

СПОСОБЫ СБОРА ДАННЫХ ОБРАТНОГО РАССЕЙВАНИЯ МОРСКОГО ДНА, РЕАЛИЗОВАННЫЕ В СОВРЕМЕННЫХ МНОГОЛУЧЕВЫХ ЭХОЛОТАХ

Методы обработки многолучевой гидроакустической информации, реализованные в современных гидрографических системах, касаются главным образом батиметрии. Однако современный многолучевой эхолот позволяет также получать и данные обратного рассеивания. До настоящего времени не существует универсального стандартного подхода для обработки и интерпретации данных обратного рассеивания многолучевых эхолотов (МЛЭ). Фирмы-разработчики многолучевых эхолотов используют собственные методы первичной обработки данных обратного рассеивания и предлагают различные методы визуализации этих данных. Все данные обратного рассеивания, собранные с помощью систем МЛЭ, являются производными от интенсивности обратного рассеивания, или её квадратного корня, который является мгновенной амплитудой, обычно называемой огибающей обратного рассеивания (ОР). Для получения оценок коэффициента ОР морского дна и его угловой зависимости важно знать, интенсивность или амплитуда ОР были записаны эхолотом. В настоящий момент существует четыре возможных способа записи данных ОР, применяемых в современных гидроакустических многолучевых системах. Целью данной работы является устранение неопределенности в области сбора и обработки данных обратного рассеивания морского дна. В статье рассмотрены существующие методы записи данных обратного рассеивания, применяемые в современных высокочастотных многолучевых эхолотах, а также соответствующие методы обработки этих данных. Отмечается, что выбор метода записи данных ОР системой МЛЭ зависит от конкретной цели изучения или исследования морского дна. Для получения мозаик ОР морского дна из перекрывающихся данных МЛЭ необходимо принимать во внимание и компенсировать влияние угла падения на силу ОР. Дополнительно рассмотрены возможные ошибки, которые могут появиться при обработке данных обратного рассеивания. Такие ошибки проиллюстрированы данными, собранными с помощью МЛЭ типа «Reason SeaBat» и других современных многолучевых систем.

Ключевые слова: съемка рельефа дна, гидроакустика, эхо-сигнал, гидролокатор бокового обзора, многолучевые эхолоты, современные гидрографические технологии, Reson, Kongsberg, водная толща, обратное рассеивание, сниметы, морские геологоразведочные работы.

Введение

Многолучевой эхолот (МЛЭ) признан самым эффективным инструментом для картографирования морского дна. МЛЭ способны собирать батиметрические данные и данные обратного рассеивания (ОР) одновременно в широкой полосе обзора и с высоким разрешением. Это позволяет производить экономически эффективное картографирование морского дна, включая возможность дистанционной классификации различных типов морского дна.

Одним из первых исследователей, продемонстрировавших потенциал данных ОР, собранных с помощью МЛЭ в целях классификации донных осадков, был Де-Мустье [1]. Другие исследовательские работы [2] – [6] позволили развить методы обработки данных ОР. Эти методы были разработаны и апробированы, в первую очередь, для низкочастотных МЛЭ (менее 100 кГц) как наиболее распространенных в то время. Несмотря на то, что основные принципы измерения силы обратного рассеивания морского дна схожи при низких и высоких частотах, геометрия измерения и физические условия, такие как коэффициент и пятно засветки по отношению к шкале шероховатости дна и параметру Рэля, существенно различаются.

На протяжении последних 10 лет исследований были предложены специально разработанные методы анализа и обработки для высокочастотных систем с узкими лучами. Различные методы обработки батиметрических данных разработаны и реализованы в гидрографическом программном обеспечении, предоставляемом как самими производителями МЛЭ, так и другими компаниями. Однако до настоящего времени не существует универсального стандартного подхо-

да для обработки и интерпретации данных обратного рассеивания МЛЭ. Во многом это связано с тем, что в различных системах МЛЭ используются разные способы сбора и записи данных. Неопределенность, связанная с различными методами сбора данных, может привести к тому, что обработка данных ОР неподготовленными пользователями будет происходить некорректно.

Получение характеристик морского дна по данным обратного рассеивания, не искажённых параметрами эхолота и / или теми или иными путями сбора этих данные, имеет очень важное значение для вывода геоморфологических и физических свойств поверхности морского дна. Поэтому для того, чтобы применить подходящий метод обработки данных, необходимо знать все параметры эхолотов по отношению к данным обратного рассеивания и методы записи этих данных. В настоящей статье подробно изложены различные методы сбора данных обратного рассеивания в современных высокочастотных системах МЛЭ, а также разъясняются существующие методы обработки данных и возможные ошибки и артефакты, ожидаемые при обработке данных ОР МЛЭ.

Основная часть

Принцип работы многолучевого эхолота. МЛЭ, обычно устанавливаемые на судно, телеуправляемый аппарат или автономный подводный аппарат, излучают короткие акустические импульсы. Передача акустической энергии в сторону морского дна определяется диаграммой направленности передающей матрицы эхолота — широкой, перпендикулярно плоскости линии пути ($120 - 150^\circ$), и узкой в плоскости линии пути (порядка одного градуса вдоль линии пути для высокочастотных систем).

Антенная решетка приемной акустической антенны располагается перпендикулярно передающей антенне, формируя большое количество приемных лучей (узконаправленных перпендикулярно линии пути) и с помощью алгоритмов формирования лучей, направленных одновременно в разные стороны под разными углами от плоскости линии пути [7]. Таким образом, система выполняет пространственную фильтрацию акустических сигналов, отраженных от различных дискретных областей морского дна вдоль полосы обзора, называемых *пятнами облучения*, или *пятнами засветки луча*. Это обеспечивает возможность измерения батиметрии (времени распространения акустического сигнала и угла прихода луча) и значений параметра интенсивности обратного рассеивания, расположенных в одном месте по одному лучу.

Геометрия измерений МЛЭ показана на рис. 1. Заштрихованные области иллюстрируют проекции переданного и принятого лучей на морское дно (показана проекция единичного принимаемого луча). Проекции передаваемого и принимаемого лучей (главные лепестки диаграммы направленности) на морское дно показаны в виде заштрихованных областей. Пятно засветки эхолота формируется зоной перекрытия двух областей. Прерывистые линии показывают границы морского дна, озвученные прямоугольным импульсом эхолота в определенное время.

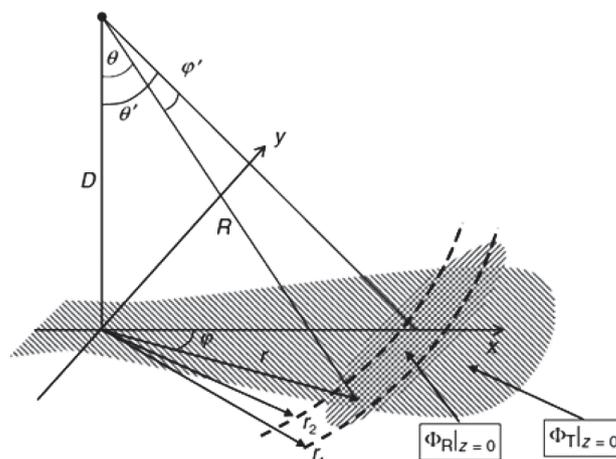


Рис. 1. Геометрия измерения обратного рассеивания системой МЛЭ

С каждым принятым лучом эхолот «осматривает» определенный участок дна, ограниченный наложением проекций отправленного и принятого луча, так называемым *пятном засветки*. Единообразно освещенный участок морского дна, отражающий эхо-сигнал эхолота обратно на приемную антенну, ограничен продолжительностью отправляемого импульса и имеет кольцеобразную форму с внешним и внутренним радиусами (r_1 и r_2 соответственно). Эти радиусы изменяются со временем t_r , истекшим с момента отправки, как показано в уравнениях:

$$r_1 = \left[\left(\frac{Ct_r}{2} \right)^2 - D^2 \right]^{1/2};$$

$$r_2 = \text{Re} \left[\left(\frac{Ct_r}{2} - \frac{CT}{2} \right)^2 - D^2 \right]^{1/2},$$

где D — высота антенн эхолота над поверхностью дна; C — скорость звука в воде; T — длина переданного импульса.

Область засветки представляет собой круг $t_r \leq 2D / C + T$, где $r_2 = 0$.

Методы записи данных обратного рассеивания. Все данные обратного рассеивания, собранные с помощью систем МЛЭ, являются производными от интенсивности обратного рассеивания, или её квадратного корня, который является мгновенной амплитудой, которую обычно называют *оглибающая ОР*. Для получения оценок коэффициента ОР морского дна и его угловой зависимости важно знать, интенсивность или амплитуда ОР были записаны эхолотом. В настоящий момент существует четыре возможных способа записи данных ОР, применяемых в МЛЭ «Reson» и в некоторых других современных МЛЭ системах (Kongsberg EM 122, 302, 712 и 2040 серий).

В порядке уменьшения объема регистрируемой информации существующие способы записи данных ОР можно представить в следующем виде:

- полный эхо-сигнал (или оглибающая ОР, или интенсивность) от каждого луча, в том числе сигналы ОР от толщи воды;
- фрагмент оглибающей ОР с центром, находящимся в районе места обнаружения дна для каждого луча (упоминается здесь как *оглибающая ОР морского дна*);
- два временных ряда амплитуд ОР, созданных путем объединения интенсивности или оглибающей ОР в отдельные лучи для левого и правого борта, наподобие данных классического гидролокатора бокового обзора (ГБО);
- одно значение ОР для луча в пределах каждого отражения от морского дна. Некоторые из современных систем «Reson» записывают пиковую амплитуду ОР морского дна, полученную для каждого луча, в то время как МЛЭ других производителей записывает другие производные ОР.

Далее выполнено описание различий между этими методами и анализируется выбор наиболее подходящего метода записи для конкретных задач.

Полный эхо-сигнал. Сбор данных полного эхо-сигнала может быть выполнен современными МЛЭ, например, системами «Reason 7125» и «Г20Р». В программном обеспечении системы «Reson» такие данные называются «snapshot» (снимок). Подобный метод записи каждого луча, включая амплитуду (рис. 2) и фазу, очень полезен для решения некоторых задач, относящихся к водной толще, таких как поиск рыбы для промысла, изучение внутренних волн, определение наименьших глубин над подводными объектами, а также изучение донного газопроявления (например, поиск выходов газогидратов [8] – [11]). На рис. 2 уровень обратного рассеивания показан в децибелах через уровень опорного сигнала в аналого-цифровом преобразователе МЛЭ, т. е. полное системное усиление МЛЭ не было применено. При картографировании морского дна на больших глубинах для обеспечения безопасности мореплавания в записи таких данных нет необходимости. Кроме того, при одновременной записи полного эхо-сигнала и батиметрии объем данных значительно возрастает, что может привести к задержкам и снизить общую скорость передачи данных в системе.

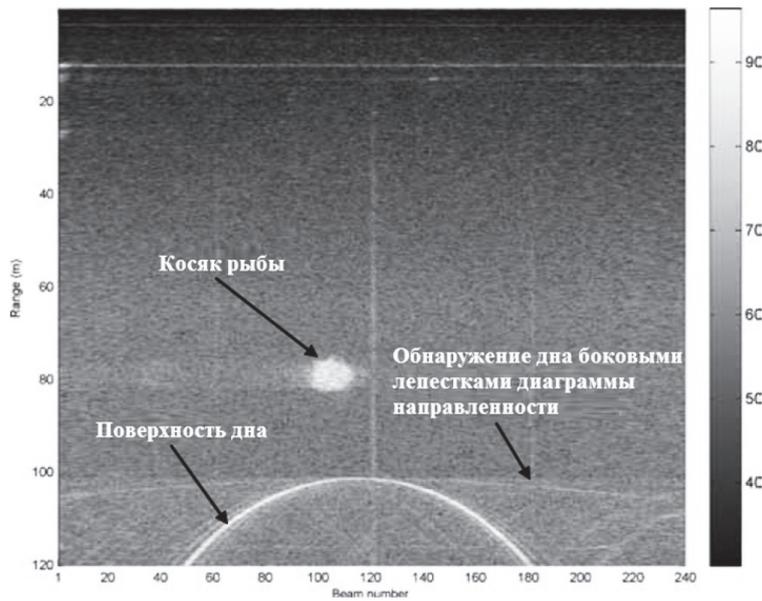


Рис. 2. Пример изображения полного эхо-сигнала, одной посылки МЛЭ системы «Reson 8125»

Так, например, система «Reson 8125» способна записывать полный эхо-сигнал только каждой пятой посылки. Последние достижения в области записи данных и увеличения компьютерных мощностей позволяют решить эту проблему в современных системах, таких как «Reason 7125».

Фрагмент пакета данных обратного рассеивания. Фрагменты пакета данных обратного рассеивания, которые компания «Reason» называет «снимками» (snippets) в своем фирменном программном обеспечении, являются фрагментами полного эхо-сигнала, которые выбраны так, чтобы содержать в себе эхо-сигнал морского дна в каждом луче (рис. 3). Начало образца каж-

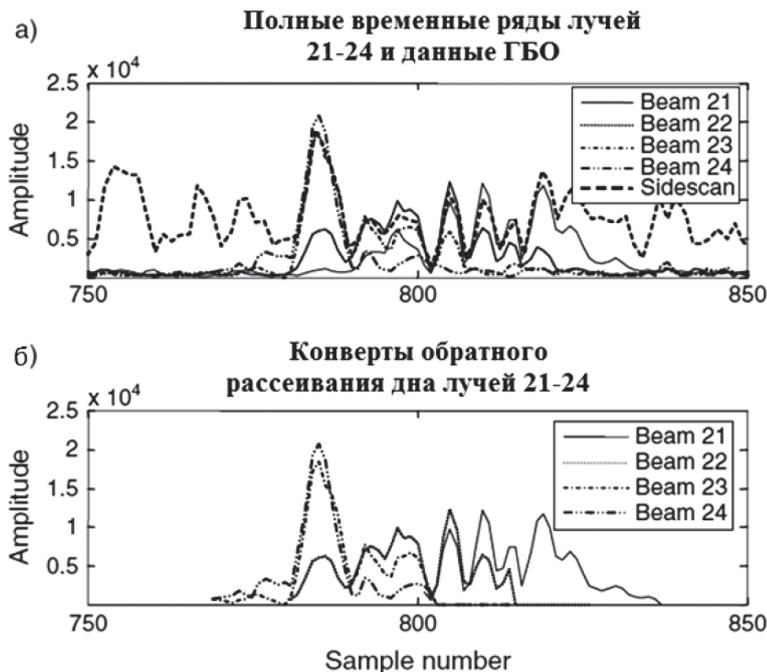


Рис. 3. Сравнение разных примеров обратного рассеивания, записанных МЛЭ:

- а — сто фрагментов полного эхо-сигнала и ГБО-подобный ряд, синтезированный из этих фрагментов;
- б — конверты обратного рассеивания полного эхо-сигнала

дого пакета данных ОР во всем эхо-сигнале («офсет фрагмента») и длина каждого фрагмента заданы процессором МЛЭ на основании диапазона определения дна и оценки диапазона наклонной дальности к внешним и внутренним границам пятна засветки на морском дне [12]. Эти вычисления обычно выполняются на основе модели плоского дна для каждой посылки МЛЭ. Иногда длина фрагментов, выбранных аппаратной частью МЛЭ, не настолько велика, чтобы содержать в себе весь отраженный эхо-сигнал от морского дна. Недостаточность длины фрагмента наблюдается чаще на крайних лучах и реже на внутренних, так как длина отраженного сигнала увеличивается по мере увеличения угла наклона [13].

Данные классического гидролокатора бокового обзора как опция ГБО многолучевого эхолота. Во время записи данных в режиме ГБО система МЛЭ комбинирует данные обратного рассеивания, принятые со смежных лучей, «сшивая» их вместе из двух (левого и правого бортов) и создавая похожие на данные ГБО временные ряды амплитуды ОР (рис. 3). Основной проблемой в объединении сигналов от различных лучей для формирования общего ГБО-подобного ряда является то, что данные соседних лучей, совпадающих по времени, обычно имеют различные амплитуды, так как пакеты обратного рассеивания искажены диаграммой направленности приемных лучей. Наиболее подходящий способ в данном случае заключается в точном исправлении диаграммы направленности для уравнивания перекрывающихся образцов.

Известно несколько полуэмпирических подходов к решению проблемы перекрывающихся образцов, состоящих из соседних лучей, для синтезирования ГБО подобного ряда, которые реализованы в некоторых последних системах МЛЭ. Например, в системе «Reason 8125» оператор может заменить существующее значение либо его среднеквадратической погрешностью, либо средним значением. Не существует стандартного подхода к объединению перекрытия пакетов обратного рассеивания в разных лучах. Методы комбинирования лучей могут различаться от системы к системе и быть неизвестными для некоторых систем. Кроме того, ГБО-подобные ряды, синтезированные аппаратной частью МЛЭ, не связаны пространственно с батиметрическими данными, что делает проблематичным производство связанных батиметрических цифровых изображений и сонарных изображений силы ОР. В случае, если ГБО-ряды должны быть собраны одновременно с батиметрическими данными, полезно создавать их из пакетов обратного рассеивания, связанных на плоскости с батиметрическими данными по каждому лучу. В этом случае пользователь может выбрать наиболее подходящий алгоритм для объединения перекрывающихся эхо-сигналов от различных лучей.

Единичное значение обратного рассеивания луча. Для уменьшения объема записываемых данных в некоторых МЛЭ-системах использован режим регистрации данных, при котором одно значение обратного рассеивания применяется для каждого луча. Это может быть либо единичное значение интенсивности / огибающей образца, выбранное аппаратным обеспечением МЛЭ, либо какое-либо среднее значение, вычисленное процессором МЛЭ. Например, когда система «Reson 8125» установлена в режиме «RI-Theta» (дальность, интенсивность, угол луча), процессор эхолота находит максимальную амплитуду каждого «конверта» (envelope) данных обратного рассеивания морского дна и сохраняет его в отдельном массиве данных, именуемом «intensity» (интенсивность) ОР, несмотря на то, что это амплитуда, а не интенсивность. Однако использование максимума огибающей или интенсивности ОР приводит к систематическому и значительному завышению силы ОР, измеренной на внешних лучах, когда пятно засветки луча намного больше, чем площадь озвучивания [14]. Более разумный подход, который не приводит к заметным систематическим погрешностям силы ОР, заключается в записи образца конверта ОР, которая соответствует или приближена к центру луча, значение которого не обязательно является максимальным.

Отдельные образцы ОР, выбранные из различных лучей, имеют большие колебания из-за стохастической природы акустического рассеивания, что приводит к сильной зашумленности мозаик ОР дна. Расчет энергии ОР, т. е. интеграл от квадрата огибающей, полученной каждым лучом, значительно уменьшает результирующие колебания и, следовательно, шум мозаики ОР морского дна.

Выбор метода записи. Выбор метода записи данных ОР системой МЛЭ зависит от конкретной цели изучения или исследования морского дна. Запись полного эхо-сигнала сохраняет большую гибкость для последующей постобработки и позволяет получить данные ОР из водной толщи [10]. Тем не менее для изучения морского дна необходимо стараться сохранить как можно большую частоту посылок и, следовательно, получать более высокую детализацию съемки. Если для имеющейся системы МЛЭ запись полного эхо-сигнала невозможна из-за ограничений объема передачи данных, следует обратить внимание на пакеты данных ОР. Пакеты могут быть использованы для получения ГБО-подобных рядов и / или вычисления силы ОР по каждому

лучу. ГБО-подобные ряды могут быть полезны для визуализации морского дна, тогда как интенсивность и значения энергии ОР, полученные для каждого луча, являются более подходящими для измерения силы ОР морского дна и изучения её угловой зависимости. Даже если одного значения ОР для каждого луча достаточно для съемки, полезнее получить его из пакетов данных ОР, а не просто использовать в виде отдельного значения, так как это позволяет осуществлять максимальный контроль.

Обработка данных обратного рассеивания. Методы обработки сигналов, обратно рассеянных из водной толщи, описаны [15]. Если системой МЛЭ регистрируется полный эхо-сигнал и позже используется для обработки, то необходимо позиционировать «конверты» ОР с использованием батиметрических измерений и экстрагировать их для расчета характеристик ОР морского дна.

Перед обработкой данных ОР определяются x , y , z положения центра пятна засветки каждого луча, каждой посылки МЛЭ, которые обычно реализуются в программном обеспечении для обработки батиметрических данных. Существует два способа обработки данных ОР морского дна. Первый способ заключается в вычислении коэффициента ОР поверхности (сила ОР морского дна) для каждого луча, второй — в создании ГБО-подобных рядов для лучей правой и левой частей раскрытия эхолота либо из ГБО-подобных данных, синтезированных самим эхолотом, либо из конвертов ОР морского дна. Для получения мозаик ОР морского дна из перекрывающихся данных МЛЭ необходимо принимать во внимание и компенсировать влияние угла падения на силу ОР.

Рекомендации при изменении системных параметров и настроек. В работе показано, что собранные системами МЛЭ данные ОР в различных экспериментальных условиях могут быть скорректированы за геометрию луча, потери при передаче и системные параметры. Тем не менее могут иметь место остаточные артефакты, сохраняющиеся в результате либо аппроксимации зоны ОР к прямоугольнику, либо неправильного выбора настроек системы. Поэтому важно учитывать возможные последствия изменения системных настроек и параметров измерения силы ОР морского дна. В частности, важно учитывать следующие рекомендации.

1. Необходимо производить калибровку системы МЛЭ, особенно для определения коэффициента усиления отдельных лучей и системы в целом, полосы частот транзьюзера и формы приемной и передающей диаграммы направленности. В идеале калибровка должна производиться в контролируемой среде с известными целями точным и хорошо контролируемым выравниванием антенны эхолота и целей.

2. Для того чтобы получить точные измерения силы ОР морского дна и их угловые зависимости, используя данные МЛЭ, необходимо знать:

- какой вид акустических характеристик сигналов ОР (огибающая ОР, интенсивность или уровень в дБ) фактически записывается аппаратным обеспечением эхолота;
- какой вид обработки (например, усреднение) применяется к сигналу ОР с помощью аппаратных средств эхолота до регистрации данных.

Описанный алгоритм измерения ОР должен быть скорректирован в соответствии с характеристиками ОР, регистрируемыми МЛЭ.

3. При сборе данных ОР соответствующим образом должны быть выбраны мощность, коэффициент усиления и длина импульса, чтобы фактические характеристики сигнала соответствовали ожиданиям от настроек и параметров системы.

При использовании этих рекомендаций измерения ОР будут зависеть только от свойств морского грунта, угла падения и частоты эхолота. В этом случае измеренные данные обратного рассеивания могут быть эффективно использованы для дистанционной классификации разных типов морских грунтов с использованием специализированного программного обеспечения.

Выводы

1. Рассмотрены методы записи и обработки данных ОР наряду со связанными с ними возможными ошибками на примере аппаратных средств МЛЭ «Reson 8125». Высокочастотные МЛЭ

прошлых поколений, такие как «Reson 8101», регистрируют данные ОР аналогичным образом, так что методы обработки и ошибки также применимы к ним. Более современные системы, такие как «Reson 7125», способны регистрировать данные полного эхо-сигнала ОР в каждом луче каждой посылки. Это означает, что характеристики ОР морского дна могут быть получены непосредственно от сигналов ОР, которые не искажены ограниченной длиной снippetов.

2. Согласно последним руководящим документам описания форматов компании Kongsberg [16], в системах МЛЭ Kongsberg серии EM используются два типа данных ОР морского дна: сила ОР в децибелах, рассчитанная системой эхолота для вертикального и наклонного падения (только два значения за посылку), и конверты эхо-сигналов, записанные по каждому лучу, упоминающиеся как *данные изображения морского дна*.

3. Сила ОР морского дна вычисляется в соответствии со способом, описанным в публикации [17]. Данные изображения морского дна (эхо-конверты) записываются в логарифмическом формате в дБ и сосредоточены вокруг времени определения дна, ограничены им же по соседним лучам. Таким образом, данные ОР МЛЭ Kongsberg можно рассматривать как аналог снippetам систем «Reson». Соответственно обработка этих данных для измерения характеристик ОР может производиться аналогично обработке данных систем «Reson».

4. Длина изображений морского дна по каждому лучу недостаточна, особенно для вертикальных лучей, где она состоит всего лишь из нескольких измерений, так что они не включают в себя полный эхо-сигнал ОР дна. Следовательно, энергия ОР не может быть измерена точно. Для получения абсолютных значений силы ОР морского дна необходимо знать общий коэффициент усиления системы, для всех лучей и для изменений между отдельными лучами, на который оказывает влияние геометрия трандюсера и формирование лучей. Согласно технической документации МЛЭ «Kongsberg», все их последние системы полностью откалиброваны, что, вероятно, относится к данным изображения морского дна. Система «Reson» обычно не производит калибровки своих систем МЛЭ. Таким образом, необходимо производить калибровку согласно процедурам, описанным [13], для определения общего системного усиления и его изменения между отдельными лучами при необходимости выполнения измерений абсолютных значений силы ОР морского дна.

5. Практически все современные системы МЛЭ предоставляют возможность записи ГБО-подобных данных ОР морского дна. Для того чтобы получить представление о том, как эти данные связаны с фактическими свойствами ОР морского дна, включая статистические данные (например, средние значения и дисперсию), важно знать, как эти данные производятся системой МЛЭ. Акустическое ОР морского дна является случайным процессом с определенным распределением, которое зависит в основном от частоты МЛЭ, неровности морского дна и угла падения [14], [18]. Как отмечалось ранее, геометрия измерения ОР системы МЛЭ может исказить результат измерений и их статистику. Кроме того, обработка данных ОР, выполняемая аппаратными средствами МЛЭ, может исказить результаты измерений и их статистику неожиданным образом. Некоторые системы МЛЭ, такие, например, как «Reson Seabat», производят ГБО-данные с помощью бокового перекрытия данных от соседних лучей. Такая обработка искажает распределение ОР и, следовательно, его среднее значение и дисперсию [14]. Таким образом, наиболее подходящим способом синтеза ГБО-данных из конвертов ОР МЛЭ является исправление амплитуды огибающих образцов за диаграмму направленности по каждому лучу таким образом, чтобы уровнять перекрывающиеся образцы, а затем «сшить» вместе все конверты ОР.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. De Moustier C. Beyond bathymetry: Mapping acoustic backscattering from the deep seafloor with Sea Beam / C. de Moustier // The Journal of the Acoustical Society of America. — 1986. — Vol. 79. — Is. 2. — Pp. 316–331. DOI: 10.1121/1.393570.
2. Kleinrock M. C. Capabilities of some systems used to survey the deep-sea floor / M. C. Kleinrock // CRC handbook of geophysical exploration at sea / ed. R. A. Geyer. — 2nd edition. — Boca Raton, Fla.: CRC Press, 1992. — Pp. 35–86.

3. *Clarke J. E. H.* Processing and interpretation of 95 kHz backscatter data from shallow-water multibeam sonars / J. E. H. Clarke, L. A. Mayer, N. C. Mitchell, A. Godin, G. Costello // *OCEANS '93. Engineering in Harmony with Ocean. Proceedings.* — IEEE, 1993. — Pp. 437–442. DOI: 10.1109/OCEANS.1993.326135.
4. *Talukdar K. K.* Interpretation of Sea Beam backscatter data collected at the Laurentian fan off Nova Scotia using acoustic backscatter theory / K. K. Talukdar, R. C. Tyce, C. S. Clay // *The Journal of the Acoustical Society of America.* — 1995. — Vol. 97. — Is. 3. — Pp. 1545–1558. DOI: 10.1121/1.412094.
5. *Augustin J. M.* Contribution of multibeam acoustic imagery to the exploration of the sea bottom / J. M. Augustin, R. Le Suave, X. Lurton, M. Voisset, S. Dugelay, C. Satra // *Marine Geophysical Researches.* — 1996. — Vol. 18. — Is. 2. — Pp. 459–486. DOI: 10.1007/BF00286090.
6. *Mitchell N. C.* Processing and analysis of Simrad multibeam sonar data / N. C. Mitchell // *Marine Geophysical Researches.* — 1996. — Vol. 18. — Is. 6. — Pp. 729–739. DOI: 10.1007/BF00313883.
7. *Фирсов Ю. Г.* Основы гидроакустики и использования гидрографических сонаров: учеб. пособие / Ю. Г. Фирсов. — СПб.: Нестор-история, 2010. — 348 с.
8. *Фирсов Ю. Г.* Новый этап батиметрических исследований северных акваторий России на примере Карского моря / Ю. Г. Фирсов, М. В. Иванов, Е. Н. Колосков // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова.* — 2014. — № 6 (28). — С. 115–124.
9. *Колосков Е. Н.* Применение современных гидрографических технологий для изучения рельефа и донного газопроявления в северных морях России / Е. Н. Колосков, Ю. Г. Фирсов // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова.* — 2015. — № 3 (31). — С. 54–62.
10. *Кожухов И. В.* Электронная инженерная гидрография и перспективы получения новых данных по морфологии и геоэкологии арктических морей / И. В. Кожухов, Е. Н. Колосков, Ю. Г. Фирсов // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова.* — 2015. — № 4 (32). — С. 95–103.
11. *Колосков Е. Н.* Взаимосвязь гидрографии и геоэкологии в контексте глобальных климатических изменений в арктических морях и их последствия / Е. Н. Колосков // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова.* — 2016. — № 1 (35). — С. 66–75.
12. *SeaBat 8125. Ultra High Resolution Focused Multibeam Echosounder System. Operator's manual. Version 3.01.* — Goleta, California: RESON, Inc., 2002. — 134 p.
13. *Parnum I. M.* Benthic habitat mapping using multibeam sonar systems: PhD thesis / I. M. Parnum. — Australia: Curtin University of Technology, 2007. — 208 p.
14. *Gavrilov A. N.* Fluctuations of seafloor backscatter data from multibeam sonar systems / A. N. Gavrilov, I. M. Parnum // *IEEE Journal of Oceanic Engineering.* — 2010. — Vol. 35. — Is. 2. — Pp. 209–219. DOI: 10.1109/JOE.2010.2041262.
15. *Cochrane N. A.* Quantification of a multibeam sonar for fisheries assessment applications / N. A. Cochrane, Y. Li, G. D. Melvin // *The Journal of the Acoustical Society of America.* — 2003. — Vol. 114. — Is. 2. — Pp. 745–758. DOI: 10.1121/1.1587151.
16. *Instruction Manual. EM Series Multibeam Echo Sounders. Datagram Formats. Report No. 850-160692/N.* — Kongsberg Maritime AS, 2010. — 106 p.
17. *Hammerstad E.* EM Technical Note: Backscattering and Seabed Image Reflectivity / E. Hammerstad. — Horten, Norway: Kongsberg Maritime AS, 2000. — 5 p.
18. *Lyons A. P.* Statistical characterization of high-frequency shallow-water seafloor backscatter / A. P. Lyons, D. A. Abraham // *The Journal of the Acoustical Society of America.* — 1999. — Vol. 106. — Is. 3. — Pp. 1307–1315. DOI: 10.1121/1.428034.

DATA BACKSCATTER SEABED IMAGE IN MODERN MULTIBEAM ECHO SOUNDERS

Methods of processing multibeam sonar data, implemented in modern hydrographic systems, relate mainly to the bathymetry. However, modern multi-beam echo sounder can also receive and backscatter data. So far, there is no universal, standard approach for processing and interpretation of MBES backscatter data. Multibeam echosounder manufacturing companies use their own methods of primary processing of backscatter data and offer different methods of visualization of the data. All backscatter data collected by MBES systems are derived from backscatter intensity or from its square root, which is the instantaneous amplitude which is generally referred

to as “envelope”. To obtain estimates of the coefficient of the backscatter of the seabed and its angular dependence, it is important to know intensity or amplitude of the backscatter was recorded by echosounder. Currently, there are four possible ways of recording backscatter data used in modern multibeam sonar systems.

The aim of this work is to eliminate the uncertainty in the collection and processing backscatter seabed data.

The article deals with the existing methods of recording backscatter data used in modern high-frequency multibeam sonars, as well as related methods of processing of this data. The choice of acquisition method of backscatter data by MBES systems depends on the particular purpose of study or research of the seabed.

For mosaic seabed backscatter of overlapping MBES data, it is necessary to take into account and compensate for the effect of the angle of incidence on the power of signal. Review of existing approaches to this problem are beyond the scope of this article and is expected to present in the following works.

Additionally, the possible errors that can occur when processing backscatter data is described. Such errors are illustrated by data collected using «Reason SeaBat» MBES and other modern multibeam systems.

Keywords: detailed seabed topography, hydroacoustic, echo-signal, SSS, multibeam echo sounders, hydrographic information technologies, Reson, Kongsberg, water column, backscatter, snippets, marine geological research.

REFERENCES

1. De Moustier, Christian. “Beyond bathymetry: Mapping acoustic backscattering from the deep seafloor with Sea Beam.” *The Journal of the Acoustical Society of America* 79.2 (1986): 316–331. DOI 10.1121/1.393570.
2. Kleinrock, M. C. “Capabilities of some systems used to survey the deep-sea floor.” *CRC handbook of geophysical exploration at sea*, edited by R. A. Geyer. 2nd edition. Boca Raton, Fla.: CRC Press, 1992: 35–86.
3. Clarke, J. E. Hughes, L. A. Mayer, N. C. Mitchell, A. Godin, and G. Costello. “Processing and interpretation of 95 kHz backscatter data from shallow-water multibeam sonars.” *OCEANS’93. Engineering in Harmony with Ocean. Proceedings*. IEEE, 1993: 437–442.
4. Talukdar, Kushal K., Robert C. Tyce, and Clarence S. Clay. “Interpretation of Sea Beam backscatter data collected at the Laurentian fan off Nova Scotia using acoustic backscatter theory.” *The Journal of the Acoustical Society of America* 97.3 (1995): 1545–1558. DOI: 10.1121/1.412094.
5. Augustin, J. M., R. Le Suave, X. Lurton, M. Voisset, S. Dugelay, and C. Satra. “Contribution of multibeam acoustic imagery to the exploration of the sea bottom.” *Marine Geophysical Researches* 18.2 (1996): 459–486. DOI: 10.1007/BF00286090.
6. Mitchell, Neil C. “Processing and analysis of Simrad multibeam sonar data.” *Marine Geophysical Researches* 18.6 (1996): 729–739. DOI: 10.1007/BF00313883.
7. Firsov, Y. G. *Osnovy gidroakustiki i ispolzovaniya gidrograficheskikh sonarov. Uchebnoe posobie*. SPb.: Nestor-istoriya, 2010.
8. Firsov, Yu. G., M. V. Ivanov, and E. N. Koloskov. “The new stage of the Russian northern basins bathymetric investigations - Kara sea example.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 6(28) (2014): 115–124.
9. Koloskov, E. N., and Y. G. Firsov. “Implementation of the new hydrographic technologies for bottom topography and seafloor gas venting investigations in the Russian northern seas.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 3(31) (2015): 54–62.
10. Kozhuhov, I. V., E. N. Koloskov, and Y. G. Firsov. “Electronic engineering hydrography and the prospects of obtaining new results on the morphology and bottom environmental conditions of the arctic seas.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 4(32) (2015): 95–103.
11. Koloskov, E. N. “The interdependence of hydrography and marine ecology in the context Arctic seas climate change and its consequences.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 1(35) (2016): 66–75.
12. *SeaBat 8125. Ultra High Resolution Focused Multibeam Echosounder System. Operator’s manual. Version 3.01*. Goleta, California: RESON, Inc., 2002.
13. Parnum, I. M. Benthic habitat mapping using multibeam sonar systems. PhD thesis. Australia: Curtin University of Technology, 2007.
14. Gavrilov, Alexander N., and Iain M. Parnum. “Fluctuations of seafloor backscatter data from multibeam sonar systems.” *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 35.2 (2010): 209–219. DOI: 10.1109/JOE.2010.2041262.

15. Cochrane, Norman A., Y. Li, and G. D. Melvin. "Quantification of a multibeam sonar for fisheries assessment applications." *The Journal of the Acoustical Society of America* 114.2 (2003): 745–758. DOI: 10.1121/1.1587151.

16. *Instruction Manual. EM Series Multibeam Echo Sounders. Datagram Formats*. Report No. 850-160692/N. — Kongsberg Maritime AS, 2010.

17. Hammerstad E. *EM Technical Note: Backscattering and Seabed Image Reflectivity*. Horten, Norway: Kongsberg Maritime AS, 2000.

18. Lyons, Anthony P., and Douglas A. Abraham. "Statistical characterization of high-frequency shallow-water seafloor backscatter." *The Journal of the Acoustical Society of America* 106.3 (1999): 1307–1315.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Колосков Евгений Николаевич — аспирант.

Научный руководитель:

Фирсов Юрий Георгиевич —

кандидат технических наук, доцент.

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени

адмирала С.О. Макарова»

evgenklskv@mail.ru

Корнипаев Борис Александрович — аспирант.

Научный руководитель:

Фирсов Юрий Георгиевич —

кандидат технических наук, доцент.

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени

адмирала С.О. Макарова»

kornipaevboris@hotmail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Koloskov Evgeniy Nikolayevich — postgraduate.

Supervisor:

Firsov Jury Georgievich —

PhD, associate professor.

Admiral Makarov State University

of Maritime and Inland Shipping

evgenklskv@mail.ru

Kornipaev Boris Aleksandrovich — postgraduate.

Supervisor:

Firsov Jurij Georgievich —

PhD, associate professor.

Admiral Makarov State University

of Maritime and Inland Shipping

kornipaevboris@hotmail.ru

Статья поступила в редакцию 20 октября 2016 г.

DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-105-112

УДК 528.47

И. Ю. Королев

ОЦЕНКА ДОПУСТИМОГО ОТКЛОНЕНИЯ ПУТИ СУДНА ОТ ОБСЛЕДОВАННОЙ ПОЛОСЫ

Статья посвящена проблеме разработке количественных показателей и методик оценки безопасного плавания по высокоширотным трассам Северного морского пути (СМП). В ней рассмотрены навигационные особенности арктического мореплавания. Приведены сравнительные статистические данные об интенсивности судоходства в периоды летне-осенней и зимне-весенней навигации в восточном и западном секторах Арктики. Отмечены основные тенденции и перспективы СМП, связанные с увеличением интенсивности арктического судоходства и увеличением доли крупнотоннажных судов. Приведен обзор методов оценки вероятности навигационных аварий, связанных с недостаточной гидрографической изученностью рельефа дна. Отмечается, что в условиях мелководья и недостаточной изученности рельефа дна движение судов в акватории СМП организовано по рекомендованным маршрутам, а движение крупнотоннажных судов — по полосам, в пределах которых выполнено площадное обследование. Поставлен вопрос о допустимом отклонении пути судна от рекомендованной полосы движения. Перечислены условия, при которых решение этого вопроса приобретает важное практическое значение. Для оценки допустимого отклонения пути судна от обследованной полосы предложено использовать метод статистического прогнозирования временных трендов, адаптированный к задачам проектирования арктических водных путей с учетом геоморфологических особенностей шельфа арктических морей. В работе определены необходимые критерии и приведены основные расчетные формулы, позволяющие оценить величину допустимого отклонения пути судна вправо и влево от обследованной полосы в зависимости от её ширины, характера рельефа дна и уровня доверительной вероятности. Приведены основные