

В.А.Иванов, А.Н.Морозов, А.С.Кузнецов, Е.В.Маньковская,
С.А.Шутов, В.В.Зима, Д.В.Дерюшкин, Л.В.Вержевская

Морской гидрофизический институт РАН, г.Севастополь

ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ADCP ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ ПРИБРЕЖНЫХ ВОД ЮЖНОГО БЕРЕГА КРЫМА

Представлен практический опыт использования акустического доплеровского профилометра течений ADCP WHM1200, приобретенный в ходе экспедиционных работ в районе Южного берега Крыма, пос.Кацивели. Рассматриваются результаты ADCP-измерений, выполненных с борта дрейфующего судна, на ходу судна и с океанографической платформы. Отмечены основные преимущества и значимые результаты, полученные при каждом из вариантов использования прибора.

Основное достоинство измерений с борта дрейфующего судна на гидрологических станциях заключается в получении синхронных профилей гидрологических параметров и вектора скорости течения. Также при благоприятном направлении дрейфа такой способ измерений позволяет получать сечения поля скорости течений с высоким пространственным разрешением. Измерения на ходу судна позволяют получать распределение течений вдоль трека судна и могут обеспечивать наблюдение и анализ различных мелкомасштабных явлений в динамике прибрежных вод. Основное достоинство использования ADCP для мониторинга течений с океанографической платформы – объединение данных наблюдений с данными от различных источников таких как: спутниковые снимки, показания береговой метеостанции (ветер, уровень) и средств постоянного мониторинга течений на фиксированных горизонтах, данные распределенных термодатчиков и CTD-зондирований.

Дополнительно ADCP измеряет профили интенсивности эхосигнала, что может быть полезным для локализации районов повышенной концентрации взвеси и определения их характерных размеров с целью проведения последующих исследований иными контактными методами.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *скорость течения, режимы ADCP-измерений, интенсивность эхосигнала, вдольбереговая составляющая, нормальная берегу составляющая, числа Ричардсона, сдвиг скорости, внутренние волны*

doi: 10.22449/2413-5577-2019-4-51-61

Введение. Течения являются основным механизмом вентиляции прибрежных вод и, как следствие, одним из наиболее важных факторов, определяющих способность морской экосистемы выдерживать антропогенную нагрузку. Именно по этой причине исследование динамики прибрежных вод Южного берега Крыма (ЮБК) остается актуальным на протяжении многих десятилетий [1 – 4]. Циркуляция вод в прибрежных районах ЮБК формируется под влиянием Основного Черноморского течения, воздействия ветра на поверхность моря, рельефа дна и орографии береговой черты. При этом доминирует влияние динамики вод прилегающих районов глубоководной час-

© **В.А.Иванов**, А.Н.Морозов, А.С.Кузнецов, Е.В.Маньковская,
С.А.Шутов, В.В.Зима, Д.В.Дерюшкин, Л.В.Вержевская, 2019

Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2019. вып.4. С.51-61.

ти моря [2]. Крупномасштабные процессы при распространении в прибрежную зону взаимодействуют с рельефом дна, порождая сложную картину мелкомасштабных явлений [5] и субмезомасштабных вихрей [6], закономерности которых в настоящее время изучены недостаточно хорошо [7]. Применение новых средств измерения, таких как акустические доплеровские профилометры течений (*ADCP*), позволяет более детально изучить динамические процессы в прибрежных водах и оценить их влияние на экосистему [8].

Приборы. В Морском гидрофизическом институте, начиная с 2008 г., для исследования динамики вод в мелководных акваториях используется *ADCP WHM1200* (рабочая частота 1200 кГц) производства *RDI* США. Прибор обеспечивает измерение профиля скорости течения в слое до 10 – 15 м с номинальным разрешением по глубине 1 м. Измерения выполняются в режиме выдержки прибора у поверхности моря с борта дрейфующего судна, на ходу судна и с океанографической платформы (ОП). На рис.1, *слева* приведен вид *ADCP* со стороны преобразователей и его типовое размещение на борту маломерного судна для выполнения измерений на ходу, на рис.1, *справа* приведена подвеска прибора для измерения течений в верхнем слое моря с ОП. Следует отметить, что работа с этим прибором в различных режимах его использования содержит много нюансов на всех этапах проведения измерений, от создания командного файла до обработки полученных данных. Например, при использовании прибора на ходу судна, как правило, показания магнитного компаса прибора будут содержать погрешности, вызванные локальным искажением магнитного поля Земли вблизи корпуса судна. Данный вид погрешности приводит к значительным неточностям в определении направления течения и может быть компенсирован использованием опции *BT (Bottom Track)* и *GPS*-данных.

Рассмотрим результаты использования *ADCP WHM1200* в различных режимах проведения измерений в районе Черноморского гидрофизического полигона РАН (пос.Кацивели).

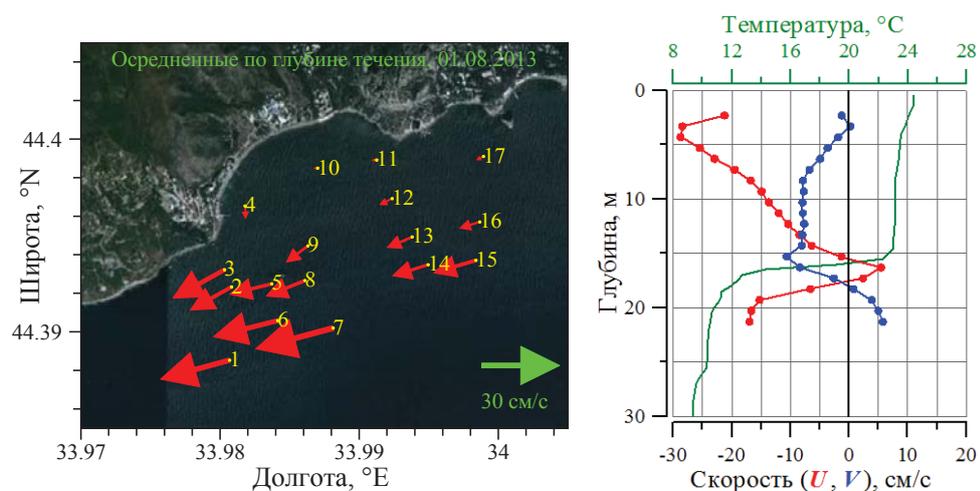


Р и с . 1 . Размещение прибора на маломерном судне (*слева*) и на платформе (*справа*).

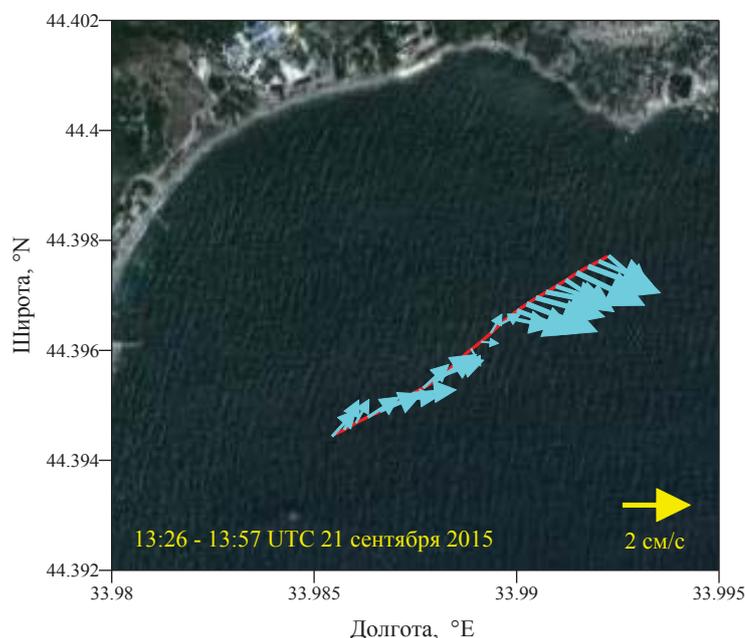
Измерения с борта дрейфующего судна на гидрологических станциях. Основное достоинство данного режима измерений заключается в получении синхронных профилей гидрологических параметров и вектора скорости течения. Экспедиция проходила 1 августа 2013 г. Измерения скорости течений производились во время выполнения работ на гидрологических станциях (судно находилось в дрейфе, средняя продолжительность работ составляла около 10 минут). Прибор вывешивался с борта судна на тросе, так чтобы его преобразователи находились на глубине ~0,8 м. Параметры функционирования ADCP: опция *WP* – *High Resolution/Low Range*; дискретность по времени – 0,5 с; по глубине – 1 м; количество сегментов глубины – 20; опция *BT* включена; диапазон *BT* – 45 м; осреднение по ансамблям не использовалось. Слой измерения составлял от 2 до 22 м. В качестве CTD-зонда использовался автономный прибор ГАП-16.

На рис.2, *слева* в векторном виде приведено распределение осредненных по глубине скоростей течений на соответствующих станциях (желтым цветом обозначены их номера). Во время экспедиции доминировало вдольбереговое течение юго-западного направления ~245°. В западной части полигона наблюдалось относительное усиление течений до 30 – 40 см/с. В Голубом заливе скорость течений не превышала 3 см/с. Вертикальная структура гидрологических параметров характеризовалась хорошо выраженным сезонным термоклином, располагающимся на глубине около 16 м (рис.2, *справа*). В области сезонного пикноклина (частота плавучести превышала 50 цикл/час) профиль скорости течений претерпевал значительные изменения по модулю и направлению.

Синхронные измерения профилей плотности и скорости течения позволяют рассчитывать значения градиентного числа Ричардсона, которые могут быть использованы для оценки параметров вертикального перемешивания [9]. В среднем, по всему ансамблю станций рассматриваемой экспедиции числа Ричардсона в 20 % случаев имеют значения меньше критического



Р и с . 2 . Горизонтальное распределение средних течений (*слева*) и профили компонент скорости и температуры на ст.14 (*справа*).

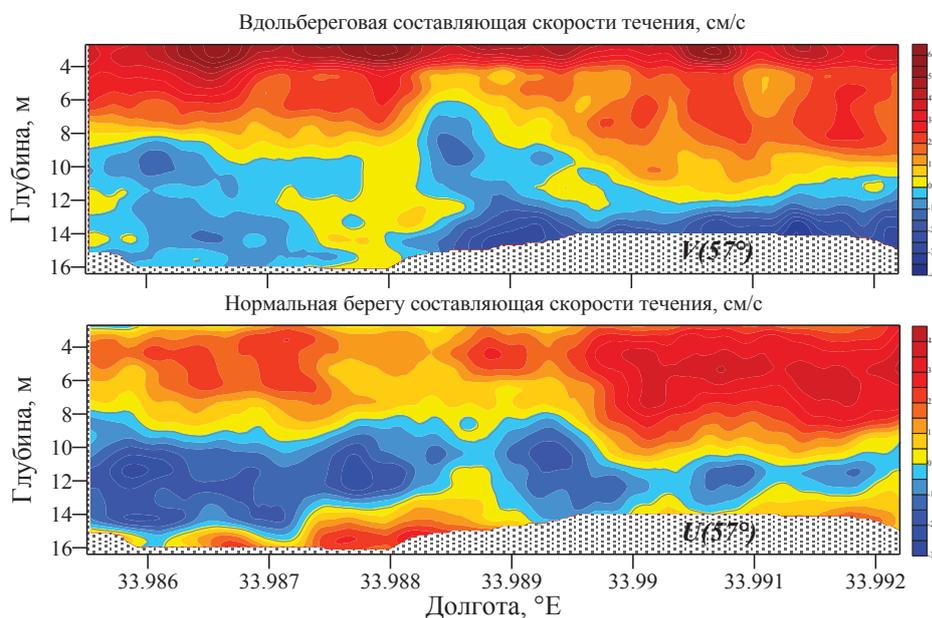


Р и с . 3 . Распределение осредненных по глубине течений на вдольбереговом дрейфовом разрезе 21 сентября 2015 г.

0,25 [10]. Вероятность наблюдения чисел Ричардсона меньше критического экспоненциально убывает с ростом квадрата частоты плавучести. При плотностной стратификации с частотой плавучести более 20 цикл/час значения числа Ричардсона всегда больше критического. Средний квадрат вертикального сдвига скорости течений пропорционален корню квадратному среднего квадрата частоты плавучести.

При благоприятном направлении дрейфа такой способ измерений позволяет получать сечения поля скорости течений с высоким пространственным разрешением. Приведем соответствующий пример, полученный в экспедиции, проходившей 15 сентября 2015 г. Измерения выполнялись на протяжении 30 минут. Судно дрейфовало со средней скоростью 39 см/с в направлении 57°. В результате был получен вдольбереговой разрез поля скорости течений протяженностью ~650 м. На рис.3 в векторном виде приведено распределение осредненных по глубине скоростей течения. На относительно небольшой дистанции наблюдается значительное изменение как модуля, так и направления средней по глубине скорости течения.

Более полное представление о поле течений вдоль разреза дают распределения вдольбереговой и нормальной берегу составляющих скорости. На рис.4 обозначения $U(57^\circ)$ и $V(57^\circ)$ означают соответствующие оси системы координат, развернутой на 57° относительно географической. Распределение вдольбереговой составляющей характеризуется усилением скорости в верхнем слое моря. В этом слое наблюдаются квазипериодические изменения скорости до 8 см/с с характерным масштабом 100 – 150 м, что может быть вызвано прохождением короткопериодных внутренних волн. В нижнем



Р и с . 4 . Распределение вдольбереговой (*вверху*) и нормальной берегу (*внизу*) составляющих скорости течения по глубине и долготе.

слое значение вдольбереговой составляющей не превосходит 3 см/с и имеет противоположный знак. Нормальная берегу составляющая проявляет слоистую вертикальную структуру, что, предположительно, является следствием влияния рельефа дна. В нижнем слое наблюдаются периодические вариации с амплитудой до 1 см/с и характерным масштабом 100 – 150 м. В восточной части разреза в верхнем слое наблюдается усиление скорости до 6 см/с. Значительное изменение скорости течений на малых горизонтальных масштабах $O(100\text{ м})$ является следствием меняющегося рельефа дна в районе проведения измерений.

Измерения на ходу судна позволяют получать распределение течений вдоль трека судна. Экспедиция проходила 6 ноября 2013 г. Прибор крепился на специально изготовленной штанге к левому борту по центру (рис.1), так что преобразователи находились на глубине 0,9 м. Измерения скорости течений производились на ходу судна (скорость движения от 1,5 до 2,5 м/с). Параметры работы *ADCP*: опция *WP – High Resolution/Low Range*; дискретность по времени – 0,4 с; по глубине – 1 м; количество сегментов глубины – 25; опция *BT* включена; диапазон *BT* – 45 м; осреднение по ансамблям не использовалось. Слой измерения составлял от 2 до 14 м.

На рис.5 приведены результаты *ADCP*-измерений на одном из разрезов протяженностью ~850 м (направлен по нормали к берегу, скорость движения судна 1,8 м/с). Положение разреза в акватории представлено желтой линией на рис.5, *слева*. На рис.5, *справа, вверху* приведено распределение вдольбереговой составляющей скорости течений на разрезе. Распределение течений характеризуется значительной пространственной изменчивостью по нормали к берегу, числа Кибеля-Россби на отдельных фрагментах разреза достигают 16.

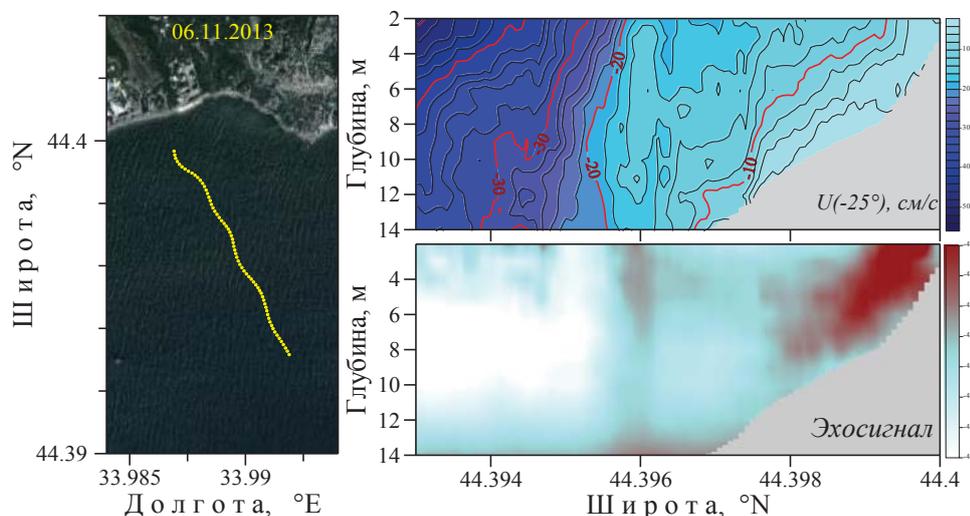


Рис. 5. Положение разреза (слева), распределение вдольбереговой составляющей скорости течения (справа, сверху) и интенсивности эхосигнала (справа, внизу).

Дополнительно *ADCP* измеряет профили интенсивности эхосигнала. На рис.5, справа, внизу приведено распределение интенсивности эхосигнала, выраженное в условных единицах, пропорциональных силе обратного рассеяния (дБ). Красные области соответствуют повышенной интенсивности эхосигнала и на качественном уровне характеризуют повышение концентрации рассеивателей звука. Количественные оценки концентрации взвешенного вещества по данным прибора могут быть получены при условии, что известны акустические свойства взвеси и ее дисперсный состав. Использование дополнительных возможностей *ADCP* может быть полезным для локализации районов повышенной концентрации взвеси и определения их характерных размеров с целью проведения последующих исследований иными контактными методами.

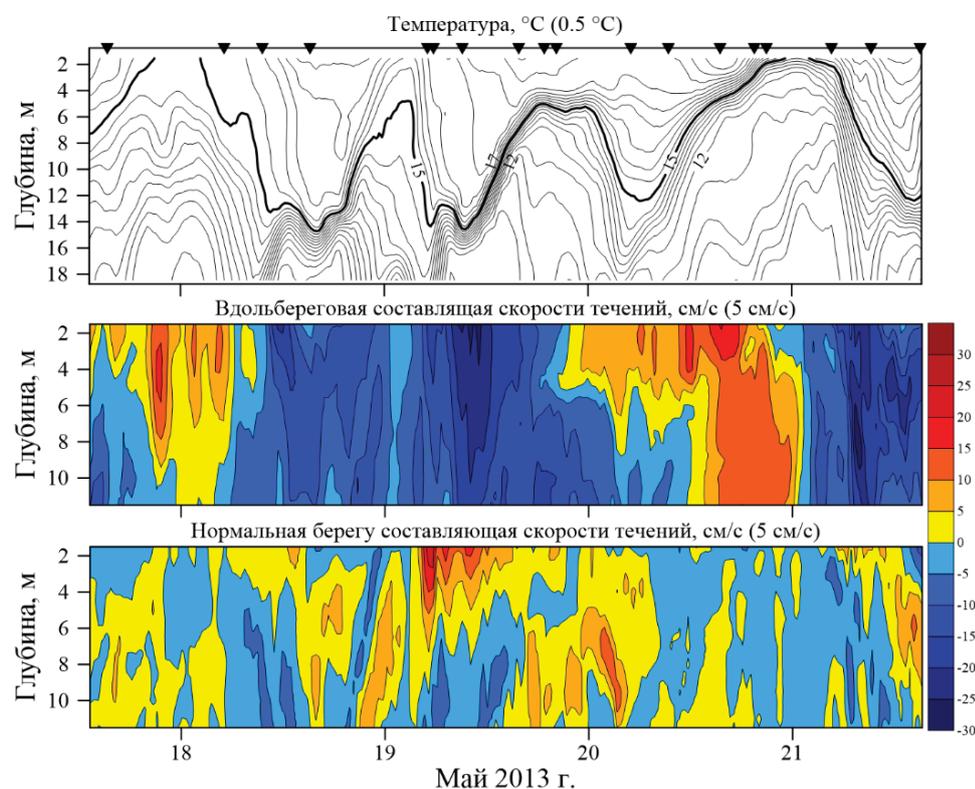
Совокупность данных, полученных в прибрежных водах пгт.Кацивели, выявила почти линейное убывание средней скорости течений по мере приближения к берегу, начиная с расстояния 0,5 – 2 км. Характерные размеры изменчивости течений по нормали к берегу составляют $O(100\text{ м})$. Разрешающая способность измерений на ходу судна в пределах действия опции *BT* по горизонтали составляет $O(10\text{ м})$.

Измерения с океанографической платформы. Основное достоинство использования *ADCP* для измерений течений с океанографической платформы – возможность совместного анализа с другими данными: спутниковыми снимками, показаниями береговой метеостанции (ветер, уровень) и средствами постоянного измерения течений, расположенными на горизонтах 5; 10; 15; 20; 25 м, данными распределенных термодатчиков и *CTD*-зондирований. Комплексная обработка данных от всей совокупности источников, ожидается, позволит в больших деталях исследовать закономерности мелкомасштабной динамики в контексте крупномасштабных явлений, происходящих в атмосфере и водной среде. В качестве примера приведем ре-

зультаты совместной обработки данных *ADCP*, *CTD*-зондирований и распределенного датчика температуры.

Измерения выполнялись с 13:51 UTC 17 мая по 15:34 UTC 21 мая 2013 г. При проведении измерений прибор вывешивался на тросе с выносного мостика (рис.1, *справа*) на расстоянии около 5 м от подводных конструкций платформы. Заглубление преобразователей составляло 0,5 – 1 м. Параметры работы профилометра: опция *WP – High Resolution/Low Range*; дискретность по глубине 0,5 м; по времени 0,2 с; число сегментов глубины 40; осреднение по 60 ансамблям (12 с), опция *BT* отключена. Такой способ использования *ADCP* является наиболее простым с точки зрения технологичности выполнения измерений, однако при этом на глубине около 12 м подводные конструкции платформы попадают в зону «видимости» прибора и данные по течениям становятся не корректными. Слой водного столба, охваченный измерениями, составил от 1,5 до 12 – 16 м в зависимости от угловой ориентации прибора. В тоже время было выполнено 18 *CTD*-зондирований и велась непрерывная запись распределенного термопрофилемера.

На рис.6 приведены распределения температуры (рис.6, *сверху*), вдольбереговой (рис.6, *середина*) и нормальной берегу (рис.6, *внизу*) составляющих скорости течений по глубине и времени, осредненные по 30 минутным интервалам. Треугольники на верхней шкале температуры показывают вре-

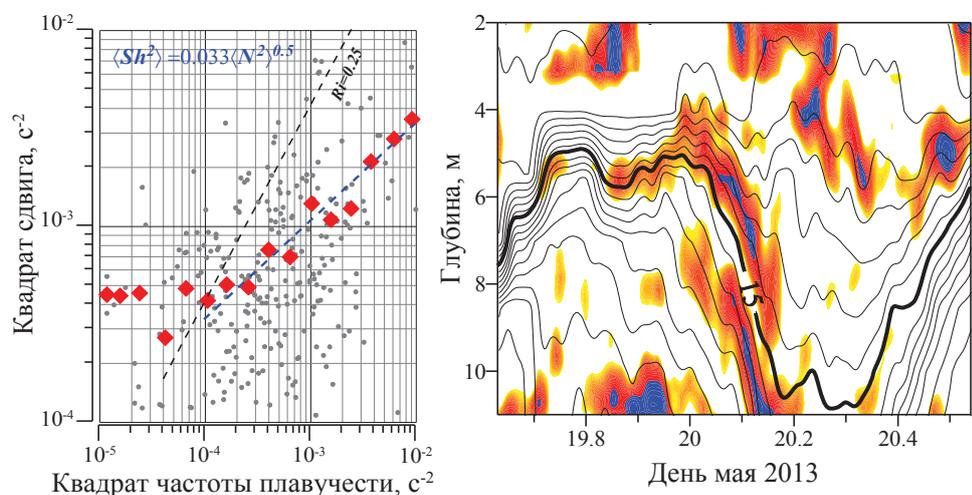


Р и с . 6 . Распределения температуры (*сверху*), вдольбереговой (*середина*) и нормальной берегу (*внизу*) составляющих скорости течений по глубине и времени, осредненные по 30 минутным интервалам.

мя проведения *CTD*-зондирований. На рисунке заметны колебания изотерм с амплитудой около 5 м и почти суточным периодом. Полученные данные показывают значительную вертикальную и временную изменчивость поля скорости течений. Большую часть времени доминировали вдольбереговые течения западной направленности, средние значения скорости течений в направлении $245 \pm 10^\circ$ составили 14 см/с, в направлении $65 \pm 10^\circ$ – 8 см/с. Средние значения скорости течений по нормали к берегу не превышают 4 см/с. Разворот вектора скорости значимых течений с глубиной идет против часовой стрелки (градиент минус $2^\circ/\text{м}$). Профиль среднеквадратического значения модуля скорости течений до горизонта 10 м адекватно воспроизводится логарифмической функцией. Среднее значение скорости трения в приповерхностном слое составило 0,48 см/с. Средняя скорость проникновения кинетической энергии в толщу вод, рассчитанная с учетом пристеночной модели турбулентности, составило $2,5 \cdot 10^{-4}$ м/с. Полученное значение хорошо согласуется с эмпирической оценкой скорости проникновения инерционных движений в толщу вод, приведенной в работе [11], и составившей 12 часов на каждые 10 метров ($2,3 \cdot 10^{-4}$ м/с). В области низких частот до 3 цикл/час временная изменчивость течений характеризуется спектром пульсаций скорости вида $\propto \omega^{-2}$. На более высоких частотах отмечается выраженное превышение значений спектра приведенной аппроксимирующей зависимости, что может быть вызвано короткопериодными внутренними волнами (КВВ) и/или баротропными сейшами (БС) в системе свал глубин – берег [12, 13]. На интервале наблюдения кинетическая энергия КВВ/БС составила менее 2 % кинетической энергии, сконцентрированной в диапазоне внутренних волн. Детально результаты рассматриваемых измерений обсуждаются в работе [14]. Отметим, что приведенные характеристики течений в верхнем слое моря получены исключительно на основе *ADCP*-данных, иных средств контроля течений, обеспечивающих настолько высокий уровень информативности, на сегодняшний день не существует.

На рис.7 слева приведена зависимость квадрата сдвига скорости течений от квадрата частоты плавучести, рассчитанные на приращениях глубины 0,5 м, по данным 17 *CTD*-зондирований, выполненных во время постановки *ADCP*. Серые точки представляют исходные данные во всем слое измерения *ADCP*. Исходные данные показывают большой диапазон изменчивости и не выявляют выраженной функциональной зависимости параметров. После осреднения (красные квадратики) в области сильной плотностной стратификации (частота плавучести более 5 цикл/час) квадрат сдвига пропорционален корню квадратному среднего квадрата частоты плавучести.

На рис.7, справа черными линиями (изотермы, шаг $0,5^\circ\text{C}$) представлено распределение температуры в один из дней, полученное по данным распределенного термопрофилирующего прибора. Красным цветом отмечены области, где числа Ричардсона меньше 1, синим – меньше критического значения 0,25. При значениях числа Ричардсона меньше критического сдвиговые потоки становятся неустойчивыми и турбулентными, при значениях меньше 1 турбулентные потоки могут существовать до тех пор, пока не станут ламинарными [15]. Отметим, что области генерации турбулентности (синие пятна) чаще встречаются при слабой стратификации, характерное время наблюде-



Р и с . 7 . Зависимость квадрата сдвига скорости от квадрата частоты плавучести (слева), серые точки – исходные данные, красные квадратики – осредненные. Справа – черные линии – изотермы, красный цвет – числа Ричардсона меньше 1, синий цвет – числа Ричардсона меньше 0,25.

ния в точке проведения измерений менее 1 часа, характерные размеры по вертикали около 1 м.

Заключение. Акустические доплеровские профилометры течений *ADCP* являются современными приборами, позволяющими оперативно исследовать динамику прибрежных вод. Показаны возможности использования прибора одновременно как профилометра течений, так и эхолота. Варианты проведения *ADCP*-измерений могут различаться в зависимости от поставленных задач и объектов исследования. При этом следует учитывать, что работа с этим прибором в различных режимах его использования содержит много нюансов на всех этапах проведения измерений, от создания командного файла до обработки полученных данных.

Приведенные характеристики течений в верхнем слое моря получены исключительно на основе *ADCP*-данных, иных средств контроля течений, обеспечивающих настолько высокий уровень информативности, на сегодняшний день не существует.

Работа выполнена в ФИЦ МГИ РАН в рамках государственного задания по темам № 0827-2019-0002 и № 0827-2019-0004.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зац В.И., Лукьяненко О.Я., Яцевич Г.В. Гидрометеорологический режим Южного берега Крыма.– Л.: Гидрометеиздат, 1966.– 120 с.
2. Блатов А.С., Иванов В.А. Гидрология и гидродинамика шельфовой зоны Черного моря (на примере Южного берега Крыма).– Киев: Наукова думка, 1992.– 244 с.
3. Белокопытов В.Н., Саркисов А.А., Щуров С.В. Течения прибрежной зоны на участке Крымского полуострова от мыса Сарыч до поселка Качивели // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– 2003.– вып.8.– С.64-68.

4. Морозов А.Н., Шутов С.А., Зима В.В., Дерюшкин Д.В., Лемешко Е.М., Белоус Н.С. Динамика вод на Черноморском подспутниковом полигоне по данным ADCP-наблюдений / Мониторинг прибрежной зоны на экспериментальном подспутниковом полигоне / Под ред. В.А.Иванова, В.А.Дулова.– Севастополь, 2014.– С.385-400.
5. Mount J.N., Nash J.D., Klymak J.M. Small-scale processes in the coastal ocean // Oceanography.– 2008.– v.21, № 4.– P.22-33.
6. Зацепин А.Г., Баранов В.И., Кондрашов А.А., Корж А.О., Кременецкий В.В., Островский А.Г., Соловьев Д.М. Субмезомасштабные вихри на кавказском шельфе Черного моря и порождающие их механизмы // Океанология.– 2011.– т.51, № 4.– С.592-605.
7. Сабинин К.Д., Серебряный А.Н. Применение акустических доплеровских профилометров течений для изучения пространственной структуры морской среды // Акустический журнал.– 2012.– т.58, № 5.– С.639-648.
8. Зацепин А.Г., Пиотух В.Б., Корж А.О., Куклева О.Н., Соловьев Д.М. Изменчивость поля течений в прибрежной зоне Черного моря по измерениям донной станции ADCP // Океанология.– 2012.– т.52, № 5.– С.629-642.
9. Подымов О.И., Зацепин А.Г., Островский А.Г. Вертикальный турбулентный обмен в черноморском пикноклине и его связь с динамикой вод // Океанология.– 2017.– т.57, № 4.– С.546-559.
10. Miles J.W. On the stability of heterogeneous shear flows // J. Fluid Mech.– 1961.– 10.– P.496-508.
11. Иванов В.А. Среднемасштабная динамика вод в южных морях: современное представление.– Севастополь: МГИ НАН Украины, 1996.– 312 с.
12. Иванов В.А., Серебряный А.Н. Частотные спектры короткопериодных внутренних волн в бесприливном море // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана.– 1982.– т.18, № 6.– С.683-685.
13. Власенко В.И., Иванов В.А., Красин И.Г., Лисиченок А.Д. Генерация интенсивных короткопериодных внутренних волн во фронтальной зоне прибрежного апвеллинга // Морской гидрофизический журнал.– 1997.– № 3.– С.3-16.
14. Морозов А.Н., Лемешко Е.М., Шутов С.А., Зима В.В., Дерюшкин Д.В., Кузнецов А.С., Белоус Н.С. Течения в верхнем слое моря по данным ADCP-наблюдений с океанографической платформы // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– 2014.– вып.28.– С.51-61.
15. Galperin B., Sukoriansky S., Anderson P.S. On the critical Richardson number in stably stratified turbulence // Atmos. Sci. let.– 2007.– 8.– P.65-69.

Материал поступил в редакцию 10.10.2019 г.

V.A.Ivanov, A.N.Morozov, A.S.Kuznetsov, E.V.Mankovskaya,
S.A.Shutov, V.V.Zima, D.V.Deryushkin, L.V.Verzhevskaya

EXPERIENCE OF ADCP USAGE FOR RESEARCH A COASTAL WATER DYNAMICS NEAR THE SOUTH COAST OF CRIMEA

Practical experience of ADCP WHM1200 acoustic Doppler current profiler usage acquired during cruises near the southern coast of Crimea, Katsiveli is presented. The measurements with ADCP carried out from a drifting vessel, from moving vessel and from an oceanographic platform are considered. The main advantages and significant results obtained with each case of the device usage are noted.

The main advantage of measurements from a drifting vessel at hydrological stations is to obtain synchronous profiles of hydrological parameters and vector of current velocity. Also, with a favorable drift direction, such a method of measurement allows to obtain cross sections of the current velocity field with high spatial resolution. Measurements in the vessel course make it possible to obtain a currents distribution along the vessel track and can provide observation and analysis of various small-scale phenomena in a coastal water dynamics. The main advantage of ADCP usage for current monitoring from an oceanographic platform is the combination of observational data with various data such as satellite images, coastal weather station data (wind, level) and continuous monitoring of currents at fixed layers, data from distributed temperature sensors and CTD probes.

In addition, ADCP measures the profiles of echo signal intensity, which can be useful for localizing of the areas with increased suspended matter concentration and determining their characteristic sizes to conduct subsequent study using other contact methods.

KEYWORDS: current velocity, ADCP measurement modes, echo signal intensity, along coast component, normal coast component, Richardson number, velocity shift, internal waves