

Автоматизация научных исследований морей и океанов

УДК 551.465

А.Н. Морозов, Е.М. Лемешко

Методические аспекты использования акустического доплеровского измерителя течений (ADCP) в Черном море

Впервые в акватории Черного моря был использован акустический доплеровский измеритель течений (ADCP) фирмы *RDI* в зондирующем режиме (*Lowered ADCP*). Такое направление применения *ADCP* находится в стадии становления и отработки различных методик проведения измерений и их последующей обработки и позволяет получить распределение скоростей течений до глубин 1000 – 6000 м в зависимости от модификации прибора. В статье излагаются методики проведения измерений *ADCP* в зондирующем режиме во время экспедиции и этапы обработки первичной информации, при этом широко использовался опыт работ МГИ НАН Украины с аналогичными акустическими измерителями течений в 80-е годы. В результате обобщен опыт применения *ADCP* в гидрологических условиях Черного моря, даны алгоритмы обработки данных, приведены профили абсолютной скорости течений на ряде станций, дано сопоставление с геострофическими скоростями и приведена глубоководная структура поля течений на разрезе шельф — область открытого моря вдоль 31,17° в.д.

Введение. Измерение вертикального профиля скорости морских течений с борта судна — одна из актуальных задач современной прикладной океанологии. Инструментальные оценки скорости движения вод наряду со стандартными гидрологическими *CTD*-данными позволяют в 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] и с борта судна [2]. Большая потребность в данных прямых измерений скорости течений привела к быстрому развитию техники вертикального профилирования течений, основанной на отслеживании траекторий свободно падающих зондов гидроакустическими средствами [3]. Однако такие методы измерений не давали возможности их применения для оперативного контроля поля скорости течений вследствие значительных временных затрат на выполнение зондирований. В дальнейшем решение этой задачи в основном свелось к развитию методов и приборов для вертикального профилирования течений с борта судна. Одно из направлений по созданию такой техники разрабатывалось в МГИ НАН Украины с начала 80-х годов и основывалось на использовании погружаемого трехкомпонентного акустического датчика скорости потока, включающего в свой состав *CTD*-комплекс и датчики угловой ориентации [4]. Причиной ограниченного использования разработанного прибора стало влияние его собственных движений на качество получаемой информации. Попытка учесть вклад этого фактора привела к созданию сложных систем контроля движений [4, 5], что снизило технологичность использования прибора.

© А.Н. Морозов, Е.М. Лемешко, 2006

В настоящее время доминирующим направлением решения проблемы вертикального профилирования течений с борта судна является использование доплеровских измерителей течений. Одним из лидеров производства таких приборов различного назначения является американская фирма *RDI* (www.rdiinstruments.com), изделия которой находят применение при решении широкого круга экспериментальных океанологических задач [6, 7]. В рамках проведения экспериментов по международному проекту *GEF Black Sea Ecosystem Recovery Project — RER/01/G33* в распоряжение МГИ был передан измеритель *ADCP* производства фирмы *RDI*, что и позволило выполнить данную работу.

Цель статьи заключается в обобщении опыта работ с *ADCP* в зондирующем режиме (*LADCP*), что дает возможность ответить на вопросы, которые возникали при эксплуатации прибора в натурных условиях и при дальнейшей обработке исходной информации, полученной в рейсе «*BSERP-3*» НИС «*Akademik*» Института океанографии Болгарской АН, проходившем с 8 по 19 мая 2004 г. В качестве дополнительной цели стояла задача дать предварительную интерпретацию вертикальной структуры поля течений и сравнить с результатами расчета геострофических скоростей.

Статья ориентирована на специалистов, которые непосредственно проводят измерения и обрабатывают исходные данные, частично на пользователей информации, планирующих применение этого прибора в будущих экспедициях, и океанологов, интерпретирующих полученные результаты.

Состав прибора, характеристики датчиков, физические принципы измерения. Собственно измеритель течений (*Work Horse Monitor — WHM*) представляет собой цилиндрический корпус (глубина погружения до 1000 м), на конце которого установлена головка преобразователей. Она состоит из четырех симметрично расположенных электроакустических преобразователей, формирующих Янус-конфигурацию с углом отклонения луча от продольной оси прибора на 20° (рабочая частота 307,2 кГц, раствор диаграммы направленности преобразователя $2,2^\circ$ при уровне ослабления 3 дБ). Внутри корпуса размещается электроника, обеспечивающая управление процессом измерения, коммуникацию с внешним компьютером, обработку аналоговых сигналов, хранение (64 Мбайт) и преобразование данных. На одной из плат электроники установлены датчики угловой ориентации: датчик направления — компас (*Flux-gate compass*); датчики наклонов — крен/дифференциальные инклинометры (*Pitch/Roll-inclinometers*). Прибор дополнительно содержит встроенные датчики температуры и давления. Ниже приведены характеристики датчиков, заявленные изготовителем:

- датчик температуры — диапазон $-5 \dots +45^\circ\text{C}$, точность $0,4^\circ\text{C}$, дискретность $0,01^\circ\text{C}$;

- датчик наклонов — диапазон $\pm 15^\circ$, погрешность $0,5^\circ$, разрешение $0,01^\circ$;

- компас — точность $\pm 2^\circ$, погрешность $0,5^\circ$, разрешение $0,01^\circ$ при допустимом наклоне $\pm 15^\circ$;

- датчик скорости — диапазон измеряемых скоростей ± 20 м/с, среднеквадратичные отклонения (с.к.о.) измерения скорости 30 мм/с (при размере элемента глубины 4 м).

При использовании *WHM* в автономном режиме (*self contained*) питание прибора производится от внешних батарей, которые размещаются в отдельном корпусе, рассчитанном на глубину погружения до 6000 м.

Принцип измерения скорости течений водной среды, реализованный в *ADCP*, основан на эффекте Доплера, т.е. на определении смещения частоты акустического эхосигнала, характеризующего скорость движения рассеивателей в объеме измерения вдоль направления луча. До 1991 г. в приборах фирмы *RDI* для выделения доплеровского сдвига частоты эхосигнала 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]. 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 его надежность. Наличие датчиков угловой ориентации позволяет производить преобразование измеренных значений скоростей в географическую систему координат. Относительное смещение элементов глубины вдоль каждого из лучей, возникающее из-за наклона прибора, учитывается при пересчете полученных профилей в географическую систему координат 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*, сделаем некоторые замечания (практически дословные выдержки из работы [8]):

- прибор разрабатывался для проведения измерений при относительно медленных собственных движениях, в этих условиях датчики угловой ориентации эффективно измеряют направление, крен и дифферент (*Heading, Pitch, Roll*);

- компас (т.е. и сам прибор) нельзя использовать вблизи металлических материалов (например корпуса 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;

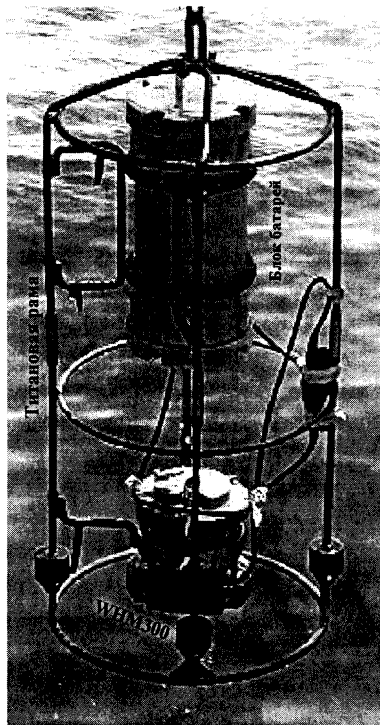
- компас подвержен действию собственных движений прибора либо непосредственно, либо через его инклинометры.

В целом из приведенных выше замечаний следует, что прибор может наиболее эффективно использоваться в составе заякоренной станции или при его установке на дне в раме из немагнитного материала.

Условия и методика проведения измерений. Акустический доплеровский измеритель профиля скорости течений производства *RDI*, модель *WHM300-I-UG23* (*ADCP Work Horse Monitor*, серийный номер 4253, частота 307,2 кГц, автономный, дальность действия прибора 100–150 м) использовал-

ся при проведении экспериментальных исследований динамики взаимодействия крупномасштабного глубоководного вихря с шельфом в северо-западном районе Черного моря ($\phi = 43,8 - 44,9^\circ$ с.ш., $\lambda = 29,9 - 32,6^\circ$ в.д.).

В процессе подготовки к рейсу была изготовлена титановая рама, на которой закреплялись блок батарей и головка преобразователей (*WHM 300*), с расстоянием между ними более 30 см в соответствии с рекомендациями *RDI*. Внешний вид прибора в сборе представлен на рис. 1.



Р и с. 1. Общий вид комплекса *ADCP*

Перед использованием прибора в натурных условиях была предпринята попытка проведения методических работ на платформе ЭО МГИ НАН Украины в пос. Качивели с целью сопоставления получаемых посредством *ADCP* профилей течений с показаниями гирлянды измерителей течений МГИ-1301. Полученные данные оказались непригодными для проведения намеченных сопоставлений из-за наличия большого количества отражающих акустические сигналы конструкций (сваи, на которых установлена платформа, и другие ее элементы). Сравнение показаний *ADCP* и точечных измерителей течений можно проводить на основе данных, полученных в условиях открытого моря (с борта судна [9], на заякоренной станции [10]).

При проведении натурных исследований мы использовали следующие основные параметры постановки:

- интервал повторения циклов измерения около 1 с (*Ensemble Interval*);
- значение элемента глубины 2; 4; 5; 10 м (*Depth Cell Size*);
- количество элементов глубины в зависимости от глубины моря (*Number of Depth Cells*);
- мода — высокое разрешение/короткая дистанция (*Hardware Settings – Mode – High Resolution/Low Range*);
- осреднение по циклам измерения — 1 (*Water Pings*);
- магнитное склонение $4,5^\circ$ (*Magnetic Variation*);
- соленость 18 ‰ (*Salinity*);
- 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 одной секунды.

При проведении измерений на мелководных станциях прибор вывешивался за борт так, чтобы глубина погружения *WHM* составляла 1–2 м. Продолжительность измерений на таких станциях определялась продолжительностью работ, выполняемых гидрологическим зондом, и составляла от 0,5 до 1 ч. Отметим, 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. Искажение естественного магнитного поля Земли корпусом судна определяется водоизмещением, курсом и другими параметрами судна и простирается на достаточно большие расстояния: косвенная оценка, приведенная в работе [11], составляет около 50 м для НИС «Академик Вернадский». Можно было бы избежать влияния этого фактора, 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, приводящие к значительным динамическим погрешностям измерения угловых величин (крен, дифферент, направление), уровень которых определяется динамическими характеристиками датчиков угловой ориентации прибора [12, 13, 14]. Для проведения измерений с борта судна фирма *RDI* выпускает специальную модификацию (*Vessel-mounted*) *ADCP*, в состав которого входит адаптер подключения к судовому гирокомпасу. Такая конфигурация прибора позволяет исключить погрешности, вызываемые искажениями естественного магнитного поля Земли корпусом судна, и в значительной мере уменьшить погрешности, вызванные качкой судна и волнением. Использование судовых *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. Последовательность проведения измерений была следующей: 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, затем прибор поднимался на борт. Выбор скоростей опускания и подъема прибора производился исходя из лимита времени забортных работ на станции.

Использование *ADCP* в зондирующем режиме — сравнительно новая технология измерения профиля скорости течений в толще вод с борта судна [15]. Современные низкочастотные судовые *ADCP* (75 кГц) при оптимальных условиях позволяют проводить измерения в верхнем 1000-метровом слое моря со снижением точности с глубиной. Для Черного моря максимальная глубина таких измерений составляет 100 – 300 м в силу специфики вертикального распределения акустических характеристик вод [16]. Сущность технологии *LADCP* заключается в следующем: в каждом цикле измерения может быть

рассчитано локальное распределение вертикальных сдвигов компонент скорости течения; в результате зондирования определяются распределения вертикальных сдвигов компонент скорости течения по всей толще воды; после интегрирования по глубине получается профиль скорости течения, найденный с точностью до неизвестной константы, которая определяется из показаний *GPS* или с использованием данных, полученных относительно дна (*Bottom Track*). Детально метод рассмотрен в работах [17, 18]. Первая станция с применением технологии *LADCP* была выполнена в 1989 г. [15] и показала наличие полезной информации в полученных данных, однако погрешность 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 данных *LADCP*, — фирма *RDI* до настоящего времени не выпустила своей версии программного обеспечения обработки таких данных. Наиболее распространено применение программного обеспечения свободного доступа в Интернете, реализующего подход, представленный в работе [18], с использованием математического аппарата инверсных решений. Программа работает в среде *MatLab*, к сожалению, не имеет удобного интерфейса и детального описания вводимых оператором параметров. На сегодняшний день выбор параметров *LADCP*-измерений и методов обработки данных остается открытым [18].

Обработка данных. В силу некоторого различия как методических, так и математических аспектов целесообразно разделить обсуждение вопросов, связанных с обработкой данных, отдельно для групп мелководных и глубоко-водных станций.

Процесс обработки данных, полученных на мелководных станциях, рассмотрим на примере ст. 54, выполненной в штилевую погоду (глубина моря 91 м). Прибор выдерживался на глубине около 5 м, середина первого элемента измерения относительно прибора 6,14 м ($H_{\text{FirstCeel}}$), относительно поверхности моря 11,05 м, размер элемента глубины 4 м (H_{Cell}), 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. Формулу для расчета профиля скорости естественного течения удобно представить в следующем виде [11]:

$$U_{\text{Absolute}}(i, j) = U_{\text{Measured}}(i, j) + U_{\text{Motion}}(i), \quad (1)$$

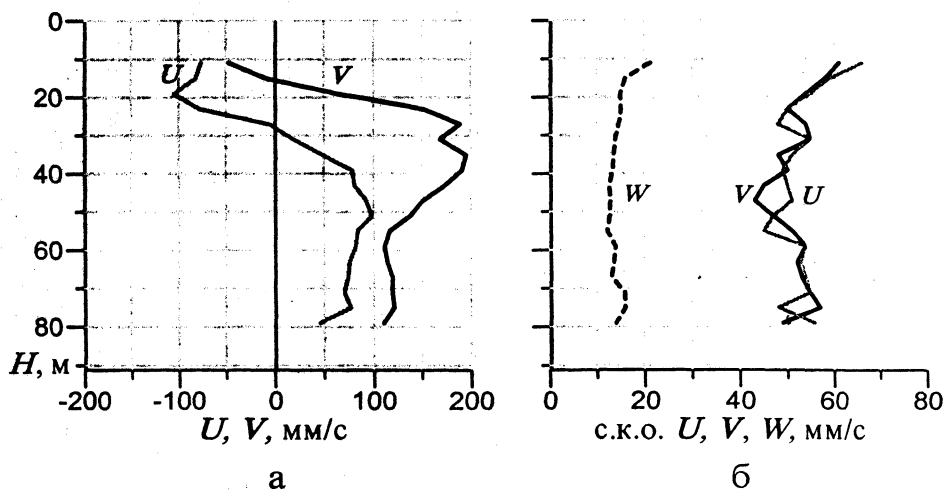
где i — номер цикла измерения, j — номер уровня измерения ($1 \dots N_{\text{Level}}$); $U_{\text{Absolute}}(i, j)$ — трехмерный вектор абсолютной скорости морского течения ($U_{\text{Absolute}}, V_{\text{Absolute}}, W_{\text{Absolute}}$); система координат географическая, положительные направления: U — восток, V — север, W — от дна к поверхности моря; $U_{\text{Measured}}(i, j)$ — трехмерный вектор измеренной *ADCP* скорости течения

$(U_{\text{Measured}}, V_{\text{Measured}}, W_{\text{Measured}})$; $U_{\text{Motion}}(i)$ — трехмерный вектор скорости перемещения ADCP ($U_{\text{Motion}}, V_{\text{Motion}}, W_{\text{Motion}}$).

В условиях проведения измерений в режиме выдержки прибора у поверхности моря второе слагаемое правой части соотношения (1) после осреднения должно быть равно средней скорости дрейфа судна $\langle U_{\text{Motion}}(i) \rangle_i = \langle U_{\text{Drift}}(i) \rangle_i, \langle \dots \rangle_i$ — операция осреднения по индексу i с отбраковкой сбойных кадров). В рамках этого предположения производилась обработка данных. Полученные для ст. 54 в результате осреднения профили компонент скорости естественного течения представлены на рис. 2, а. В математическом виде полученный профиль может быть описан следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} U_{\text{Absolute}}(H_j) &= \langle U_{\text{Measured}}(i, j) \rangle_i + \langle U_{\text{Drift}}(i) \rangle_i, \\ H_j &= \langle H_{\text{WHM}}(i) \rangle_i + (j-1)H_{\text{Cell}} + H_{\text{FirstCell}}, \end{aligned} \quad (2)$$

где H_j — глубина центра j -го элемента измерения, $H_{\text{WHM}}(i)$ — измеряемая глубина расположения ADCP WHM. Определение среднего значения скорости дрейфа судна $\langle U_{\text{Drift}}(i) \rangle_i$ производилось посредством расчета наклона линейной аппроксимации временной зависимости координат судна на основе синхронных GPS-данных методом наименьших квадратов.



Р и с. 2. Профили компонент скорости течения (а) и с.к.о. случайной составляющей погрешности их измерения (б)

Как можно видеть, на рис. 2, а отсутствуют значения скоростей в верхнем 10-метровом слое и в придонном слое ниже 80 м. Отсутствие данных в верхнем слое вызвано наличием некоторой паузы после излучения акустического импульса, необходимой для затухания процессов в ближней зоне излучателя и в конструкциях прибора [8]. Отсутствие данных в придонном слое вызвано тем обстоятельством, что эхосигналы на двух уровнях выше дна содержат как сигнал, реверберировавший от придонных слоев воды, так и сигнал, отраженный от дна. Адекватность измеренных значений скорости на

двух уровнях выше дна реальным скоростям течений скорее исключение, чем правило. Чтобы избежать неверной трактовки результатов измерений в придонной области, два уровня выше дна следует исключать из рассмотрения [8]. Таким образом, слой воды, в котором могут быть получены корректные данные *ADCP*, ограничен:

$$\begin{aligned} &\text{сверху } (\langle H_{WHM}(i) \rangle_i + H_{\text{FirstCeel}}), \\ &\text{снизу } (H_{\text{Bottom}} - 2H_{\text{Cell}}), \end{aligned}$$

где H_{Bottom} — глубина моря.

На рис. 2, б представлены профили с.к.о. случайной составляющей погрешности измерения вертикальной W и горизонтальных U , V компонент скорости течений, полученные на основе данных ст. 54 после выделения низкочастотной составляющей. Представленные результаты находятся в хорошем соответствии с заявленной изготовителем погрешностью измерений 3 см/с; под этой величиной следует понимать погрешность измерения скорости вдоль направления луча.

Основная проблема обработки данных *ADCP*, полученных при выдержке прибора у поверхности, заключается в том, что при проведении измерений прибор находился вблизи корпуса судна. Из-за локального искажения магнитного поля Земли полученные значения горизонтальных компонент $U_{\text{Measured}}(i, j)$ будут развернуты относительно магнитного меридиана на неизвестный угол δ . Как правило, при проведении измерений и обработке данных вопрос о влиянии корпуса судна на показания компаса прибора не рассматривается. В рамках выполнения данной работы мы попытались учесть этот фактор. 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 лучам эхосигнала, информация о скорости для данного уровня интерпретировалась как скорость движения прибора относительно земной поверхности. Перепишем соотношение (1) для уровня, соответствующего дну, полагая $\langle U_{\text{Absolute}}(i, j_{\text{Bottom}}) \rangle_i = 0$:

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

Для ст. 54 (при осреднении данных на 7-минутном интервале):

– по *GPS* — модуль скорости дрейфа судна 16 см/с, направление (α_{Drift}) 207°;

– по *ADCP* ($j_{\text{Bottom}} = 21$) — модуль скорости 15 см/с, направление (α_{Bottom}) 28°.

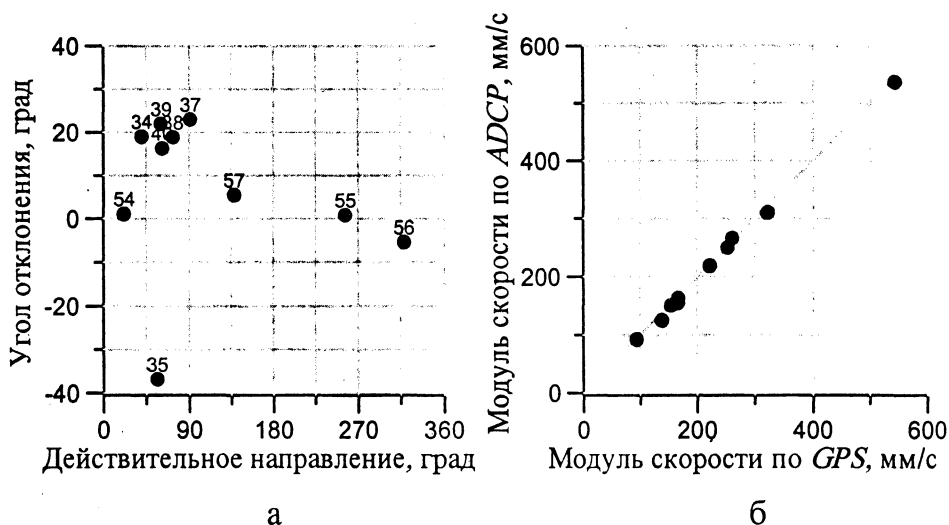
С учетом соотношения (3) наблюдается хорошее совпадение оценки одного и того же параметра, полученной абсолютно разными измерителями *GPS* и *ADCP*, различие по модулю составляет 1 см/с, по азимуту 1° ($\alpha_{\text{BottomGPS}} = 180^\circ + \alpha_{\text{Drift}} = 27^\circ$, $\alpha_{\text{Bottom}} = 28^\circ$). Мы провели аналогичные расчеты для 10 мелководных станций, результаты представлены на рис. 3. На рис. 3, б представлена зависимость модуля скорости, измеренной *ADCP* на уровне j_{Bottom} (глубины моря от 50 до 80 м), от модуля скорости дрейфа судна, рассчитанной по синхронным данным *GPS*. Как можно видеть, хорошее соответствие значений модулей скоростей сохраняется в широком диапазоне.

На рис. 3, а представлена зависимость угла отклонения ($\alpha_{\text{Bottom}} - \alpha_{\text{BottomGPS}}$) от действительного направления ($\alpha_{\text{BottomGPS}}$). При некоторых направлениях (меньших 90°) значение угла отклонения достигает $\pm 35^\circ$. При обработке данных ADCP, полученных на мелководных станциях, мы попытались учесть рассмотренный выше эффект. Первоначально рассчитывались профили относительно уровня j_{Bottom} :

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

далее для получения профиля абсолютной скорости течения выполнялся поворот $U_{\text{FirstStep}}(H_j)$ около вертикальной оси на угол δ :

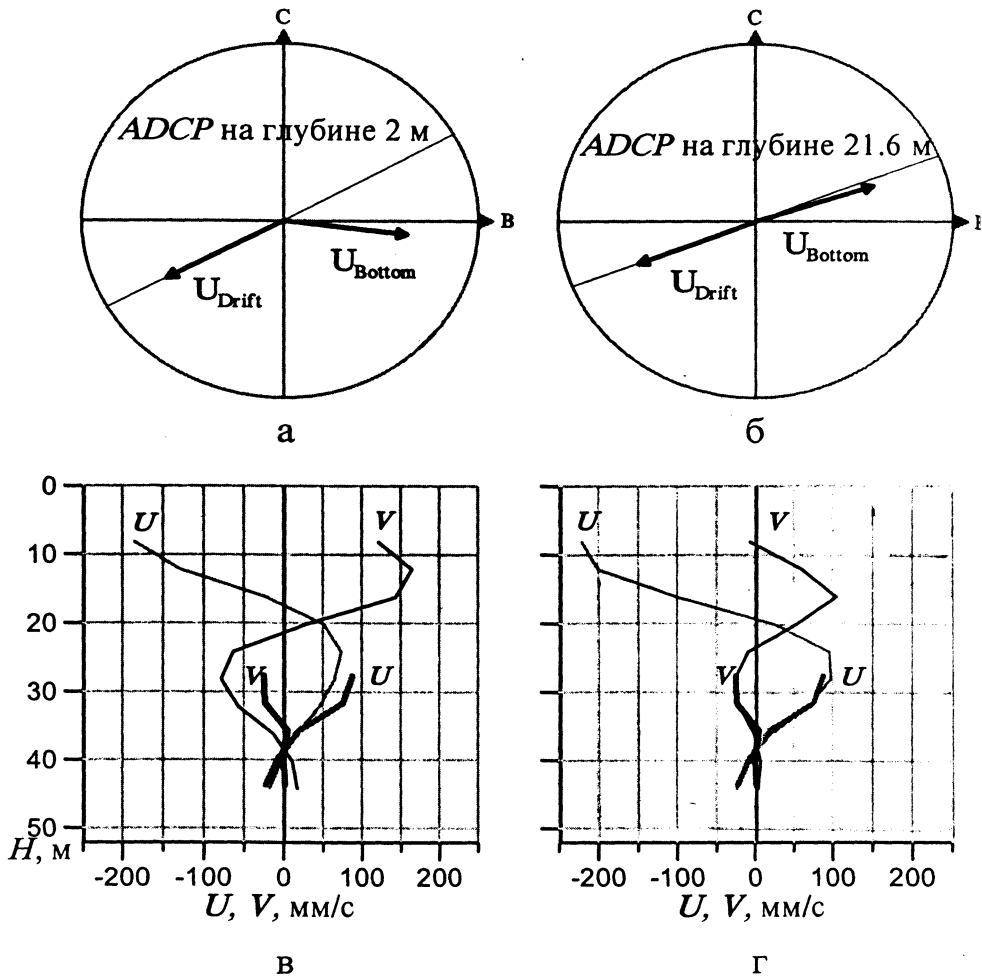
$$\begin{aligned} \delta &= \alpha_{\text{Drift}} - (\alpha_{\text{Bottom}} + 180^\circ), \\ U_{\text{Absolute}}(H_j) &= U_{\text{FirstStep}}(H_j) \cos(\delta) + V_{\text{FirstStep}}(H_j) \sin(\delta), \\ V_{\text{Absolute}}(H_j) &= -U_{\text{FirstStep}}(H_j) \sin(\delta) + V_{\text{FirstStep}}(H_j) \cos(\delta), \\ j &= 1 \dots (j_{\text{Bottom}} - 2). \end{aligned} \quad (5)$$



Р и с. 3. Зависимость угла отклонения, вызванного влиянием корпуса судна, от действительного направления скорости, измеренной на уровне дна (а, цифры — номера станций), и зависимость модуля скорости дрейфа судна, определенной по данным ADCP, от модуля скорости дрейфа, рассчитанной по данным GPS (б)

В качестве примера на рис. 4, а, б представлены горизонтальные векторы $U_{\text{Bottom}} = \langle U_{\text{Measured}}(i, j_{\text{Bottom}}) \rangle_i$ и $U_{\text{Drift}} = \langle U_{\text{Drift}}(i) \rangle_i$, полученные на ст. 35 при выдержке прибора на глубине 2 м (рис. 4, а) и на глубине 21,6 м (рис. 4, б). На рис. 4, в, г жирными линиями представлены профили скорости течения относительно дна, полученные при выдержке прибора на глубине 21,6 м и рассчитанные по соотношению (4). Профили скорости течения, полученные при выдержке прибора на глубине 2 м, представлены на рис. 4, в, г тонкими линиями: на рис. 4, в — рассчитанные по соотношению (2) без угловой коррекции; на рис. 4, г — рассчитанные по соотношениям (4), (5) с угловой коррекцией. Как можно видеть из представленной графической информации, влияние корпуса

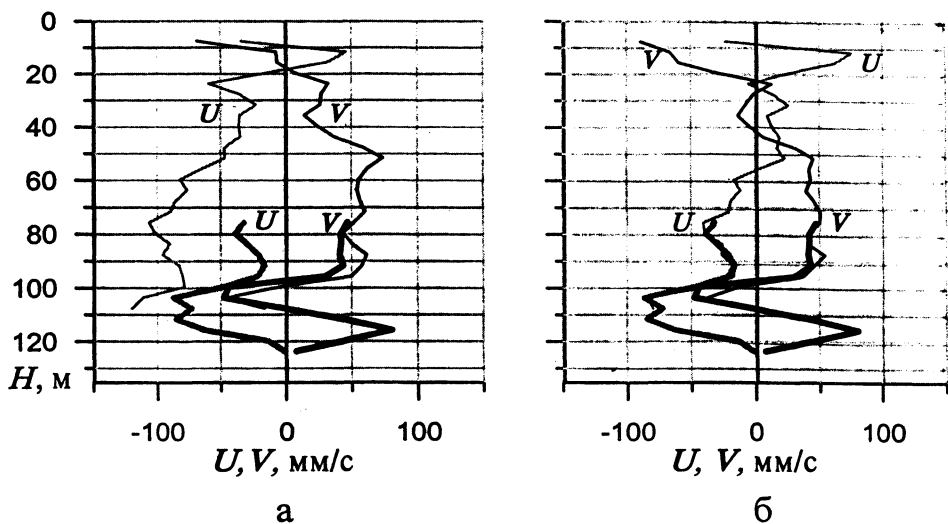
судна на качество полученных результатов достаточно велико, однако может быть учтено при обработке полученных данных.



Р и с. 4. Соотношение скорости дрейфа судна, рассчитанной по данным *GPS*, и скорости, измеренной *ADCP* на уровне дна при выдержке прибора на глубине 2 м (а) и на глубине 21,6 м (б), на примере ст. 35 (глубина моря 54 м); профили скорости течения относительно дна, вычисленные по данным *ADCP*, при выдержке прибора на глубине 21,6 м (в, з – жирные линии), а также профили скорости течения, полученные по данным *ADCP*, с учетом дрейфа судна, при выдержке прибора на глубине 2 м, без угловой коррекции (в – тонкие линии) и с угловой коррекцией (з – тонкие линии)

На станциях с глубинами моря от 80 до 150 м (прибор при выдержке у поверхности уже не принимает уверенно сигнал, отраженный от дна) мы 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 определения угла поворота являлся минимум среднеквадратичного расхождения профиля относительно дна, полученного при выдержке на глубине, и профиля, полученного у поверхности с учетом дрейфа, в зоне их перекрытия. Для на-

глядности на рис. 5, а, б представлены профили, полученные на ст. 41 (глубина моря 135 м).



Р и с. 5. Профили скоростей течений на ст. 41 (глубина моря 135 м): а – без угловой коррекции, б – с угловой коррекцией (обозначения аналогичны рис. 4, в, з)

Запишем соотношения для расчета абсолютной скорости течения при выдержке прибора на глубине 70 м:

$$U_{\text{Absolute}}(H_j) = \langle U_{\text{Measured}}(i, j) - U_{\text{Measured}}(i, j_{\text{Bottom}}) \rangle_i, \quad (6)$$

у поверхности (2 м):

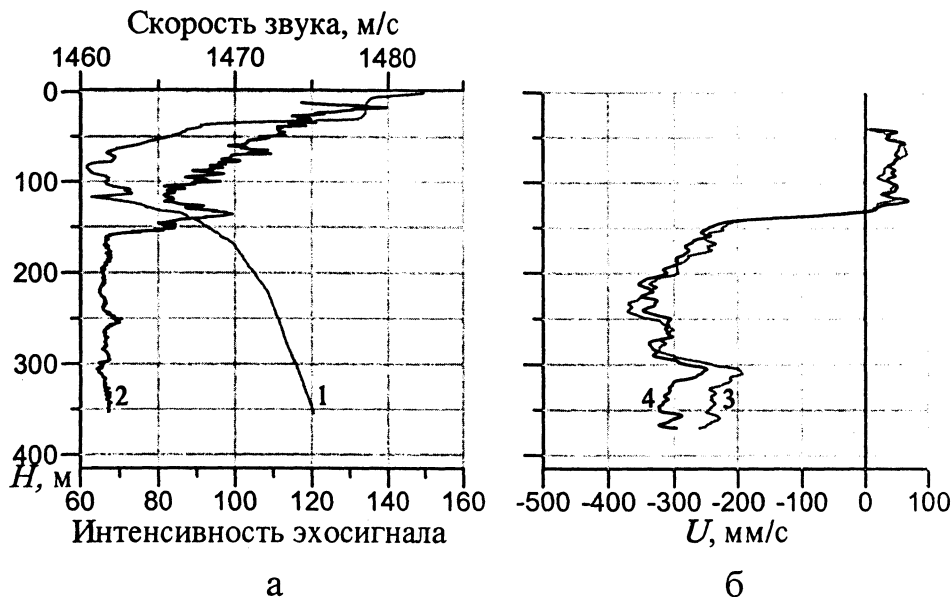
$$U_{\text{Absolute}}(H_j) = \langle U_{\text{Measured}}(i, j) \rangle_i \cos(\delta) + \langle V_{\text{Measured}}(i, j) \rangle_i \sin(\delta) + \langle U_{\text{Drift}}(i) \rangle_i, \quad (7)$$

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

угол δ определяется в зоне перекрытия профилей от 75 до 105 м методом наименьших квадратов. Подчеркнем то обстоятельство, что в данном примере влияние корпуса судна на компас приводит к значительным расхождениям профилей течений, полученных при выдержке прибора у поверхности и при его выдержке на глубине, достигающим 7 см/с.

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. 6, а представлены профили скорости звука (исходные данные *CTD*-зонда *Sea Bird*, формула расчета *UNESCO-83* [20]) и интенсивности эхосигнала (сила цели [21]). Такое поведение интенсивности эхосигнала вызывает резкое сокращение дальности действия *ADCP* при его погружении ниже основного пик-

ноклина; так, в верхней части моря дальность составляет 80 – 120 м, ниже основного пикноклина — от 20 до 30 м. Именно это обстоятельство ограничивает применение судовых *ADCP* в Черном море верхним 100 – 300-метровым слоем [16, 22] и делает наиболее перспективным направлением измерение профилей скорости течения с борта судна по технологии *LADCP*.



Р и с. 6. Профили: а – скорости звука (кривая 1) и интенсивности эхосигнала (кривая 2); б – U -компоненты относительной скорости течения, рассчитанные по данным *LADCP*, при погружении (кривая 3) и подъеме (кривая 4) прибора

Обработка информации производится следующим образом. На первом шаге рассчитываем профили вертикальных сдвигов компонент скорости по данным, полученным при опускании прибора и при его подъеме. При этом используем следующее соотношение:

$$U_{\text{Measured}}(i, j) = U_{\text{Absolute}}(h_{ij}) - U_{\text{Motion}}(i), \quad (8)$$

где $U_{\text{Measured}}(i, j)$ — измеренное значение скорости в i -й момент времени в j -м элементе, $U_{\text{Absolute}}(h_{ij})$ — значение скорости течения относительно земной поверхности ($h_{ij} = h_{\text{WHM}}(i) + (j-1)H_{\text{Cell}} + H_{\text{FirstCeel}}$), $U_{\text{Motion}}(i)$ — скорость движения прибора в i -й момент времени.

Далее в каждом цикле измерений производится расчет вертикальных сдвигов компонент измеренной скорости:

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

где

$$\begin{aligned} U'_{\text{Measured}}[i, h_j(i)] &= [U_{\text{Measured}}(i, j+1) - U_{\text{Measured}}(i, j)] / H_{\text{Cell}}, \\ h_j(i) &= h_{\text{WHM}}(i) + (j-0,5)H_{\text{Cell}} + H_{\text{FirstCeel}}, \\ U'_{\text{Absolute}}[h_j(i)] &= \{U_{\text{Absolute}}[h_{j+1}(i)] - U_{\text{Absolute}}[h_j(i)]\} / H_{\text{Cell}}. \end{aligned}$$

В предположении, что измерение профиля скорости в цикле измерения производится почти мгновенно, $U'_{\text{Motion}}(i) = 0$.

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

$$U'_{\text{Measured}}[i, h_f(i)] = U'_{\text{Absolute}}[h_f(i)] . \quad (9a)$$

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

$$U'_{\text{Absolute}}(h_k) = \langle U'_{\text{Measured}}[i, h_f(i)] \rangle_{ij} , \quad (10)$$

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

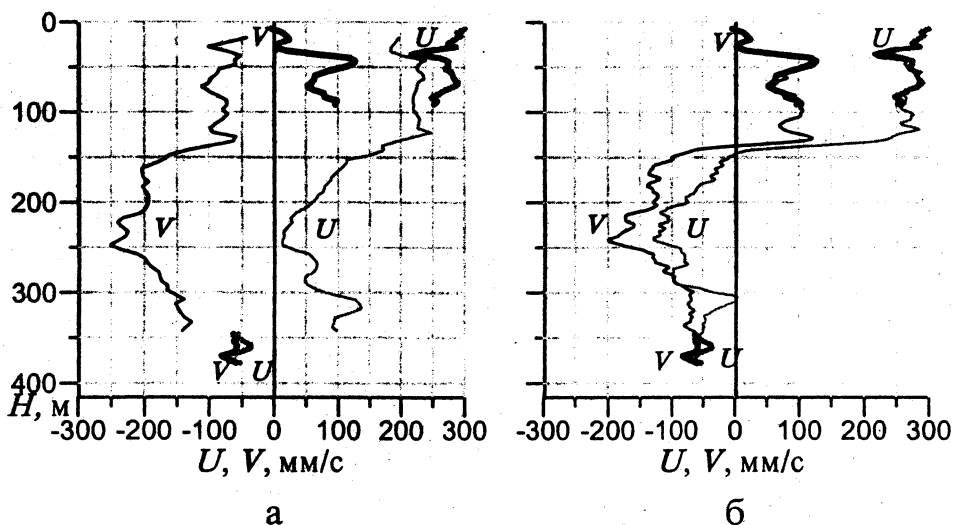
Для получения профиля выполняем операцию интегрирования:

$$U_{\text{Absolute}}(h_k) = U_{\text{Absolute}}(O) + \sum U'_{\text{Absolute}}(h_k) \Delta H . \quad (11)$$

Получаем в результате профиль абсолютной скорости течения с точностью до некоторой постоянной $U_{\text{Absolute}}(O)$. Определить неизвестную постоянную можно различными методами с использованием данных *GPS* или *Bottom Track*.

После пояснения технологии обработки представим результаты обработки на примере данных, полученных на ст. 44 (глубина моря 415 м, $U_{\text{Drift}} = 244$ мм/с, $V_{\text{Drift}} = -52$ мм/с). На рис. 6, б 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. Наблюдаются 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. При проведении измерений выдержка прибора на глубине 340 м составила около 5 мин, в течение этого времени центр 18-го элемента глубины точно соответствовал уровню дна. Это дало нам возможность произвести определение постоянной интегрирования по данным *Bottom Track* с точностью до 5 мм/с. На рис. 7, а, б жирными линиями представлены профили компонент абсолютной скорости течения: у поверхности моря (до 100 м) они рассчитаны с учетом угловой коррекции по соотношениям (7), в качестве исходных использовались данные, полученные в пределах 5 мин до начала зондирования; у дна (ниже 345 м) профили рассчитаны относительно дна по соотношению (6). На рис. 7, а тонкими линиями представлены профили скорости течений, вычисленные по программе, основанной на методе инверсных решений, взятой из интернета [18]. На рис. 7, б тонкими линиями показаны профили,

рассчитанные по соотношениям (6), (7), (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. Как можно видеть из рис. 7, наблюдается значительное несоответствие между представленными профилями *LADCP*, полученными по простым соотношениям (рис. 7, б) и рассчитанными методом инверсных решений [18] (рис. 7, а). Отметим, что профили *LADCP*, показанные на рис. 7, б, хорошо согласуются с профилями, полученными у поверхности и вычисленными с учетом угловой коррекции и данных *GPS*, и с профилями у дна, рассчитанными с использованием данных *Bottom Track*, определенных по данным *Water Profiling*. Основная причина наблюдаемого расхождения, скорее всего, в том, что программа, взятая из Интернета, не учитывает влияния корпуса судна на показания компаса прибора или рассчитана на иную методику проведения измерений.

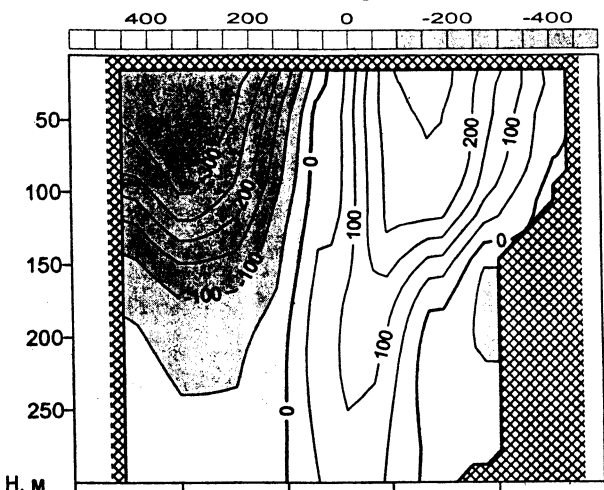


Р и с. 7. Профили абсолютной скорости течения на ст. 44 (глубина моря 415 м): а – восстановленные по программе, основанной на методе инверсных решений [18]; б – рассчитанные по формулам (6), (7), (9) – (11)

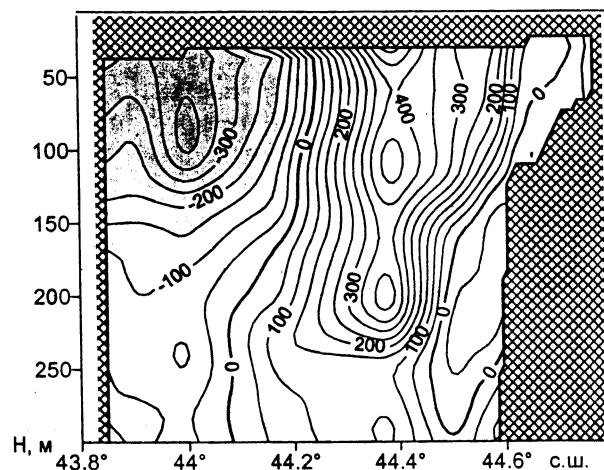
Вертикальная структура течений. Представляет интерес использовать полученную информацию для предварительного описания поля скоростей, так как детальный анализ течений выходит за рамки этой статьи. Для примера мы выбрали меридиональный разрез вдоль 31,17° в.д. с севера на юг от шельфа (глубина 70 м, 44,78° с.ш.) до области открытого моря (глубина 1430 м, 43,83° с.ш.), который выполнялся 16 – 17 мая 2004 г., всего 12 гидрологических и *ADCP*-станций. Разрез проходил через центр антициклонического вихря. Ориентация разреза позволяет сравнить геострофическую скорость с зональной компонентой скорости по данным *LADCP*. Геострофические скорости рассчитывались относительно нулевой поверхности 500 дбар, при этом для мелководных станций использовался метод дополнения — профиль плотности дополнялся до 500 м осреднением плотности на соседних более глубоководных станциях. Вертикальные структуры геостро-

фической скорости (рис. 8, а) и зональной U -компоненты скорости по данным *LADCP* (рис. 8, б) аналогичны: центр вихря (нулевая изотаха) проходит около $44,2^\circ$ с.ш., ось вихря наклонена по глубине по данным *LADCP*; ядро

западного течения (отрицательные значения) занимает одинаковое положение в обоих случаях — до глубин 75 – 100 м (глубины залегания главного пикноклина в этом месте) и на $44 – 44,05^\circ$ с.ш. — с максимумом скоростей до 40 см/с. Ядро восточного течения (положительные значения скорости) для геострофики (рис. 8, а) смещено в сторону берега на $\sim 0,1^\circ$ относительно положения по данным *LADCP*, а глубина его залегания на 50 – 100 м больше (рис. 8, б). Следует заметить, что в обоих случаях скорости восточного течения на шельфе невелики — до 10 см/с, а у дна и вдоль кромки шельфа выделяется слабое западное течение 5 – 7 см/с. Возможно, возникновение течения связано с поступлением холодных шельфовых вод с температурой ($\sim 7^\circ\text{C}$) в холодный промежуточный слой (нижняя граница лежит на ~ 125 м). Восточное течение мористее более интенсивное и проникает на большую глубину, чем западное, хотя для геострофики получается наоборот.



а

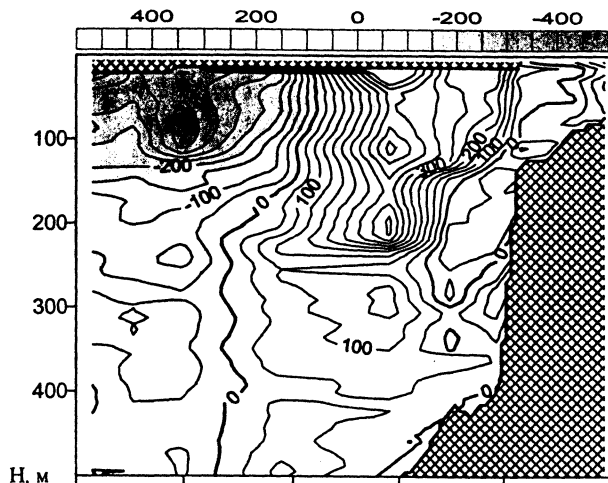


б

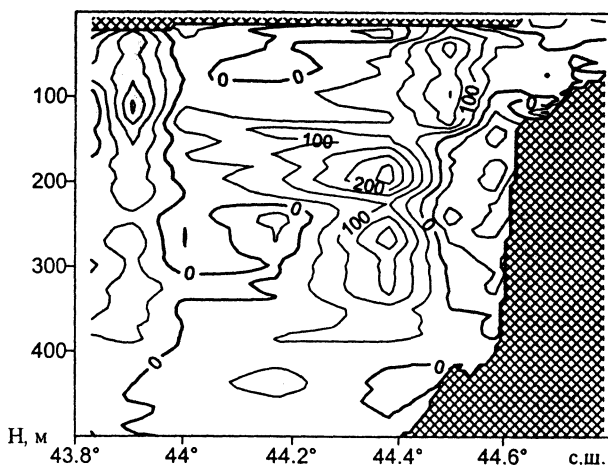
Р и с. 8. Меридиональный разрез вдоль $31,17^\circ$ в.д., выполненный 16 – 17 мая 2004 г.: а – геострофическая скорость (мм/с) относительно нулевой поверхности 500 дбар; б – зональная компонента скорости (мм/с) по данным *LADCP*

В целом наблюдается хорошее соответствие скоростей, но геострофическая скорость дает заниженные на 5 – 10 см/с значения, поскольку при расчете не учтены агеострофические эффекты и баротропные компоненты течений. Глубже 300 м величины геострофических скоростей составляют 2 – 5 см/с, что меньше точности метода. Однако *LADCP* позволяет нам впервые получить представление о глубоководной структуре течений (рис. 9). В толще 300 – 500 м величины зональной компоненты скорости составили ~ 5 см/с до 400 м для

западного течения (рис. 9, а) и до глубины 500 м для восточного (рис. 9, б). Меридиональная компонента скорости также отражает сложную вертикальную структуру течений, значения скорости >10 см/с наблюдаются в толще 150 – 300 м (ниже основного пикноклина), а величины ~ 5 см/с наблюдаются до глубин 350 м. У свала глубин выделяется составляющая течения из области шельфа на юг с максимумом на глубине 200 м около 7,5 см/с. Таким образом, картина течений дает представление о динамической структуре антициклонического вихря до глубин 500 м.



а



б

Р и с. 9. Меридиональный разрез вдоль $31,17^\circ$ в.д., выполненный 16 – 17 мая 2004г.: зональная (а) и меридиональная (б) компоненты скорости течений (мм/с) по данным LADCP

Заключение. Представленный в работе материал достаточно наглядно демонстрирует характеристики автономного ADCP как современного мощного 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 станций [15, 17, 18].

В гидрологических условиях Черного моря рекомендуется устанавливать значение размера элемента глубины 4 м, интервал повторения циклов измерения 0,5 с. При проведении измерений на мелководных станциях рекомендуется устанавливать количество элементов измерения на $3H_{\text{Cell}}$ больше глубины моря. На станциях с глубиной моря более 80 м рекомендуется проводить выдержку на глубине 50 – 70 м от дна. При выполнении измерений по технологии

LADCP — скорость погружения прибора должна быть не более 0,5 – 0,6 м/с, количество элементов измерения рекомендуется $80/H_{\text{Cell}}$.

Предварительный анализ профиля течений позволил описать динамическую структуру антициклонического вихря и установить наличие скорости течений до ~ 5 см/с на глубинах 450 – 500 м. Сравнение *ADCP*-измерений с расчетами скоростей по динамическому методу относительно нулевой поверхности 500 дбар в целом дало хорошее совпадение вертикальной структуры вихря в слое 0 – 300 м, при этом величины геострофической скорости меньше значений скоростей по данным *LADCP* на 5 – 10 см/с. Ранее полученные сведения о структуре течений по данным судового *ADCP* в силу специфики акустических свойств Черного моря не позволили получить информацию о поле течений глубже 300 м [16].

Наибольшую ценность в информации о динамике вод представляют профили абсолютных скоростей течений. Для обеспечения привязки профилей, полученных посредством *ADCP*, к земной поверхности существует две возможности — использование данных *Bottom Track* и *GPS*. Качество данных *Bottom Track*, полученных в результате обработки данных *Water Profiling*, сильно зависит от угла наклона прибора, и в ряде случаев их использование может привести к значительным ошибкам. Этот вопрос в полной мере решается путем приобретения устанавливаемой *Bottom Track*-опции. Непрерывная запись данных *GPS* на протяжении всего рейса — удачное решение, позволяющее при обработке информации учитывать движение судна на каждой станции. Возможно, использование данных *DGPS* позволит с большей точностью производить расчет абсолютных скоростей течений.

В рамках выполнения данной работы мы попытались разрешить как методические вопросы проведения измерений, так и вопросы обработки данных, связанные с использованием *ADCP* в условиях, не рекомендованных изготовителем. Несмотря на то, что нам удалось решить ряд проблем, тем не менее на современном этапе мы не можем однозначно установить границы погрешности измерения профилей абсолютных скоростей течений по данным *LADCP*. Определяется это тем, что на функционирование прибора оказывает воздействие большое число факторов (собственные движения, вертикальное распределение интенсивности эхосигнала, рефракция лучей на неоднородностях поля скорости звука), исключение влияния которых является предметом дальнейшей работы.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Plaisted R.O., Richardson W.S.* Current Fine Structure in the Florida Current // *J. Mar. Res.*— 1970.— 28, № 3.— Р. 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* Т.Э.— Л.: Гидрометеониздат, 1982.— С. 17 – 28.
3. *Wenstrand D.C.* Measurements of Vertical Profiles of Oceanic Current and Richardson Number near St.Croix, U.S.V.I.// *J. Hydronautics.*— 1979.— 13, № 3.— Р. 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 / Дис. ... канд. техн. наук. – Севастополь, 1991. – 151 с.
6. Fiekas V., Leach H., Mirbach K.-J. et al. 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 // Ibid. – 1999. – 29, № 4. – P. 651 – 670.
8. RDI-Primer. 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 Fifth Working Conf. on Current Measurement (February 7-9, 95CH35734). – 1995. – P. 65–70.
10. James D.I., Plueddemann A.J., Lentz S.J. In-Situ Comparisons of Moored Acoustic Doppler Profilers with Conventional VACM and VMCM Current Meters // Proc. IEEE Fifth Working Conf. on Current Measurement (February 7-9, 95CH35734). – 1995. – P. 59–64.
11. Кушнир В.М., Морозов А.Н. Контроль метрологических характеристик измерителя скорости потока зонда-профилографа ОЛТ по данным натурных зондирований // Морской гидрофизический журнал. – 2001. – № 5. – С. 56 – 66.
12. Колтаков Ю.Н., Кушнир 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. Кушнир В.М. Точность измерения угловых координат гидрофизических приборов // Морской гидрофизический журнал. – 1989. – № 4. – С. 47–51.
14. Кушнир В.М. Динамика угловых колебаний гидрофизического зонда // Там же. – 1991. – № 2. – С. 21–28.
15. Firing E., Gordon R. Deep ocean acoustic Doppler current profiling // Proc. IEEE Fourth Working Conf. on Current Measurements, MD. – 1990. – P. 192–201.
16. Oguz T., Besiktepe S. Observations on the Rim Current structure, CIW // Deep-Sea Res. – 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. Atmos. Oceanic Technol. – 2002. – 19. – P. 794 – 807.
19. Firing E. Lowered ADCP developments and use in WOCE // WOCE Newsletter. – WOCE International Project Office, Southampton, United Kingdom. – 1998. – № 30. – P. 10 – 13.
20. 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.
21. Справочник по гидроакустике / Под ред. А.Е. Колесникова. – Л.: Судостроение, 1982. – 318 с.
22. Ilyin Y.P., Besiktepe S., Ivanov V.A. et al. 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. – Kluwer Academic Publishers, The Netherlands. – 1998. – 2. – P. 119 – 129.

Морской гидрофизический институт НАН Украины,
Севастополь

Материал поступил
в редакцию 01.04.05

ABSTRACT Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) manufactured by RDI was used in a lowered mode (Lowered ADCP) in the Black Sea for the first time. Such an application of ADCP is now in the stage of development and verification of various measurement methods and their further processing. It permits to obtain current velocity profiles up to 1000 – 6000 m depth levels depending on the equipment modification. The method of ADCP observations in a probing mode carried out during a field experiment and the phases of the initial data processing are given in the paper. At the same time previous experience of work of MHI NASU with similar acoustic current profilers in the 80ies is widely used. It results in generalization of the experience of ADCP application in the Black Sea hydrological conditions; the algorithms of the data processing are given. The profiles of current absolute velocity at several stations are represented and compared to the geostrophic velocities; deep-water structure of current velocity for the shelf – open sea section along 31,17° is given.