

А.Н.Морозов, Е.М.Лемешко

*Морской гидрофизический институт НАН Украины, г.Севастополь***ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АКУСТИЧЕСКОГО ДОПЛЕРОВСКОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ ТЕЧЕНИЙ (ADCP) В УСЛОВИЯХ ЧЕРНОГО МОРЯ**

Впервые в Черном море был использован акустический доплеровский измеритель течений (ADCP) фирмы RDI в зондирующем режиме (*Lowered ADCP*) в рамках программы GEF/BSERP в мае 2004 г. Такое направление использования ADCP находится в стадии становления и отработки различных методик и позволяет получить распределение вертикальных скоростей течений до глубин 1000 – 6000 м в зависимости от модификации прибора. В Черном море ADCP активно использовался в 1993 – 1994 гг. в варианте корабельного прибора во время экспедиций по программе CoMSBlack. Специфика Черного моря такова, что в корабельном варианте не удалось получить информацию о течениях глубже 200 – 300 м. В статье излагается методика проведения измерений *Lowered ADCP* и обработки первичной информации. При последующей обработке данных широко использовался опыт МГИ НАНУ с аналогичными акустическими измерителями течений в 80-е гг. В результате обобщен опыт применения *Lowered ADCP* в условиях Черного моря, даны алгоритмы обработки данных, приведены профили абсолютной скорости течений на ряде станций и показано, что предлагаемый подход дает более адекватную качественную и количественную оценку профиля скорости течения, чем известные методы.

Измерение вертикального распределения скоростей морских течений с борта судна – задача давно известная в прикладной океанологии. Инструментальные оценки скорости движения вод, наряду со стандартными гидрологическими CTD данными, позволяют значительной мере расширить наши представления о динамических процессах, происходящих в морях и океанах. Первые попытки вертикального профилирования течений проводились с использованием точечных роторных измерителей течений с автономного поверхностного буя [1], с борта судна [2]. Большая потребность в данных прямых измерений скорости течений привела к быстрому развитию техники вертикального профилирования течений, основанной на отслеживании гидроакустическими средствами траектории свободнопадающих зондов [3]. Однако рассмотренные технологии не давали возможности их применения при проведении полигонных съёмок, что привело к дальнейшему развитию техники вертикального профилирования течений с борта судна. Одно из направлений по созданию такой техники разрабатывалось в МГИ НАНУ с начала 80-х гг. и основывалось на использовании погружаемого на кабель-тросе трехкомпонентного акустического датчика скорости потока, содержащего CTD комплекс и датчики угловой ориентации [4]. Причиной ограниченного использования разработанного прибора стало влияние собственных движений на качество получаемой информации. Попытка учесть вклад этого фактора привела к созданию сложных систем контроля [4, 5] и снизило технологичность использования прибора.

В настоящее время доминирующим направлением решения проблемы вертикального профилирования течений с борта судна стало использование

© А.Н.Морозов, Е.М.Лемешко, 2005

доплеровских измерителей течений. Одним из лидеров производства таких приборов различного назначения является американская фирма *RDI* (www.rdstruments.com), изделия которой находят применение при решении широкого круга экспериментальных океанологических задач [6, 7].

В рамках выполнения части экспериментальных работ по международному проекту *GEF Black Sea Ecosystem Recovery Project – RER/01/G33*, в распоряжение МГИ НАНУ был передан *ADCP* производства *RDI*, что и послужило поводом для выполнения данной работы.

Цель статьи заключается в том, чтобы отобразить вопросы, которые возникали при эксплуатации прибора в натуральных условиях и при обработке первичных данных, полученных в рейсе «*BSERP-3*» НИС «*Akademik*», проходившем с 8 по 19 мая 2004 г.

Статья ориентирована как на специалистов, которые непосредственно проводят измерения и обрабатывают первичные данные, так и на пользователей информации, планирующих применение этого прибора при постановке натуральных экспериментов и интерпретирующих полученные результаты.

Основные компоненты или состав прибора. Прибор состоит из следующих основных компонент:

1. Головка преобразователей, состоящая из четырех осе симметрично расположенных электроакустических преобразователей, формирующих Янус конфигурацию с углом отклонения луча от продольной оси прибора на 20° .

2. В герметичном корпусе головки преобразователей, рассчитанном на глубины погружения до 1000 м, размещается электроника:

- плата встроенной *flash*-памяти (64 МВ);
- плата обработки аналоговых сигналов;
- плата центрального процессора;
- плата (верхняя, доступная после снятия верхней крышки корпуса)

связи с внешним компьютером, предохранителем, переключателем формата обмена (*RS-232/RS-422*) и датчиками угловой ориентации: азимут (*Flux-gate compass*); крен/дифферент (*Pitch/Roll-inclinometers*).

3. Внешние батареи размещаются в отдельном герметичном корпусе, рассчитанном на глубины погружения до 6000 м.

4. Прибор дополнительно содержит встроенные датчики температуры и давления.

Компоненты 1 и 2 представляют собой собственно измеритель течений (*Workhorse Monitor, WHM*), который может работать как в автономном режиме («*self contained*») от блока внешних батарей (3) с записью информации на встроенную *flash*-память, так и под управлением внешнего компьютера с передачей информации в реальном масштабе времени. Питание во втором случае осуществляется от стандартной сети через адаптер (*AC100-220V50Hz/DC48V*), входящий в комплект поставки.

Соединение измерителя течений с блоком внешних батарей производится посредством герметичного глубоководного *T*-образного кабеля (длина 1,5 м), входящего в комплект поставки. Кабель соединения измерителя течений с компьютером рассчитан на работу до глубины 10 м и имеет протяженность 25 м. Соединение с компьютером производится через *com*-порт. Также в комплект поставки входит *RS-232/RS-422* конвертор. В соответствии с описанием, внутренний переключатель *RS-232/RS-422* при поставке

должен быть установлен в положение *RS-232*, на практике это следует проверить перед первым включением. В нашем случае соединение *ADCP* с компьютером в формате *RS-232* не обеспечивало устойчивого обмена информацией при работе на кабель соединения с компьютером, в формате *RS-422* обмен устойчиво производится при скорости обмена 115 KВод. При подключении одновременно внешних батарей и адаптера питание осуществляется от источника имеющего больший потенциал, т.е. для работы с прибором достаточно блока внешних батарей, что важно при выполнении измерений с борта маломерных судов, не имеющих сетевого питания. Работоспособность прибора сохраняется при *DC* напряжении от 30 до 60 V.

Программное обеспечение. *ADCP* представляет собой многомодульный, программно управляемый прибор. Программное обеспечение можно разбить на два основных раздела:

1. Системное программное обеспечение – платное недоступное пользователю, поставляемое изготовителем и устанавливаемое в память внутреннего процессора прибора. Включает в себя набор опций для поддержки различных режимов измерений. Вот некоторые опции:

Water Profiling – устанавливаемая при продаже прибора обеспечивает поддержку измерения профилей скорости течений;

LADCP – приобретаемая, в основном предназначена для обеспечения синхронизации работы двух приборов (*Master/Slave*), несколько видоизменяет мнемонику команд управления;

Bottom Track – приобретаемая, предназначена для обеспечения измерения течений относительно дна.

2. Доступное пользователю программное обеспечение, поставляемое на *CD*:

BBTalk – программа поддерживает управление прибором на уровне мнемонических команд, охватывает все аспекты функционирования *ADCP*, но не имеет удобного интерфейса, требует полного понимания используемых команд и результатов их действия;

WinSC – программа управления прибором, с хорошо развитым интерфейсом, поддерживает операции тестирования модулей прибора и перекачки информации записанной на *flash*-памяти, подключает *PlanADCP* – планировщик постановки, позволяющий изменять параметры постановки;

WinADCP – программа визуального представления результатов измерений. Поддерживает формат данных, полученных в географической системе координат, позволяет преобразовывать данные из двоичного формата в текстовый.

Для большинства практических случаев достаточно использования программ *WinSC* и *WinADCP*. Здесь не приводится более детального описания этих программ; с одной стороны перечень поддерживаемых ими опций очень велик, с другой стороны хорошо развитый интерфейс позволяет ориентироваться в программах при наличии общих представлений о работе прибора.

Физические принципы работы. Принцип измерения скорости течений водной среды, реализованный в *ADCP*, основан на эффекте Доплера, т.е. на определении смещения частоты эхо-сигнала, характеризующего скорость движения рассеивателей в объеме измерения вдоль направления луча.

Цикл измерения начинается с излучения зондирующих акустических сигналов вдоль каждого из четырех лучей прибора, растровая диаграмма направленности преобразователей для *WHM300* составляет около 2,2° по

уровню ослабления 3 дБ.

После излучения выдерживается пауза (*Blank* – рекомендованное значение $L_{Blank} = 1,76$ м, может быть установлена *WinSc-PlanADCP* или *BBtalk*), необходимая для затухания акустических волн в корпусе прибора, возникающих в результате излучения. Значение времени паузы выбирается исходя из конкретных условий; задав этот параметр достаточно малым, можно потерять качество измерений в первом элементе глубины; задав его слишком большим, можно потерять измерения в близком к прибору слое воды. Необходимость некоторой задержки после излучения предопределяет наличие слоя воды, прилегающего к прибору, в котором измерения проводиться не будут, при этом центр первого элемента глубины приближенно может быть определен из простого соотношения:

$$H_{FirstCell} = (L_{Blank} + H_{Cell}) / \cos 20^\circ.$$

Далее следует прием и обработка эхо-сигналов, при этом сигнал разбивается на временные окна, определяемые устанавливаемым значением размера элемента измерения по глубине H_{Cell} .

До 1991 г. в приборах *RDI* для выделения доплеровского сдвига частоты эхо-сигнала использовался узкополосный, одноимпульсный, автокорреляционный метод расчета первого момента спектра, что позволяло обеспечивать точность измерений, достаточную для решения многих океанографических задач. Начиная с 1991 г., для выделения сдвига частоты применяется широкополосный («*Broad Band*») метод, который обеспечивает повышение точности измерений в 100 раз по отношению к узкополосному методу [8].

В результате цикла измерения во внутреннюю память прибора или на внешний компьютер поступает информация, содержащая следующие основные первичные параметры:

- дата, время, номер записи;
- температура, давление, угол азимута, крена и дифферента;
- профили (значения для каждого элемента глубины): интенсивность эхо-сигнала вдоль каждого луча; корреляция эхо-сигнала вдоль каждого луча; скорости течения в одной из систем: в географической системе координат; в системе координат прибора; вдоль каждого луча.

Система вывода профилей скорости течения может быть задана при формировании командного файла из *BBtalk*, программа *WinSc-PlanADCP* поддерживает только географическую систему координат. При формировании данных о скорости течения производится автоматическая отбраковка данных по пороговым значениям корреляции и интенсивности эхо сигналов, установленная *RDI (Percent Good)*.

Прибор производит измерение проекций скорости течений на четыре пространственных оси для каждого элемента глубины, в то время как для расчета трех компонент скорости достаточно трех пространственно несовпадающих осей, избыточность системы частично повышает надежность и сглаживает влияние локальной анизотропии поля скорости течений. Относительное смещение элементов глубины вдоль каждого из лучей, возникающее из-за наклона прибора, учитывается при пересчете полученных профилей в географическую систему координат с использованием показаний датчиков угловой ориентации встроенным программным обеспечением, начиная с

Firmware Version 5.0 (в нашем случае установлено *Firmware Version 16.21*).

Предварительные общие замечания. Перед тем как перейти к описанию условий использования *ADCP WHM RDI*, сделаем некоторые замечания (практически дословные выдержки из [8]):

- прибор разрабатывался для проведения измерений при относительно медленных собственных движениях, в этих условиях датчики угловой ориентации эффективно измеряют азимут, крен и дифферент (*heading, pitch, roll*);

- датчик азимута (компас, т.е. и сам прибор) нельзя использовать вблизи металлических материалов, таких как корпус судна, которые деформируют естественное магнитное поле Земли;

- инклинометры (датчики крена, дифферента) измеряют наклоны относительно оси земной гравитации, и не учитывают влияния ускорения собственных движений прибора, которые могут вызывать значительные погрешности измерений;

- компас также подвержен действию собственных движений прибора либо непосредственно, либо через его инклинометры.

В целом из приведенных выше замечаний следует, что прибор может наиболее эффективно использоваться в составе заякоренной станции (лучше под поверхностной с целью избежать влияния поверхностных волн) или при его установке на дне в раме из немагнитного материала. Такое назначение прибора определило характеристики использованных в нем датчиков, при этом основными критериями, вероятно, была малогабаритность и малое энергопотребление. Приводимые паспортные характеристики датчиков (включая датчики температуры и давления), скорее всего, получены в статических условиях и не отображают динамических составляющих погрешности, влияние которых при наличии собственных движений прибора может оказаться доминирующим.

Условия проведения измерений. Акустический доплеровский измеритель профиля скорости течений производства *RDI* модель *WHM300-I-UG23* (*ADCP Work Horse Monitor, Serial Number 4253, frequency 307.2 kHz, self contained, range 100 – 150 m*) использовался при проведении экспериментальных исследований динамики взаимодействия крупномасштабного глубоководного вихря с шельфом в юго-западном районе Черного моря (43,8 – 44,9° с.ш., 29,9 – 32,6° в.д.).

В процессе подготовки к рейсу была изготовлена титановая рама, на которой закреплялись блок батарей и головка преобразователей (*WHM300*) с расстоянием между ними более 30 см в соответствии с рекомендациями *RDI*. Внешний вид прибора в сборе представлен на рис.1.

Перед использованием прибора в натуральных условиях была предпринята попытка проведения методических работ на платформе Экспериментального отделения МГИ НАН Украины (пос.Кацивели) с целью сопоставления получаемых посредством *ADCP WHM*, установленного под поверхностью, профилей течений с показаниями гирлянды измерителей течений МГИ-1301, установленными через каждые 5 м по глубине. Как и ожидалось, полученные данные оказались непригодными для проведения намеченных сопоставлений из-за наличия большого количества отражающих акустические сигналы конструкций (сваи, на которых установлена платформа, и другие элементы платформы). В целом выполненные измерения были полезны с точки

зрения приобретения опыта практической работы с *ADCP* и подтверждения его функционирования. Сравнение показаний *ADCP* и точечных измерителей течений можно проводить лишь на основе данных, полученных в условиях открытого моря (с борта судна [9], на заякоренной станции [10]). Однако вряд ли такие исследования целесообразны для каждого конкретного образца прибора в силу хорошо отлаженной технологии производства *ADCP RDI*.

При проведении натуральных исследований мы использовали следующие основные параметры постановки:

- интервал повторения циклов измерения (*ensemble interval*) около 1 с;
- значение элемента глубины (*depth cell size*) 2, 4, 5, 10 м;
- количество элементов глубины в зависимости от глубины моря (*number of depth cells*);
- использовалась мода высокое разрешение/короткая дистанция (*hardware settings – mode – high resolution / low range*);
- осреднение по циклам измерения (*water pings*) – единица (т.е. без осреднения);
- магнитное склонение (*magnetic variation*) 4,5°;
- солёность (*salinity*) 18 ‰;
- скорость течения выводилась в географической системе координат.

На протяжении всего рейса в память отдельного компьютера непрерывно велась запись показаний *GPS*. Перед началом проведения измерений внутренние часы *ADCP* были синхронизированы со встроенными часами *GPS*, указывающими время *GMT*, расхождение синхронизации периодически контролировалось на протяжении всего рейса и составило не более 1 с.

При проведении измерений на мелководных станциях прибор при помощи гидравлической лебедки, расположенной по правому борту на корме судна, вывешивался за борт так, чтобы глубина погружения *WHM* составляла 1 – 2 м (в зависимости от высоты волны). Продолжительность измерений на таких станциях определялась продолжительностью работ, выполняемых гидрологическим зондом, и составляла от 0,5 до 1 ч. Расстояние между коренным концом поддерживающего троса и прибором составляло около 5 – 7 м. Следует отметить, что при проведении измерений прибор находился вблизи корпуса судна и подвергался воздействию поверхностных волн и качки судна, т.е. прибор использовался в условиях, не рекомендованных изготовителем (см. раздел «Предварительные общие замечания»). Искажение естественного магнитного поля Земли корпусом судна определяется водоиз-



Р и с . 1 . Общий вид комплекса *ADCP*.

мещением, курсом и другими параметрами судна и простирается на достаточно большие расстояния. Косвенная оценка, приведенная в [11], составляет около 50 м для НИС «Ак.Вернадский». Можно было избежать влияния этого эффекта, выдерживая прибор на глубине 50 м, однако при этом из профиля течений был бы исключен наиболее динамичный приповерхностный слой моря выше сезонного пикноклина. Влияние качки судна и поверхностных волн на точность проводимых измерений происходит опосредствованно, через вызванные ими относительно быстрые собственные движения прибора, которые приводят к значительным динамическим погрешностям измерения угловых величин (крен, дифферент, азимут), уровень которых определяется динамическими характеристиками датчиков угловой ориентации прибора [12 – 14]. Влияние собственных движений на качество получаемой информации в данной ситуации можно уменьшить, подвергая полученные временные реализации компонент скорости на разных горизонтах низкочастотной фильтрации с частотой среза, меньшей минимальной частоты качки судна или волнения [11]. Для проведения измерений с борта судна фирма *RDI* специально выпускает *Ship mounting ADCP*, в состав которого входит адаптер подключения к судовому гироскопу; такая конфигурация прибора позволяет исключить погрешности, вызываемые искажениями естественного магнитного поля Земли корпусом судна, и в значительной мере уменьшить погрешности, вызванные качкой и волнением. Использование *Ship mounting ADCP* является, на сегодняшний день, наиболее удачным техническим решением проблемы измерения скорости течения с борта судна на шельфе.

Программа выполнения экспедиционных работ включала в себя проведение измерений как на шельфе (18 станций), так и в районе свала глубин и в глубоководной части Черного моря (45 станций), где для измерения профиля скорости течения *ADCP* использовался в качестве зондирующего прибора (*Lowered ADCP*). Последовательность проведения измерений: прибор вывешивался под поверхность и после некоторой выдержки опускался, средняя скорость погружения составляла около 0,5 м/с, далее следовала выдержка на глубине (около 2 мин), после чего производился подъем со средней скоростью около 0,8 м/с; у поверхности – выдержка около 2 мин и прибор поднимался на борт. Выбор скоростей подъема и опускания прибора производился, исходя из лимита времени забортных работ на станции. Для того чтобы избежать столкновения прибора с дном, зондирования проводились до глубины на 50 м меньшей показаний судового эхолота (но не глубже 900 м), при этом текущая глубина погружения прибора определялась по показаниям счетчика лебедки, который был прокалиброван на первой методической станции в штилевую погоду при малом дрейфе.

Использование *ADCP* в зондирующем режиме (*LADCP*) – сравнительно новая технология измерения профиля скорости течений в толще вод с борта судна [15]. Развитие такого способа измерений было продиктовано потребностью в данных прямых измерений течений для исследования динамических процессов в глубинных слоях морей. Современные низкочастотные *Ship Mounting ADCP* (75 кГц) позволяют проводить измерения в верхнем 800 – 1000 м слое моря при оптимальных условиях, со снижением точности с глубиной; для Черного моря максимальная глубина таких измерений со-

ставит 100 – 200 м в силу специфики вертикального распределения акустических характеристик вод [16]. Сущность *LADCP* технологии заключается в следующем: за каждый цикл измерения может быть рассчитано значение вертикальных сдвигов компонент скорости течения (более точно локальное распределение вертикальных сдвигов); в результате зондирования определяются распределения вертикальных сдвигов компонент скорости течений по всей толще воды; после интегрирования по глубине получается профиль скорости течения, определенный с точностью до неизвестной константы, которая определяется из показаний *GPS* или с использованием *Bottom Track* опции, детально метод рассмотрен в [17, 18]. Первая станция с применением *LADCP* технологии была выполнена в 1989 г. [15] и показала наличие полезной информации в полученных данных, однако погрешности измерений оказалась достаточно высокой, около 10 см/с. В последующие годы технология получила дальнейшее развитие и широко использовалась при проведении натурных исследований в рамках выполнения проекта *WOCE* [19]. В настоящее время *LADCP*, как правило, используется в составе гидрологического зонда и содержит два прибора (*Master/Slave*), один из которых направлен вниз, другой – вверх, что позволяет несколько снизить погрешности измерений. Существует некоторая проблема, связанная с обработкой информации, полученной посредством *LADCP*: фирма *RDI* до настоящего времени не выпустила своей версии программного обеспечения обработки *LADCP* данных. Наиболее распространено использование программного обеспечения, свободно доступного в Интернете, которое реализует подход, представленный в [18], с использованием математического аппарата инверсных решений. Программа работает в среде *MatLab*, к сожалению, не имеет удобного интерфейса и детального описания вводимых оператором параметров. Без сомнения *LADCP* технология проведения измерений течений в глубинных слоях моря с борта судна является перспективной (для Черного моря – безальтернативной), находящейся в постоянном развитии. На сегодняшний день выбор параметров *LADCP* зондирования и методов обработки данных остается открытым [18].

Характеристики датчиков. *Датчик давления* (характеристики в технической документации не представлены). С целью протестировать датчик давления (в пересчете на глубину) производились измерения, как в лабораторных условиях, так и в натуральных; полученные оценки погрешности аналогичны и составляют около $\pm 0,7$ м при доверительном интервале 95 %. На рис.2 представлена нормированная гистограмма вариаций глубины, вызванных погрешностью датчика давления. В качестве исходной информации использовались данные, полученные на ст.37 в штилевую погоду, режим измерений – выдержка под поверхностью на глубине около 2 м, продолжительность – больше 1 ч, количество измерений 3900, при обработке низкочастотный тренд исключался. Представленное распределение хорошо описывается гауссовым законом $W = \exp\{-(x/0,56)^2\}$ (рис.2, черная линия).

Как можно видеть, характеристики датчика давления невысоки, что может вызывать некоторые сложности при обработке информации *LADCP* и ограничение возможности использования данных для сопоставления с данными профилометра по вертикальной компоненте измеряемой скорости, аналогично методике рассмотренной в [11], что могло бы быть использова-

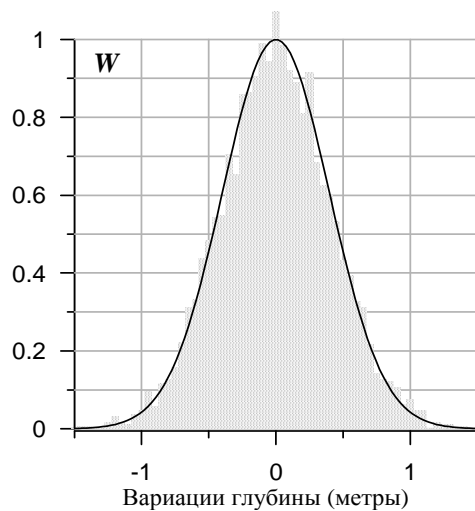


Рис. 2. Нормированная гистограмма вариаций глубины, вызванных погрешностью датчика давления.

Для более полного представления о характеристиках датчика температуры. При использовании *ADCP* в качестве зондирующего комплекса или при исследовании относительно быстрых процессов более важной характеристикой датчика температуры является не столько точность, приведенная выше, сколько его инерционность. Оценку этого параметра мы произвели на основе натуральных данных, воспользовавшись разностью температур воздуха и поверхностного слоя моря, т.е. сразу после погружения мы регистрировали процесс установления показаний датчика температуры, соответствующая реализация представлена на графике (рис.3, светлая линия). Как можно видеть, полученная передаточная характеристика (отклик на ступень) датчика температуры представляет собой реакцию линейного интегрального звена и может быть аппроксимирована эмпирической зависимостью (темная линия):

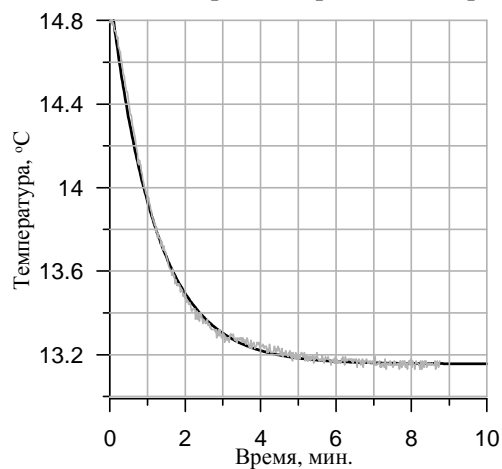


Рис. 3. Процесс установления показаний датчика температуры.

но для повышения точности.

Датчик температуры (диапазон 5 – 45 °С, точность 0,4 °С, дискретность 0,01 °С). Показания датчика температуры, в совокупности со значением солёности, введенной оператором, используются для расчета скорости звука [20] в приборе при проведении каждого цикла измерения. Погрешность определения скорости звука вносит определенный вклад в погрешность измерения профилей течений как при вычислении доплеровского сдвига частоты, так при пересчете профилей в географическую систему координат, вследствие рефракции акустических лучей на неоднородностях поля скорости звука [8]. Было целесообразно полу-

$$13,156 + (14,8 - 13,156 \cdot \exp(-(t - 0,1)/1,2)),$$

где 13,156 °С – температура поверхностного слоя моря; 14,8 °С – температура воздуха; t – время (мин); 1,2 – постоянная времени (τ – время релаксации) датчика температуры (мин). Большая инерционность датчика температуры, неопределенность профиля солёности при проведении зондирований приводят к соответствующим погрешностям в определении текущего значения скорости звука, используемого прибором для расчета важных параметров функционирования

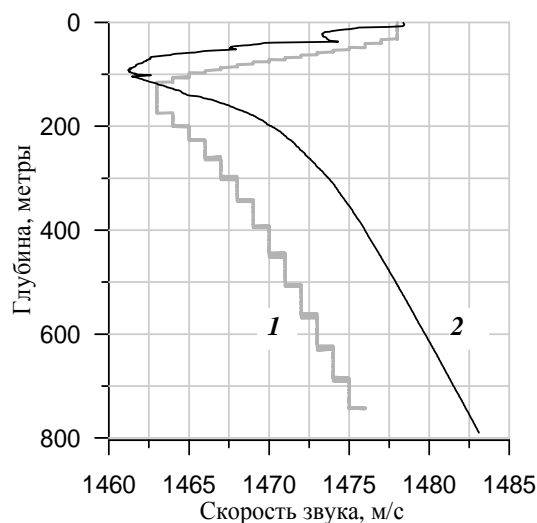


Рис. 4. Профили скорости звука для глубоководной ст.7: LADCP (1); Sea Bird (2).

и приводящим к дополнительным погрешностям определения компонент скорости течения. Для примера представлены профили скорости звука для глубоководной ст.17 (рис.4) при погружении, зарегистрированные LADCP и рассчитанные по профилям CTD зонда Sea Bird по формуле, рекомендованной UNESCO-1983 [21].

Датчик скорости (диапазон измеряемых скоростей ± 20 м/с, с.к.о. измерения скорости 30 мм/с, дальность действия 123 м, при размере элемента 4 м).

Датчик наклонов (диапазон $\pm 15^\circ$, погрешность $0,5^\circ$, разрешение $0,01^\circ$).

Компас (точность $\pm 2^\circ$, по-

грешность $0,5^\circ$, разрешение $0,01^\circ$, при допустимом наклоне $\pm 15^\circ$).

Обработка информации. Целесообразно разделить обсуждение вопросов, связанных с обработкой первичных данных, полученных при выполнении мелководных и глубоководных станций, в силу некоторого различия как методических, так и математических аспектов.

Обработку данных, полученных на мелководных станциях, рассмотрим на примере ст.54, выполненной в штилевую погоду 17 мая 2004 г.; глубина моря 91 м; начало: 17:53:08 GMT, $44^\circ 05,473'$ с.ш., $30^\circ 07,956'$ в.д.; конец: 18:09:10 GMT, $44^\circ 05,401'$ с.ш., $30^\circ 07,908'$ в.д.

Прибор выдерживался на глубине около 5 м, а не 2 м из-за большого количества медуз, середина первого элемента измерения относительно прибора 6,14 м, относительно поверхности моря 11,05 м, размер элемента по глубине 4 м, время между циклами измерения 1,07 с, количество уровней 30 (N_{Level}). Получаемые в каждый цикл измерения профили скорости содержат в себе две составляющие скорость течения и скорость собственного движения прибора. Расчет профиля скорости естественного течения удобно представить в следующем виде [11]:

$$\mathbf{U}_{Absolute}(i, j) = \mathbf{U}_{Measured}(i, j) + \mathbf{U}_{Motion}(i), \quad (1)$$

где i – номер цикла измерения, j – номер уровня измерения ($j = 1 - N_{Level}$), $\mathbf{U}_{Absolute}(i, j)$ – трехмерный вектор скорости морского течения ($U_{Absolute}$, $V_{Absolute}$, $W_{Absolute}$), система координат географическая, положительные направления, U – восток, V – север, W – от дна к поверхности моря, $\mathbf{U}_{Measured}(i, j)$ – трехмерный вектор измеренной ADCP скорости течения ($U_{Measured}$, $V_{Measured}$, $W_{Measured}$), $\mathbf{U}_{Motion}(i)$ – трехмерный вектор скорости перемещения ADCP (U_{Motion} , V_{Motion} , W_{Motion}).

В условиях проведения измерений на мелкой воде в режиме выдержки прибора у поверхности моря второе слагаемое правой части соотношения (1) после осреднения должно быть равно средней скорости дрейфа судна

$\langle \langle \mathbf{U}_{Motion}(i) \rangle_i = \langle \mathbf{U}_{Drift}(i) \rangle_i, \langle \dots \rangle_i$ – операция осреднения по индексу i). В рамках этого предположения производилась обработка данных. Профиль скорости естественного течения, полученный для ст.54 в результате осреднения, представлен на рис.5. В математическом виде полученный профиль может быть представлен следующими соотношениями:

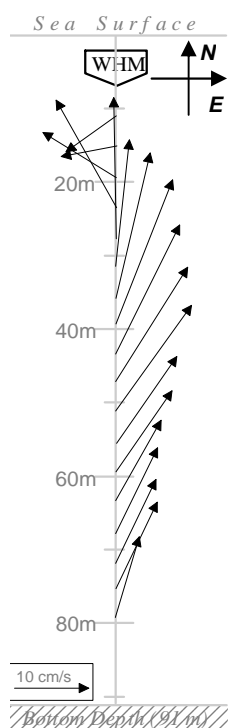
$$\mathbf{U}_{Absolute}(H_j) = \langle \mathbf{U}_{Measured}(i, j) \rangle_i + \langle \mathbf{U}_{Drift}(i) \rangle_i,$$

$$H_j = \langle H_{whm}(i) \rangle_i + (j - 1)H_{Cell} + H_{FirstCeel}, \quad (2)$$

где H_j – глубина центра j -го элемента измерения, $H_{whm}(i)$ – измеряемая глубина расположения ADCP (WHM).

Из соотношений (1), (2) следует, что обработка данных ADCP, полученных в условиях мелкой воды, алгоритмически достаточно проста, и может быть выполнена с использованием программы *WinADCP*, при этом полученные значения придется записывать вручную. Определение среднего значения скорости дрейфа судна ($\langle \mathbf{U}_{Drift}(i) \rangle_i$) производилось посредством расчета наклона линейной аппроксимации временной зависимости координат судна на основе синхронных *GPS* данных методом наименьших квадратов. Такой подход дает более высокую точность определения скорости дрейфа судна по отношению к её расчету по начальному и конечному положению, что было проверено на основе *GPS* данных, полученных в стационарных условиях.

Как можно видеть, на рис.5 приведены значения скорости течения лишь для 18-ти уровней глубины, в то время как установленное количество уровней 30 (N_{Level}), т.е. измерения заведомо охватывают придонную область, 19 и 20 уровни исключены из полученного профиля сознательно на основе рекомендаций *RDI* [8].



Адекватность измеренных значений скорости на 2-х уровнях выше дна реальным скоростям течений скорее исключение, чем правило. Во избежание неверной трактовки результатов измерений в придонной области, 2 уровня выше дна следует исключать из рассмотрения. Искажение информации на рассматриваемых уровнях обусловлено техническими причинами. Таким образом, слой воды, в котором могут быть получены корректные ADCP данные, ограничен: сверху – $\langle \langle H_{whm}(i) \rangle_i + H_{FirstCeel} \rangle$; снизу – $(H_{Bottom} - 2 \cdot H_{Cell})$.

Существуют некоторые нюансы, которые необходимо учитывать при обработке данных, чтобы избежать получения ложных результатов и последующих неверных выводов.

На рассматриваемой станции количество информативных циклов измерения составило 749, однако, для расчетов были использованы только первые 400 (продолжительность наблюдений около 7 мин), причиной этому послужило выполнение зондирования *CTD* зондом с носовой лебедки. Расстояние между лебедками около 30 м,

Р и с . 5 . Профиль скорости естественного течения на ст.54.

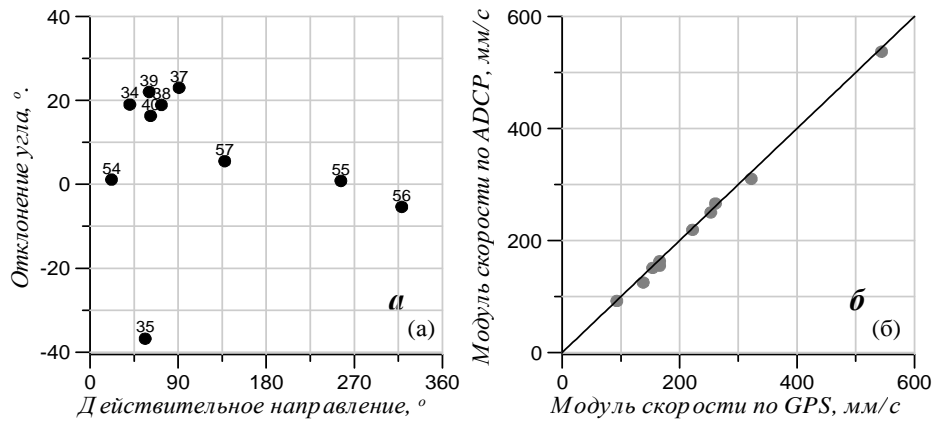
и по расчетам зонд не должен был попадать в зону действия акустического излучения *ADCP*. Зарегистрированное куполообразное изменение скорости до 60 см/с в течение 10 с при погружении *CTD* зонда и через некоторое время при его подъеме аналогичное изменение скорости с обратным знаком позволило однозначно определить природу наблюдаемого изменения скорости. Причина заключается в том, что преобразователи *WHM ADCP*, хотя и имеют достаточно острую диаграмму направленности, тем не менее, при наличии в зоне бокового лепестка объекта с большим значением силы цели [22], [20], доминирующий вклад в эхо сигнал дает сигнал, отраженный от объекта. Приведенная ситуация встречалась на многих станциях, где гидрологический *CTD* зонд работал одновременно с *ADCP*, при обработке данных на таких станциях это обстоятельство учитывалось. К сожалению, этим проблемы обработки данных не исчерпываются.

Основная проблема обработки *ADCP* данных, полученных на мелководных станциях, заключается в том, что при проведении измерений прибор находился вблизи корпуса судна. Из-за локального искажения магнитного поля Земли, полученные значения $\mathbf{U}_{Measured}(i, j)$ будут развернуты относительно магнитного меридиана (магнитное склонение учитывается) на неизвестный угол δ , значение которого, из общих соображений, должно определяться параметрами судна, его курсом и относительным положением прибора. Каков диапазон значений δ и как определить его значение из натурных данных – вопрос в литературе не освещенный. В рамках выполнения обработки данных мы попытались найти ответ на этот вопрос. На мелководных станциях количество уровней измерения устанавливалось заведомо большим глубины места проведения измерений. Это дало нам возможность при обработке данных выделять уровни наиболее близкие к дну (j_{Bottom}). Критерием выбора был максимум интенсивности осредненного по 4-м лучам эхо сигнала, информация о скорости для данного уровня интерпретировалась как скорость движения прибора относительно земной поверхности. Перепишем соотношения (1) для уровня соответствующего дну, полагая $\langle \mathbf{U}_{Absolute}(i, j_{Bottom}) \rangle_i = 0$:

$$\langle \mathbf{U}_{Measured}(i, j_{Bottom}) \rangle_i = - \langle \mathbf{U}_{Motion}(i) \rangle_i = - \langle \mathbf{U}_{Drift}(i) \rangle_i. \quad (3)$$

Для ст.54 (при осреднении данных на 7 мин. интервале): *GPS* – модуль скорости дрейфа судна = 16 см/с, азимут $\alpha_{Drift} = 207^\circ$; *ADCP*, $j_{Bottom} = 21$ – модуль скорости = 15 см/с, азимут $\alpha_{Bottom} = 28^\circ$.

С учетом соотношения (3), наблюдается очень хорошее совпадение оценки одного и того же параметра, полученной абсолютно разными измерителями *GPS* и *ADCP*, различие по модулю составляет 1 см/с, по азимуту 1° ($\alpha_{BottomGPS} = 180^\circ + \alpha_{Drift} = 27^\circ$, $\alpha_{Bottom} = 28^\circ$). Полученный результат кажется несколько неожиданным, т.к. погрешность определения координат по *GPS* в настоящее время составляет около 10 м, а определение скорости относительно дна по одному уровню представляется достаточно грубой оценкой. Для того чтобы избежать случайных совпадений, мы провели аналогичные расчеты для 10-ти мелководных станций, результаты представлены на рис.6 (индексы – номера станций). На (рис.6, б) представлена зависимость модуля скорости измеренной *ADCP* на уровне j_{Bottom} (для разных станций глубина моря от 50 до 80 м) от модуля скорости дрейфа судна, рассчитанной по синхронным данным *GPS*. Как можно видеть, хорошее соот-



Р и с . 6 . Отклонение ($^{\circ}$) (а) и модуль скорости (мм/с) (б) по 10 станциям ADCP на мелководье (номера станций указаны на (а)).

ветствие значений модулей скорости сохраняется в широком диапазоне.

В левой части рис.6, а представлена зависимость отклонения угла ($\alpha_{Bottom} - \alpha_{BottomGPS}$) от действительного направления ($\alpha_{BottomGPS}$). При некоторых направлениях ($< \sim 90^{\circ}$) наблюдается значительное отклонение до $\pm 35^{\circ}$. С нашей точки зрения это результат влияния корпуса судна на показания компаса ADCP, как следствие локального искажения естественного магнитного поля Земли. Полученные результаты достаточно наглядны и позволяют исследователям делать выбор: учитывать или не учитывать при обработке данных влияние корпуса судна на качество результатов. При обработке данных ADCP, полученных на мелководных станциях, мы попытались учесть рассмотренный выше эффект. Первоначально рассчитывались профили относительно уровня j_{Bottom} :

$$\mathbf{U}_{FirstStep}(H_j) = \langle \mathbf{U}_{Measured}(i, j) - \mathbf{U}_{Measured}(i, j_{Bottom}) \rangle_i, \quad (4)$$

далее для получения профиля абсолютной скорости течения выполнялся поворот $\mathbf{U}_{FirstStep}(H_j)$ около вертикальной оси на угол δ

$$\delta = \alpha_{Drift} - (\alpha_{Bottom} + 180^{\circ});$$

$$U_{Absolute}(H_j) = U_{FirstStep}(H_j) \cdot \cos \delta + V_{FirstStep}(H_j) \cdot \sin \delta; \quad (5)$$

$$V_{Absolute}(H_j) = -U_{FirstStep}(H_j) \cdot \sin \delta + V_{FirstStep}(H_j) \cdot \cos \delta, \quad j = 1 - (j_{Bottom} - 2).$$

В качестве примера, на рис.7, а, б представлены векторы $\mathbf{U}_{bottom} = \langle \mathbf{U}_{Measured}(i, j_{Bottom}) \rangle_i$ и $\mathbf{U}_{Drift} = \langle \mathbf{U}_{Drift}(i) \rangle_i$, полученные на ст.35 при выдержке прибора на глубине 2 м (рис.7, а) и 21,6 м (рис.7, б). В нижней части рисунка представлены профили скорости течения, полученные при выдержке прибора на тех же уровнях глубины (рис.7, в, г). Профили течений при выдержке прибора на 21,6 м рассчитывались по соотношению (4), т.е. относительно дна. Профили течения для глубины погружения прибора 2 м, рассчитанные по соотношению (2), представлены на (рис.7, в), с учетом (4) и (5) – на (рис.7, г). Как можно видеть из представленной графической информации, влияние корпуса судна достаточно велико, однако может быть учтено при обработке полученных данных.

На станциях с глубинами моря от 80 до 150 м (прибор при выдержке у поверхности уже не захватывает уверенно сигнал, отраженный от дна) мы

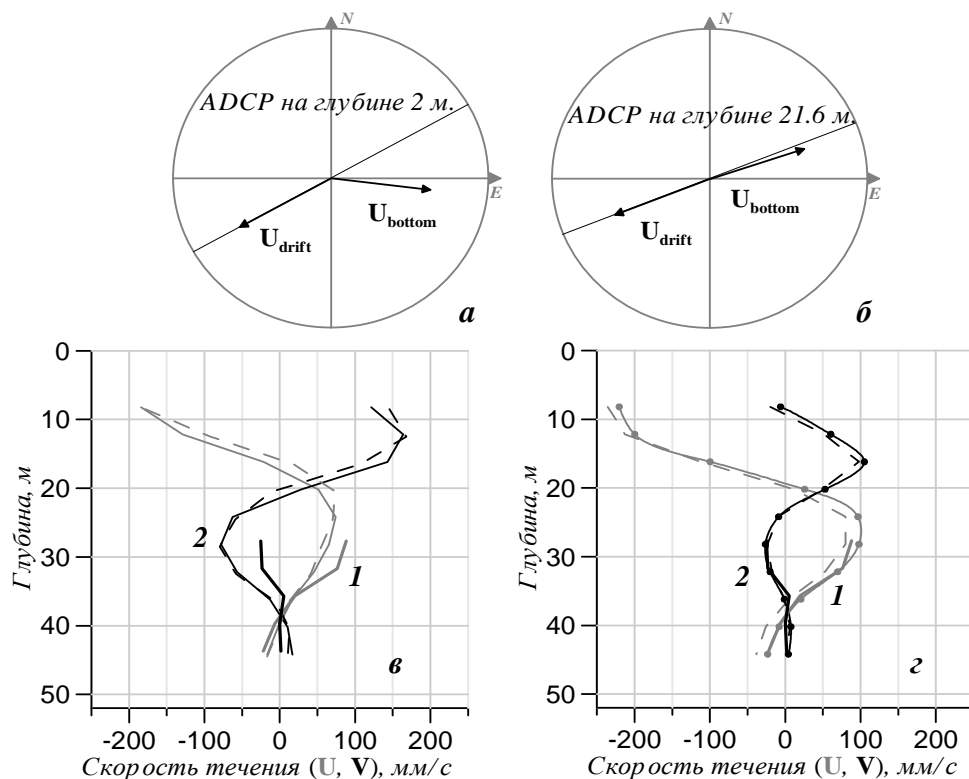


Рис. 7. Соотношение дрейфа судна и рассчитанных придонных скоростей U (1) и V (2) при выдержке ADCP на глубине 2 м (а) и 21,6 м (б) на примере ст.35 (глубина моря 54 м). Профили течения при выдержке прибора на тех же горизонтах (в, г): ADCP на 2 м до погружения прибора (тонкая линия), после проведения зондирования вниз/вверх и остановке на 2 м (штрих пунктир); при выдержке ADCP на глубине 21,6 м (жирная линия).

проводили измерения на двух уровнях выдержки у поверхности (2 м) и на глубине ($H_{bottom} - 50$ м). Обработка информации проводилась аналогично приведенной выше методике, с той лишь разницей, что критерием поиска угла поворота являлся минимум среднеквадратического расхождения профиля относительно дна, полученного при выдержке на глубине, и профиля, полученного у поверхности с учетом дрейфа, в зоне их перекрытия. Для наглядности на рис.8 представлены профили, полученные на ст.41 (глубина 135 м).

Расчетные соотношения для выдержки на глубине 70 м:

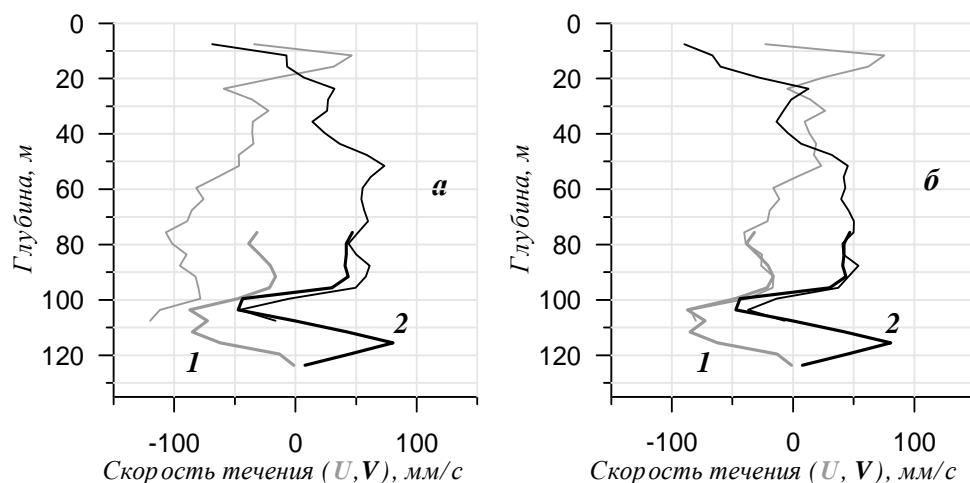
$$\mathbf{U}_{Absolute}(H_j) = \langle \mathbf{U}_{Measured}(i, j) - \mathbf{U}_{Measured}(i, j_{Bottom}) \rangle_i; \quad (6)$$

для выдержки у поверхности (2 м):

$$U_{Absolute}(H_j) = \langle U_{Measured}(i, j) \rangle_i \cos \delta + \langle V_{Measured}(i, j) \rangle_i \sin \delta + \langle U_{Drift}(i) \rangle_i \quad (7)$$

$$V_{Absolute}(H_j) = - \langle U_{Measured}(i, j) \rangle_i \sin \delta + \langle V_{Measured}(i, j) \rangle_i \cos \delta + \langle V_{Drift}(i) \rangle_i$$

угол δ определяется в зоне перекрытия профилей от 75 до 105 м методом наименьших квадратов. Приведенные данные демонстрируют наличие достаточно интенсивных динамических процессов, с полным поворотом вектора течений в придонной области. К сожалению, обсуждение физических аспектов наблюдаемых явлений выходит за рамки данной статьи и может

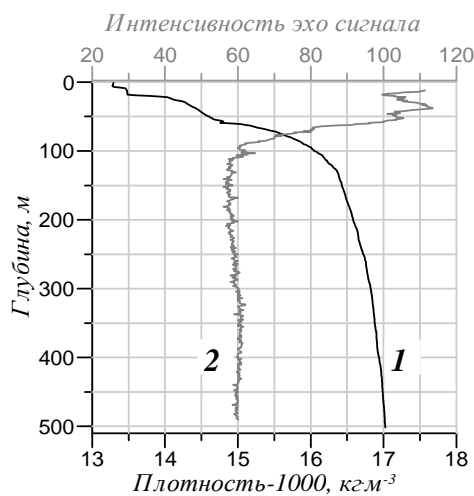


Р и с . 8 . Профили скоростей течений U (1) и V (2) на ст.41 (глубина моря 135 м): без угловой коррекции (а), с коррекцией (б). Обозначения аналогичны рис.7.

быть выполнено только в контексте всей информации по течениям полученной в рейсе в данном районе. Обратим внимание на необходимость выполнения угловой коррекции полученных у поверхности данных, в особенности, если пользователя информации интересуют не только модули сдвигов скорости течений.

Перед тем, как перейти к обсуждению вопросов, связанных с обработкой информации, полученной на глубоководных станциях, сделаем небольшое замечание по специфике акустических характеристик вод глубоководной части Черного моря. Особенность акустических свойств черноморских вод (с точки зрения использования *ADCP*) заключается в резком уменьшении количества рассеивателей ниже основного пикноклина. Для демонстрации этого факта на рис.9 представлены профили плотности и интенсивности эхо сигнала. Такое поведение интенсивности вызывает резкое сокращение дальности действия *ADCP* при его погружении ниже основного пикноклина, так в верхней части моря дальность составляет 80 – 120 м, ниже основного пикноклина от 20 до 30 м. Именно это обстоятельство ограничивает применение *Ship Mounting ADCP* в Черном море верхним 100 – 200 м слоем [16, 23] и делает наиболее перспективным направлением измерения профилей скорости течения с борта судна по *Lowered ADCP* технологии.

Обработка информации производилась следующим образом. На первом шаге обработки рассчитывались профили вертикальных сдвигов компонент скорости по данным, полученным при опускании прибора и при его



Р и с . 9 . Профили плотности (1) и интенсивность эхо сигнала (2).

подъеме. При этом мы использовали следующие соотношения.

$$\mathbf{U}_{Measured}(i, j) = \mathbf{U}_{Absolute}(h_{ij}) - \mathbf{U}_{Motion}(i), \quad (8)$$

где $\mathbf{U}_{Measured}(i, j)$ – измеренное значение скорости в i -й момент времени в j -м элементе, $\mathbf{U}_{Absolute}(h_{ij})$ – значение скорости течения относительно земной поверхности ($h_{ij} = h_{whm}(i) + (j - 1) \cdot H_{Cell} + H_{FirstCeel}$), $\mathbf{U}_{Motion}(i)$ – скорость движения прибора в i -й момент времени.

Далее в каждом кадре производится расчет вертикальных сдвигов компонент измеренной скорости:

$$\mathbf{U}'_{Measured}(i, h_j(i)) = \mathbf{U}'_{Absolute}(h_j(i)) - \mathbf{U}'_{Motion}(i), \quad (9)$$

$$\mathbf{U}'_{Measured}(i, h_j(i)) = (\mathbf{U}_{Measured}(i, j + 1) - \mathbf{U}_{Measured}(i, j)) / H_{Cell},$$

$$h_j(i) = h_{whm}(i) + (j - 0,5)H_{Cell} + H_{FirstCeel},$$

$$\mathbf{U}'_{Absolute}(h_j(i)) = (\mathbf{U}_{Absolute}(h_{j+1}(i)) - \mathbf{U}_{Absolute}(h_j(i))) / H_{Cell},$$

где $\mathbf{U}'_{Motion}(i) = 0$ в предположении, что измерение профиля скорости в цикле измерения производится почти мгновенно (0,1 – 0,2 с).

Таким образом, соотношение (9) можно представить в виде:

$$\mathbf{U}'_{Measured}(i, h_j(i)) = \mathbf{U}'_{Absolute}(h_j(i)). \quad (9')$$

После получения массива сдвигов, соответствующих, согласно (9'), сдвигам абсолютных скоростей течений, находим их значения в узлах регулярной по глубине сетки h_k

$$\mathbf{U}'_{Absolute}(h_k) = \langle \mathbf{U}'_{Measured}(i, h_j(i)) \rangle_{ij}, \quad (10)$$

$h_k = (k - 1)\Delta H$ (в нашем случае $\Delta H = 1$ м), $\langle \dots \rangle_{ij}$ – осреднение по i и j , таким, что $(h_k - \delta H) \leq h_j(i) \leq (h_k + \delta H)$, δH – подбирается из условий проведения измерений.

Для получения профиля выполняем операцию интегрирования

$$\mathbf{U}_{Absolute}(h_k) = \mathbf{U}_{Absolute}(0) + \sum \mathbf{U}'_{Absolute}(h_k) \cdot \Delta H. \quad (11)$$

Получаем в результате профиль абсолютного течения с точностью до некоторой постоянной $\mathbf{U}_{Absolute}(0)$. Определить неизвестную постоянную можно различными методами, с использованием *GPS* или *Bottom Track* данных.

После пояснения технологии обработки, представим результаты на примере данных, полученных на ст.44 (глубина моря 415 м, $U_{drift} = 244$ мм/с, $V_{drift} = -52$ мм/с). На рис.10, а представлены профили U -компоненты, определенные с точностью до неизвестной постоянной, рассчитанные для погружения прибора и для его подъема с глубины. Интегрирование производилось сверху вниз. При расчетах использовались данные, полученные при нахождении прибора ниже глубины 30 м с целью избежать влияния корпуса судна. Наблюдается достаточно хорошее совпадение профилей в верхней части моря (в пределах 20 мм/с) и некоторое возрастание расхождения (до 50 мм/с) в нижней части моря, возможно, вызванное наличием некоторой систематической составляющей. Для северной компоненты расхождение профилей не превышает 10 мм/с во всем диапазоне глубин. На рис.10, б представлены профили плотности (с целью показать расположение основного пикноклина) и интенсивности эхо сигнала, демонстрирующего, что специфика поведения акустических свойств сохраняется в Черном море не только на глубокой воде, но и в районе свала глубин. Одной из причин выбора ст.44 для демонстрации результатов обработки стало то обстоятельство, что при проведении зондирования выдержка прибора на глубине 370 м

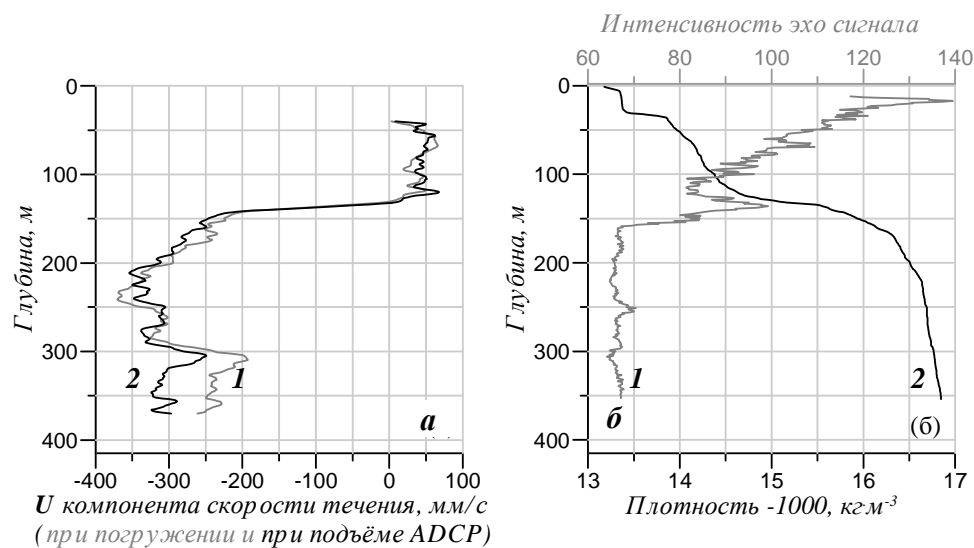


Рис. 10. Профили скорости U -компоненты (мм/с), определенные с точностью до неизвестной постоянной: при погружении прибора (1) и при его подъеме с глубины (2) (а); интенсивность эхо сигнала (1) и плотность (2) (б).

составила около 5 мин. При этом в течение этого периода центр 18-го элемента измерения точно соответствовал поверхности дна. Таким образом, это дало нам возможность произвести определение постоянной интегрирования по *Bottom Track* данным с точностью до 10 мм/с. На рис.11, а представлены конечные профили компонент абсолютной скорости течения, ка- ждых из которых содержит три элемента:

- жирные линии (ближе ко дну) – профили рассчитаны относительно дна по соотношению (6);
- тонкие линии – *LADCP* профили рассчитаны по соотношениям (9) – (11), постоянная определена методом наименьших квадратов в зоне перекрытия с придонным профилем, были использованы совместно данные полученные при погружении прибора и при его подъеме, при нахождении прибора ниже 30 м глубины;
- жирные линии (ближе к поверхности) рассчитаны с учетом влияния корпуса судна по соотношениям (6), (7), при использовании *LADCP* профи- ля, в качестве исходных данных использовались данные, полученные в пре- делах 5 мин до начала зондирования.

На рис.11, б представлены профили компонент абсолютной скорости течения:

- жирные линии представляют те же самые профили, что и в левой части рисунка;
- тонкие линии – профили, рассчитанные с использованием програм- мы, взятой из Интернета [18].

Как можно видеть из рис.11, наблюдается полное несоответствие между профилями, представленными на рисунке, при некотором подобии формы, полученными по простым соотношениям, приведенными выше (рис.11, а), и рассчитанными методом инверсных решений [18] (рис.11, б). Мы склонны доверять тому, что получено нами по формулам (6), (7), (9) – (11) (рис.11, а),

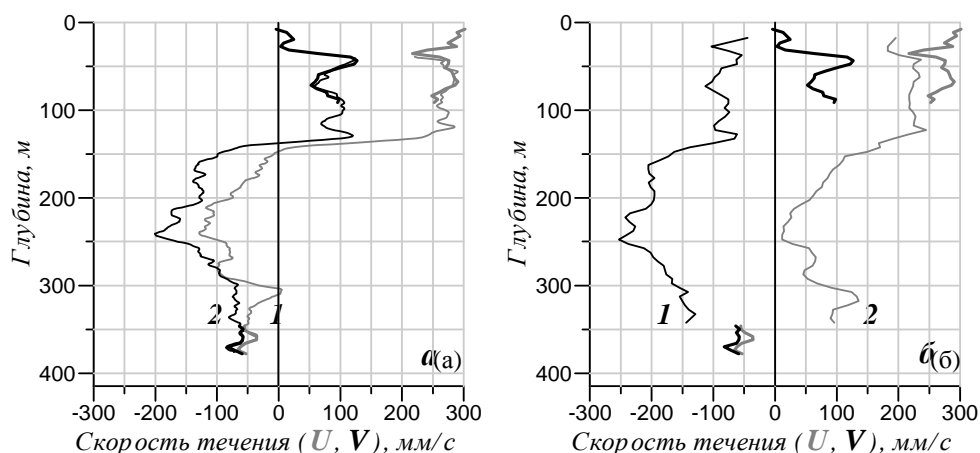


Рис. 11. Абсолютные скорости U (1) и V (2) течений, рассчитанные по формулам (6), (7), (9) – (11) (а) и скорости, восстановленные по программе на основе метода инверсных решений [18] (б). Обозначения линий в тексте.

по крайней мере, здесь использованы данные не только *ADCP*, но и *GPS*, и все они находятся в достаточно хорошем соответствии. Причин расхождения наблюдаемых на рис.11, б можно предположить несколько:

- неучтено влияние корпуса судна, в [18] это не упоминается;

- исходная формула (1) $U_{adcp} = U_{ocean} + U_{ctd} + U_{noise}$ в [18], с нашей точки зрения, содержит ошибку в знаке, опустив шумовую составляющую, перепишем ее в обозначениях данной статьи: $U_{Measured} = U_{Absolute} + U_{Motion}$. Перед вторым слагаемым правой части должен стоять знак «минус», т.е. правильно формула будет выглядеть (1) [11]: $U_{Measured} = U_{Absolute} - U_{Motion}$, если это не описка, то наблюдаемое расхождение вполне может быть результатом этой неточности.

Обсуждение. Представленный в работе материал достаточно наглядно демонстрирует характеристики *Self Contained ADCP*, как современного технического средства измерения течений. Несмотря на то, что прибор разрабатывался для проведения измерений в условиях неподвижного основания и укомплектован датчиками, имеющими соответствующие характеристики, тем не менее, его применение для измерения течений с борта судна является перспективным в решении задачи оперативного контроля динамики вод при проведении гидрологических съёмки [15, 17, 18]. Несомненно, использование *ADCP* в условиях, не предусмотренных изготовителем, влечет за собой необходимость решения дополнительных вопросов, частично затронутых в данной работе, которые необходимо учитывать при обработке данных. К сожалению, на текущий момент времени не существует единого программного обеспечения обработки *LADCP* данных и каждый пользователь прибора вынужден либо разрабатывать собственную программу, либо пользоваться доступной в Интернете.

В силу специфики акустических свойств черноморских вод мы вынуждены были избрать первый путь. На данной стадии разработки программы мы пока не смогли разрешить некоторые дополнительно возникшие вопросы, связанные с учетом собственных движений прибора. Однако приобретенный опыт работы с первичными *LADCP* данными позволяет выработать некоторые практические рекомендации по применению прибора в условиях Черного

моря. Рекомендуемое значение размера элемента 4 м, интервал повторения циклов измерения 0,5 с (прибор автоматически установит минимальное значение в зависимости от заданного количества элементов измерения). При проведении измерений на мелководных станциях рекомендуется устанавливать количество элементов измерения на $3H_{cell}$ больше расстояния до дна. На станциях с глубиной моря более 80 м рекомендуется проводить выдержку у дна, но не менее чем в 50 м (лучше 70 м) от него. При выполнении глубоководных станций скорость погружения прибора должна быть не более 0,5 – 0,6 м/с, количество элементов измерения рекомендуется $80/H_{cell}$.

Наибольшую ценность информации о динамике вод представляют профили абсолютных скоростей течений или иначе скоростей течений относительно земной поверхности. Для обеспечения привязки профилей, полученных посредством *ADCP* к земной поверхности, существует две возможности: использование *Bottom Track* и *GPS* данных. Качество *Bottom Track* данных, полученных в результате обработки *Water Profiling* данных, сильно зависят от угла наклона прибора, и в ряде их использование может привести к значительным ошибкам. Этот вопрос в полной мере решается путем приобретения устанавливаемой *Bottom Track* опции, которая обеспечивает надежную привязку профилей течений к земной поверхности за счет выработки отдельных зондирующих импульсов большой длительности. Непрерывная запись *GPS* данных на протяжении всего рейса, на отдельный компьютер позволяет при обработке данных учитывать движение судна на каждой станции. Можно улучшить географическую привязку судна при проведении станций путем приобретения *DGPS* европейской системы *Omni Star* или других, однако на данном этапе в этом нет насущной потребности.

В целом измерение скоростей течений с борта судна посредством *ADCP* – перспективное направление в области оперативного профилирования течений.

Выражаем свою благодарность оргкомитету проекта *GEF Black Sea Ecosystem Recovery Project – RER/01/G33* за предоставленную возможность работы с прекрасным изделием фирмы *RDI – ADCP Work Horse Monitor*. Особая благодарность экипажу НИС «Академик» Института океанографии Болгарской АН за создание благоприятных условий при проведении измерений и сотрудникам Морского гидрофизического института НАН Украины выполнившим большую подготовительную работу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Plaisted R.O., Richardson W.S.* Current fine structure in the Florida Current // *J. Marine Res.*– 1970.– 28, №3.– P.359-363.
2. *Ефимов В.В., Кушнир В.М., Заикин В.М.* Течения и адвективный перенос тепла в Экваториальной Атлантике // *Океанографические исследования в тропической зоне Атлантического океана.*– Л.: Гидрометеиздат, 1982.– С.17-28.
3. *Wenstrand D.C.* Measurements of vertical profiles of oceanic current and Richardson number near St.Croix // *J. Hydronautics.*– 1979.– 13, №3.– P.69-76.
4. *Дроздов А.Е., Кушнир В.М.* Комплекс гидрофизический зондирующий для океанографических исследовательских судов // *Записки по гидрографии.*– 1991.– 226.– С.49-57.
5. *Морозов А.Н.* Разностно-дальномерная гидроакустическая система контроля движений гидрофизических приборов.– Дисс. на соиск. степени канд. техн. н.– Севастополь, 1991.– 151 с.

6. *Fiekas V., Leach H., Mirbach K.-J., Woods J.D.* Mesoscale instability and upwelling. Part 1. Observations at the North Atlantic intergyre front // *J. Phys. Oceanogr.*– 1994.– 24(8).– P.1750-1758.
7. *Sherman R.K., Barth J.A., Kosro M.* Diagnosis of the three-dimensional circulation associated with mesoscale motion in the California Current // *J. Phys. Oceanogr.*– 1999.– 29(4).– P.651-670.
8. *Acoustic doppler current profilers principles of operation: a practical primer.*– RD Instruments, 1996.– 54 p.
9. *Edwards A., Griffiths C., Fernand L.* Use of ADCP and S4 current meters at high sampling rates in stratified Scottish coastal waters // *Proc. IEEE 5th Working Conf. on Current Measurement.* February 7-9, 1995.– 95CH35734.– P.65-70.
10. *Irish J.D., Plueddemann A.J., Lentz S.J.* In-situ comparisons of moored acoustic Doppler profilers with conventional VACM and VMCM current meters // *Proc. IEEE 5th Working Conf. on Current Measurement,* February 7-9, 1995.– 95CH35734.– P.59-64.
11. *Кушнин В.М., Морозов А.Н.* Контроль метрологических характеристик измерителя скорости потока зонда-профилографа ОЛТ по данным натуральных зондирований // *Морской гидрофизический журнал.*– 2001.– 5.– С.56-66.
12. *Колтаков Ю.Н., Кушнин В.М.,* Влияние собственных движений измерителя на точность результатов зондирования течений // *Тонкая структура и синоптическая изменчивость морей и океанов.*– Таллин: Изд-во ЭССР, 1984.– С.50-52.
13. *Кушнин В.М.* Точность измерения угловых координат гидрофизических приборов // *Морской гидрофизический журнал.*– 1989.– 4.– С.47-51.
14. *Кушнин В.М.* Динамика угловых колебаний гидрофизического зонда // *Морской гидрофизический журнал.*– 1991.– 2.– С.21-28.
15. *Firing E., Gordon R.* Deep ocean acoustic Doppler current profiling // *Proc. IEEE 4th Working Conf. on Current Measurements.*– MD, IEEE, 1990.– P.192-201.
16. *Oguz T., Besiktepe S.* Observations on the Rim Current structure, CIW // *Deep-Sea Research I.*– 1999.– 46.– P.1733-1753.
17. *Fisher J., Visbeck M.* Deep velocity profiling with self-contained ADCPs // *J. Atmos. Oceanic Technol.*– 1993.– 10.– P.764-773.
18. *Visbeck M.* Deep velocity profiling using Lowered Doppler Current Profilers: bottom track and inverse solutions // *J. of Atm. and Ocean. Tech.*– 2002.– 19.– P.794-807.
19. *Firing E.,* Lowered ADCP developments and use in WOCE // *WOCE Newsletter.*– №30.– Southampton, United Kingdom, 1998.– P.10-13.
20. *Urlick R.J.* Principles of underwater sound.– McGraw-Hill, New York, 1983.– 357 p.
21. *Chen C.-T., Millero F.J.* Speed of sound in seawater at high pressures // *J. Acoust. Soc. of Amer.*– 1977.– 62 (5).– P.1129-1135.
22. *Евтютов А.П. и др.* Справочник по гидроакустике.– Л.: Судостроение, 1982.– 318 с.
23. *Ilyin Y.P., Besiktepe S., Ivanov V.A., Sur H.I., Lemeshko E.M., Gungor H., Ozsoy E.* Western Black Sea currents by the ship measurements and satellite imagery // *Ecosystem modeling as a management tool for the Black Sea.* Eds L.I.Ivanov, T.Oguz.– Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1998.– v.2.– P.119-129.

Материал поступил в редакцию 11.03.2005 г.
После доработки 23.03.2005 г.