

ОЦЕНКА КОНЦЕНТРАЦИИ ВЗВЕСИ ПО ДАННЫМ ADCP WHM1200

A.H. Морозов, Е.М. Лемешко

Морской гидрофизический институт
НАН Украины
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2
E-mail: anmorozov@yahoo.com

В статье рассматривается возможность использования высокочастотного акустического допплеровского профилометра течений для оценки потоков взвешенного вещества. Представлено уточненное соотношение для расчета акустической силы обратного рассеивания по интенсивности эхосигнала. Приведены примеры распределения потоков взвешенного вещества в северной узости Керченского пролива, полученные на основе натурных данных.

Введение. В последние десятилетия при изучении процессов переноса и седиментации взвешенного вещества в прибрежных районах моря все более широкое применение находят высокочастотные акустические допплеровские профилометры течений (ADCP) [1 – 5]. Такие приборы обеспечивают одновременное измерение профилей скорости течения и интенсивности обратнорассеянного акустического сигнала. Последний параметр зависит от количества и акустических свойств обратных рассеивателей в озвученном объеме, и может быть использован для грубой оценки концентрации взвеси. Совместная обработка данных по течениям и интенсивности эхосигнала открывает широкие возможности для исследования пространственно-временного распределения потоков взвеси в мелководных акваториях.

В данной статье приводятся уточненные уравнения для расчета силы обратного рассеивания и концентрации взвеси по интенсивности эхосигнала, регистрируемого ADCP Work Horse Monitor (WHM) RDI. Цель статьи выработать практические рекомендации по обработке данных, для более эффективного использования прибора в натурных исследованиях.

Теория. Первый шаг в обработке данных по интенсивности эхосигнала за-

ключается в пересчете единиц измерения RDI в силу цели обратного рассеивания, которая зависит от расстояния до объема измерения и свойств морской среды. Как правило, для расчета силы обратного рассеивания (S_v , дБ) по измеренному значению интенсивности эхосигнала (EI_m , единицы RDI) используется упрощенное уравнение, представленное RDI для серии широполосных измерителей [1]:

$$S_v = C + 10 \cdot \lg(T_x) - P_{DBW} + \\ + [2 \cdot \alpha \cdot R + 10 \cdot \lg R^2 - L_{DBM}] + , \quad (1)$$
$$+ K_c \cdot (EI_m - I_n)$$

где C – постоянная, определяемая по результатам калибровки, T_x – температура электро-акустического преобразователя в $^{\circ}\text{K}$, P_{DBW} – мощность излучения в децибелах (дБ) по отношению к 1 Вт, $L_{DBM} = 10 \cdot \lg(L_{Tr})$ – длина излучаемого импульса (L_{Tr}) в дБ по отношению к 1 м, α – коэффициент поглощения звука в дБ/м, множитель “2” учитывает прохождение сигнала до объема измерения и обратно, I_n – интенсивность шумового фона в единицах RDI, R – расстояние в метрах, K_c – коэффициент преобразования единиц RDI в дБ. Следует обратить внимание, что в соответствии с [1], регистрация интенсивности эхосигнала производится в последней четверти сегмента глубины, соответствующее расстояние определяется по соотношению:

$$R = \frac{H_{BL} + (j - 3/4) \cdot D + D/4}{\cos(\phi)}, \quad (2)$$

где H_{BL} – расстояние до середины первого сегмента глубины по вертикали, j – номер сегмента, D – размер сегмента в метрах, ϕ – угол отклонения луча от продольной оси прибора (для WHM составляет 20°). Коэффициент K_c в среднем составляет 0.45, но может варьироваться в пределах 20 %. Точные значения K_c для каждого из лучей могут быть запрошены в RDI, по серийному номеру прибора. Значение I_n – определяется в процессе предустановочного тестирования прибора для каждого луча и составляет, как правило, около 40 единиц RDI.

Коэффициент α зависит от свойств морской воды и может быть рассчитан по известным соотношениям (например [6]). Для WHM1200 (рабочая частота 1200 кГц) коэффициент ослабления составляет от 0.44 до 0.66 дБ/м [7]. Мощность излучения может быть рассчитана по соотношению [5]:

$$P_{DBW} = 10 \cdot \lg(U_{Tr} \cdot I_{Tr}) = 10 \cdot \lg[(TC \cdot 0.011451) \cdot (TV \cdot 0.380667)], \quad (3)$$

где U_{Tr}, I_{Tr} – напряжение и ток излучения, соответственно, TC – ток излучения в единицах RDI, TV – напряжение излучения в единицах RDI. Особенno важно учитывать мощность при работе прибора в автономном режиме, поскольку падение напряжения батарей со временем может вызывать значительные отклонения мощности излучения. Значения $T_x, TC, TV, L_{Tr}, EI_m, H_{BI}, D$ записываются в соответствующие поля бинарного файла данных каждый цикл измерений, формат файла данных детально представлен в [8].

Слагаемое правой части уравнения (1) заключенное в квадратные скобки упрощенно учитывает поглощение звука при распространении, сферическое расхождение волны и продолжительность зондирующего импульса. Более точно слагаемое, определяющее зависимость от расстояния может быть представлено в следующем виде:

$$-10 \lg \left(\int_{R-L_{Tr}/2}^{R+L_{Tr}/2} \frac{10^{-2\alpha(R+\eta)/10}}{(R+\eta)^2 \cdot \psi} d\eta \right), \quad (4)$$

где ψ – поправка на несферичность распространения акустической энергии в ближней зоне излучателя, которая определяется соотношением [9]:

$$\psi = \frac{1 + 1.35z + (2.5z)^{3.2}}{1.35z + (2.5z)^{3.2}}, \quad (5)$$

где $z = (R\lambda) / (\pi a_{tr}^2)$, λ – длина волны в метрах, a_{tr} – радиус излучателя в метрах, для WHM1200 $z = 0.546R$. Интегрирование учитывает осреднение сигнала в объеме воды на длине зондирующего импульса. Соотношение (4) в лучшей степени описывает зависимость от расстояния в ближней к излучателю зоне, и на больших расстояниях стремится к ви-

ду слагаемого уравнения (1), заключенного в квадратные скобки.

Последнее слагаемое правой части уравнения (1), учитывает шумовой фон, так как если бы он подключался на выходе измерителя, в то время как в действительности шум суммируется с полезным сигналом на входе прибора. Нетрудно получить, что в этом случае последнее слагаемое будет представляться в следующем виде:

$$10 \cdot \lg(10^{K_c \cdot EI_m / 10} - 10^{K_c \cdot I_n / 10}) \quad (6)$$

такое представление более точно учитывает шумовой фон и позволяет проводить более точные оценки в условиях малой концентрации обратных рассеивателей в удаленных сегментах глубины. Таким образом, уточненное уравнение может быть получено заменой в (1) двух последних слагаемых на (4) и (6). Для того чтобы показать различие между уравнением (1) и его уточненной формой мы воспользовались данными погружаемого ADCP WHM300. На рис. 1 приведена зависимость измеренного значения интенсивности эхосигнала от расстояния до середины сегмента глубины: черные треугольники – измеренные значения, сплошная черная линия соответствует уравнению (1), пунктирная линия – уравнению (1) с учетом (4) – (6). Можно видеть, что уточненное уравнение в лучшей степени соответствует измеренным значениям, особенно при уровне интенсивности эхосигнала менее 70 единиц RDI.

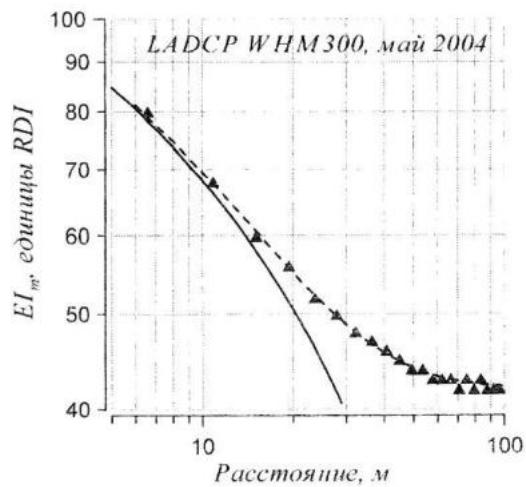


Рис. 1. Зависимость EI_m от расстояния

Начиная с 2004 г., для оценки концентрации взвешенного вещества (SMC), по измеренному значению силы обратного рассеивания, применяют соотношение [3]:

$$\lg(SMC) = A \cdot S_v + B, \quad (7)$$

где A, B – калибровочные коэффициенты, определяемые, как правило, на основе сопоставления с данными оптических профиломеров концентрации взвеси.

Результаты измерений. В качестве исходной информации были использованы данные, собранные в ходе экспедиции в район Керченского пролива, проходившей с 22 по 24 июля 2008 года. Схема проведения измерений приведена на рис. 2. Для измерения течений использовался ADCP RDI WHM1200. Прибор жестко крепился к правому борту судна на специально изготовленной раме. Дискретность измерений по глубине составляла 0.5 м, по времени – 0.3 с. Запись велась непрерывно. Расчет силы обратного рассеивания производился по уточненному уравнению, коэффициенты для расчета концентрации взвеси заимствованы из работы [2]. Более детально методические аспекты и результаты экспедиции обсуждаются в [10].

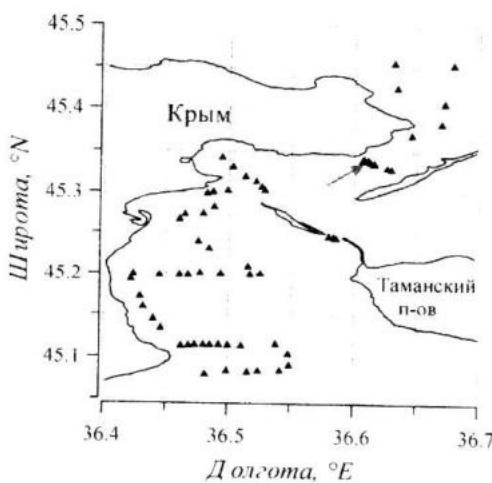


Рис. 2. Район проведения измерений.

В Керченском проливе взаимодействуют азовоморские и черноморские воды, значительно отличающиеся по своим свойствам. Наиболее ярко различие вод проявляется в оптических характеристиках, что дает возможность использовать спутниковые снимки для мониторинга циркуляции вод и распределения взве-

щенного вещества в приповерхностном слое моря [11, 12]. Акустические свойства вод для данного района в литературе не представлены, поэтому на первом этапе интересно было определить, насколько они изменяются на протяжении пролива. С этой целью запись ADCP была разбита на фрагменты, представлены на рис. 2 черными треугольниками. В каждой точке рассчитывалось среднее по глубине значение концентрации взвешенного вещества. Результаты расчетов приведены на рисунке 3 в виде зависимости логарифма концентрации от широты: треугольники – измеренные значения; сплошная линия – аппроксимирующая прямая. Как можно видеть из рисунка значение концентрации взвеси изменяется в пределах трех порядков. В среднем на протяжении пролива (аппроксимирующая прямая) концентрация обратных рассеивателей уменьшается на два порядка при переходе из Азовского в Черное море. Отметим, что в ходе экспедиции на дрейфовых станциях выполнялись измерения с использованием оптического профиломера (Чепыженко А.И.), которые показали тот же порядок изменчивости оптических свойств вод.

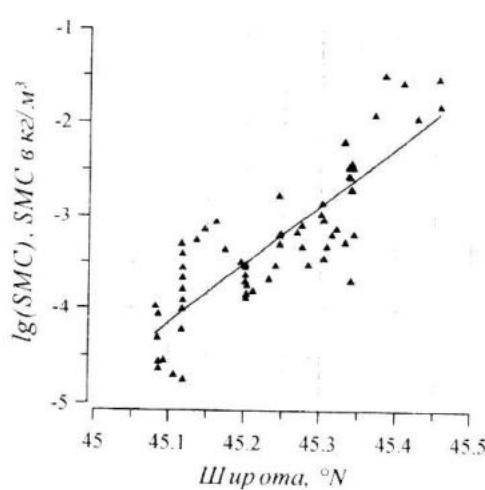


Рис. 3. Изменчивость концентрации взвеси на протяжении пролива

Основная ценность ADCP измерений заключается в том, что прибор обеспечивает одновременные измерения профилей скорости течения и концентрации взвеси на ходу судна, что позволяет выполнять инструментальные оценки потоков взвешенного вещества через попе-

речные сечения разрезов. Для примера на рис. 4 приведено распределение потоков взвешенного вещества через поперечное сечение северной узости Керченского пролива (отмечено серой стрелкой на рис. 2.) в зависимости от расстояния вдоль разреза от его западной границы. В данном районе рельеф дна характеризуется наличием искусственного продольного углубления (фарватера) шириной около 200 м и глубиной 11 м, при средней глубине акватории 4 – 5 м. Расчет потока взвеси (F_{SM}) производился по соотношению:

$$F_{SM} = \frac{H_{bot}}{H_{dw} - H_{up}} \cdot \frac{H_{dw}}{H_{up}} \int SMC \cdot V_p dz, \quad (8)$$

где V_p – перпендикулярная разрезу составляющая скорости течения, H_{bot} – глубина моря, H_{up}, H_{dw} – верхняя и нижняя границы слоя измерения, соответственно [10]. Знак “минус” указывает на перенос взвеси из Азовского в Черное море. Характерным для распределения является наличие значительного максимума потока по модулю в области фарватера и относительное возрастание модулей потоков в прибрежных районах. Скорость переноса вещества через северную узость на момент наблюдения составила 12 кг/с.

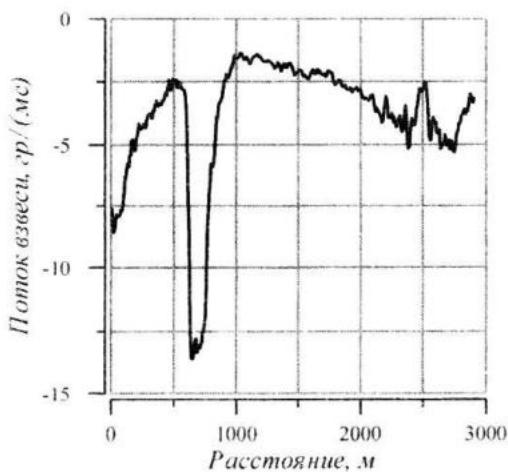


Рис. 4. Распределение потоков взвеси в северной узости пролива

Данные ADCP позволяют не только рассчитывать интегральные потоки вещества через поперечное сечение разреза, но и получить детальное представле-

ние о пространственном распределении течений и концентрации взвеси, на горизонтальных масштабах порядка сотен метров. Для примера на рис. 5 приведены распределения логарифма концентрации взвеси (верхний график) и скорости течения (нижний), в районе фарватера рассматриваемого разреза. Протяженность фрагмента около 400 м. В придонной части моря наблюдается повышение концентрации взвеси, что может быть вызвано размывом донного материала. Можно также отметить, что подъем взвеси наблюдается в области повышенных горизонтальных градиентов скорости течения. Наибольший подъем взвеси зафиксирован у западной границы фарватера, в то время как ядро струи концентрируется в его восточной части. Наблюдаемое распределение течений является несколько неожиданным, так как под действием силы Кориолиса ядро струи должно было прижиматься к западной границе углубления. Это обстоятельство может объясняться наличием изгиба фарватера в районе наблюдений, или флуктуациями положения ядра струи. Скорость течения в ядре струи в 1.5–2 раза выше, чем в соседних частях разреза.

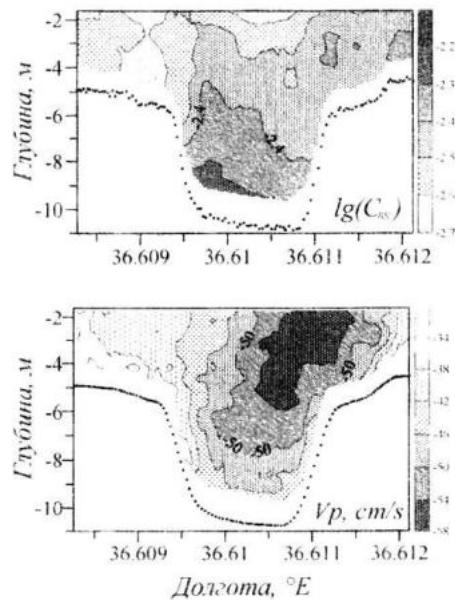


Рис. 5. Детализация распределения концентрации (верх) и течений (низ)

Выводы. В статье представлено уточненное уравнение для расчета силы обратного рассеивания акустических сигналов по параметрам, измеряемым

ADCP WH RDI, с учетом технических нюансов процесса измерения. Полученное уравнение более точно учитывает зависимость интенсивности эхосигнала от расстояния в ближней зоне прибора и более корректно представляет измерения в условиях малого соотношения сигнал/шум. Приведенные материалы могут быть полезны для более эффективного применения ADCP в натурных исследованиях, за счет использования его дополнительных возможностей.

Качество оценки концентрации взвеси по известному значению силы обратного рассеивания акустического сигнала определяется размерным составом и свойствами рассеивателей и поэтому соответствующие коэффициенты (7) справедливы в пределах акватории выполнения калибровки. Приведенные в работе примеры распределения концентрации и потоков взвеси имеют относительный характер, для получения абсолютных оценок требуется проведение соответствующей калибровки прибора в районе проведения измерений. Использование ADCP в судовом режиме, при отсутствии калибровки, может быть полезным для локализации районов повышенной концентрации взвеси и определения их характерных размеров.

Работа выполнена в рамках проектов НАН Украины “Оперативная океанография”, “Управление”.

Выражаем глубокую признательность сотрудникам отдела гидрофизики шельфа МГИ НАН Украины, оказавшим неоценимую помощь при проведении натурных измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Deines K.L. Backscatter estimation using broadband acoustic Doppler current profiler // Proceeding IEEE/OES 6th Working Conference on Current Measurement Technology, 1999. – P. 259 – 264.
2. Kim Y.H., Voulgaris G. Estimation of suspended sediment concentration in estuarine environments using acoustic backscatters from an ADCP // Proceedings of the International Conference on Coastal Sediments, 2003. – 10 p.
3. Gartner J. Estimating suspended solids concentrations from backscatter intensity measured by acoustic Doppler current profiler in San Francisco Bay // California: Marine Geology, 2004. – v. 211. – P. 169 – 187.
4. Souza A.J., Alvarez L.G., Dickey T. Tidally induced turbulence and suspended sediment // Geophys. Res. Lett., 2004. – 31. – L20309, doi: 10.1029/2004GL021186.
5. Wall, G.R., Nystrom, E.A., and Litten, Simon. Use of an ADCP to compute suspended-sediment discharge in the tidal Hudson River // New York: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2006-5055, 2006. – 16 p.
6. Урик Р. Дж. Основы гидроакустики. – Л.: Судостроение, 1978. – 448 с.
7. Gordon R.L. Acoustic Doppler Current Profiler Principles of Operation: A Practical Primer // RD Instruments, 1996. – 54 p.
8. Work Horse: Commands and output data format // RD Instruments, 2002. – 178 p.
9. Downing, Andrew. Thorne P.D., Vincent C.E. Backscattering from a suspension in the near-field of a piston transducer // The Journal of the Acoustical Society of America, 1995. – v. 97, no. 3. – P. 1614.
10. Морозов А.Н., Лемешко Е.М., Иванов В.А., Шутов С.А., Зима В.В. Течения в Керченском проливе по данным ADCP наблюдений 2008 – 2009 годов // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь. – 2010. – вып. 21. – 15 с. (в печати).
11. Ломакин П.Д., Боровская Р.В. Возможность контроля системы течений в Керченском проливе на базе спутниковой информации // Системы контроля окружающей среды. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2005. – С. 255 – 257.
12. Кушип В.М. Характеристики приповерхностного слоя азовского моря по данным оптических сканеров системы MODIS // Исследование Земли из космоса, 2009. – С. 1 – 2.