

Любомищенко Денис Сергеевич

Технологический институт федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге.

E-mail: dexusint@gmail.com.

347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44.

Тел.: 8(8634)601-219.

Кафедра высшей математики; аспирант.

Lubomishenko Denis Sergeevich

Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”.

E-mail: dexusint@gmail.com.

44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia.

Phone: 8(8634)601-461.

The Department of Higher Mathematics; post-graduate student.

УДК 519.4

А.И. Сухинов, А.А. Черчаго

**ОЦЕНКА КОНЦЕНТРАЦИИ ВЗВЕШЕННЫХ ЧАСТИЦ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АКУСТИЧЕСКОГО ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ
ADCP-ЗОНДА**

В исследовании представляется метод определения концентрации взвешенных частиц в водной среде на основе данных, собранных при помощи акустического доплеровского профилографа течений (ADCP, RDI Workhorse, 600kHz) с калибровкой оптическим обратным датчиком (SBE 19 Plus), данные которого используются для уточнения упрощенного варианта гидролокационного уравнения, которое преобразует записанные ADCP-зондом данные об интенсивности эхо-сигнала в SSC (Suspended Sediment Concentration).

ADCP; акустический Доплеровский профилограф; концентрация взвешенных частиц; эхо-сигнал.

A.I. Sukhinov, A.A. Cherchago

**ESTIMATION OF WEIGHED PARTICLES' CONCENTRATION USING
ACOUSTIC BACK DISPERSION OF AN ADCP-PROBE**

This study presented simultaneously collected acoustic Doppler current profiler (ADCP, RDI Workhorse, 600kHz) and suspended sediment concentration data, obtained with an optical backscatter sensor (SBE 19 Plus). These data are utilized to calibrate a simplified version of the sonar equation that converts the recorded by the ADCP echo intensity into SSC (Suspended Sediment Concentration).

ADCP; Accoustic Doppler current profiler; Suspended sediment concentration (SSC); echo intensity.

Введение

Исследование эрозии, переноса и осаждения взвеси имеют важное значение для экологических исследований водных объектов. Кроме того, геоморфологические исследования, связанные с появлением или изменениями наносов для судоходных каналов, требуют детальной информации о динамике донных отложений и в частности их пространственном и временном распределении.

Для прибрежных зон концентрации взвешенных частиц (SSC) существенно изменяются во времени и в пространстве из-за ряда условий, таких как, например, притоки пресной водой, приливной изменчивости или геометрии судоходных каналов. Традиционные методы измерений SSC включают фильтрацию воды, оптические методы (например, *transmissometry*, *nephelometry*, *backscatterance*) и акустические датчики *backscatterance* (ABS). Несмотря на то, что эти датчики могут быть легко откалиброваны и широко применимы, они пригодны лишь для получения данных в конкретной точке. Кроме того, для задач распределения донных отложений необходимо дополнительное оборудование, например, датчики определения скоростей течений.

Акустические доплеровские профилографы течений (ADCP) в последние несколько лет стали стандартом для измерения скорости течений, как для стационарных измерений, так и для измерений с движущегося судна. А в последние годы в значительной степени интенсифицированы работы по разработке методов получения SSC из данных акустического эхо-сигнала таких профилографов (Thorne et al., 1991, 1993; Holdaway et al., 1999; Gartner and Cheng, 2001; Poerbandono and Mayerle, 2001; Gartner, 2002). Большинство типов акустических профилографов записывают данные о 3-мерном векторе скорости течения, а также позволяют оценить интенсивность эхо-сигнала, которая пропорциональна количеству частиц, создающих эхо-сигнал в водной среде. Если большинство частиц имеют характер донных отложений, то по данным интенсивности эхо-сигнала можно судить об общей концентрации взвеси. Связь между уровнем отражения акустического сигнала и SSC основана на гидролокационном уравнении (Deines, 1999; Gartner и Cheng, 2001). Интенсивность эхо-сигнала является функцией расстояния до датчика, ослабления сигнала самой водой и общей концентрации взвешенных частиц.

В этом исследовании мы используем экспериментальные данные для оценки применимости зонда ADCP 600 kHz для получения данных SSC. Конкретными целями данного исследования является:

- 1) калибровка упрощенного гидролокационного уравнения для использования с зондом 600kHz RDI ADCP, которое будет использоваться для оценки SSC;
- 2) проверка полученного уравнения.

Теоретическое введение

В соответствии с простейшей теорией гидроакустики равенство между уровнем полученного сигнала и факторами, влияющими на него, может быть выражено следующим уравнением:

$$DT + NL = SL + 2TL + TS + DI, \quad (1)$$

где DT – полезный сигнал;

NL – уровень шума;

SL – уровень исходного сигнала;

TL – потеря сигнала;

TS – отраженный частицами сигнал;

DI – поглощенный сигнал.

Уровни исходного сигнала (SL) и поглощенного сигнала (DI) обычно определяются производителем акустического излучателя и могут считаться константой для конкретного прибора. Таким образом, результирующий акустический сигнал (DT + NL) зависит от двунаправленной потери сигнала (2TL) и сигнала, отраженного частицами (TS). На оба этих параметра влияет взвешенные частицы в столбе

воды. Двухнаправленные потери сигнала включают затухание сигнала в морской воде и рассеяние и затухание из-за частиц взвеси. Отраженный взвешенными частицами сигнал (TS) также является функцией формы, размера, жесткости частиц и длины акустической волны.

Основанное на мощности (энергии) акустической интенсивности, Deines (1999) упростил гидролокационное уравнение для RDI ADCP:

$$S_v = C + 10 \log_{10}((T_x + 273.16)R^2) - L_{DBM} - P_{DBW} + 2\alpha_w R + K_c(E - E_r), \quad (2)$$

где S_v – коэффициент обратного рассеяния (dB);

T_x – температура излучателя (в градусах Цельсия);

R – расстояние от излучателя до частицы;

$L_{DBM} = 10 \log_{10}$ (длина импульса);

$P_{DBW} = 10 \log_{10}$ (мощность передачи);

α_w – коэффициент поглощения сигнала водой;

K_c – множитель силы полученного сигнала;

E – сила эхо-сигнала (в counts);

E_r – полученный шум (в counts);

C – константа, которая включает множество комбинированных параметров (например, шум в источнике питания, эффективность излучателя), которые не могут быть измерены в отдельности. Параметры L_{DBM} , P_{DBW} и E_r также могут быть рассмотрены, как константы, характеризующие конкретный прибор и постоянное напряжение питания.

Основываясь на всех этих предположениях уравнение (2) может быть упрощено следующим образом:

$$10 \log_{10}(SSC) = C_k + 10 \log_{10}(R^2) + 2\alpha_w R + K_c E, \quad (3)$$

где SSC – концентрация взвешенных частиц ($\text{кг}/\text{м}^3$) и C_k – комбинированная константа. Коэффициент ослабления акустического сигнала водой (α_w) зависит в основном от частоты излучаемого импульса и в меньшей степени от температуры, солености, плотности и высоты водяного столба (Rehman 1990);

α_w – коэффициент, определенный Shulkin и Marsh (1962), измеряемый в неперах на метр;

$$\alpha = \left(\frac{SAf_T f^2}{f_T^2 + f^2} + \frac{3.38 \cdot 10^{-5} f^2}{21.9 \cdot 10^6 - [1520]} \right) (1 - 6.54 \cdot 10^{-4} P)$$

где S – соленость, в промилях;

P – давление воды, в атмосферах;

f – это частота акустического сигнала, 10^3 х^{-1} ;

T – температура воды, в градусах Цельсия.

Для частоты в 600 kHz, близкой к той, на которой работает наш ADCP, мы использовали $\alpha_w = 0,14 \text{ dB}/\text{м}$ (Rehman 1990; Deines 1999). Однако C_k и K_c не могут быть измерены напрямую, они могут быть получены после калибровки акустического эхо-сигнала известными значениями концентраций взвешенных частиц. Далее будет описан метод получения экспериментальных данных для определения C_k и K_c .

Сбор данных

Полевые испытания проходили в Таганрогском заливе Азовского моря в сентябре 2008 года. Зонд ADCP Workhorse Sentinel 600 погружался в воду с НИС т/х «Платов». Данные о течении и интенсивности эхо-сигнала были записаны для 34

ячеек (bin). Высота каждой ячейки составила 0,15 м. Максимальная глубина составила 6,2 м. ADCP был настроен так, чтобы излучать 100 акустических импульсов или "пингов" каждую минуту. 100 импульсов излучались и отраженный сигнал записывался примерно за 20 секунд.

Вместе с ADCP использовался зонд Sea Bird Electronics 19 Plus с датчиком мутности. Зонд плавно опускался от поверхности воды до дна, данные измерений записывались во внутреннюю память зонда и после поднятия были извлечены. Данные от оптического датчика были преобразованы в данные о концентрации взвешенных частиц в столбе жидкости, которые впоследствии использовались для анализа акустических измерений.

Информация о концентрациях зонда SBE-19 была усреднена по столбу жидкости высотой 0,15 м, чтобы получить возможность установления соответствия с данными от ADCP-зонда. Информация о концентрациях была также разбита на 2 части. Первая – для установления неизвестных констант C_k и K_c , а вторая – для верификации данных, полученных из уравнения (3).

Чтобы исключить влияние одной группы данных на другую группы были разделены случайным образом.

Результаты

Процедура калибровки

Во время процедуры калибровки SSC и E были подставлены в уравнение (3). Данные SSC были взяты из первой группы (группы калибровки) данных, полученных оптическим методом, и данные интенсивностей, полученные от ADCP (рис. 1). К полученным данным был применен регрессионный анализ для выяснения неизвестных констант C_k и K_c . Было выяснено, что наилучшим значениями для C_k и K_c являются 17,04 и 0,38 соответственно.

Приближенное значение коэффициента RRSI (K_c) находится в пределах диапазона, предложенного Deines (1999) для приборов аналогичного типа. Это согласование результатов предполагает, что похожее значение K_c может иметь место для аналогичных приборов того же производителя с той же частотой.

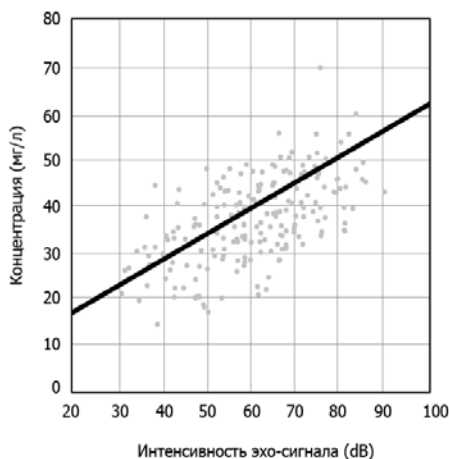


Рис. 1. Линейная регрессия данных SSC, взятых из группы калибровки, полученных оптическим методом, и данных интенсивностей, полученной от ADCP

Верификация данных

Используя уравнение (3), с учетом полученных на предыдущем этапе констант C_k и K_c , проведем сравнение данных из контрольной группы точек с полученными данными о концентрациях взвешенных частиц. Проведенный анализ показывает высокую степень корреляции ($R^2=0,90$) данных SSC, полученных оптическим методом с данными, полученными ADCP-зондом.

В дальнейшем откалиброванное уравнение (3) позволит получать данные о концентрации взвеси не только на контрольных точках, но и по пути следования судна в 3-мерном столбе жидкости с высоким разрешением без использования дополнительного оборудования, кроме ADCP-зонда.

Выводы

В настоящей работе концентрация взвешенных частиц была определена с помощью акустического доплеровского профилографа (ADCP WHS 600). Разработанный метод позволяет определить две константы, которые невозможно измерить напрямую, при помощи зонда SBE 19 Plus, который определяет точечные данные о концентрации взвеси оптическим методом.

Использование оценки SSC при помощи ADCP-зонда следует использовать с осторожностью. Было выяснено, что ошибка в вычислении SSC растет с приближением к единице отношения размера частицы к длине волны.

Мы также представили методику, которая может быть использована с коммерчески доступными ADCP-системами для непрерывных и одновременных измерений отложений взвеси во всем столбе жидкости.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Agrawal, Y.C., and Pottsmith, H.C.* 2000. Instruments for particle size and settling velocity observations in sediment transport. *Marine Geology*, 168: 89-114.
2. *Deines, K.L.* 1999. Backscatter estimation using broadband acoustic Doppler current profilers. *Proceedings IEEE 6th Working Conference on Current Measurements*, 249-253.
3. *Folk, R.L.* 1954. The distinction between grain size and mineral composition in sedimentary-rock nomenclature. *Journal of Geology*, 62: 344-359.
4. *Gartner J.W.* 2002. Estimation of suspended solids concentrations based on acoustic backscatter intensity: theoretical background. *Turbidity and other sediment surrogates workshop*.
5. *Gartner J.W. and Cheng, R.T.* 2001. The promises and pitfalls of estimating total suspended solids based on backscatter intensity from acoustic Doppler current profilers. *Proceedings 7th Federal Interagency Sedimentation Conference*, III-119-III-126.
6. *Holdaway, G.P., Thorne, P.D., Flatt, D., Jones, S.E., and Prandle, D.* 1999. Comparison between ADCP and transmissometer measurements of suspended sediment concentration. *Continental Shelf Research*, 19: 421-441.
7. *Poerbandono and Mayerle, R.* 2002. Preliminary result on the estimation of suspended sediment concentration from acoustical profilers. *Proceedings ADCP-Anwender Workshop*, 12-15.
8. *Rehman, S.S.* 1990. The Development of High Frequency Acoustics for the Measurement of Suspended Sediment. Ph.D. thesis, University of East Anglia, – 235 pp.
9. *Thorne, P.D., Vincent, C.E., Harcastle, P.J., Rehman, S., and Pearson, N.* 1991. Measuring suspended sediment concentrations using acoustic backscatter devices. *Marine Geology*, 98:7-16.
10. *Thorne, P.D., Harcastle, P.J., and Soulsby, R.L.* 1993. Analysis of acoustic measurements of suspended sediments. *Journal of Geophysical Research*, 98: 899-910.
11. *Urick, R.J.* 1983. *Principles of Underwater Sound*. 3rd Edition. McGraw-Hill, Inc., – 423 pp.

Сухинов Александр Иванович

Технологический институт федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге.

E-mail: sukhinov@gmail.com.
347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44.
Тел.: 8(8634)310-599; 7(928)102-11-06.
Руководитель ТТИ ЮФУ; профессор.

Sukhinov Alexander Ivanovich

Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”.

E-mail: sukhinov@gmail.com.
44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia.
Phone: 8(8634)310-599; 7(928)102-11-06.
Chief of TIT SFedU; professor.

Черчаго Антон Александрович

Технологический институт федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге.

E-mail: tcherchago@gmail.com.
347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44.
Тел.: 8(863)371-606; 7(928)920-48-34.
Кафедра высшей математики; аспирант.

Cherchago Anton Alexandrovich

Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”.

E-mail: tcherchago@gmail.com.
44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia.
Phone: 8(8634)371-606; 7(928)920-48-34.
The Department of Higher Mathematics; post-graduate student.

УДК 519.63:532.55

А.И. Сухинов, М.Д. Чекина

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД ДЛЯ ЗАДАЧИ
ДИНАМИКИ ВЫПАДЕНИЯ ОСАДКОВ И ЗАТОПЛЕНИЯ**

Целью данной работы является оценка скоплений дождевой воды и прогнозирование затоплений. Проводится исследование динамики затопления некоторой области. Для решения этой задачи построена математическая модель на основе уравнения Сен-Венана. В результате были получены сеточные функции высоты столба жидкости, а также картины динамики затопления области. Полученные результаты являются физическими и согласуются с ожидаемыми.

Динамика затопления; уравнение Сен-Венана; русловые потоки.

A.I. Sukhinov, M.D. Chekina

**MATHEMATICAL MODEL AND NUMERICAL METHOD OF WASTEWATER
GATHERING AND FLOOD FORECASTING**

The main purpose of the work is to create an estimation of wastewater gathering and flood forecasting. Investigation of flood of some region was considered in the work. Mathematical model of the task is based on Saint-Venant equation. The results of the investigation are the mesh functions of the height of liquid column and pictures of flood of the region dynamics. Received results correspond to the expected one.

Flood dynamics; Saint-Venant equation; channel flow.