

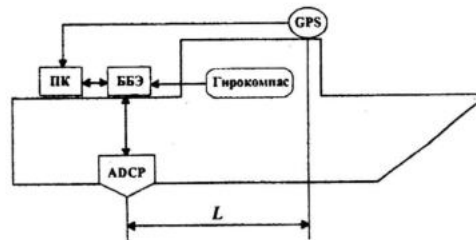
## КОРРЕКЦИЯ ДАННЫХ *VMADCP*

А.Н. Морозов, В.К. Павлов\*

Морской гидрофизический институт  
НАН Украины

г. Севастополь, ул. Капитанская, 2  
E-mail: anmorozov@yahoo.com

\*Norwegian Polar Institute, Norway  
Fram Centre, N-9296, Tromso



Р и с. 1. Схема расположения элементов *VMADCP* на борту судна

Рассматриваются вопросы коррекции данных по течениям, собранных с помощью *ADCP*, установленного на борту судна. Предложенные поправки учитывают: пространственное разнесение положения датчиков *GPS* и *ADCP* на борту исследовательского судна; и влияние корпуса судна на показание компаса прибора, при работе на маломерных судах из магнитного материала. Результаты применения коррекций проиллюстрированы примерами натурных наблюдений.

Акустические доплеровские профилометры течений, установленные на судах (*VMADCP*), находят широкое применение в практике научных исследований для изучения пространственно-временной структуры поля скорости течений [1 – 4]. Несмотря на продолжительную практику использования этих уникальных приборов в обработке данных обнаруживаются небольшие нюансы, которые не могут быть учтены в рамках поставляемого программного обеспечения, но позволяют повысить точность измерений в моменты маневрирования судна, и использовать self-contained *ADCP* в качестве судового при проведении измерений в мелководных акваториях. Именно эти вопросы обработки данных *VMADCP* и являются предметом обсуждения в статье.

Большое количество современных научно-исследовательских судов оборудованы *ADCP* производства *RDI* США. Схематично структура судового профилометра течений приведена на рис. 1, которая включает в свой состав: собственно *ADCP*, жестко установленный в шахте; блок бортовой электроники, в который поступают данные от прибора и судового гироскопа; бортовой компьютер, с установленной программой *VMDas RDI*, которая управляет работой

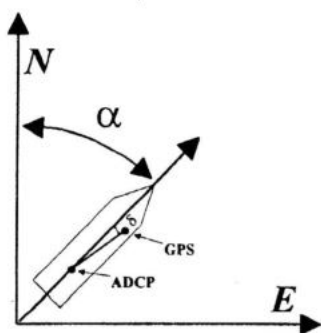
прибора, и принимает навигационные данные от *GPS* по одному из серийных портов. Программа управления и обработки *VMDas* позволяет учитывать расхождение угловой ориентации осей прибора и гироскопа, путем внесения поправок в соответствующие поля программы. Детально процедуры определения поправок и калибровки прибора в натурных условиях представлены в [5, 6]. При пересчете измеренных значений ( $U_{ADCP}, V_{ADCP}$ ) в абсолютные скорости течений ( $U_{Cur}, V_{Cur}$ ), собственные движения прибора учитываются следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} U_{Cur} &= U_{ADCP} + U_{GPS}, \\ V_{Cur} &= V_{ADCP} + V_{GPS}, \end{aligned} \quad (1)$$

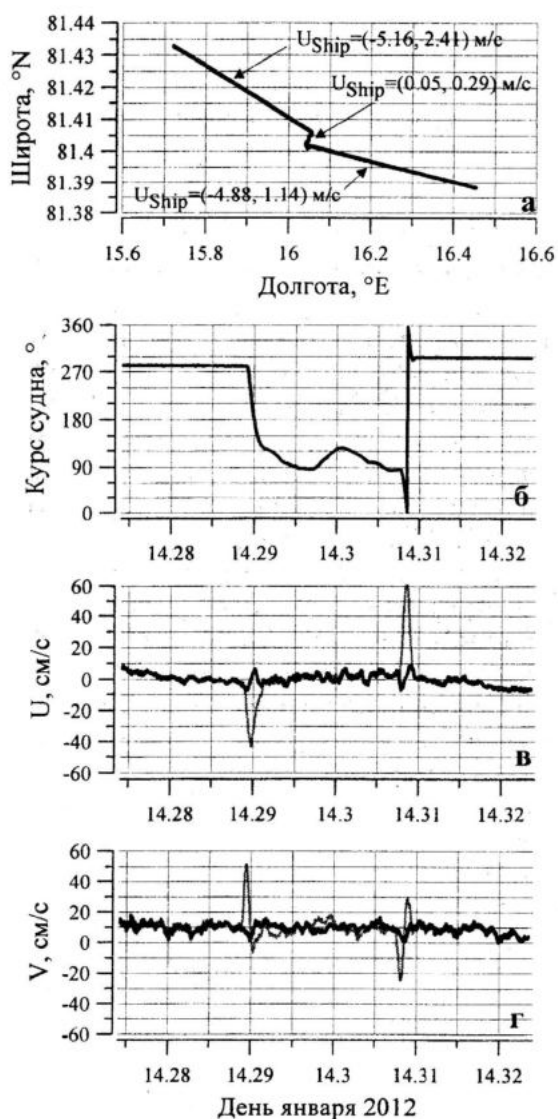
где  $U_{GPS}, V_{GPS}$  – скорость движения судна по данным навигационной системы. Как правило, датчик *GPS* устанавливается на рубке судна, а датчик *ADCP* в оптическом окне в днище судна, которое расположено на расстоянии ( $L$ ) от точки навигационной привязки (см. рис. 1). В этих условиях скорость движения прибора будет отличаться от скорости определенной по навигационным данным при выполнении судном поворотов. Пространственное разнесение датчиков может быть компенсировано введением в соотношение (1) дополнительных членов, учитывающих скорость разворота судна:

$$\begin{aligned} U_{Cur} &= U_{ADCP} + U_{GPS} + L\alpha_t \cos(\alpha + \delta), \\ V_{Cur} &= V_{ADCP} + V_{GPS} - L\alpha_t \sin(\alpha + \delta), \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\alpha$  – курс судна;  $\alpha_t$  – его производная по времени;  $\delta$  – отклонение оси, соединяющей датчики, от продольной оси судна. В графическом виде соответствующие углы представлены на рис. 2.



Р и с. 2. Положение судна в географической системе координат



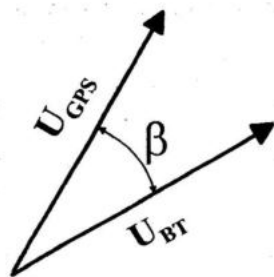
Р и с. 3. Трек судна (а), зависимости курса судна (б), восточной (в) и северной (г) компонент измеренной скорости течения (серая линия – до коррекции, черная после коррекции)

Для демонстрации действия введенной поправки мы заимствовали фрагмент записи *ADCP* (“Ocean Surveyor”, *RDI*) НИС “Helmer Hanssen”, Polar Night Cruise, январь 2012 г. На рис. 3а приведен трек судна. При выходе на станцию судно осуществляет разворот под ветер, соответствующая зависимость курса судна от времени приведена на рис. 3б. На рис. 3в и 3г приведены зависимости рассчитанной по данным *ADCP* скорости течений ( $U_{Cur}, V_{Cur}$ ), осредненной по слою 50 – 100 м, бледные линии – по соотношению (1) без коррекции, толстые линии – по соотношению (2) с коррекцией. Можно видеть, что введенная коррекция позволяет подавить наблюдаемые в моменты поворотов скачки в 5 и более раз, и свести их до уровня шумового фона измерений. Значения  $L=22$  м,  $\delta = -5^\circ$  определялись методом подбора с осреднением по ансамблю станций. Аналогично были определены параметры коррекции для НИС “Lance”:  $L = 9$  м,  $\delta = 7^\circ$ . Предложенная коррекция использовалась при обработке данных *VMADCP* ряда рейсов НИС “Helmer Hanssen” (“Jan Mayen”) и “Lance”, выполненных во время Международного Полярного года, при участии сотрудников Norwegian Polar Institute и МГИ НАН Украины.

При проведении океанографических исследований в мелководных акваториях (прибрежная зона, лиманы, заливы, устья рек, фиорды и т.д.) использование оснащенных крупнотоннажных научно-исследовательских судов ограничивается в силу их значительной осадки 6 – 10 м. В этом случае измерения выполняются на маломерных судах с осадкой менее 2 м. В качестве судовых профилометров течений могут быть успешно использованы self-contained *ADCP*, серии Work Horse производства *RDI*, которые снабжены внутренними датчиками угловой ориентации: магнитный компас и крен/дифферент инклинометры. Структурная схема близка к представленной на рис. 1 – исключается гирокомпас и блок бортовой электроники, *ADCP* подключается непосредственно к одному из портов компьютера, питание прибора осуществляется от сетевого адаптера.

Одна из основных проблем, которая возникает при обработке данных таких приборов – влияние корпуса судна на показание компаса [7]. Вблизи массивного металлического корпуса судна магнитное поле Земли может значительно деформироваться и вызывать значительные погрешности при определении направления по данным компаса прибора [8]. Однако эту проблему можно преодолеть при условии, что судно находится в движении и в *ADCP* включена опция отслеживания дна *Bottom Track (BT)*. С этой целью каждый цикл измерения определяется угол рассогласования ( $\beta$ ) между направлением вектора скорости движения судна, рассчитанной по данным *GPS* ( $\vec{U}_{GPS}$ ) и полученной из *BT* опции ( $\vec{U}_{BT}$ ). Схематично положение векторов приведено на рис. 4. После определения угла рассогласования расчет абсолютных значений скорости течений ( $U_{Cur}, V_{Cur}$ ) производится по данным опции *Water Profiling (WP)* ( $U_{WP}, V_{WP}$ ) и опции *BT* ( $U_{BT}, V_{BT}$ ) с использованием следующего соотношения:

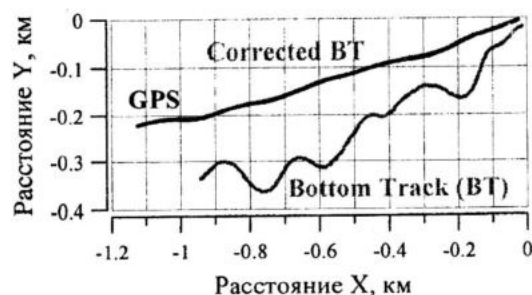
$$\begin{aligned} U_{Cur} &= (U_{WP} - U_{BT}) \cos(\beta) + \\ &\quad + (V_{WP} - V_{BT}) \sin(\beta), \\ V_{Cur} &= -(U_{WP} - U_{BT}) \sin(\beta) + \\ &\quad + (V_{WP} - V_{BT}) \cos(\beta). \end{aligned} \quad (3)$$



Р и с. 4. Угол рассогласования  $\beta$

Наиболее показательный пример необходимости предложенной коррекции был получен на южной границе Керченского пролива (июль 2008 г.) в районе вдоль берегового течения. На рис. 5 приведен трек судна на фрагменте разреза в линейных координатах, черная линия по данным *GPS*, бледная линия по данным *BT* без коррекции. После коррекции (3)

линии *GPS* и *BT* сливаются. Скорость движения судна на разрезе составляла 2.5 м/с.



Р и с. 5. Трек судна в линейных координатах по данным *GPS* (черная линия) и по данным *BT* опции *ADCP* (серая линия)

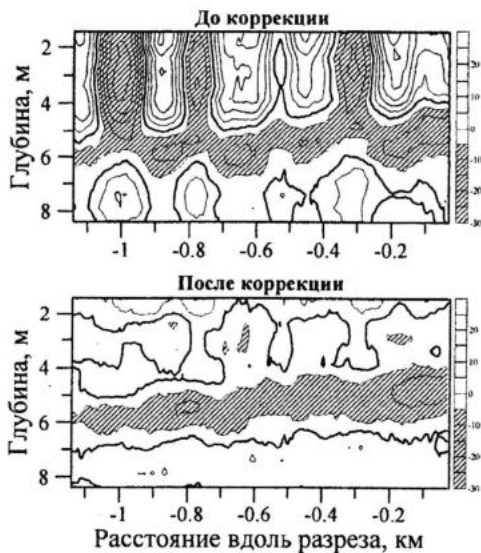
На рис. 6 приведено поведение угла рассогласования в зависимости от расстояния вдоль разреза. Значения угла  $\beta$  изменяются в широких пределах от  $-60^\circ$  до  $+60^\circ$ , что, в условиях вдольберегового течения, со скоростью около 40 см/с, может приводить к значительным погрешностям измерений и возможной неправильной физической интерпретации полученных данных.



Р и с. 6. Зависимость угла рассогласования от расстояния вдоль разреза

На рис. 7 приведено распределение компоненты скорости нормальной основному потоку ( $57^\circ$  по часовой стрелке от направления на север), вверху до коррекции, внизу после коррекции. Распределение, приведенное в верхней части рис. 7, содержит хорошо выраженную гармоническую составляющую. При отсутствии коррекции можно было бы интерпретировать наблюдаемое, как цуг солитонов, картина течений близка к приводимой в [9] временной развертке последних. Однако наблюдаемая картина является следствием небольших изменений направления движения судна на разрезе, что приводит, тем не менее, к

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ



Р и с. 7. Распределение составляющей скорости течений нормальной основному потоку до коррекции (вверху) и после (внизу)

значительному изменению углов рассогласования. Картина течений после коррекции (рис. 7 внизу) уже не содержит хорошо выраженной гармоник. Действие предложенной коррекции более хорошо продемонстрировано на рис. 8, где представлена зависимость осредненных по слою 2 – 4 м компоненты скорости течений нормальной основному потоку до (бледная линия) и после (черная линия) коррекции.



Р и с. 8. Распределение осредненной по слою 2 – 4 м скорости течений вдоль разреза (серая линия – до коррекции, черная после коррекции)

Предложенная коррекция позволяет использовать self-contained ADCP RDI для исследования пространственно-временной изменчивости поля скорости течений в мелководных водоемах с борта маломерного судна, вне зависимости из какого материала оно изготовлено.

1. *Oguz T., Besiktepe S.* Observations on the Rim Current structure, CIW, formation and transport in the western Black Sea // *Deep-Sea Res.* – 1999. – 46. – P. 1733 – 1753.
2. *Cisewski B., Budeus G. and Crause G.* Absolute transport estimates of total and individual water masses in the northern Greenland Sea derived from hydrographic and acoustic Doppler current profiler measurements // *Journal of Geophysical Research*, 2003. – Vol. 108, NO. C9, 3298. – doi:10.1029/2002JC001530. – 14 p.
3. *Lherminier P. et al.* Transports across the 2002 Greenland-Portugal Ovide section and comparison with 1997// *Journal of Geoph. Res.*, 2007. – Vol. 112. – C07003. – doi: 10.1029/2006JC003716. – 20 p.
4. *Джиганин Г.Ф., Полонский А.Б.* Кинематическая структура и мезомасштабная изменчивость Основного Черноморского течения вблизи побережья Крыма (по данным инструментальных измерений в сентябре 2008 г.) // *Морской гидрофизический журнал*, 2011. – №1. – С. 25 – 35.
5. *Joyce T.M.* On in situ calibration of shipboard ADCPs // *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 1989. – 6. – P. 169 – 172.
6. *Pollard R.T., Read J.* A method for calibrating shipmounted acoustic Doppler profilers and limitations of gyro compasses // *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 1989. – 6. – P. 859 – 865.
7. *Кушнир В.М., Морозов А.Н.* Контроль метрологических характеристик измерителя скорости потока зонда ОЛТ по данным натурных зондирований // *Морской гидрофизический журнал*, 2001. – № 5. – С. 56 – 66.
8. *RDI-Primer* Acoustic Doppler Current Profilers Principles of Operation: A Practical Primer. – RD Instruments, 1996. – 54 p.
9. *Сабинин К.Д., Серебряный А.Н.* Применение акустических доплеровских профилометров течений для изучения пространственной структуры морской среды // *Акустический журнал*, 2012 – том 58, №5. – С. 639 – 648.