

СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЛУБИНЫ МЕСТА С ПОМОЩЬЮ МНОГОЛУЧЕВОГО ЭХОЛОТА ПРИ НЕИЗВЕСТНОМ ПРОФИЛЕ СКОРОСТИ ЗВУКА

Активное промышленное освоение нефтегазовых ресурсов шельфовой зоны океана требует навигационно-гидрографического обеспечения, значительную часть которого составляют промерные работы. Производительная съемка профиля дна может осуществляться с помощью многолучевого эхолота, что требует достоверных данных о текущих гидрофизических характеристиках на акватории съемки. Предлагаемый способ определения глубины не требует знаний фактического профиля скорости звука и может представлять практический интерес.

Введение

Стремительное развитие средств и методов современной гидрографии, внедрение в практику современного мореплавания морских электронных карт настоятельно ставят вопросы повышения точности съемок. Это отражается в международных стандартах, где регламентируется качество проведения гидрографических съемок [2, 11]. Важной технической задачей, решение которой будет способствовать снижению затрат на навигационно-гидрографическое обеспечение, является повышение производительности промеров с одновременным обеспечением точности определения глубин, которая необходима для получения качественной съемки [1, 10].

Определение глубины в океане осуществляется по результатам измерения времен прихода отраженных от дна сигналов с помощью промерного эхолота вертикального зондирования или многолучевого эхолота [2, 6, 10]. Для определения глубины необходимо достоверно знать распределение скорости звука по глубине на всей обследуемой акватории, что не всегда возможно. Постоянный мониторинг распределения скорости звука по глубине в процессе съемки является весьма затратным и из-за этого не применяется. Часто используют прогнозные сведения о вертикальном распределении скорости звука, основанные на сезонных исследованиях и получении среднестатистических данных по гидрофизическим характеристикам для различных районов океана, или средневзвешенное значение скорости звука. Как результат, возникает методическая ошибка оценки глубины в силу высокой изменчивости гидрофизических характеристик океана [3, 7, 12, 13,]. При этом для однолучевого эхолота вертикального зондирования она остается минимальной. Нетрудно показать, что для однолучевого эхолота максимально возможная ошибка определения глубины состав-

Консон Александр Давидович. Доктор технических наук, начальник сектора ОАО «Концерн «Океанприбор» (С.-Петербург).

Кулагина Наталья Васильевна. Инженер 2 категории ОАО «Концерн «Океанприбор».

Тимошенко Валерий Григорьевич. Доктор технических наук, ведущий научный сотрудник ОАО «Концерн «Океанприбор».

Янпольская Алиса Александровна. Ведущий математик ОАО «Концерн «Океанприбор».

вит не более 5%. На практике она может быть существенно меньше, если использовать средневзвешенное значение скорости звука в выбранном районе.

Для промерных работ часто применяют более производительный многолучевой эхолот (МЛЭ), когда имеется множество наклонных лучей и охватывается большая площадь съемки. Однако, применяя многолучевой эхолот, следует учитывать, что в гидроакустическом канале наклонные лучи имеют рефракцию, что приводит к появлению параллакса, когда определяемое по прямой положение блестящей точки отличается от истинного. Ошибка для каждого наклонного луча может оказаться существенной в силу эффекта рефракции и доходить до значений, значительно больших, чем при вертикальной локации. С учетом этого эффекта для получения достоверных картографических материалов планирование галсов проводится таким образом, чтобы обеспечить значительную площадь перекрытия промерных полос. В этом случае участок дна дважды обследуется МЛЭ для увеличения плотности точек промера [2, 6, 8, 9].

Таким образом, использование многолучевого эхолота для промерных работ дает потенциально высокую производительность съемки за счет охвата большой площади дна, но, к сожалению, имеет серьезную методическую ошибку.

В силу отмеченных обстоятельств целью настоящей работы является поиск путей уменьшения методической ошибки при съемке с помощью многолучевого эхолота в условиях рефракции лучей, когда вертикальное распределение скорости звука в акватории съемки остается неизвестным.

Аналитическое решение задачи

Для решения задачи имеем следующие условия. Считаем, что полный профиль скорости звука по глубине не известен, известна только скорость звука на горизонте установки приемной антенны многолучевого эхолота. Известны также углы приемных лучей в вертикальной плоскости, и может быть измерено время распространения отраженного сигнала по каждому лучу. При решении поставленной задачи допустим, что определение углов приемных лучей и оценка времен прихода сигнала по лучам осуществляются без приборных погрешностей или эти погрешности ничтожно малы.

Времена распространения отраженного сигнала по каждому i -му лучу T_i являются функцией таких параметров, как глубина H , углы приемных лучей в вертикальной плоскости α_i и зависимость скорости звука от глубины $C(x)$ – $T_i = F[H, C(x), \alpha_i]$. В этом уравнении имеются два неизвестных – параметр H и функция $C(x)$.

В первом представлении задача определения глубины, когда известны параметры сигнала по множеству лучей, но не известен профиль скорости звука, относится к не полностью определенным задачам. Это обусловлено, в частности, тем, что профиль скорости звука является непрерывной функцией глубины, а многолучевой эхолот производит конечное (равное числу лучей) число измерений временных задержек.

Рассмотрим возможность решения задачи определения глубины, минуя процедуру поиска истинного профиля скорости звука. Для этого допустимо предположить, что наблюдаемое время распространения сигнала по лучу с известным углом приема сигнала и для известной глубины может быть получено не только в существующих гидрофизических условиях. Другими словами, всегда найдется иное, отличное от реального, распределение скорости звука по глубине, которое даст аналогичные параметры принимаемого сигнала при той же глубине места. Допустим, что решение задачи можно найти, формально заме-

нив реальный профиль скорости звука некоторой виртуальной функцией, имеющей простое аналитическое описание, при котором многообразие зависимостей $C(x)$ задается значением одного регулирующего параметра ζ . Тогда система уравнений может быть решена относительно ζ и, как результат, виртуальная функция $C(\zeta, x)$ будет определена.

Для того чтобы рассмотреть принципиальную возможность такого подхода к решению задачи, допустим, что могут быть выбраны совокупности пар лучей, для каждой из которых априорно известно, что $H_i = H_{i+1} = \text{const}$. В практическом плане такое допущение справедливо, если выбираются пары лучей, пересечение которых с поверхностью дна приходится на горизонтальный участок дна. Получить это возможно, если, например, пары лучей выбрать с соответствующим угловым расстоянием. Принятое условие приведет к решению задачи, однако потребует исследования влияния на это решение величины отклонения поверхности от горизонтальной плоскости.

Для выбранных условий однозначное решение задачи относительно двух неизвестных можно было бы искать в системе двух уравнений:

$$\begin{cases} T_1 = F[H, C(\zeta), \alpha_1] \\ T_2 = F[H, C(\zeta), \alpha_2] \end{cases} \quad (2)$$

где T_1 и T_2 – времена прихода отраженных от дна сигналов многолучевого эхолота по двум лучам с углами соответственно α_1 и α_2 ; H – искомая глубина места в точках пересечения с поверхностью дна первого и второго лучей, ζ – искомый параметр.

Исследуем возможность расчета глубины места H при заданных исходных условиях. Допустим, что в качестве виртуальной функции $C(\zeta, x)$ можно использовать линейную зависимость вида (1). Такая зависимость удобна для решения задачи, так как линейное распределение скорости звука задается одним значением градиента скорости звука g . Тогда систему уравнений (2) можно переписать в виде

$$\begin{cases} T_1 = F[H, C_0, g, \alpha_1] \\ T_2 = F[H, C_0, g, \alpha_2] \end{cases} \text{ и решать при двух неизвестных } H \text{ и } g. \text{ Зна-}$$

чение скорости звука C_0 на горизонте приема-излучения эхолота всегда определяется с помощью специального устройства, устанавливаемого на корпусе судна рядом с антеннами многолучевого эхолота.

Следует заметить, что при выборе более сложных моделей виртуального профиля скорости звука потребуются решение системы уравнений более высокого порядка. При этом получить решение такой системы в замкнутом виде, как при линейной модели, может оказаться весьма проблематично.

Время распространения сигнала по лучу в слое с постоянным градиентом скорости звука можно записать согласно [4] так:

$$T = \frac{1}{g} [Arth(\sin \alpha) - Arth(\sin \alpha')], \quad (3)$$

где α и α' – углы скольжения луча (относительно горизонтали) в точке излучения и у дна соответственно.

Решим систему уравнений, используя выражение (3) для времен прохождения сигналов по разным лучам под углами α_1 и α_2 . Воспользуемся соотноше-

нием $Arthx = Arch \frac{1}{\sqrt{1-x^2}}$, а также $\cos \alpha' = \frac{C_H}{C_0} \cos \alpha$ согласно закону Снелиуса

для углов скольжения. Тогда для соотношения времен можно записать:

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{\left| \text{Arch}\left(\frac{1}{\cos \alpha_1}\right) - \text{Arch}\left(\frac{C_0}{C_H} \frac{1}{\cos \alpha_1}\right) \right|}{\left| \text{Arch}\left(\frac{1}{\cos \alpha_2}\right) - \text{Arch}\left(\frac{C_0}{C_H} \frac{1}{\cos \alpha_2}\right) \right|}. \quad (4)$$

Из выражения (4) видно, что при известной скорости звука у поверхности путем оценивания времен прихода сигналов, отраженных от дна, для двух разнесенных по углам лучей, может быть рассчитано значение скорости звука у дна, которое дает формальная замена реального распределения скорости звука линейной зависимостью. После этого глубину места можно определить из выражения

$$H = \frac{T(C_H - C_0)}{\text{Arch}\left(\frac{1}{\cos \alpha}\right) - \text{Arch}\left(\frac{C_0}{C_H} \frac{1}{\cos \alpha}\right)}. \quad (5)$$

Здесь при $T = \frac{T_{\text{изм}}}{2}$, где $T_{\text{изм}}$ – измеренное время прохождения сигнала по лучу до дна и обратно.

Алгоритм реализации способа

Аналитическое решение задачи показало, что для определения глубины с помощью многолучевого эхолота существует принципиальная возможность обойтись без затратной процедуры определения профиля скорости звука по всей глубине океана. Условием решения задачи является предположение, что рельеф поверхности дна достаточно выровненный и горизонтальный или что имеются отдельные участки дна с относительно ровной и горизонтальной поверхностью. В этом случае для определения глубин могут быть использованы выходные данные зондирования.

Для реализации способа необходимо знать углы приема МЛЭ, оценить времена прихода отраженных от дна сигналов по каждому лучу. Должна быть известна также скорость звука в месте нахождения приемной антенны. Тогда, попарно сопоставив времена прихода сигналов по отдельным наклонным лучам, рассчитывают глубину места на участке зондирования дна каждой пары лучей. Для этого с использованием выражения (4) рассчитывается значение параметра C_H , который является характеристикой виртуальной функции, заменяющей в решении задачи реальное распределение скорости звука по глубине. Далее, используя значение параметра C_H , на основе выражения (5) определяем глубину на участке дна, где произошло отражение выбранной пары лучей. Следует заметить, что, учитывая ограничения, которые были приняты для решения задачи, для пары лучей необходимо допустить равенство глубин в точках их отражения от дна. Для пары лучей, где это уверенно не происходит, данные зондирования не должны использоваться.

Апробация способа в модельном эксперименте

Для исследования ошибок определения глубины места предлагаемым способом в условиях реальных профилей скорости звука был применен метод компьютерного моделирования. Преобразуем выражение (4) в более удобную форму на основании формулы сложения

$$\operatorname{Arch} x - \operatorname{Arch} y = \operatorname{Arch}(xy - \sqrt{(x^2 - 1)(y^2 - 1)}).$$

Тогда получим

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{\operatorname{Arch} \left[\frac{1}{\cos^2 \alpha_1} \left(\frac{C_0}{C_H} - \operatorname{tg} \alpha_1 \sqrt{\frac{C_0^2}{C_H^2} - \cos^2 \alpha_1} \right) \right]}{\operatorname{Arch} \left[\frac{1}{\cos^2 \alpha_2} \left(\frac{C_0}{C_H} - \operatorname{tg} \alpha_2 \sqrt{\frac{C_0^2}{C_H^2} - \cos^2 \alpha_2} \right) \right]}. \quad (6)$$

Обратимся к известному методу моделирования акустических полей в океанской среде на основе кусочно-линейной аппроксимации реального распределения скорости звука [5].

При моделировании реальной среды определяем для двух выбранных лучей их времена прохождения T_1 и T_2 до дна. Когда известны времена прихода сигналов по двум лучам в реальной среде с произвольно выбранным профилем скорости звука, по формуле (6) находим значения C_H методом итерационного приближения. Затем согласно предлагаемому способу рассчитываем значение глубины места H из формулы (5).

Модельные эксперименты по определению глубины предлагаемым способом были проведены на примере различных распределений скорости звука по глубине. Моделировалась работа многолучевого эхолота, имеющего веер лучей от -20° до $+20^\circ$ с шагом 5° . Проводилось множество экспериментов по определению глубины для различных гидрофизических условий и разных глубин места. Представительность экспериментов достигалась также путем полного перебора пар углов излучения-приема, исключая 0° , что соответствует вертикальному зондированию. Таким образом, для каждого профиля скорости звука было проведено 48 экспериментов. На рис. 1 и 2 показаны характерные результаты модельных экспериментов для различных гидрофизических условий.

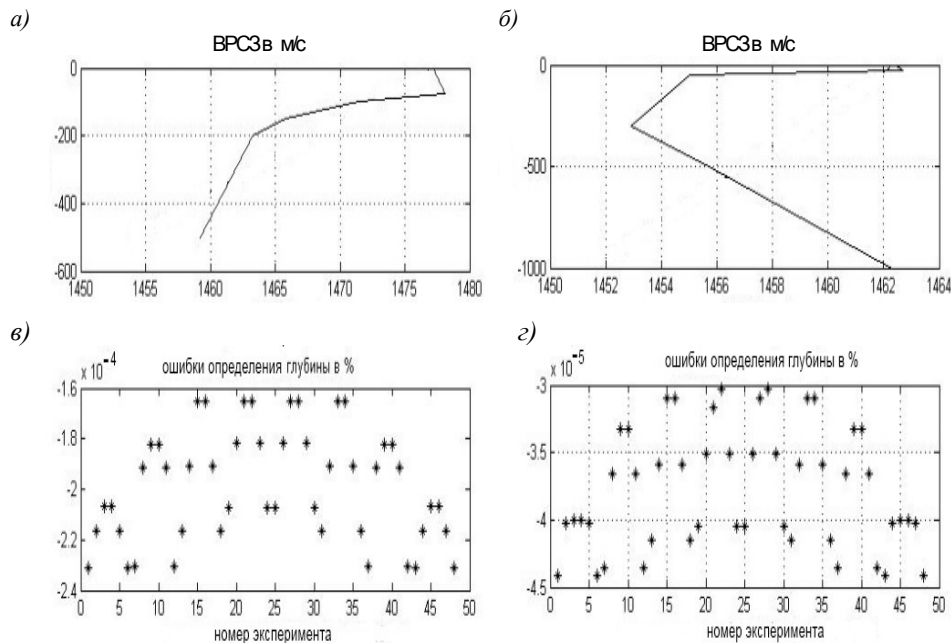


Рис. 1. Результаты модельных экспериментов для двух вариантов вертикального распределения скорости звука

На рис. 1 и 2 (а и б) приведены варианты вертикального распределения скорости звука (ВРСЗ), для которых проводились модельные эксперименты. По вертикали отложена глубина места в метрах, по горизонтали – скорость звука в метрах в секунду. На рис. 1 и 2 (в и г) приведены результаты расчета глубины предлагаемым способом. По вертикали отложены значения ошибок определения глубины в процентах для каждого эксперимента, по горизонтали – номер эксперимента от 1 до 48.

Моделирование проводилось как для ровного, так и для неровного дна. Для обобщенной характеристики неровностей дна введено понятие среднеквадратическое отклонение (СКО) профиля дна от горизонтальной линии. Для ровного дна $\text{СКО}=0$, а для дна с неровностями $\text{СКО}>0$. Как видно из рис 1, в, г ошибки при расчете глубины в условиях ровного дна ничтожно малы.

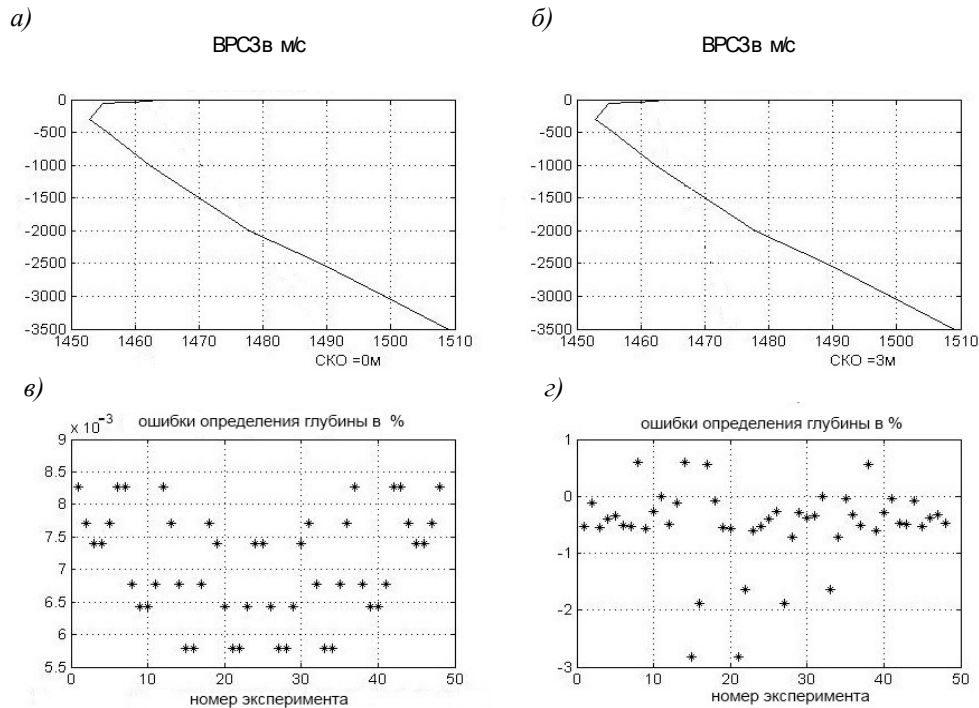


Рис. 2. Сравнительные результаты модельных экспериментов определения глубины в условиях ровного и неровного дна

На рис. 2 представлены результаты сравнительного эксперимента по определению глубины для условий ровного дна и для дна с неровностями при одном профиле скорости звука (рис. 2, а, б). Примеры результатов модельного эксперимента для $\text{СКО}=3$ м, когда дно ровное, представлены на рис. 2, в, а когда в аналогичных условиях дно неровное, – на рис. 2, г.

Из рис. 2, г видно, что ошибка определения глубины для неровного дна в основном менее 1%, т.е. становится сопоставимой с той, которую дает вертикальная локация с использованием средневзвешенного значения скорости звука. Таким образом, предлагаемый способ применим, когда возможны неровности дна, и ошибки в расчете глубины остаются в допустимых пределах. Поскольку в эксперименте величина СКО для неровностей дна принята постоянной для любой пары лучей, то наклон дна для близких лучей может быть существенно больше, чем для крайне разнесенных по углу лучей. Так, результаты экспери-

мента показывают, что для близких лучей характерен существенный наклон, когда их пересечение с профилем дна составляет десяток метров, а максимальное значение вертикального отклонения точек пересечения 10 м (при СКО 3 м). Для крайне разнесенных лучей, когда пересечение с профилем дна составляет сотни метров и наклон дна можно считать ничтожно малым, расчет глубины дает такую же ошибку, как и для близких лучей. Такие результаты подтверждают корректность допущений, которые были приняты в начале работы и сделали возможным решение задачи определения глубины места с помощью многолучевого эхолота при неизвестном профиле скорости звука.

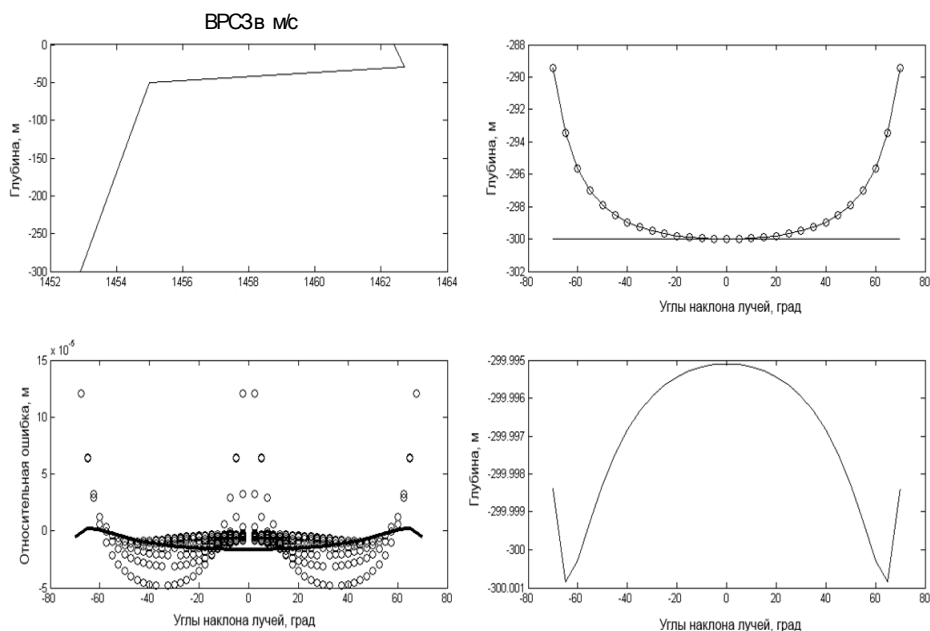


Рис. 3. Сравнительные результаты модельных экспериментов определения глубины предлагаемым способом и традиционным с использованием средневзвешенного значения скорости звука

Для получения сравнительных оценок результатов определения глубины предлагаемым способом и традиционным с использованием средневзвешенного значения скорости звука для района съемки был проведен модельный эксперимент для условий мелкого моря. Моделировалась работа многолучевого эхолота с предельными углами разнесения лучей $\pm 70^\circ$. Условия и результаты эксперимента представлены на рис. 3. Слева сверху показана зависимость скорости звука в районе съемки, дно принято горизонтальным. Результаты съемки традиционным методом с использованием средневзвешенного значения скорости звука показаны на правом верхнем рисунке сплошной линией с маркером. Результаты определения глубины предлагаемым способом на данном рисунке из-за используемого масштаба глубины сливаются с горизонтальной линией. Результаты определения глубины предлагаемым методом представлены на нижних рисунках. Слева показаны относительные ошибки для всех пар углов (отмечены точками), а также результат, полученный методом наименьших квадратов (жирная линия). Справа приведены абсолютные значения. Представленные результаты подтверждают эффективность применения предлагаемого способа определения глубины по сравнению с тем, который допускает возможность использования средневзвешенного значения скорости звука.

Выводы

Исследования показали, что для определения глубины с помощью многолучевого эхолота можно обойтись без затратной процедуры определения профиля скорости звука по всей глубине океана. Результаты модельных экспериментов подтвердили, что предлагаемым методом глубина может быть рассчитана для любых вертикальных распределений скорости звука и глубин океана.

Способ может найти практическое применение в условиях, когда рельеф поверхности дна достаточно выровненный и горизонтальный или когда имеются отдельные участки дна с относительно ровной и горизонтальной поверхностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Горбунов, О.Н.** Методика инженерно-гидрографических работ по обследованию морских подводных трубопроводов // Геопрофи. – 2011. - № 1. - С. 52-57.
2. **Фирсов, Ю.Г.** Основы гидроакустики и использования гидрографических сонаров. - СПб.: Нестор-История, 2010. – 348 с.
3. **Гидролокационные системы** вертикального зондирования дна / Барник В. [и др.]. - Новосибирск: Изд-во Новосибирского ун-та, 1992. С. 43-52.
4. **Бреховских, Л.М.** Акустика океана // Л.М. Бреховских, Ю.П. Лысанов - В кн.: Физика океана, т.2. - М.: Наука, 1978. - С. 49-145.
5. **Сташкевич, А.П.** Акустика моря. - Л.: Судостроение, 1966 г. - 353 стр. с илл.
6. **EM 1110-2-1003, US ACE, 2001.** Chapter 11. Acoustic Multibeam Survey Systems for Deep-Draft Navigation Projects. 33 P.
7. **Hammerstad E.** Multibeam Echo Sounder Accuracy // EM Technical Note, 16 March, 2000, 37 P.
8. **HYPACK User's Manual.** HYPACK Inc., 2008.
9. **HYSWEEP User's Manual.** HYPACK Inc., 2008, 146 P.
10. **IHO Manual on Hydrography.** International Hydrographic Bureau, Monaco, Publication M-13, 1st Edition, 2005, 511 P.
11. **IHO Standards for Hydrographic Surveys,** International Hydrographic Organization, Special Publication No 44, 5th Edition, 2008. P. 24.
12. **Hare, R.** Depth and Position Error Budget for Multibeam Echosounding // International Hydrographic Review, Monaco, LXXII(2), September 1995. P. 37-69.
13. **Har, R.** Error Budget Analysis for US Naval Oceanographic Office (NAV-OCEANO) Hydrographic Surveys Systems, HSRC, University of Southern Mississippi, Hattiesburg, USA, September 2001.

Abstract. Active industrial development of oil and gas in the ocean shelf area requires navigational and hydrographic support, one of the most important issues being the depth measurement. Effective survey of bottom profile can be conducted using a multi-beam echosounder, however, this method requires reliable data on hydrophysical characteristics of the surveyed water area. The proposed method of depth determination does not require the knowledge of the actual sound speed profile and can present a practical interest.

Key words: survey echosounder, depth, sound speed profile

Материал поступил 9.04.13