) and salinity (*b*) at stations in the Vema FZ. *1* – station 2570, year 2015; *2* – station 2609, year 2016.

1. Файл с данными LADCP. Переписывается напрямую с зонда.

2. Файл со значениями давления, температуры и солености. Измеряется CTD-зондом, обработка данных подробно описана в предыдущем разделе. Эти данные необходимы для точного расчета глубины по известному давлению, а также для расчета скорости звука.

3. Файл с навигационными данными, содержащий координаты и время, синхронизированное со временем LADCP. Эти данные необходимы для точного восстановления баротропной составляющей скорости в точке измерений [6].

Ориентация зонда в пространстве определяется по магнитному компасу, поэтому для работы необходимы значения магнитного склонения на каждой станции. В нашем случае эти значения автоматически рассчитываются с помощью калькулятора магнитного склонения, использующего модель международного геомагнитного аналитического поля (International Geomagnetic Reference Field, IGRF [12]). Модель позволяет рассчитывать магнитное склонение в произвольных координатах в промежуток времени с 1900 по 2019 год, действие модели продлевается каждые 5 лет введением новых коэффициентов, отражающих текущее состояние магнитного поля.

Результатом расчета являются профили зональной и меридиональной составляющих горизонтальной скорости с шагом в 8 м по глубине. На основе сравнения измерений вертикальной скорости двумя парами излучателей рассчитывается ошибка определения скорости в зависимости от глубины. Отдельно рассчитываются скорости в придонном слое, в котором горизонтальная скорость розетты рассчитывается по отражению акустического сигнала от дна. Практика показывает, что инструментальная засечка о дно (RDI bottom track) может не срабатывать. Достоинством данного пакета является возможность получения засечки о дно по отраженному основному сигналу. Также производится расчет траектории движения прибора в воде.

Существенное влияние на локальные скорости движения водных масс в океане оказывают приливы. В реальных условиях LADCP-зондирование проводится в случайную фазу прилива, который может как увеличить скорость течения, так и уменьшить ее. Поэтому при обработке данных LADCP имеет смысл вычитать текущую скорость приливной волны из измеренных значений скорости.

Для расчета скорости баротропного прилива может использоваться глобальная модель TPXO орегонского университета, использующая данные динамической топографии, полученной с помощью спутниковой альтиметрии [13, 14]. Данные динамической топографии содержатся в модели, в нашем случае использовалась модель TPXO7.1. Для ее запуска необходим алгоритм OTPS (Ocean Tidal Prediction Software, http://volkov.oce.orst.edu/tides/otps.html), написанный на языке Fortran, или аналогичный по функционалу алгоритм TMD (Tidal Model Driver, http://polaris.esr.org/ptm_index.html) на языке MatLab. Модель позволяет рассчитывать колебания уровня, скорости течения и приливные эллипсы в произвольных координатах и в произвольный момент времени для следующих составляющих (гармоник) прилива полусуточных M2, S2, N2, K2, суточных K1, O1, P1, Q1, долгопериодных MF и MM.

Пример расчета зональной и меридиональной скоростей приливной волны во время проведения измерений показаны на рис. 2. При расчете учтены все доступные гармоники приливов, расчет проводился на момент измерений (21 сентября 2015 г.) в точке, в которой проводились станции (10º47.3’ с.ш., 41º01.0’ з.д.). Скорости показаны за двое суток. Полученные скорости баротропного прилива вычитаются из обработанных данных LADCP, что позволяет получить естественные данные скоростей течений без колебаний, вызванных приливами.

При проведении описанной коррекции следует учитывать, что существенное влияние на локальные скорости приливной волны могут оказать особенности топографии морского дна, в частности, глубоководные каньоны. Это влияние подробно исследовалось в натурных [15], в численных [16] и лабораторных [17] экспериментах. Расчеты скоростей приливной волны с учетом топографии дна существенно сложнее указанной методики расчета баротропной составляющей и требует точных данных по батиметрии всего района исследований. В предложенной выше методике мы делаем коррекцию только баротропной составляющей прилива; в отдельных задачах этого может быть недостаточно и необходимо более точно рассчитывать прилив с учетом влияния рельефа морского дна.

Основной поток ААДВ идет через две части разлома Вима, северную и южную. Станции 2606 и 2607 были выполнены в южном канале разлома Вима для изучения придонного водопада. Скорректированные

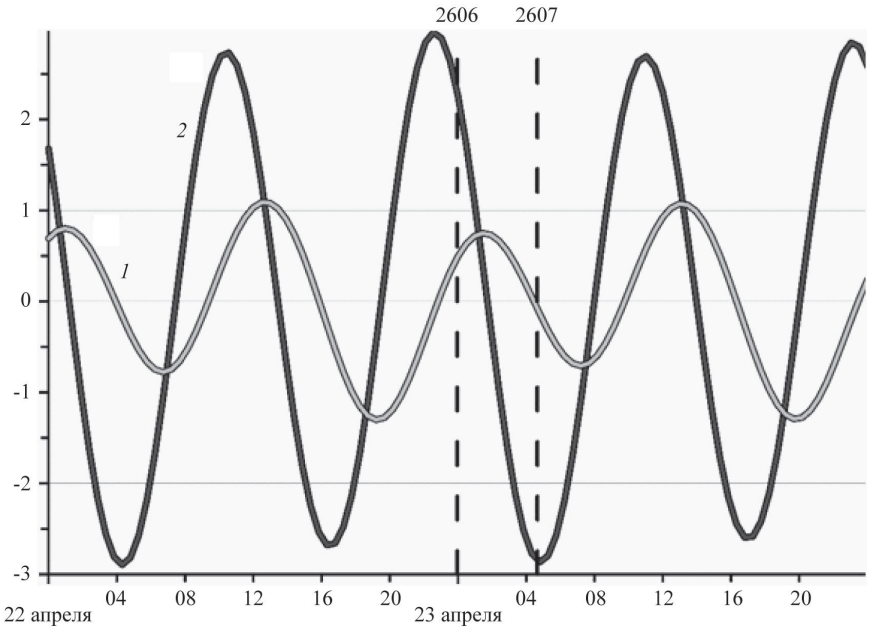

Рис. 2. Зональная (*1* — *U*) и меридиональная (*2* — *V*) скорости приливной волны за двое суток.
Время нахождения зондов у дна на двух станциях показано пунктирными линиями.

Fig. 2. Zonal (*1* — *U*) and meridional (*2* — *V*) velocity of the tidal wave during two days.
Time of the bottom locations of the measuring devices at two stations is shown with dash lines.

с учетом прилива составляющие скорости показаны на рис. 3. Разрешение по вертикали составляет 8 м. Станция 2606 была выполнена на перевале, станция 2607 на две мили ниже по потоку в узком проходе. В верхней точке перевала ширина канала по изобате 3800 м, что соответствует глубине изотермы 2.0 °С, равняется 3 милям. Глубина канала 4541 м. Температура у дна 1.484 °С. Скорости на восток в ядре течения на глубине 4440 м до 29 см/с. В 2015 г. в этой точке была зафиксирована придонная температура 1.534 °С и скорости потока более 40 см/с. На станции 2607 ниже по потоку придонная температура на глубине равнялась 1.514 °С, а скорости на восток достигали 22, 20 и 12 см/с в трех ядрах течения на водопаде на глубинах 4424, 4560 и 4648 м. Это соответствует глубинам течения в ядре на перевале, глубине перевала и глубине в точке станции.

Построение разрезов через абиссальные каналы. Антарктическая донная вода распространяется в северном направлении преимущественно в западной части Атлантического океана. В восточную часть Атлантики ААДВ попадает в основном через разломы Срединно-Атлантического хребта, в частности, через разлом Вима на 10°50’ с.ш. Ключевое значение для этого потока играет топография морского дна. Существующие глобальные модели рельефа, такие как Smith&Sandwell [18], GEBCO [19], ETOPO, имеют недостаточное разрешение, при этом расхождение между данными этих моделей и реальной топографией достигает сотен метров на крутых склонах разломов. Поэтому для исследования придонных течений важен предварительный эхолотный промер в перпендикулярном течению направлении.

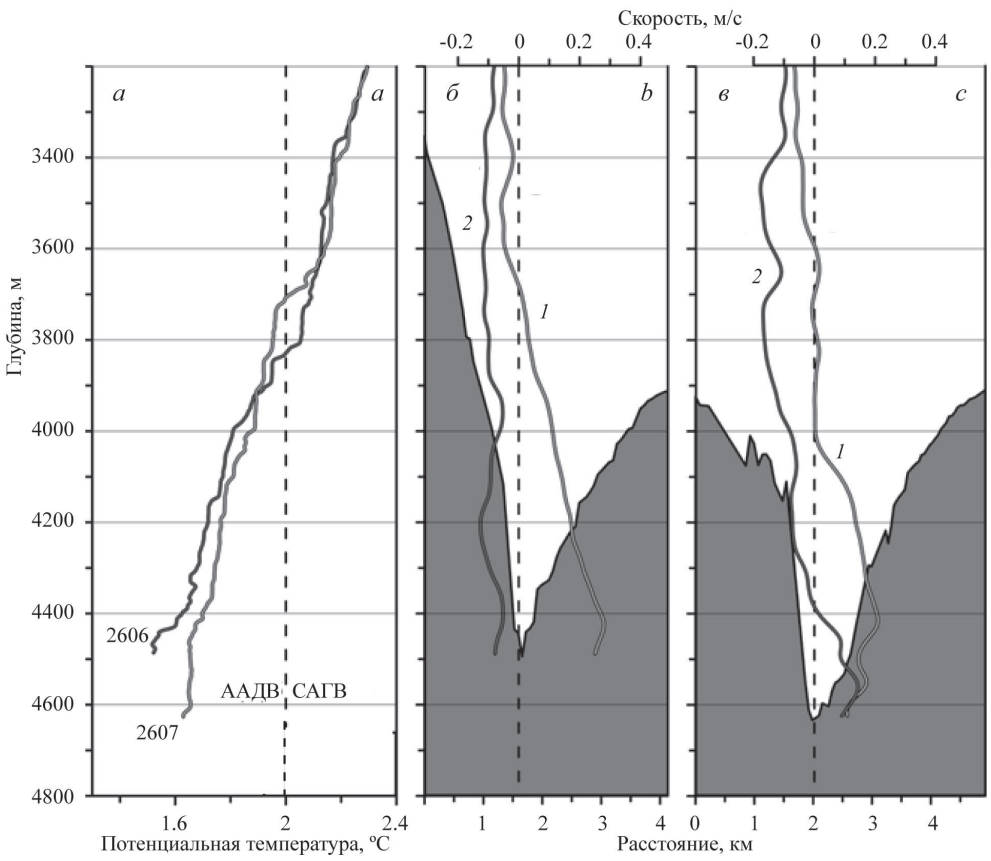

Рис. 3. Профили потенциальной температуры (*а*) и скорости течения на седловине канала на станции 2606 (*б*) и на две мили ниже по потоку на станции 2607 (*в*).

Зональная и меридиональная скорости обозначены буквами *U* (*1*) и *V* (*2*) соответственно. Серым цветом показаны профили дна в поперечном сечении канала, предварительно измеренные эхолотом.

Fig. 3. Profiles of potential temperature (*a*) and current velocities at station 2606 at the sill of the channel (*b*) and two miles downstream (*c*).

Zonal and meridional components of velocity are indicated as *U* (*1*) and *V* (*2*) respectively.
The bottom relief at the cross section of the channel measured by our echo sounder is shown in gray color.

При наличии CTD-данных необходимо скорректировать эхолотный промер с учетом скорости звука по имеющимся гидрологическим данным. Интегральная скорость звука может быть рассчитана с помощью программного пакета SBE Data Processing.

Визуализация гидрологических данных и данных скорости на полное сечение канала выполняется стандартными средствами Golden Software Surfer. Интерполяция на регулярную сетку выполняется методом kriging, горизонтальное разрешение 500 м, вертикальное — 20 м, коэффициент анизотропии 0.05, горизонтальный и вертикальный радиусы поиска 3 км и 200 м соответственно. Экстраполяция за пределы крайних станций проводится на половину расстояния между станциями, изолинии здесь практически горизонтальны, поскольку значения на этих участках фактически приравниваются к значениям на ближайшей станции. Пример построенного разреза потенциальной температуры и скорости для разлома Вима представлен на рис. 4. Разрез имеет меридиональное направление, скорость направлена вдоль канала на восток. В канале было выполнено 3 станции, 2608, 2609 и 2610.

По построенным разрезам видно, что максимальные скорости обнаруживаются в ядре течения возле дна в узкой части разлома. Минимум холодной температуры и максимум скорости течения при этом смещены к северной стене канала. Самая низкая температура у дна 1.358 °C была зафиксирована на станции 2610 на северном склоне на глубине 4507 м. При этом потенциальная температура в 2016 г. на 0.04 °C больше, чем в 2015 г. Представленные данные позволяют также рассчитать интегральные характеристики течений. Поток антарктической донной воды через канал рассчитывается интегрированием скорости по площади поперечного сечения, ограниченного эхолотным промером снизу и изотермой потенциальной температуры 2 °C сверху (верхняя граница ААДВ). Для рассматриваемого канала поток воды оценен в 0.45 Св (1 Св = 10^6 $м^3/с$).

***

В статье представлена методика обработки данных глубоководных измерений от первичной обработки до построения разрезов. Данные получены комплексом CTD и LADCP зондов в экспедиционных рейсах НИС «Академик Сергей Вавилов». Обработка данных CTD осуществляется набором программ,

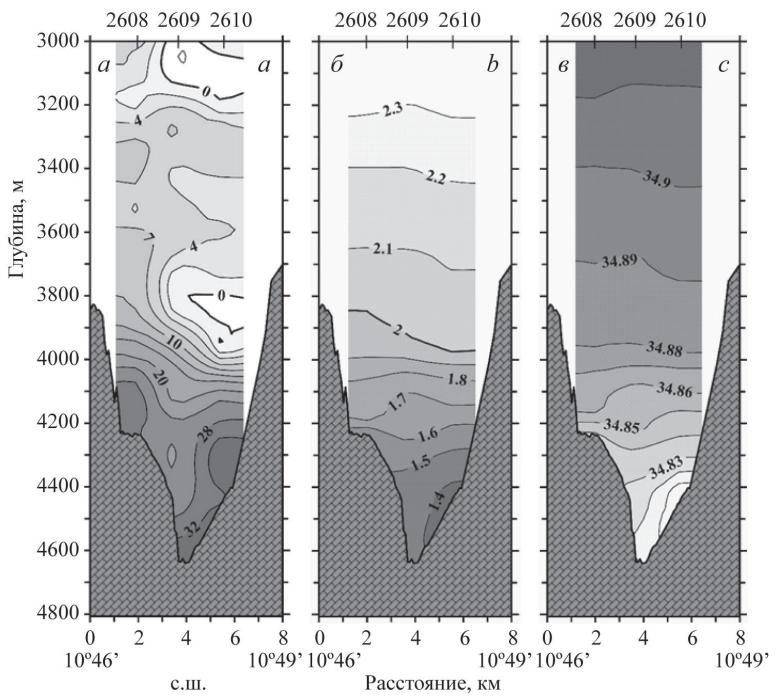

Рис. 4. Разрез скорости течения (*а*), потенциальной температуры (*б*) и солености (*в*) через разлом Вима Северо-Атлантического хребта по трем станциям 2608, 2609, 2610.
Положительные скорости соответствуют течению на восток.

Fig. 4. Section of current velocity (*a*), potential temperature (*b*) and salinity (*c*) across the Vema FZ in the North-Atlantic Ridge based on three stations 2608, 2609, 2610.
Positive velocities correspond to the eastward current.

разработанным производителем прибора и предусматривает фильтрацию сигналов, введение динамических поправок, выравнивание данных и их осреднение, расчет дополнительных характеристик морской воды. Обработка данных LADCP является нетривиальной задачей. Пакеты программ, основанные на линейном обратном методе обработки, позволяют получить профиль скоростей и их ошибок от поверхности до дна, а с помощью моделей расчета баротропного прилива можно ввести поправки на приливные скорости.

Также обсуждаются результаты проведенных измерений. Применение описанной методики к исследованию потоков в абиссальных каналах позволяет получать информацию как о термохалинной структуре водных масс, так и о динамике придонных течений. В южном канале разлома Вима обнаружен водопад с перепадом высот около 200 м со скоростями до 40 см/с в верхней части. Через северный канал в 2016 г. было выполнено 3 станции, придонная потенциальная температура до 1.36 °С, скорости до 36 см/с. В обоих каналах по результатам измерений в 2016 г. наблюдается увеличение потенциальной температуры по сравнению с 2015 г. — на 0.15 °С в южном канале и на 0.04 °С в северном канале. Суммарный поток ААДВ через обе части канала оценивается в 1 Св.

Работа поддержана грантом РНФ (проект 16-17-10149) и молодежным грантом РФФИ (проект 16-35-50158).

References

1. *Morozov E. G., Demidov A. N., Tarakanov R. Y., Zenk W.* Abyssal Channels in the Atlantic Ocean. Ed. Weatherly G. *Dordrecht, Springer,* 2010. 266 p.
2. *Levashov D. I.* Methods of experimental research. *VNIRO,* 2003. 399 p. (in Russian).
3. *Emery W. J., Thomson R. E.* Data Analysis Methods in Physical Oceanography, second ed., 2005, 619 p.
4. Sea-Bird Electronics, SBE 19plus SeaCAT Profiler CTD, User Manual, Release Date: 08/17/2016, URL: http://www.seabird.com/ (Date of access: 10.12.2016).
5. Teledyne RD Instruments, WorkHorse Sentinel ADCP User's Guide, August 2002, URL: http://www.teledynemarine.com/ (Date of access: 11.12.2016).
6. *Thurnherr A. M.* How To Process LADCP Data With the LDEO Software, January 5, 2007 URL: ftp://ftp.uib.no/pub/ngfif/DATA/ES033/ladcp/howto_Jan05_2007.pdf (Date of access: 12.12.2016).
7. *Lewis E. L., Perkin R. G.* The Practical Salinity Scale 1978: conversion of existing data. *Deep-Sea Research.* 1981, 28A, 4, 307—328.
8. IOC, SCOR and IAPSO, 2010: The international thermodynamic equation of seawater — 2010: Calculation and use of thermodynamic properties. *Intergovernmental Oceanographic Commission, Manuals and Guides No. 56*, UNESCO (English), 196 p.
9. *Firing E., Gordon L.* Deep ocean acoustic Doppler current profiling. *Proc. IEEE Fourth Working Conf. on Current Measurements.* Clinton, MD, Current Measurement Technology Committee of the Ocean Engineering Society, 1990, 192—201.
10. *Visbeck M.* Deep velocity profiling using Lowered Acoustic Doppler Current Profiler: bottom track and inverse solution. *J. Atmosph. Oceanic Technol.* 2002, 19, 5, 794—807.
11. *Thurnherr A. M.* Vertical velocity from LADCP data. Proceeding, CWTMC'11 (IEEE), 2011.
12. *Thébault E., Finlay CC., Beggan CD., Alken P., Aubert J., Barrois O., Bertrand F., Bondar T, Boness A., Brocco L., Canet E., Chambodut A., Chulliat A., Coïsson P., Civet F., Du A., Fournier A., Fratter I., Gillet N., Hamilton B., Hamoudi M., Hulot G., Jager T., Korte M., Kuang W., Lalanne X., Langlais B., Léger J-M., Lesur V., Lowes FJ.* et al. International Geomagnetic Reference Field: the twelfth generation. *Earth Planets Space.* 2015, 67:79.
13. *Egbert G. D., Bennett A. F., Foreman M. G. G.* TOPEX/Poseidon tides estimated using a global inverse model. *J. Geophys. Res.* 1994, 99, 24 821—24 852.
14. *Egbert G. D., Erofeeva S. Y.* Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides. *J. Atmos. Oceanic Technol.* 2002. 19, 2, 183—204.
15. *Wain D. J., Gregg M. C., Alford M. H., Lien R. C., Hall R. A., Carter G. S.* Propagation and dissipation of the internal tide in upper Monterey Canyon. *Journal of geophysical research: Oceans.* 2013, 118, 4855—4877.
16. *Rob A. Hall, Glenn S.* Carter, Internal Tides in Monterey Submarine Canyon. *Journal of Physical Oceanography.* 2010, 41, 186—204.
17. *Peter G. Baines.* Tidal motion in submarine canyons – a laboratory experiment. *Journal of Physical Oceanography.* 1983, 13, 310—328.
18. *Smith WHF, Sandwell DT.* Global sea floor topography from satellite altimetry and ship depth soundings. *Science.* 1997, 277, 1956—1962.
19. British Oceanographic Data Centre (BODC), 2008, The GEBCO_08 Grid, version 20091120, General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO).