



ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО МОРСКОГО И РЕЧНОГО ТРАНСПОРТА

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова»
(ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова»)**

Институт «Морская академия»

Кафедра Гидрографии моря

Направление подготовки 26.03.01 Управление водным транспортом и гидрографическое
обеспечение судоходства

(код, наименование направления подготовки/специальности)

«К ЗАЩИТЕ ДОПУЩЕНА»
Заведующий кафедрой

(подпись)

А.Л. Тезиков

(ФИО)

«__» _____ 2018 г.

Выпускная квалификационная работа

Обучающегося Ледяева Максима Алексеевича

(фамилия, имя, отчество)

Вид работы выпускная квалификационная работа бакалавра

(выпускная квалификационная работа бакалавра, специалиста, магистра)

Пояснительная записка

Тема: Методы акустического распознавания донного грунта

(полное название темы квалификационной работы, в соответствии с приказом об утверждении тематики ВКР)

Руководитель работы к.т.н., доцент Фирсов Ю. Г.

(должность, подпись, фамилия, инициалы, дата)

Обучающийся студент Ледяев М. А.

(подпись, фамилия, инициалы, дата)

Санкт - Петербург

2018г.

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО МОРСКОГО И РЕЧНОГО ТРАНСПОРТА

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова»
(ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова»)**

Институт «Морская академия»

Кафедра Гидрографии моря

Направление подготовки 26.03.01 Управление водным транспортом и гидрографическое
обеспечение судоходства

(код, наименование направления подготовки/специальности)

«УТВЕРЖДАЮ»
Заведующий кафедрой

(подпись)

А.Л. Тезиков

(ФИО)

«__» _____ 201__ г.

**Задание
на выпускную квалификационную работу**

Вид работы: выпускная квалификационная работа бакалавра
(ВКР бакалавра, специалиста, магистра)

Обучающемуся Ледяеву Максиму Алексеевичу
(фамилия, имя, отчество)

Тема Методы акустического распознавания донного грунта

Утверждена приказом ректора Университета от «09» февраля 2018 года, № 98

Срок сдачи законченной работы «08» июня 2018г.

Исходные данные (или цель ВКР):

Целью ВКР является анализ существующих методов акустического распознавания донного грунта.

Перечень подлежащих исследованию, разработке, проектированию вопросов (краткое содержание ВКР):

(актуальность темы, цели и задачи ВКР; аналитический обзор литературных источников; постановка задачи исследования, разработки, проектирования; содержание процедуры исследования, разработки, проектирования; обсуждение результатов; дополнительные вопросы, подлежащие разработке; заключение – выводы по работе в целом, оценка степени решения поставленных задач, практические рекомендации; и др.)

– обоснование актуальности использования различных технологий дистанционного распознавания донного грунта при выполнении гидрографических работ;

(наименование вопроса, раздела и его краткое содержание)

– рассмотрение принципа работы многолучевого эхолота и регистрации данных обратного рассеивания;

(наименование вопроса, раздела и его краткое содержание)

– исследование и обобщение возможных способов записи данных обратного рассеивания, реализованных в современных высокочастотных многолучевых эхолотах;

(наименование вопроса, раздела и его краткое содержание)

– рассмотрение способов обработки данных обратного рассеивания: создание карт типов морского дна, анализ данных обратного рассеивания; а также рассмотрение методов распознавания донного грунта;

(наименование вопроса, раздела и его краткое содержание)

– рассмотрение методов обработки данных обратного рассеивания в электронно-гидрографической информационной системе НУРАСК МАХ и в программе постобработки и трёхмерной визуализации данных съёмки «Fledermaus».

(наименование вопроса, раздела и его краткое содержание)

Перечень графического материала (или презентационного материала):

1. Графическое иллюстрирование рассматриваемых вопросов в тексте выпускной квалификационной работы;
2. Презентация выпускной квалификационной работы в формате программы «Power Point».

Консультанты по разделам ВКР (при наличии):

1. _____
(наименование раздела, ученая степень, ученое звание и должность, ФИО консультанта)

2. _____
(наименование раздела, ученая степень, ученое звание и должность, ФИО консультанта)

3. _____
(наименование раздела, ученая степень, ученое звание и должность, ФИО консультанта)

Дата выдачи задания: «12» февраля 2018г.

Задание согласовано и принято к исполнению: «12» февраля 2018г.

Руководитель ВКР: доцент кафедры Гидрографии моря, к.т.н. Фирсов Ю. Г. _____
(должность, ученая степень, ученое звание, ФИО) (подпись)

Обучающийся: группа Г-421, Ледяев М. А. _____
(учебная группа, ФИО) (подпись)

Содержание

Содержание	2
Перечень сокращений	3
Введение	4
Глава 1. Принцип работы многолучевого эхолота и регистрации данных обратного рассеивания	7
1.1. Принцип работы многолучевого эхолота	7
1.2. Теоретическое представление акустического обратного рассеивания	9
1.3. Способы записи данных обратного рассеивания, реализованные в современных многолучевых системах	11
1.3.1. Полный эхо-сигнал.....	12
1.3.2. Данные временных рядов («сниппеты»).....	14
1.3.3. Объединённый амплитудный временной ряд.....	17
1.3.4. Временные ряды амплитуд и углов	19
1.3.5. Единичное значение интенсивности обратного рассеивания луча	20
1.4. Выбор метода записи данных обратного рассеивания	21
Глава 2. Обработка данных обратного рассеивания: создание карт типов морского дна, анализ данных обратного рассеивания, создание мозаик и методика распознавания донного грунта	23
2.1. Обработка данных обратного рассеивания.....	23
2.2. Составление карт типов морского дна из данных многолучевого эхолота.....	23
2.3. Анализ данных обратного рассеивания многолучевого эхолота и распознавание донного грунта.....	25
2.4. Алгоритм «геокодер» (Geocoder).....	28
Глава 3. Рассмотрение методов обработки данных обратного рассеивания в электронно-гидрографической информационной системе НУРАСК МАХ и в программе постобработки «Fledermaus»	32
3.1. Обработка данных обратного рассеивания в электронно-гидрографической информационной системе НУРАСК МАХ.....	32
3.2. Обработка данных обратного рассеивания в программе постобработки и трёхмерной визуализации данных съёмки «Fledermaus»	36
Заключение	44
Список используемых источников	46

Перечень сокращений

ОЛЭ – однолучевой эхолот

МЛЭ – многолучевой эхолот

ГБО – гидролокатор бокового обзора

ОР – обратное рассеивание

ЭГИС – электронно-гидрографическая информационная система

ДН – диаграмма направленности

Введение

Традиционно гидрографические работы проводятся в интересах безопасности мореплавания и включают в себя: съёмку рельефа дна, гидрографическое траление, грунтовую съёмку, топографическую съёмку береговой полосы, сбор сведений для лоций, а также сопровождающие их работы по сгущению геодезической основы и уровенные наблюдения [1]. Основным методом картографирования дна продолжают оставаться однолучевые эхолоты (ОЛЭ), многолучевые эхолоты (МЛЭ), гидролокаторы бокового обзора (ГБО) и многоканальные эхолоты (эхотралы). Действие этих приборов полностью основано на акустических методах. Отметим, что помимо данных батиметрии современные МЛЭ позволяют собирать данные обратного рассеивания (ОР). Технологии записи и обработки этих данных МЛЭ за последние годы претерпели значительные изменения, что позволяет достаточно достоверно распознавать тип донного грунта при гидрографических работах.

Данные обратного рассеивания позволяют получить информацию о грунтах морского дна (поверхностных донных осадках) дистанционно и без использования средств морской грунтовой съёмки, таких как дночерпатели и драги. Это обстоятельство позволяет обеспечить относительно быстрый охват обширных зон морского дна и, следовательно, повысить экономическую эффективность гидрографических работ. Данные подобного рода крайне важны при комплексном обследовании морского дна. Например, характер грунта должен определяться при обследовании зон будущих якорных стоянок на портовых акваториях или же в местах, где предполагается гидротехническое строительство и иных зонах, где суда могут встать на якорь. Более того, определение типа донных осадков имеет важное значение при разведке и бурении на морских месторождениях углеводородов, при прокладке и обслуживании трубопроводов и кабелей. Данные технологии востребованы также в рыбопромышленной индустрии для промысловых судов, позволяя в процессе лова определить места обитания рыб и избежать зон, где рыболовные тралы могут быть повреждены.

Методы акустического распознавания донного грунта исследуются достаточно давно как отечественными, так и зарубежными исследователями. Можно отметить следующие отечественные труды: «Акустика моря» А. П. Сташкевича [2], где пятая глава посвящена акустическим свойствам морского грунта и методам их определения; «Акустика океана» Л. М. Бреховских [3] и многочисленные публикации Акустического института им. академика Н.Н. Андреева [4]. Из зарубежных исследователей можно отметить Кристиана Де-Мустье, который одним из первых увидел большой потенциал данных обратного рассеивания, собранных при помощи МЛЭ Sea Beam в целях распознавания донных осадков [5]. Другие исследовательские работы [6] – [10] позволили развить методы обработки данных ОР. Эти методы были разработаны и испытаны, в первую очередь для низкочастотных МЛЭ (менее 100 кГц), наиболее распространённых в то время.

Морское дно обладает разнообразным геологическим составом и стратификацией и всегда неоднородно. В спецификациях к гидрографическим съёмкам типы донных осадков определяются как «пески» (крупные, средние, мелкие), «камни» и «валуны». А более мелкие материалы чем песок классифицируются как «ил» и «глина» [11]. Если в рамках гидрографических работ поставлена задача проведения комплексных инженерно-геологических изысканий, то начинают действовать нормативные документы [12 – 15].

На данный момент существует пять возможных способа записи данных обратного рассеивания, применяемых в современных многолучевых системах и соответствующие им методы обработки, посредством которых можно получить представление о типе донного грунта в исследуемой зоне. Важно понимать, что выбор метода сбора данных обратного рассеивания зависит от цели исследования морского дна.

Исходя из вышесказанного, определение характеристик морского дна по данным ОР (которые не искажены собственными параметрами МЛЭ или неверно выбранным способом записи этих данных) имеет очень важное прикладное значение. Следовательно, для эффективного и верного сбора данных ОР важно не только применить подходящий метод обработки данных, но и необходимо отлично знать все параметры МЛЭ, имеющие отношение к

данным обратного рассеивания и методику записи этих данных у конкретной многолучевой системы. Помимо этого, важно учесть ошибки и артефакты, которые могут возникнуть при обработке данных обратного рассеивания.

Целью настоящей работы является обобщение и анализ способов записи данных ОР, реализуемых в современных высокочастотных МЛЭ, а также рассмотрение методов обработки этих данных, реализуемых в современной электронно-гидрографической информационной системе (ЭГИС) «НУРАСК МАХ» (НУРАСК Inc., США) и в программе постобработки и трёхмерной визуализации данных съёмки «Fledermaus» (QPS, Нидерланды).

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

1. Рассмотреть принцип работы МЛЭ и регистрации данных ОР, а также способы записи данных ОР, реализованных в современных высокочастотных МЛЭ.
2. Рассмотреть порядок обработки данных обратного рассеивания: создание карт типов морского дна, создание мозаик, анализ данных ОР и методы распознавания донного грунта.
3. Рассмотреть принцип работы алгоритма «геокодер» (Geocoder), который является основой для обработки данных ОР и заложен в структуре НУРАСК МАХ и в программе постобработки Fledermaus.
4. Рассмотреть методы обработки данных обратного рассеивания в ЭГИС НУРАСК МАХ и в программе постобработки Fledermaus.

Глава 1 посвящена принципу работы МЛЭ и регистрации данных обратного рассеивания. В данной главе также рассматриваются и обобщаются способы записи данных обратного рассеивания, реализованных в современных высокочастотных МЛЭ наиболее известных фирм-производителей.

В главе 2 рассматривается обработка данных обратного рассеивания: создание карт типов морского дна, анализ данных ОР в целях распознавания донного грунта. Также в данной главе кратко рассматривается принцип работы алгоритма «геокодер».

В главе 3 поэтапно описывается обработка данных ОР в ЭГИС «НУРАСК МАХ» и в программе постобработки «Fledermaus».

Глава 1. Принцип работы многолучевого эхолота и регистрации данных обратного рассеивания

1.1. Принцип работы многолучевого эхолота

Многолучевые эхолоты продолжают являться наиболее распространёнными и эффективными инструментами для картографирования морского дна. Они могут устанавливаться на крупные исследовательские суда, маломерные катера, автономные подводные аппараты и телеуправляемые подводные аппараты.

Общие принципы работы современных МЛЭ можно сформировать следующим образом: передающая матрица эхолота излучает короткие акустические импульсы, имеющие широкую диаграмму направленности (ДН) перпендикулярно плоскости линии движения судна ($120^\circ - 150^\circ$), и узкую в плоскости по линии движения судна (около 1° для высокочастотных МЛЭ). Решётка приёмной акустической антенны, направленная перпендикулярно к передающей матрице, формирует большое количество приёмных лучей, которые являются узкими перпендикулярно линии движения судна. При этом используются алгоритмы формирования диаграммы направленности приёмных лучей, которые направляются одновременно в разные стороны под разными углами относительно плоскости по линии движения судна. С помощью данного алгоритма система выполняет пространственную фильтрацию акустических сигналов, отражённых от различных областей морского дна вдоль полосы обзора. Данные области принято называть пятнами облучения или пятнами засветки луча, что обеспечивает возможность измерения батиметрии (регистрации времени прохождения акустической посылки и угла прихода), а также значений интенсивности обратного рассеивания, расположенных в одном месте по одному лучу.

Принцип работы МЛЭ проиллюстрирован на рисунке 1. Заштрихованные области изображают проекции переданного и принятого

лучей (показана проекция единичного принимаемого луча). Проекции передаваемого и принимаемого лучей (являющиеся главными лепестками ДН) показаны в виде заштрихованных областей. Пятно засветки МЛЭ создаётся зоной перекрытия областей. Две пунктирные линии очерчивают границы дна, освещённые (озвученные) прямоугольным одиночным акустическим импульсом эхолота за определённый промежуток времени [16].

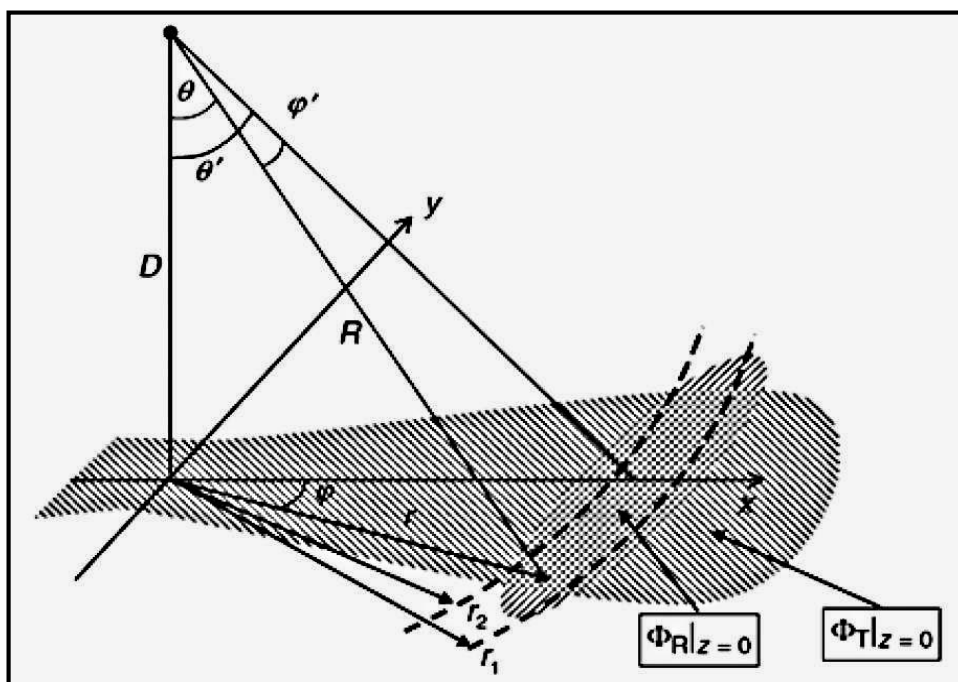


Рис 1. Принцип работы многолучевого эхолота и геометрии измерения обратного рассеивания. Заштрихованные области иллюстрируют проекции переданного и принятого лучей (показана проекция единичного принимаемого луча)

С каждым принятым лучом эхолот «озвучивает» определённую область морского дна, которая ограничивается наложением проекций отправленного и принятого лучей – это и есть пятно засветки. Озвученный участок дна, отражающий эхо-сигнал обратно на приёмную антенну, ограничен продолжительностью посылаемого импульса и имеет форму кольца с внешним и внутренним радиусами r_1 и r_2 (см. рис. 1). Данные радиусы изменяются со временем t_r , истёкшим с момента посылки, как показано в уравнениях:

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

$$r_2 = \text{Re} \left[\left(\frac{ct_r}{2} - \frac{cT}{2} \right)^2 - D^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1),$$

где D — высота антенн МЛЭ над поверхностью дна;

c — скорость звука в воде;

Re — акустическое число Рейнольдса (безразмерный параметр, использующийся в акустике для количественной характеристики соотношения членов в уравнении, описывающем распространение волны конечной амплитуды);

T — длина переданного импульса. Пятно засветки представляет собой круг при $t_r \leq \frac{2D}{c+T}$, где $r_2 = 0$.

1.2. Теоретическое представление акустического обратного рассеивания

Обратный рассеянный сигнал может быть выражен численно, если МЛЭ посылает $(\phi_T(\theta', \varphi'))$ и принимает $(\phi_R(\theta', \varphi'))$ — как показано рисунке 1. И если при этом диаграмма направленности известна, то мгновенная интенсивность звука равна [17]:

$$I(t_r) = \int_{r_2}^{r_1} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{I_s \cdot R_0^2 \cdot e^{-2\beta R}}{R^4(\theta)} \cdot \sigma_{bs}(\theta) \cdot \phi_T^2(\theta', \varphi') \cdot \phi_R^2(\theta', \varphi') r dr d\varphi \quad (2),$$

где $\sigma_{bs}(\theta)$ — коэффициент обратного рассеяния поверхности в зависимости от угла падения (θ) ;

I_s — интенсивность излучаемой посылки на расстоянии $R_0 = 1$ м от антенны МЛЭ;

β — коэффициент затухания звука в воде;

R — наклонная дальность.

При относительно коротких импульсах (как правило, несколько десятков микросекунд для высокочастотных МЛЭ) и управляемых вручную

наклонных лучах, пятно засветки представляет собой часть покрытия луча, ограниченную r_1 и r_2 , как показано рисунке 1. Для МЛЭ с узкой диаграммой направленности и с обычной шириной луча в несколько градусов можно предположить, что $\sigma_{bs}(\theta)$ и R существенно не изменяются в зоне озвучивания. На основании этого предположения, уравнение (2) можно упростить:

$$I(t_r) = \frac{I_s \cdot R_0^2 \cdot e^{-2\beta R_c}}{R_c^4(t_r)} \cdot \sigma_{bs} \cdot S_{ins}(t_r) \quad (3),$$

где S_{ins} — площадь пятна засветки;

R_c — наклонная дальность прохождения луча до центра пятна засветки, зависящая от времени t_r .

Приближённая формула (3) обычно используется для получения коэффициента обратного рассеивания морского дна в зависимости от интенсивности ОР, измеренной в каждом луче МЛЭ:

$$\sigma_{bs} = \left(\frac{I(t_r) \cdot R_c^4(t_r)}{I_s \cdot R_0^2 \cdot e^{-2\beta R_c} \cdot S_{ins}(t_r)} \right) \quad (4),$$

Выражение в скобках обозначает усреднение по серии измерений. Для приблизительного вычисления σ_{bs} время t_r обычно выбирается так, чтобы оно соответствовало двойному времени прохождения сигнала МЛЭ в центр зоны пятна засветки с учётом геометрии измерений: угла крена и глубины моря. Пятно засветки обычно аппроксимируется прямоугольной формой. Простое и общеупотребительное уравнение для расчёта площади пятна засветки, аппроксимируемого прямоугольной формой, как указано в [18], выглядит следующим образом:

$$S = \min\{R \cdot \varphi_1 \cdot TC / \sin \theta, R^2 \cdot \varphi_1 \cdot \sin \theta_t \cdot \cos \theta\} \quad (5),$$

где φ_1 — продольная (в направлении движения) ширина переданного луча;

θ_t — ширина приёмного луча в поперечном направлении, указывается изготовителем сонара;

θ — угол поворота луча.

Минимальная функция применяется для того, чтобы учесть случай, когда поперечная ширина пятна засветки меньше, чем $r_1 - r_2$ (см. рис. 1).

Энергия обратного рассеивания может быть вычислена путём интегрирования интенсивности обратного рассеивания (I) по длительности эхо-сигнала, что эквивалентно интегрированию по ширине пятна засветки. Следовательно, энергия обратного рассеивания также может быть аппроксимирована простым уравнением, аналогичным уравнению (3):

$$E = \frac{E_s \cdot R_0^2 \cdot e^{-2\beta R_c}}{R_c^4} \cdot \sigma_{bs} \cdot S_{FP} \quad (6),$$

где E_s — энергия передаваемого импульса (произведение интенсивности передаваемого сигнала и длительности импульса);

$S_{FP} = R^2 \cdot \varphi_l \cdot \sin \theta_t \cdot \cos \theta$ — площадь пятна засветки луча.

Коэффициент обратного рассеяния морского дна σ_{bs} можно получить из энергии обратного рассеивания:

$$\sigma_{bs} = \frac{E \cdot R_c^4}{E_s \cdot R_0^2 \cdot e^{-2\beta R_c} \cdot S_{FP}} \quad (7),$$

На практике же акустическое обратное рассеивание морского дна обычно характеризуется логарифмической шкалой силы обратного рассеивания морского дна:

$$BS = 10 \log \sigma_{bs} \quad (8).$$

1.3. Способы записи данных обратного рассеивания, реализованные в современных многолучевых системах

Все данные ОР, записанные современными высокочастотными МЛЭ, получены из интенсивности обратного рассеивания (I), см. уравнение (2), или её квадратного корня, являющимся мгновенной амплитудой, который называется «огibaющая обратного рассеивания». Для получения оценок

коэффициента ОР морского дна и его угловой зависимости важно знать, интенсивность или амплитуда ОР были записаны эхолотом. На данное время существует пять способов регистрации данных ОР, применяемых в МЛЭ фирмы Reson и в некоторых других современных МЛЭ (Kongsberg EM 122, 302, 712 и 2040 серий), а также R2Sonic. По ходу уменьшения объёма регистрируемой информации способы регистрации данных ОР можно представить в следующем порядке:

- полный эхо-сигнал (либо огибающая обратного рассеивания, либо интенсивность) от каждого луча, включая сигналы ОР от водной толщи;
- фрагмент огибающей ОР («сниппет») с центром, находящимся в области распознавания грунта для каждого луча (упоминается здесь как «огибающая ОР морского дна»);
- амплитудные временные ряды, созданные путём объединения интенсивности (или огибающей) ОР принятого сигнала в две группы: суммарная амплитуда справа от центрального луча и суммарная амплитуда слева от центрального луча (рис. 8), наподобие работы классического ГБО;
- временные ряды амплитуд и углов (данный метод доступен в технологии TruePix МЛЭ R2sonic);
- одно значение интенсивности ОР на луч в пределах каждого отражения от морского дна. Часть современных МЛЭ фирмы «Reson» записывают пиковую амплитуду ОР морского дна, полученную для каждого луча, а МЛЭ иных фирм-производителей регистрируют другие производные ОР.

Далее мы опишем каждый метод в отдельности, определим различия между этими методами и проанализируем выбор наиболее подходящего метода регистраций для конкретных практических задач.

1.3.1. Полный эхо-сигнал (либо огибающая обратного рассеивания, либо интенсивность)

Регистрация данных полного эхо-сигнала может быть выполнена современными МЛЭ, например, Reson Seabat 7125 [19] и Reson Seabat T20P

[20]. В программном обеспечении МЛЭ «Reson» такие данные называются «snapshots» (снимки). Запись полного эхо-сигнала по каждому лучу, включая амплитуду (рис. 2) и фазу, применима для решения некоторых практических задач, относящихся к данным водной толщи, таких как: поиск рыбы для промысла [21], исследование внутренних волн [22], перенос осадков [23], а также изучение донного газопроявления (например, поиск выходов газогидратов [24]).

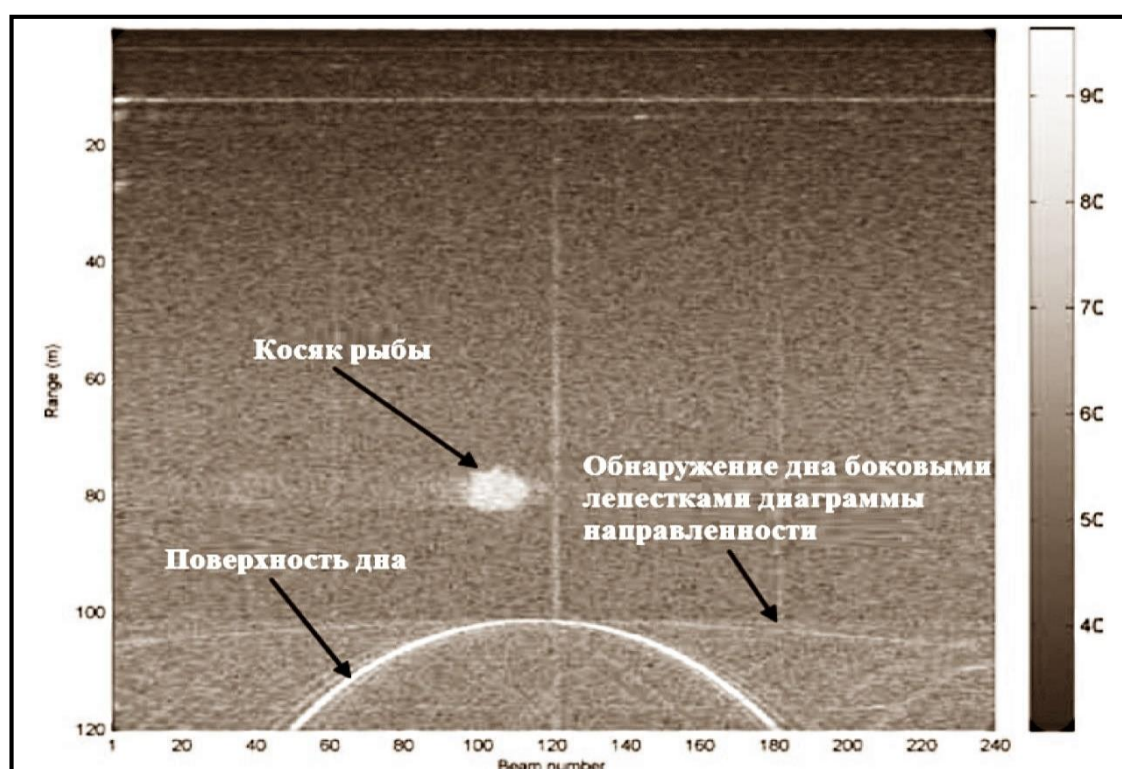


Рис 2. Пример полного эхо-сигнала обратного рассеивания от одной посылки МЛЭ Reson Seabat 8125. Уровень обратного рассеивания показан в децибелах (дБ) через уровень опорного сигнала в системном аналого-цифровом преобразователе единиц (т.е. не скорректировано за полное системное усиление МЛЭ)

При картографировании дна на больших глубинах для обеспечения безопасности мореплавания в записи таких данных нет необходимости. Кроме того, при совместной регистрации полного эхо-сигнала и батиметрии объём данных значительно возрастает, что может привести к задержкам и снизить общую скорость передачи данных. Например МЛЭ Reson 8125 может регистрировать полный эхо-сигнал каждой пятой посылки. Последние

достижения в области записи данных и увеличения компьютерных мощностей позволяют решить эту проблему в современных МЛЭ, таких как Reson 7125.

1.3.2. Данные временных рядов. Фрагмент огибающей обратного рассеивания («снимет»)

В 2001 году Fugro Pelagos Inc, работая совместно с RESON Inc. и TritonElics, Inc., разработали технологию обработки временных рядов пятна засветки и назвали их «сниметами» (Snippets) [25].

«Снимет» (фрагмент) — это временной ряд значений амплитуды в сигнале, отражённом от пятна засветки луча на морском дне. «Сниметы» являются фрагментами полного эхо-сигнала, которые выбраны так, чтобы содержать в себе эхо-сигнал морского дна в каждом луче, для каждой посылки МЛЭ (рис. 3). Центр временного ряда совпадает с положением центра луча.

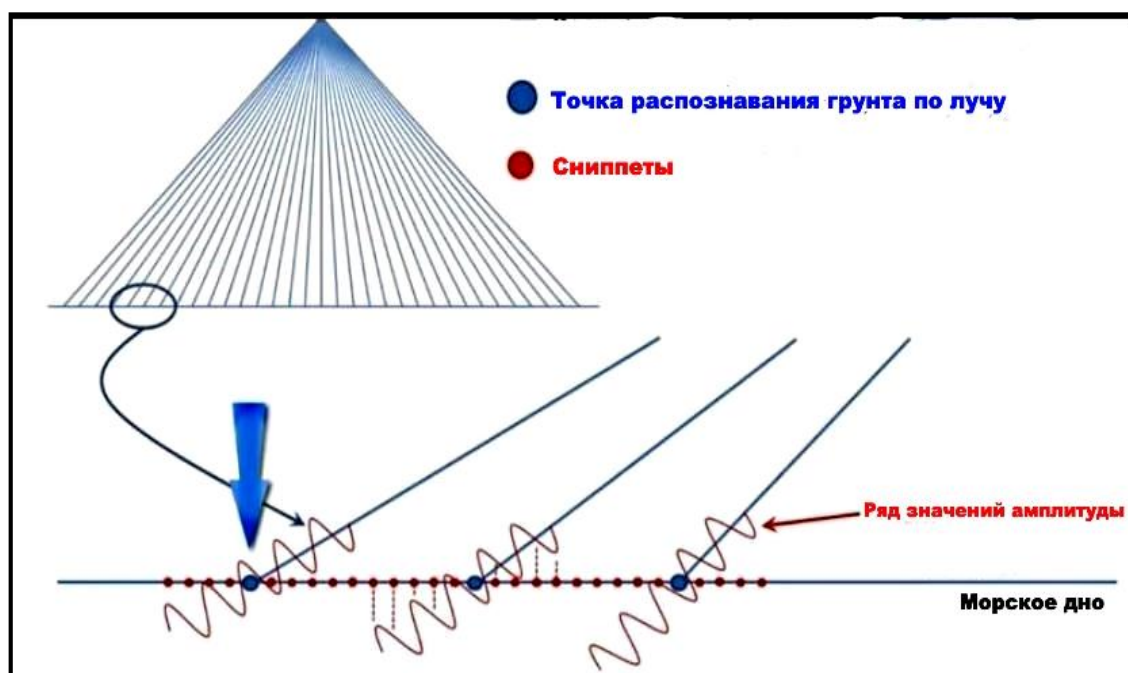


Рис 3. Наглядное представление «сниметов» — рядов значений амплитуды в отражённом сигнале

Временной ряд генерируется для каждого луча отдельно в пределах одной акустической посылки. В дополнение к интенсивности каждый пакет данных содержит информацию о длительности (времени) временного ряда, номере акустической посылки, частоте дискретизации, скорости звука, настройках оператора (мощность излучаемого сигнала, коэффициент

усиления, поглощение и т. д.), что несколько увеличивает объём данных. Начало образца каждого фрагмента данных ОР в полном эхо-сигнале и длина каждого фрагмента заданы процессором МЛЭ на основании диапазона определения дна (глубины) и оценки диапазона наклонной дальности к внешним и внутренним границам пятна засветки на морском дне [26]. 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 отражённый эхо-сигнал от морского дна. Недостаточность длины фрагмента наблюдается чаще на крайних лучах и реже на внутренних, так как длина отражённого сигнала увеличивается по мере увеличения угла наклона [27]. На рисунке 4 представлено наглядное представление «снимка» относительно пятна засветки и точки распознавания донного грунта

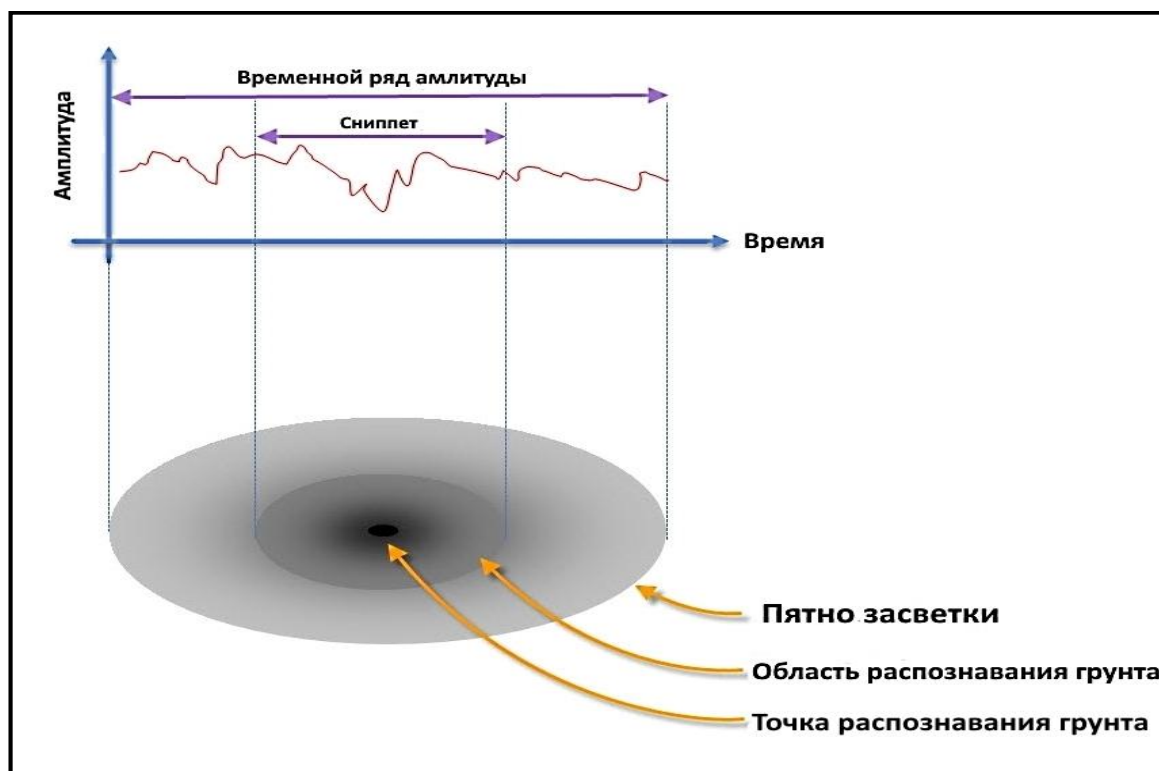
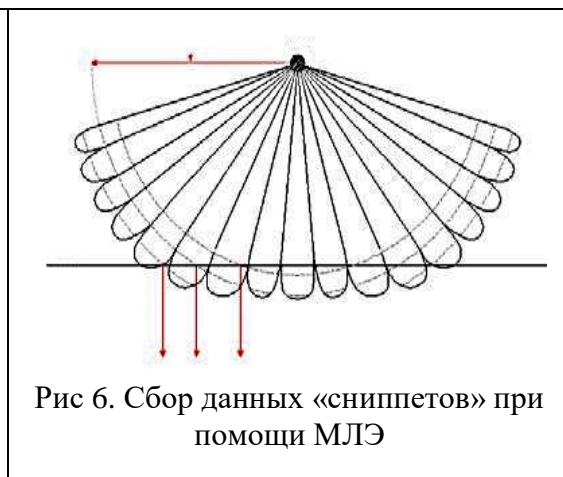
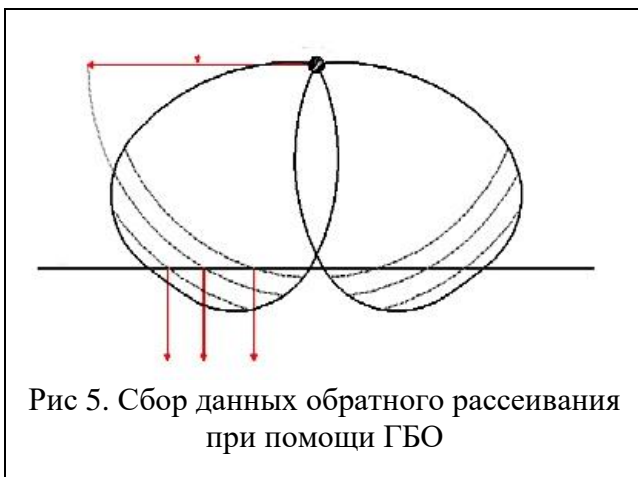


Рис 4. Наглядное представление «снимка» относительно пятна засветки и точки распознавания донного грунта

Наглядно сбор данных ОР при помощи ГБО и сбор данных «сниметов» посредством МЛЭ можно увидеть на рисунках 5 и 6 соответственно.



Если данные «сниметов» для каждой полосы обзора объединены по каждому отдельному лучу, центрированному в соответствующем положении пятна засветки, то объединённая серия даст результат, подобный снимкам ГБО, с учётом коррекции угловой дальности, что можно увидеть на Рис. 7. В большинстве случаев это обеспечит 100% покрытие морского дна [28].

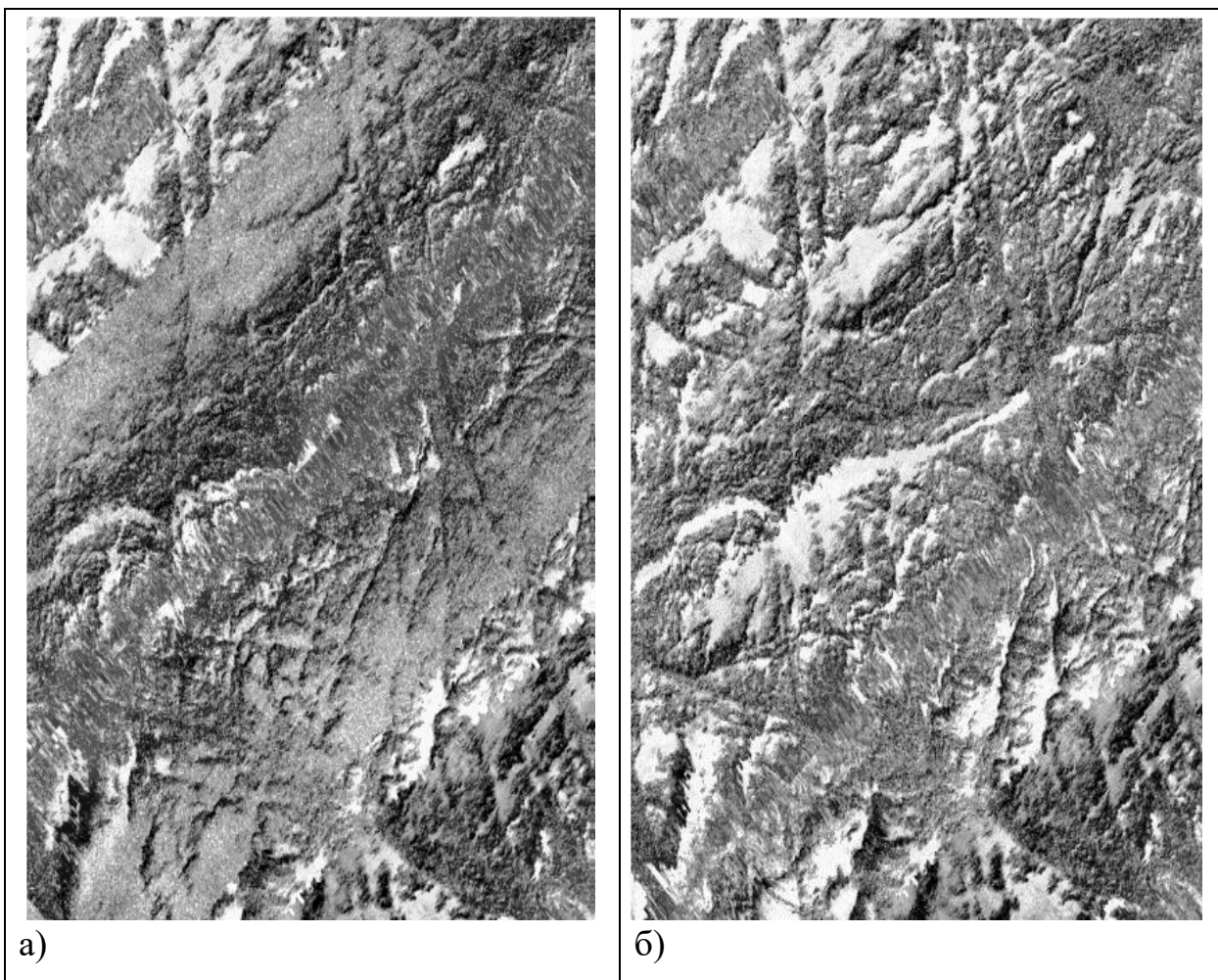


Рис 7. Сравнение между изображениями по данным ГБО (а) и изображениями по данным «сниметами» МЛЭ (б)

Правильная обработка «сниппетов» оказывает значительное влияние на разрешающую способность МЛЭ, обеспечивая улучшенное соотношение «сигнал-шум», позволяя обнаруживать мелкие особенности рельефа дна.

Данные интенсивности в виде временных рядов позволяют в полной мере раскрыть потенциал многолучевых систем в вопросах классификации грунтов.

1.3.3. Объединённый амплитудный временной ряд. Данные классического гидролокатора бокового обзора как опция ГБО многолучевого эхолота

При регистрации данных в режиме ГБО система МЛЭ объединяет данные обратного рассеивания так, что весь принятый сигнал объединяется в две группы: суммарная амплитуда справа от центрального луча и суммарная амплитуда слева от центрального луча (рис. 8), чтобы создать ГБО-подобные временные ряды амплитуды обратного рассеивания.

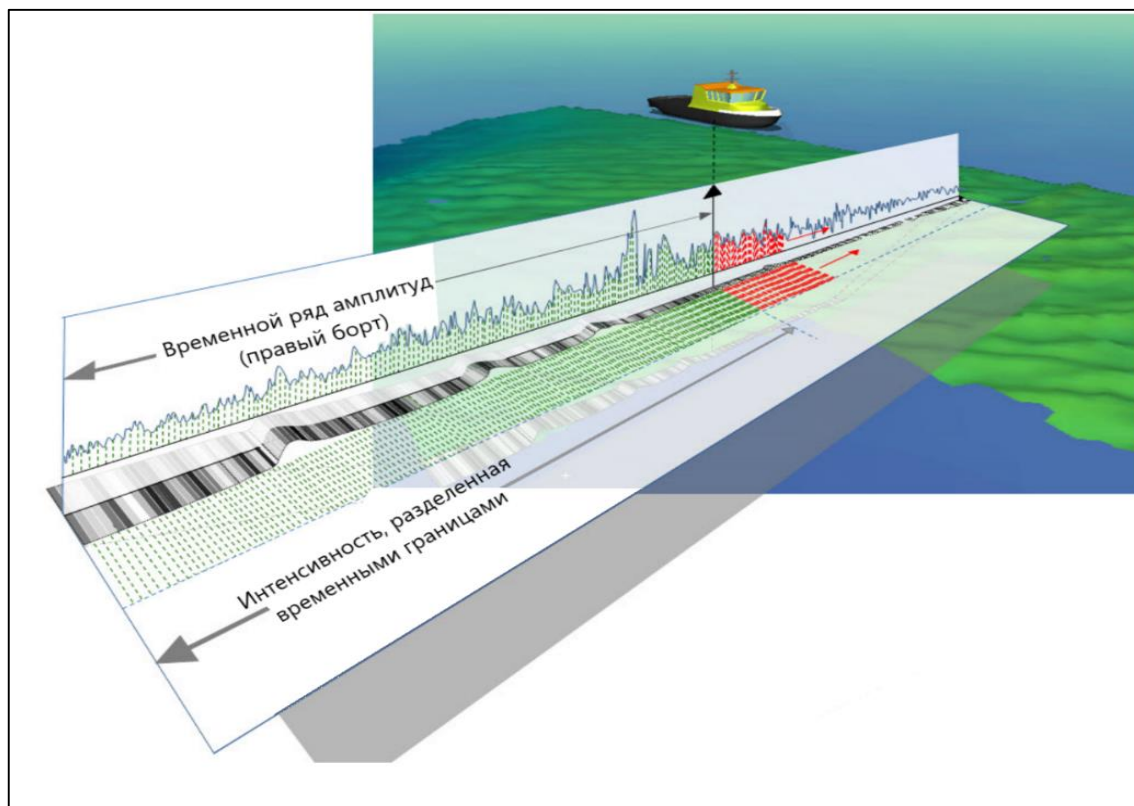


Рис 8. Пример обратного рассеивания, зарегистрированного МЛЭ в режиме ГБО. Сбор данных амплитудного временного ряда.

Основная проблема при объединении сигналов от различных лучей для формирования общего ГБО-подобного ряда заключается в том, что данные соседних лучей, совпадающих по времени, обычно имеют различные амплитуды, так как фрагменты обратного рассеивания искажены диаграммой направленности приёмных лучей. Наиболее подходящий способ обработки перекрывающихся измерений заключается в том, чтобы точно исправить диаграмму направленности огибающих обратного рассеивания для уравнивания перекрывающихся измерений (образцов). Однако реализовать это непросто, поскольку данная процедура предполагает угловую зависимость амплитуды обратного рассеивания в пределах диаграммы направленности (для корректного проецирования во временном интервале), а это требует знания рельефа дна в пределах пятна засветки.

Известно несколько полуэмпирических подходов к решению проблемы с перекрывающимися измерениями соседних лучей, для синтезирования ГБО-подобного ряда, которые реализованы в некоторых МЛЭ. Например, в МЛЭ Reson 7125 оператор может заменить перекрывающиеся измерения либо их среднеквадратической погрешностью, либо средним значением [29].

Не существует стандартного подхода к объединению перекрывающихся огибающих обратного рассеивания в разных лучах. Методы объединения лучей могут различаться от системы к системе и быть неизвестными для некоторых систем. Кроме того, ГБО-подобные ряды, созданные процессором МЛЭ, не связаны пространственно с батиметрическими данными, что делает проблематичным производство совмещённых батиметрических карт и силы ОР.

Данные амплитудного временного ряда (записанные при помощи МЛЭ) выгодно создавать из огибающих обратного рассеивания, связанных с горизонтальными координатами на морском дне, т.е. батиметрическими данными по каждому лучу. В этом случае оператор может выбрать наиболее подходящий алгоритм для объединения перекрывающихся эхо-сигналов от

различных лучей, например метод, основанный на исправлении диаграммы направленности, описанный выше.

1.3.4. Временные ряды амплитуд и углов

Данный метод является разновидностью и дальнейшим развитием амплитудных временных рядов как опции ГБО многолучевых эхолотов. Примером этого метода является технология TruePix от фирмы R2Sonic. Суть метода заключается в объединении амплитудного временного ряда с угловой информацией для каждого временного отрезка: все временные отрезки лучей правого борта «стягиваются» в один временной отрезок, причём каждый образец заполняется самым сильным отражённым эхо-сигналом в данном отрезке. То же самое происходит для лучей левого борта. Визуально данный метод можно увидеть на рис. 9 [30]. Далее весь принятый сигнал объединяется в две группы, как описано в п. 1.3.3. Но весь принятый сигнал является не объединённой суммарной амплитудой с формированием широкого приёмного луча, а амплитудой, собранной из принятых индивидуально сформированных лучей.

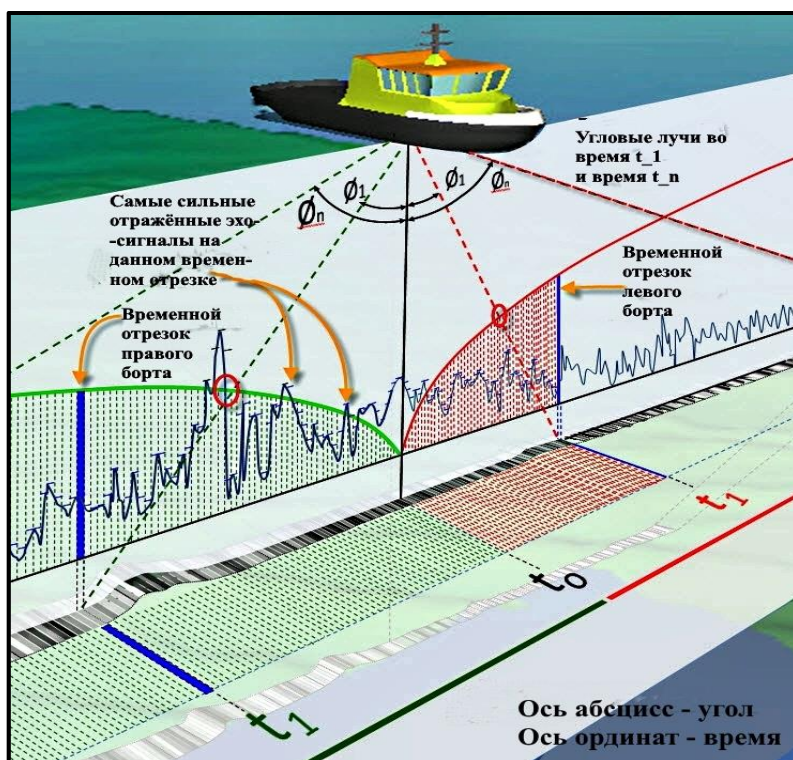


Рис 9. Наглядное представление объединения амплитудного временного ряда с угловой информацией для временных отрезков левого и правого бортов

В отличие от «сниппетов», технология TruePix регистрирует данные с одним значением на каждый временной отрезок, поэтому размеры файлов меньше чем при регистрации «сниппетов». Помимо вышеперечисленного, при регистрации данным способом нет перекрывающихся измерений, которые должны быть объединены и сведены до одного измерения, создавая единообразные и качественные данные. TruePix просчитывает и выводит углы, связанные с каждой точкой изображения, в отличие от «сниппетов», которые регистрируют только угол центральной точки каждого «сниппета». Это увеличивает количество угловых измерений на порядок больше и обеспечивает дополнительный источник информации при распознавании донного грунта.

1.3.5. Единичное значение интенсивности обратного рассеивания луча

Для уменьшения объёма регистрируемых данных в некоторых МЛЭ использован режим записи, где одно значение интенсивности обратного рассеивания записывается для каждого луча (см. рис. 10).

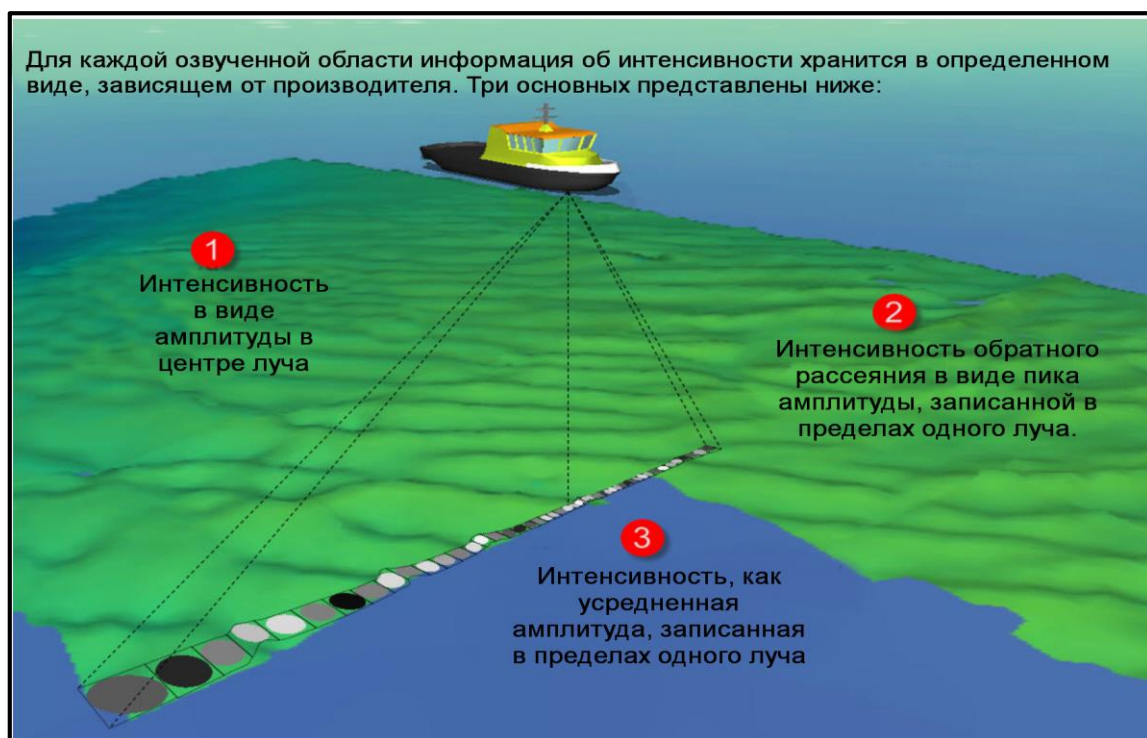


Рис 10. Процесс регистрации данных обратного рассеивания путём измерения единичного значения интенсивности ОР по каждому лучу

Этим значением может быть либо единичное значение интенсивности (огибающей) обратного рассеивания в центре луча, либо интенсивность в виде пиковой амплитуды в пределах каждого луча или же усреднённое значение интенсивности (амплитуды) ОР, вычисленное процессором МЛЭ. Формат записи данных интенсивности (амплитуды) по лучу зависит от фирмы-производителя МЛЭ. Например, если МЛЭ Reson 8125 установлен в режиме «RI-Theta» (дальность, интенсивность, угол луча), процессор эхолота находит пиковую амплитуду каждого «конверта» (envelope) данных ОР морского дна и сохраняет его в отдельном массиве данных, именуемом «intensity» (интенсивность обратного рассеивания), несмотря на то, что это амплитуда, а не интенсивность.

Однако использование пиковой амплитуды (огибающей ОР) или интенсивности ОР приводит к систематическому и значительному завышению силы ОР, измеренной на внешних лучах, когда пятно засветки луча намного больше, чем область озвучивания [31]. Более рациональным подходом, который не приводит к заметным систематическим погрешностям силы ОР, будет являться запись образца конверта ОР, который соответствует или приближен к центру луча, значение которого не обязательно является максимальным.

Описанный подход записи данных ОР имеет ряд недостатков: усреднённая интенсивность может сильно исказить картину в пределах луча, записанные данные не хранят информацию о настройках мощности излучённого сигнала, детализация данных гораздо ниже, чем у данных временных рядов («сниппетов»), трудно скорректировать интенсивность за резкие перепады глубин.

1.4. Выбор метода записи данных обратного рассеивания

Выбор метода записи данных ОР системой МЛЭ зависит от конкретной специфики поставленной задачи исследования морского дна. Запись полного эхо-сигнала сохраняет большую гибкость для последующей постобработки и

позволяет получить данные ОР из водной толщи. Однако для исследования морского дна необходимо стараться поддерживать как можно большую частоту посылок (ping rate) для более высокой детальности съёмки в направлении движения судна. А это может быть недоступно в устаревших МЛЭ (например, Reson 8125). Если же для имеющейся системы МЛЭ запись полного эхо-сигнала невозможна из-за ограничений объёма передачи данных (или скорости передачи данных), то следует обратить внимание на фрагменты огибающей ОР («сниппеты»).

Фрагменты огибающей ОР могут быть использованы для выведения ГБО-подобных рядов и/или вычисления силы ОР по каждому лучу. ГБО-подобные ряды и TruePix могут быть полезны для визуализации морского дна, тогда как интенсивность и значения энергии ОР, измеренные по каждому отдельному лучу, являются более подходящими для измерения силы ОР морского дна и изучения её угловой зависимости. Даже если одного измерения ОР по каждому лучу достаточно для съёмки, полезнее получить его из фрагментов огибающей ОР («сниппетов»), а не просто использовать его в виде отдельного значения, так как это позволяет осуществлять максимальный контроль.

Глава 2. Обработка данных обратного рассеивания: создание карт типов морского дна, анализ данных ОР, создание мозаик и методика распознавания донного грунта

2.1. Обработка данных обратного рассеивания

В случае, когда МЛЭ регистрируется полный эхо-сигнал и далее он используется для обработки, то нам нужно произвести геопривязку фрагментов огибающей ОР с использованием данных батиметрии и извлечь их для расчёта характеристик обратного рассеивания дна.

Перед обработкой данных ОР определяются координаты x , y , z положения центра пятна засветки по каждому лучу, каждой посылки МЛЭ. Данная процедура обычно реализуется в программном обеспечении для обработки батиметрических данных, речь о которых пойдёт в Главе 3. Существует два подхода к обработке данных ОР морского дна.

Первый заключается в вычислении коэффициента ОР поверхности (или силы ОР морского дна) по каждому лучу, который достаточно подробно описан в источнике [32]. Второй способ подразумевает создание ГБО-подобных рядов для лучей левого и правого бортов раскрытия эхолота либо из ГБО-подобных данных, синтезированных самим эхолотом, либо из фрагментов огибающей ОР («сниппетов») морского дна. Для создания мозаик ОР морского дна из перекрывающихся данных МЛЭ также необходимо компенсировать влияние угла падения на силу ОР.

2.2. Составление карт типов морского дна из данных МЛЭ

Основные операции, связанные с составлением карт типов морского дна из данных МЛЭ, проиллюстрированы на рисунке 11. Несмотря на то, что сбор и обработка данных батиметрии МЛЭ (операции 1 (а) и 2 (а) на рис. 11) на текущий момент хорошо развиты, существует множество способов сбора и

обработки данных обратного рассеивания (операции 1 (б) и 2 (б) на рис. 11), которые были описаны в Главе 1.

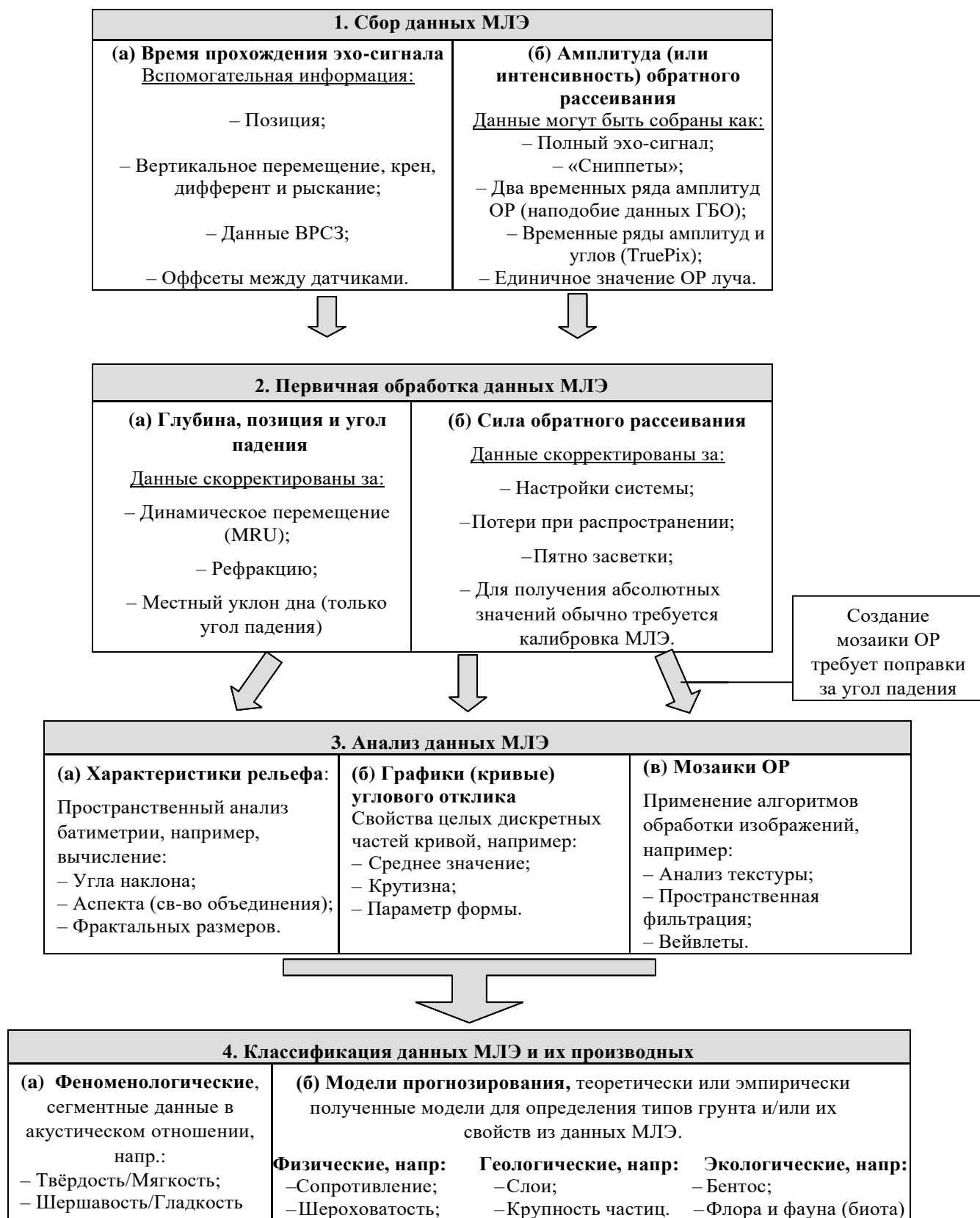


Рис 11. Поток данных МЛЭ для составления карт типов и свойств морского дна. Приведены четыре операции: (1) сбор данных, (2) первичная обработка данных, (3) анализ данных и (4) классификация данных и их производных

Операции 3 и 4 на рисунке 11 иллюстрируют описание основных методов, используемых для создания карт обратного рассеивания морского дна и классификации типов морского дна на основе данных ОР и батиметрии, включая создание и анализ мозаики ОР, а также использование угловой зависимости ОР для характеристики морского дна. Помимо вышеперечисленного, операция 4 на рис. 11 иллюстрирует основные подходы к классификации морского дна с использованием данных МЛЭ.

2.3. Анализ данных обратного рассеивания МЛЭ и распознавание донного грунта

Из различных источников [2] — [5] и экспериментальных наблюдений [6] — [10] хорошо известно, что акустическое обратное рассеивание морского дна зависит от угла падения. Угловая зависимость ОР морского дна, полученная из данных МЛЭ, может использоваться для распознавания различных типов донного грунта.

На рис. 12 представлен график зависимости силы ОР от угла падения трёх типов морского дна в заливе Эсперанс (Австралия) на одном из галсов.

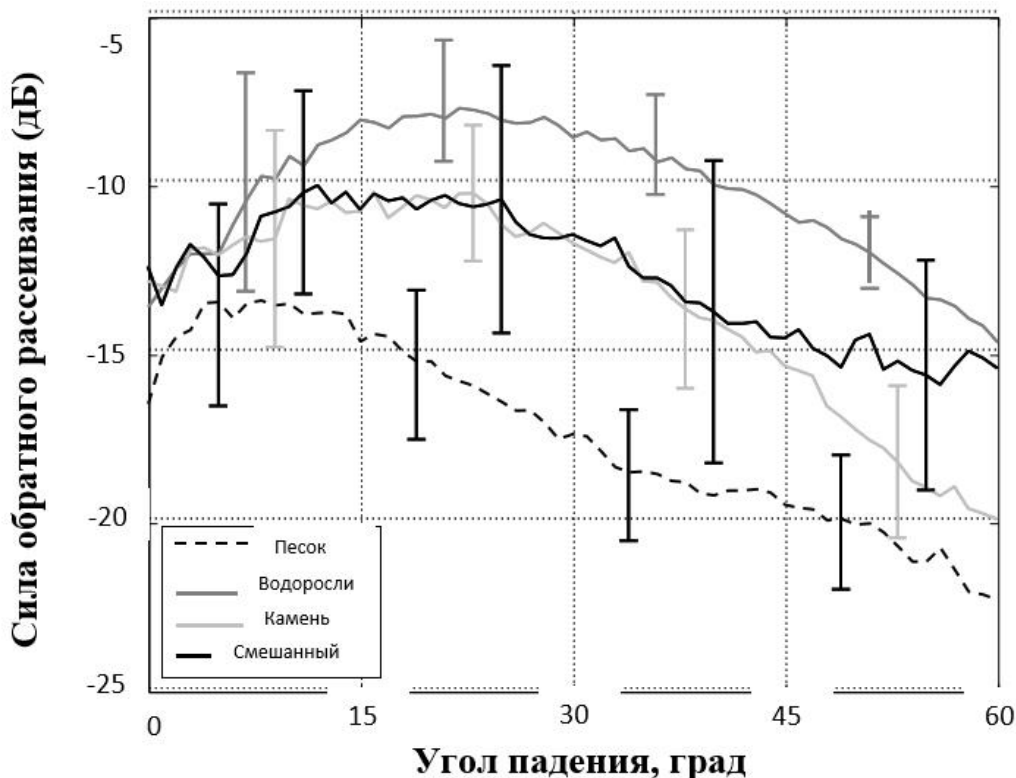


Рис 12. График зависимости силы обратного рассеивания от угла падения трёх основных типов морского дна в заливе Эсперанс

Изыскания производились при помощи МЛЭ Reson SeaBat 8125. Данные силы ОР были обработаны из фрагментов огибающей ОР («сниметов») морского дна, описанных в Главе 1, в п. 1.3.2.

Как было указано выше, в спецификациях к гидрографическим съёмкам типы донных осадков определяются как «пески» (крупные, средние, мелкие), «камни» и «валуны». А более мелкие материалы чем песок классифицируются как «ил» и «глина» [11].

При помощи подводной видеосъёмки было определено, что в данном районе есть три основных типа донного грунта, отмеченные на рисунке 13: слой родолита (известковые красные водоросли) в северной части района работ, средний песок («песок») в южной части и осыхающая скала («скала»), расположенная в юго-западном углу исследуемой зоны. Помимо данных типов имеется область смешанного грунта.

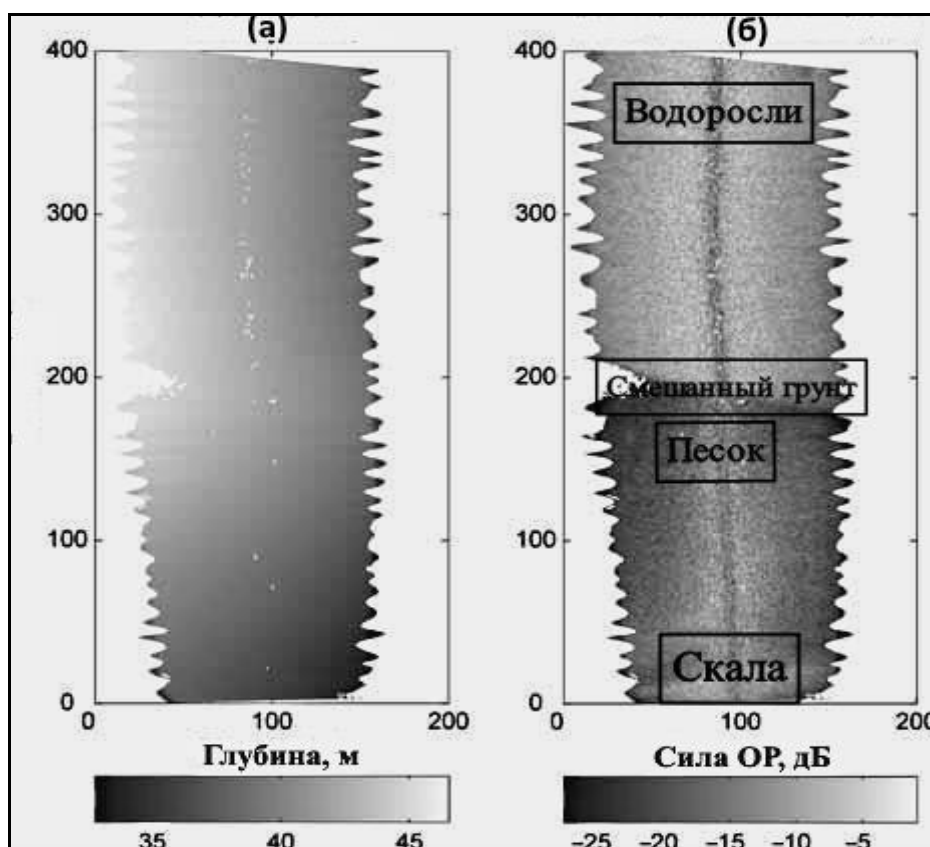


Рис 13. Данные батиметрии (а) и силы обратного рассеивания (б) трёх основных типов морского грунта в заливе Эсперанс

Использование кривых зависимости силы ОР от угла падения в целях распознавания донного грунта может быть сделано либо путём сравнения данных с теоретической моделью, либо же с использованием эмпирического подхода, то есть анализа относительной разницы между угловыми откликами [33].

Наиболее полная процедура анализа угловой зависимости ОР включает в себя определение отличительных угловых областей и вычисление некоторых характерных значений, таких как: средняя интенсивность ОР, средний наклон и вторая производная в пределах каждой области. Обычно предлагаются три отличительные области: почти вертикальные углы ($0 - 15^\circ$), умеренные углы ($15 - 45^\circ$) и малые углы скольжения ($>45^\circ$). Статистические методы также могут быть использованы для определения наиболее полезных параметров угловой зависимости ОР [34].

Отдельно стоит отметить, что для создания мозаик ОР из перекрывающихся областей на галсах нужно использовать подход обработки, заключающийся в корректировании угловой зависимости ОР, в противном случае полученные изображения трудно интерпретировать и классифицировать. В публикации [34] описаны различные методы коррекции угловой зависимости.

Феноменологический подход распознавания донного грунта предполагает корреляцию между морфологическими и физическими свойствами морского дна и данными ОР с данными батиметрии. Исходя из этого, данные объединяются в статистически схожие области (без изменения порядка измеренных данных) и осуществляется пересчёт в действительные физические свойства донного грунта. Наиболее полно феноменологический подход представлен в коммерческом программном обеспечении QTC Multiview. В QTC Multiview изначально извлекаются 132 различных характеристик ОР из данных МЛЭ [35].

Преимущество теоретических моделей состоит в том, что они мало требуют или вообще не требуют контроля (выборки грунта) и могут

потенциально оценивать параметры морского дна (например, средний размер частиц) в отличие от эмпирического подхода. Однако при использовании методов, основанных на теоретических моделях, необходимо чтобы МЛЭ был хорошо откалиброван в дополнение к заложенной в программном обеспечении модели ОР морского дна. Поскольку программное обеспечение, работающее по принципу сравнения данных с теоретической моделью, постоянно совершенствуется, а развитие современных МЛЭ позволяет провести быструю и качественную калибровку, то на данный момент теоретический подход является наиболее распространённым. Одним из самых известных и наиболее используемых в программном обеспечении обработки данных съёмки стал алгоритм «геокодер» (Geocoder), речь о котором пойдёт в п. 2.4. Но не стоит забывать, что наибольшую достоверность и информативность о типе морского дна могут дать только комплексные исследования: дистанционно (акустическими методами) и при помощи средств морской грунтовой съёмки (дночерпатели, драги, виброударные пробоотборники, пенетрометры и т.д.).

Новейшим решением для распознавания донного грунта является алгоритм BRESS (bathymetry- and reflectivity-based estimator for seafloor segmentation — батиметрическая и отражательная оценка для сегментации морского дна), который заключается в объединении и совместной обработке данных батиметрии и мозаики ОР для автоматической сегментации морского дна. Данный метод подробно рассматривается в статье [36].

2.4. Алгоритм «геокодер» (geocoder)

«Геокодер» (GEOCODER) — это программа, разработанная доктором Лучиано Фонсейкой из Центра прибрежного и океанического картографирования (CCOM) в Университете Нью-Хэмпшира. В 2005 году команда учёных университета начала решать задачу, направленную на улучшение набора доступных инструментов обработки данных обратного

рассеивания. Цель была двойственная: разработать простые в использовании инструменты, которые будут создавать «красивые» изображения ГБО или же изображения обратного рассеивания МЛЭ, которые будут пригодны для обнаружения мелких объектов, а также для анализа различных сред обитания и геологических сред. Также цель состояла в разработке инструментов, которые позволят вести количественный анализ данных ОР и поддерживающих задачу распознавания донного грунта и идентификацию малых объектов [37].

Ещё одной целью являлось создание интегрированного набора инструментов, которые позволили бы импортировать данные обратного рассеивания МЛЭ или ГБО из нескольких датчиков в различных формах и форматах, и далее, преобразовывать эти данные во внутренний формат GSF, с последующим исправлением этих данных (где это возможно) за уровни шума, за диаграмму направленности лучей, за коэффициенты усиления, за пятно засветки, за коэффициент затухания и угол падения, а затем или проанализировать и/или отобразить эти данные в мозаике с привязкой по координатам. Результатом всех усилий является «геокодер» — инструмент для создания мозаики, который считывает данные ГБО или МЛЭ в форматах GSF, XTF (или в их собственных форматах) и применяет ряд радиометрических и геометрических поправок к данным, включая поправки за диаграмму направленности лучей. Также в «геокодер» имеется крайне важный алгоритм размытия (feathering algorithm), который позволяет сглаживать переход между перекрывающимися галсами и алгоритм подавления помех, что позволяет создавать мозаику с более низким разрешением, которая не ухудшается даже при наложениях частот. Наклонная дальность исправляется при помощи данных батиметрии, а настраиваемый, изменяемый коэффициент усиления по каждому углу луча (trend-adaptive angle-varying gain), помогает удалить артефакты, которые появляются, когда разные типы грунта находятся по всей полосе обзора МЛЭ. Галсы могут быть удалены или выложены мозаикой, а

область перекрытия между параллельными галсами может регулироваться [37].

Геокодер также поддерживает пакет статистических данных, который идентифицирует структуры в сигнале ОР, используемые для определения характеристик морского дна. Статистические данные, рассчитанные для ячеек обратного рассеивания, включают в себя: среднюю величину, форму, область изменения, минимальную и максимальную величины, среднее квадратическое отклонение (СКО), дисперсию, процентиля и квантили, коэффициенты асимметрии, эксцессы распределения, моменты любого порядка, а также параметры, извлечённые из полутоновой матрицы совместного появления (co-occurrence matrix): контрастность, однородность, неоднородность, энтропия и энергия. Используя поправки, применённые для данных ОР, «геокодер» также служит в качестве первоначального компонента для подхода к использованию данных обратного рассеивания МЛЭ в целях характеристики морского дна, называемого АРА (Angular Range Analysis, ранее известного как АВО) [37].

С момента своего создания, «геокодер» стал простым в использовании инструментом для создания высококачественных мозаик ГБО или мозаик ОР МЛЭ. К этому программному обеспечению был огромный интерес от NOAA, промышленных предприятий, а также различных учреждений [36].

Спрос на использование «геокодер» крайне высок. Полный список поддерживаемых систем и форматов приведён в таблице 1 [37]:

Таблица 1 – Поддерживаемые системы и форматы алгоритма «геокодер»

№	Фирма-производитель МЛЭ (ГБО)	Расширение файлов	Способ записи данных обратного рассеивания
1	Kongsberg/Simrad	*.all	Полный эхо-сигнал, «сниметы», единичное значение ОР луча, данные ГБО
2	Reson	*.xtf, *.s7k	«Сниметы», единичное значение ОР луча, амплитудный временной ряд
3	ГБО фирмы Klein	*.sdf, *.sdf2	Данные ГБО.
4	ГБО различных фирм	*.xtf, *.hsx	Данные ГБО.
5	МЛЭ различных фирм	*.gsf	Единичное значение ОР луча, «сниметы»
6	Wärtsilä (МЛЭ Seabeam)	-	Единичное значение ОР луча, амплитудный временной ряд

7	Geoswath	*.rdf	Геопривязанные данные ГБО
8	C3D	*.xtf	Данные ГБО
9	R2Sonic (технология TruePix)	*.r2s	Геопривязанные данные амплитудного временного ряда

Лицензии для «геокодер» были выпущены для фирм: Caris, Reson, Fugro, Triton, Hypack, IVS 3D, Chesapeake Technology.

«Геокодер» является программным инструментом, предназначенным для приёма различных форм акустического обратного рассеивания и построения согласованных и геопривязанных мозаик донного грунта. Обработка данных начинается с первичных собранных данных (raw data), то есть исходных данных, зарегистрированных во время съёмки, без какой-либо дополнительной обработки. Данные, которые может принять система для обработки, приведены в таблице 1. Реализованный алгоритм радиометрически исправляет интенсивность (амплитуду) ОР, регистрируемые ГБО и/или МЛЭ, а затем геометрически корректирует и позиционирует каждый акустический объект в финальной мозаике ОР, в чётко выбранной проектной системе координат [38].

Алгоритм «геокодер» реализован с интерактивным графическим пользовательским интерфейсом, который позволяет визуализировать навигационный трек и мозаики ОР и структурирован с использованием объектно-ориентированных методов. Основными объектами его структуры данных являются: озвученные линии (галсы), сонарные мозаики и ячейки обратного рассеивания. Мозаичные объекты имеют информацию о проекции, разрешении и гистограммах финальной мозаики. Мозаичный объект определяется как массив ячеек обратного рассеивания, а не только пикселей. Один объект ячейки может хранить до двух измерений МЛЭ (ГБО), каждое измерение состоит из значения силы ОР, источника измерений (галс) и качества измерения. В конечном счёте, процедура создания мозаики определяется как метод, который распределяет (отображает) многочисленные освещённые (озвученные) объекты в один мозаичный объект [38].

Глава 3. Рассмотрение методов обработки данных обратного рассеивания в ЭГИС HYPACK MAX и в программе постобработки и трёхмерной визуализации данных съёмки «Fledermaus»

3.1. Обработка данных обратного рассеивания в ЭГИС HYPACK MAX

Программное обеспечение HYPACK на данное время является одним из наиболее широко используемых в мире гидрографических пакетов для выполнения съёмки рельефа дна и последующей обработки. HYPACK MAX позволяет выполнять гидрографические и магнитометрические съёмки, а также съёмку посредством ГБО. Данная ЭГИС предоставляет универсальный инструментарий, который позволяет выполнять: планирование, сбор данных, использование поправок (за уровень моря, за вертикальное распределение скорости звука в воде, за динамическое перемещение судна и др.), удаление сбойных глубин и помех, подготовку планшетов, экспорт данных в САД-системы, расчёт объёмов, создание изобат и мозаик обратного рассеивания, а также создания и обновления морских электронных карт.

Алгоритм «геокодер» был лицензирован HYPACK. Данная ЭГИС включает две версии Geocoder: 32-битную и 64-битную. Для работы с Geocoder в пакете обработки HYSWEEP нужно выбрать SIDE SCAN-GEOCODER. На рисунке 14 приведена схема предварительной обработки данных съёмки перед их загрузкой в «геокодер». Как было указано в параграфе 2.4., «геокодер» можно использовать для работы со следующими файлами [39]:

- Файлы с расширением HSX, HS2, содержащие данные сонограмм. Данные можно получить от обычных ГБО (Edgetech, Klein и т.д.);
- Файлы с расширением HS2/GSF от высокочастотных МЛЭ (Reson, R2Sonic и т.д.);

- Файлы с расширением XTF, созданные в HYPACK или другом программном обеспечении также поддерживаются.

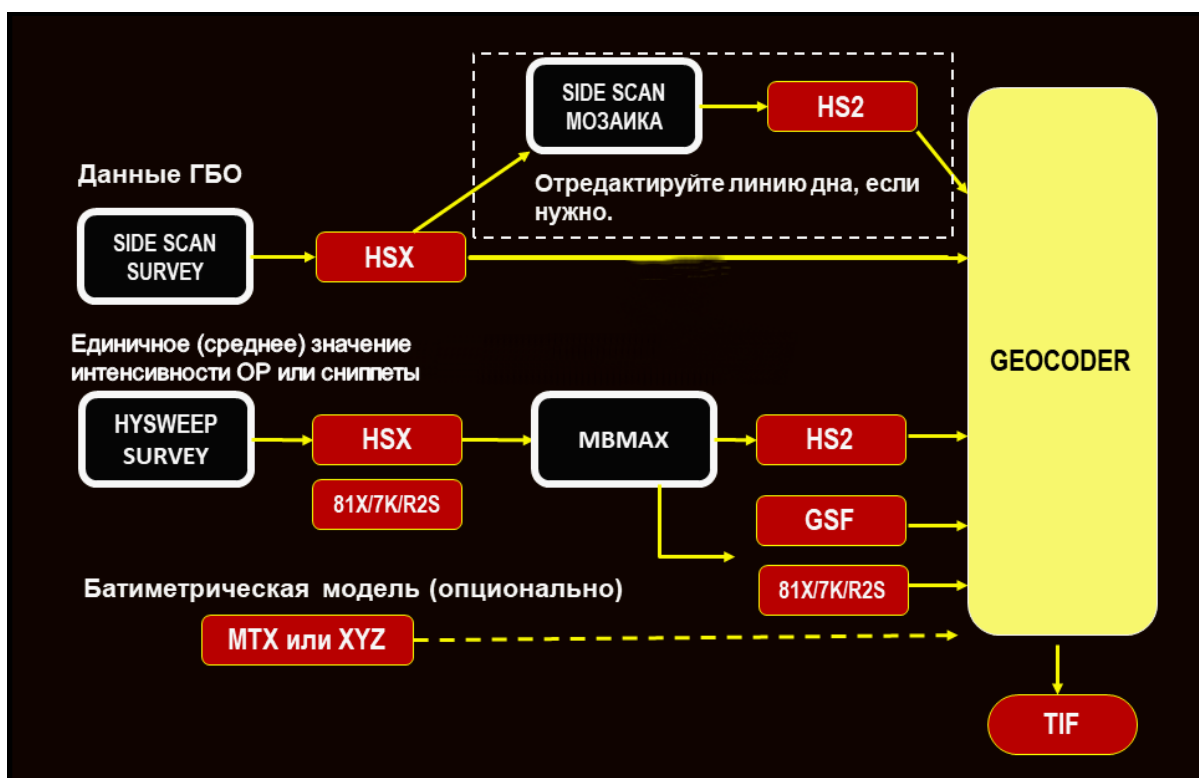


Рис. 14. Подготовка исходных данных для последующей обработки в «геокодер»

Первым шагом будет добавление файлов. Исходные данные для получения мозаик ОР в ЭГИС Нураск проиллюстрированы на рисунке 15. Поддерживаются следующие типы данных: «сниметы» МЛЭ (HS2/GSF), сонограмма ГБО (HSX/HS2), единичное (среднее) значение интенсивности ОР МЛЭ в записях RMB (HS2/GSF). Кроме этого, можно добавить данные батиметрии (цифровая модель рельефа дна в форматах XYZ, MTX), это позволит улучшить мозаику ОР с помощью алгоритмов усиления сигнала в зависимости от угла отражения [39].

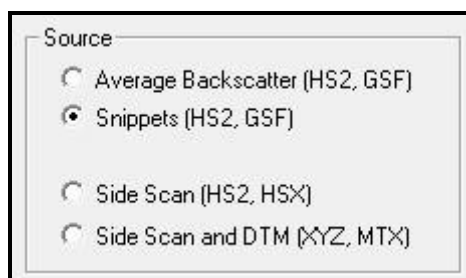


Рис. 15. Исходные данные для получения мозаик ОР в ЭГИС Нураск MAX

Помимо вышеперечисленных типов, поддерживаются также данные с расширением R2S (технология TruePix, описанная в Главе 1). Для обработки данных с расширением R2S перед началом съёмки нужно настроить специализированный драйвер для регистрации файлов с расширением R2S, которые обычно находится рядом с файлами HSX в папке проекта HYPACK [40]. Для обработки файлов R2S нужно выбрать опцию Non-HYPACK® Imagery в окне выбора исходных данных. Загруженную мозаику ОР можно сохранить в файл GeoTIF (GeoTIF и соответствующий файл с привязкой TFW будут сохранены в папке проекта HYPACK).

Вторым шагом обработки будет установление опций мозаики. После того, как мы добавили файлы, «геокодер» вычислит размер будущего графического файла с расширением GeoTIF и его текущее разрешение (Image Size) – в мегапикселях. Мы можем менять разрешение, которое влияет на размер изображения и его чистоту. Большее разрешение приведёт к созданию файла меньшего размера, но с худшим качеством изображения. Также мы можем изменить размер участка построения мозаики.

Третий шаг – создание мозаики. На рисунке 16 показана созданная мозаика, состоящая из пяти перекрывающихся галсов.

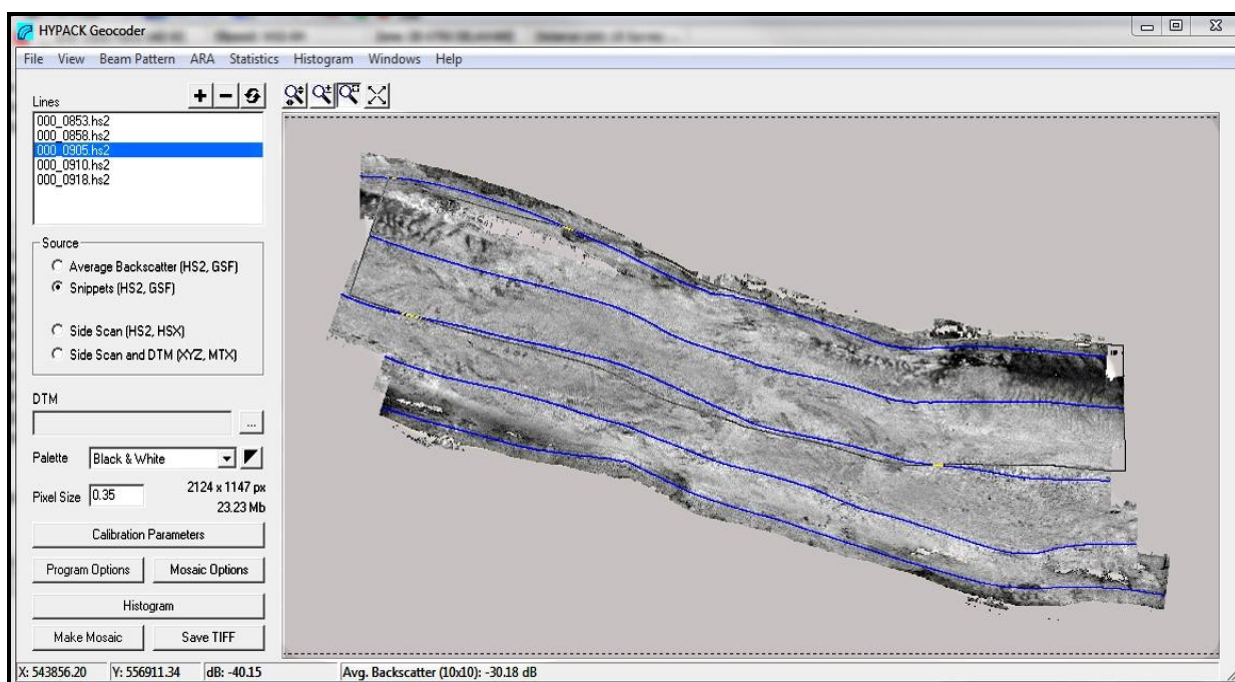


Рис. 16. Созданная мозаика из пяти перекрывающихся галсов в ЭГИС Нураск

Четвёртый шаг – классификация донного грунта посредством анализа угла отражённого эхосигнала (ARA). Классификация производится в три этапа:

1. Вычисление ARA для мозаики;
2. Выбор полосы обзора в мозаике, по которой будет производиться классификация донного грунта;
3. Запуск процедуры анализа угла отражённого эхосигнала – Patch ARA.

Этапы отражены на рисунке 17.

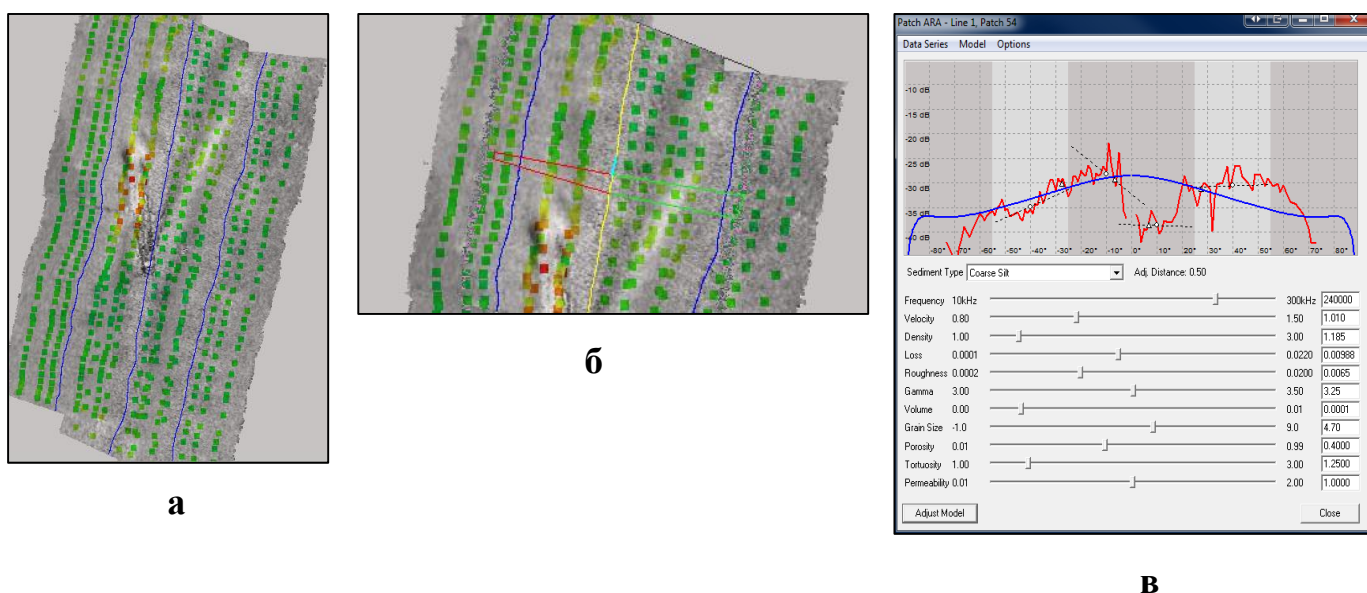


Рис. 17. Три предварительных этапа для классификации донного грунта в ЭГИС Нураск:

а – вычисление угла отражённого эхосигнала для мозаики;

б – выбор полосы обзора в мозаике, по которой будет производиться классификация донного грунта;

в – запуск процедуры анализа угла отражённого эхосигнала – Patch ARA

Заключительным и пятым шагом будет мозаичное отображение результатов классификации донного грунта и его сохранение в файле расширения *.dxf в папке проекта Нураск. Результат классификации донного грунта в ЭГИС Нураск можно увидеть на рисунке 18: различные типы донного грунта графически классифицируются при помощи разных цветов. Слева на рисунке располагается цветовая шкала, помогающая определить тип грунта в той или иной части исследуемой акватории.

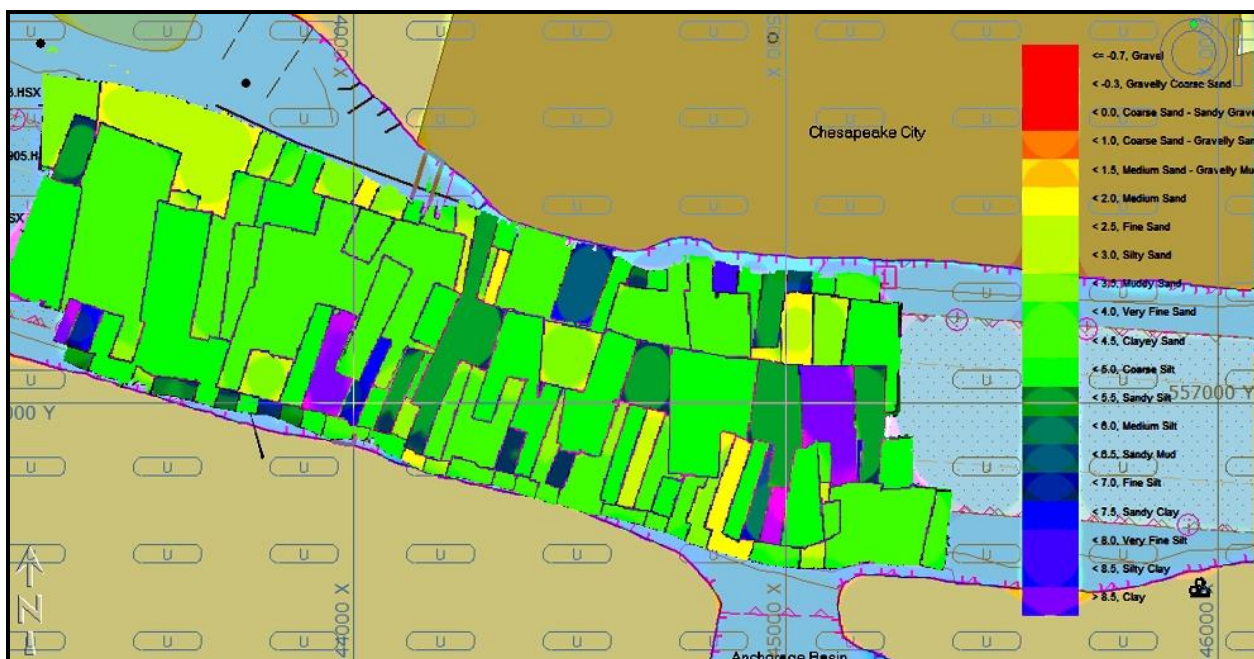


Рис. 17. Результат классификации донного грунта в ЭГИС Нураск посредством алгоритма «геокодер»

3.2. Обработка данных обратного рассеивания в программе постобработки и трёхмерной визуализации данных съёмки «Fledermaus»

Программа постобработки и трёхмерной визуализации данных съёмки Fledermaus – лидер среди средств обработки и анализа геопространственных данных. Коммерческие, научные и государственные организации используют Fledermaus для работы с большими массивами данных различных типов для морского и континентального картосоставления. Интуитивная 4-мерная среда позволяет пользователям быстро разобраться и увеличить скорость, эффективность обработки данных, а также точность контроля качества и анализа данных [41].

Fledermaus позволяет отображать данные с телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов, судов или других объектов в режиме реального времени. Применяются площадные методы обработки, что значительно экономит время [42].

В качестве дополнительной информации при обработке могут использоваться растровые карты, сетка координат, электронные навигационные карты, изобаты и т.п. В Fledermaus также можно создавать фильмы в форматах WMV или MPEG с имитацией полётов над дном [41].

Одним из главных инструментов Fledermaus является FMGeocoder Toolbox (FMGT), который создан преимущественно для отображения и анализа данных обратного рассеивания (интенсивности или амплитуды отражённого сигнала) МЛЭ и в меньшей степени данных ГБО. По мере преобразования данных в мозаику, выполняется максимально большое количество коррекций для повышения информативности полученного отражённого сигнала.

Программный инструмент FMGT может работать с составными файлами обратного рассеивания, вводить поправки и создавать мозаику ОР. После того, как мозаика создана, может быть вычислена статистика, а также возможен экспорт значений в различные форматы. Также можно использовать алгоритм анализа угла отражённого эхосигнала (ARA) в целях распознавания донного грунта.

В FMGT поддерживаются следующие типы данных:

- GSF – файлы, содержащие единичное (среднее) значение по лучу или временные ряды луча («сниметы»). Могут быть использованы при создании мозаик.
- XTF – файлы, содержащие данные ГБО. Могут быть также использованы при создании мозаик. Однако поддержка обработки данных минимальна, поскольку основная цель FMGT – обрабатывать данные МЛЭ (единичное значение по лучу и «сниметы»).
- GSF/XTF (парные файлы) – используются для обработки данных МЛЭ Reson или R2Sonic, где глубины МЛЭ поступают из файла GSF, а данные «сниметов» хранятся в файле XTF. FMGT создаст новый файл с расширением GSF, содержащий как глубины МЛЭ, так и данные «сниметов».

- GSF/S7K (парные файлы) – используются для обработки данных МЛЭ Reson, где глубины МЛЭ хранятся в файле GSF, а данные «сниметов» сохраняются в файле S7K. FMGT создаст новый файл с расширением GSF, содержащий как глубины МЛЭ, так и данные «сниметов».
- Kongsberg (файлы с расширением *.all) – нужно предварительно импортировать данные в формате *.all в базу данных QINSy для проигрывания и создания данных в формате XYZ. Подробный алгоритм действий указан в источнике [43].

На рисунке 18 приведена схема загрузки и обработки данных съёмки в инструменте FMGT.

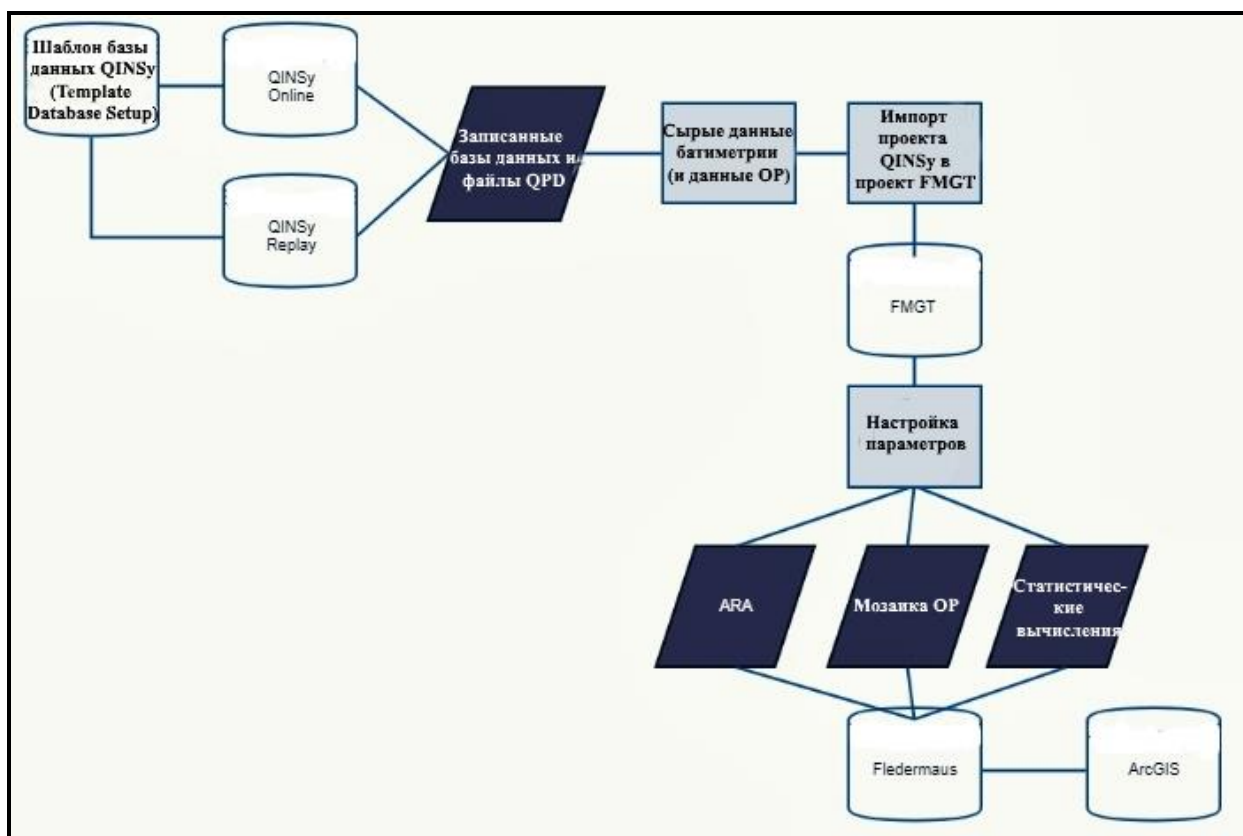


Рис. 18. Схема загрузки и обработки данных съёмки в инструменте FMGT

Как мы видим из рисунка 18, первым шагом будет установка параметров регистрации данных ОР в шаблоне базы данных ЭГИС QINSy. Эта операция производится перед началом съёмки. На рисунке 19 проиллюстрированы параметры регистрации данных ОР для для современных МЛЭ Reson Seabat 7K (модели 7125, 7101, 7111 и т.д.). Выбрана опция регистрации «сниметов».

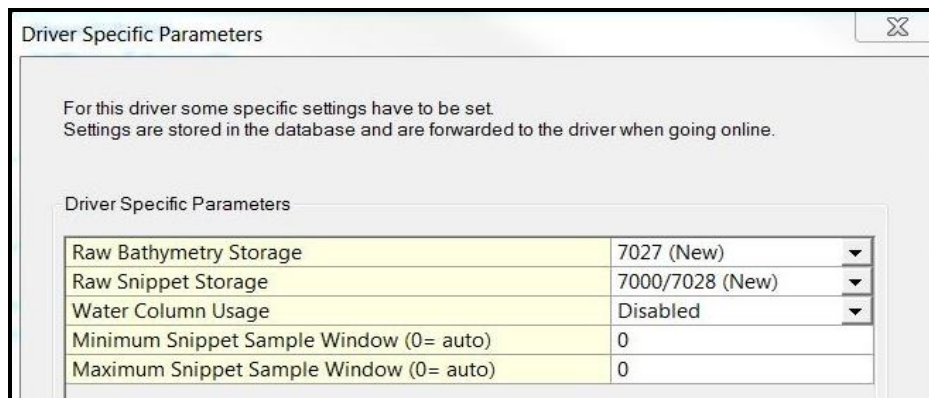


Рис. 19. Установка параметров регистрации данных ОР для современных МЛЭ Reson Seabat 7K

Второй шаг будет заключаться в получении первичных (сырых) данных съёмки (файлов с расширением QPD). Их мы получим непосредственно при съёмке рельефа дна. Также мы можем получить их при проигрывании данных съёмки (режим Replay). Как видно по схеме на рисунке 18, в файлах QPD содержатся первичные данные батиметрии и данные ОР.

Третьим мы шагом мы импортируем проект ЭГИС QINSy в проект FMGT, нужные файлы QPD также будут импортированы. Импорт проекта производится в несколько этапов:

1. Создание проекта и выбор системы координат в инструменте FMGT.
2. В зависимости от используемого МЛЭ настроить плагины, которые необходимо использовать для обработки (Settings > Processing Parameters > Edit Default), по умолчанию выставлен плагин «трубопровод» (pipeline).
3. Данный этап нужно выполнить из-за неправильной реализации вычислений временной регулировки усиления фирмы Reson в алгоритме «геокодер». Если известно, что временная регулировка усиления была использована при регистрации данных в МЛЭ Reson, то должна быть установлена опция «Reson de-TVG Corrections», для обеспечения правильного значения поглощения звука в водной среде ($\frac{\text{Дб}}{\text{км}}$). Правильное значение можно вычислить при помощи различных алгоритмов. Например, в источнике [44] Национальной физической лабораторией

Великобритании предложены три алгоритма вычислений. При использовании иных МЛЭ (Kongsberg, R2Sonic) данный этап можно пропустить.

4. Импортировать проект QINSy. FMGT автоматически выберет все данные в проекте. На рисунке 20 проиллюстрирована операция импорта данных проекта QINSy в FMGT.

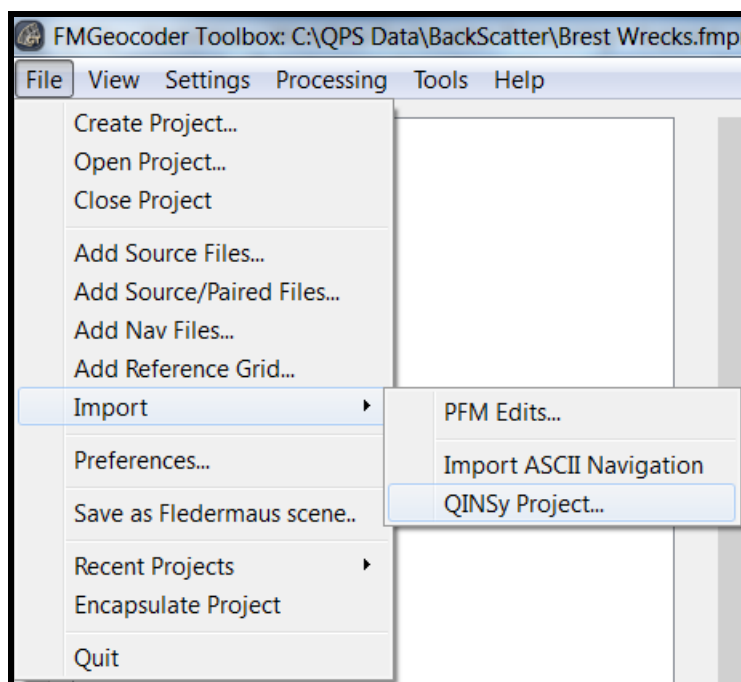


Рис. 20. Импорт данных проекта QINSy в FMGT

5. Установить опцию использования двухантенного МЛЭ (Dual head), если он был задействован при съёмке. В таком случае предпочтительнее объединить файлы обеих антенн в один файл GSF, который используется по умолчанию.

Четвёртый шаг – настройка параметров мозаики ОР (см. рис 18). Как и в ЭГИС Нураск, в FMGT мы можем менять разрешение мозаики (размер ячейки и размер статистики), а также выбрать размер участка построения мозаики (длина и ширина). Перечисленные опции проиллюстрированы на рисунке 21.

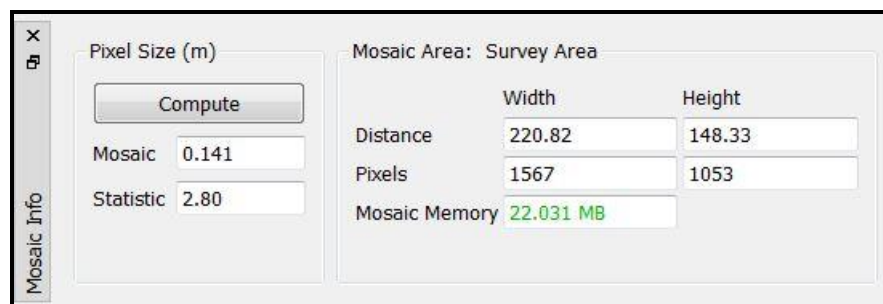


Рис. 21. Настройка параметров мозаики ОР: размер ячеек и размер участка построения мозаики

Пятый шаг – обработка данных ОР для получения мозаик классификации донного грунта. На рисунке 22 представлены опции автоматической обработки для получения классификации донного грунта по данным «снимков» (Beam Time Series). Визуально можно отобразить несколько слоёв: слой мозаики (Mosaic) для классификации донного грунта, слой статистики (Statistics) и слой угла отражённого эхосигнала (ARA). Анализируя совокупность этих слоёв, можно распознать грунт морского дна с высокой достоверностью и точностью.

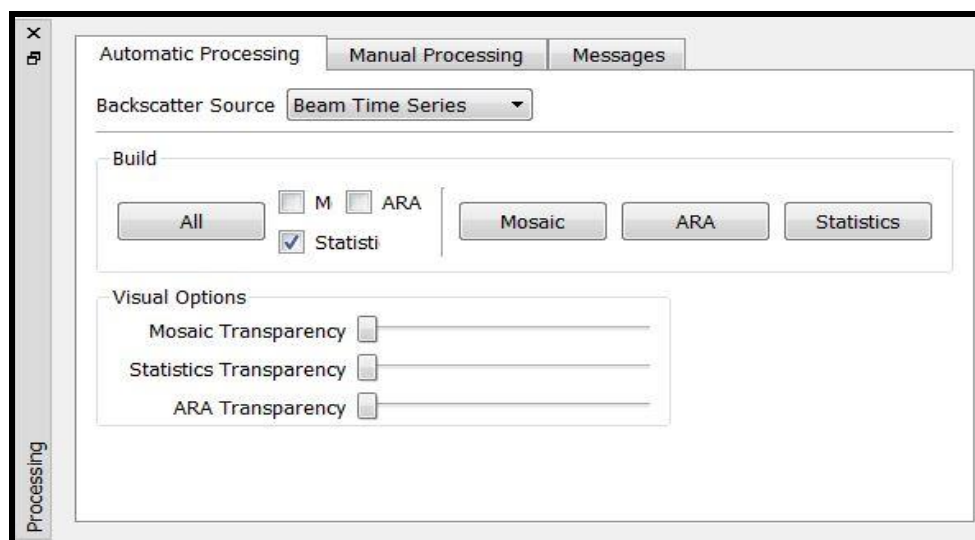


Рис. 22. Опции автоматической обработки для получения классификации донного грунта по данным «снимков» (Beam Time Series)

Шестой шаг – получение мозаичного отображения результатов классификации донного грунта в файле расширения *.scene. А также его последующий экспорт в файлы CAD (расширения *.dxf или *.dwg), или в графический файл GeoTiff, или в файл расширения *.sd.

Результат классификации донного грунта в Fledermaus можно увидеть на рисунке 23. Были созданы и отображены следующие слои: батиметрия в форме цифровой модели рельефа дна, сила ОР («сниппеты»), мозаика угла отражённого эхосигнала (ARA) и слой с классификацией донного грунта. Красный цвет – предположительно глина, коричневый цвет – предположительно песчаная глина и илистая глина, голубой цвет – предположительно песчаный ил (супесь), синий цвет – предположительно крупнозернистый алевролит.

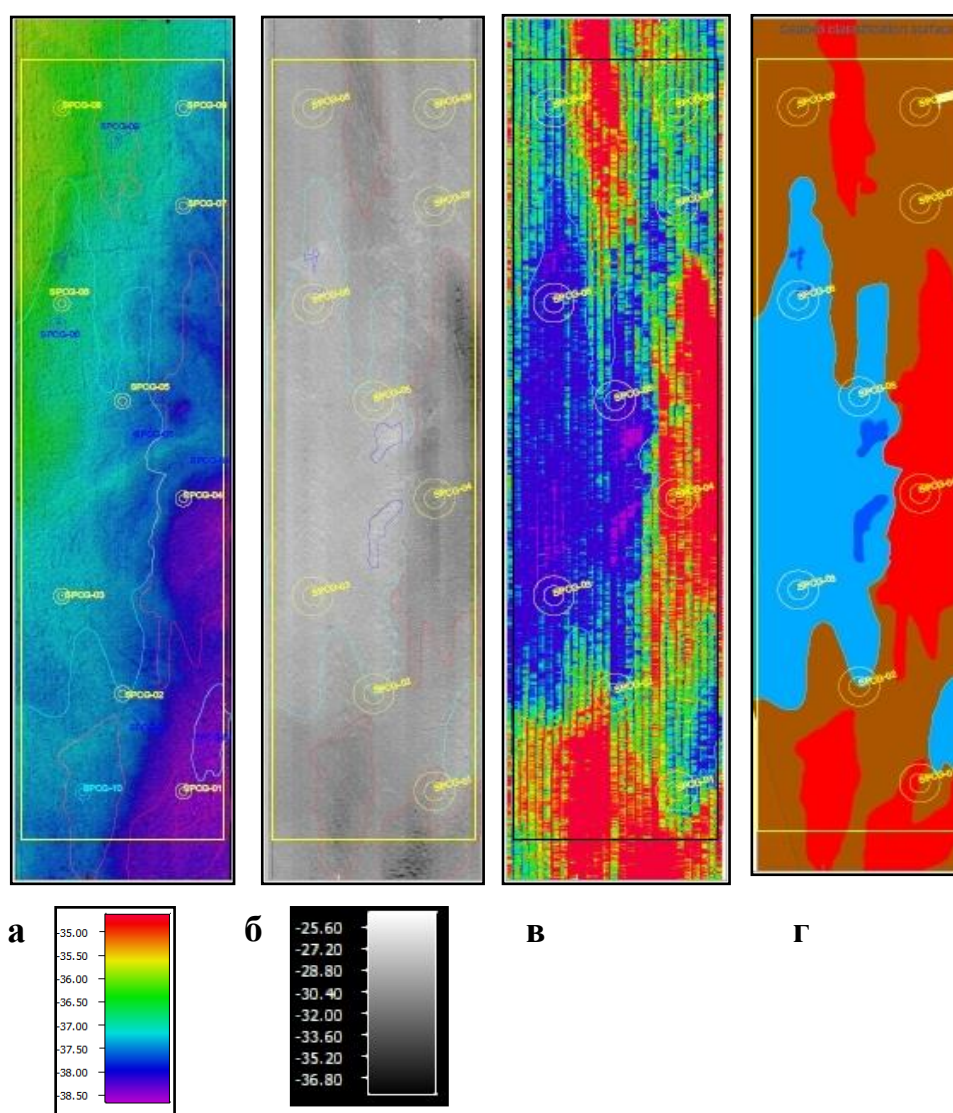


Рис. 23. Результат классификации донного грунта в инструменте в Fledermaus посредством алгоритма «геокодер»:

- а – цифровая модель рельефа дна и цветовая шкала глубин в метрах;
- б – данные обратного рассеивания «сниппетов» (сила ОР) и шкала силы ОР в дБ;
- в – мозаика угла отражённого эхосигнала (ARA);
- г – классификация донного грунта

Данные были собраны в Татарском проливе (залив Чихачёва). Участок построения мозаики (размер участка исследований) 2x4 км.

Сбор данных батиметрии и ОР производился при помощи МЛЭ R2sonic 2024. Способ регистрации данных обратного рассеивания – «сниппеты» (временной ряд значений амплитуды). Данные батиметрии были предварительно исправлены за вертикальное распределение скорости звука, за поглощение звуковой энергии в водной среде (absorption), за потери на расширение диаграммы (spreading loss), за излучаемую мощность, за усиление сигнала при приёме, за частоту посылок, за длину излучающего импульса и за динамическое перемещение судна [45].

В заключение необходимо отметить, что сбор данных обратного рассеивания зависит от многих параметров, которые должен учитывать оператор в процессе сбора данных. На интенсивность обратного рассеяния влияет [33]:

- Частота дискретизации (sampling rate);
- Частота акустической посылки;
- Максимальный угол обзора;
- Количество сформированных лучей;
- Разрешение луча;
- Вертикальное распределение скорости звука в воде;
- Длина излучаемого импульса;
- Потери за расширение диаграммы (spreading loss);
- Излучаемая мощность (TX Power);
- Усиление на приеме (RX Gain);
- Абсорбция.

Заключение

В настоящее время при картографировании дна океанов и морей и при решении задач научного, экономического и военного характера на их акваториях требования к изучению характеристик донного грунта постоянно возрастают. Используются как традиционные контактные средства морской грунтовой съёмки, такие как дночерпатели, драги или коробчатые пробоотборники, так и бесконтактные, в число которых входят акустические методы распознавания донного грунта.

В данной работе мы обосновали актуальность использования технологии акустического распознавания донного грунта при выполнении гидрографических работ. Рассмотрели и обобщили способы сбора данных обратного рассеивания, реализованных в современных МЛЭ, что позволит нам более правильно и ответственно подойти к регистрации данных подобного рода, а также даст возможность верно выбрать метод записи для решения конкретной прикладной задачи.

Для получения основных понятий о работе программного обеспечения обработки и представления результатов в целях распознавания донного грунта, мы кратко рассмотрели обработку данных ОР и их анализ на основе алгоритма «геокодер», изучили основные операции, связанные с созданием карт (мозаик) типов донного грунта. Коснулись новейшего алгоритма для распознавания донного грунта (алгоритм BRESS).

Необходимо отметить, что вследствие сравнительно простой обработки в программном обеспечении данные ОР могут быть использованы для оперативного планирования работ. Но не стоит забывать, что наибольшую достоверность и информативность о типе морского дна могут дать только комплексные исследования: дистанционно (акустическими методами) и при помощи средств морской грунтовой съёмки (дночерпатели, драги, виброударные пробоотборники, пенетрометры и т.д.). Исследования подобного рода должны сопровождаться параллельной (независимой)

обработкой данных, что обеспечит максимальный контроль и получение более точной картины распределения грунтов.

И в заключение мы поэтапно изучили обработку данных в наиболее распространённом на сегодняшний день программном обеспечении: в ЭГИС НУРАСК МАХ и в программе постобработки и трёхмерной визуализации данных съёмки Fledermaus.

Заострив внимание на исследуемых вопросах, мы получим возможность повысить качество, достоверность и информативность финальных результатов при решении задач различного характера в инженерных изысканиях, связанных с распознаванием донного грунта.

Список используемых источников

1. Справочник гидрографа по терминологии. – Л.: ГУНиО МО СССР, 1984. – 249 с.
2. Сташкевич А.П. Акустика моря. М.: Судостроение, 1966. – 350 с.
3. Доклады XV школы-семинара им. акад. Л.М. Бреховских “Акустика океана”, совмещённой с XXIX сессией Российского Акустического Общества. М.: ГЕОС, 2016. – 444 с.
4. Акустический журнал [Электронный ресурс] / Коллектив авторов, Редакция «Акустического журнала», 1955-2018 гг. – М.: akzh.ru, 2018. – Режим доступа: <http://www.akzh.ru>, свободный. – Загл. с экрана.
5. De Moustier, Christian. Beyond bathymetry: Mapping acoustic backscattering from the deep seafloor with Sea Beam / De Moustier, Christian // The Journal of the Acoustical Society of America. – 1986. – № 79 (2). – С. 316–331.
6. Kleinrock, M. C. Capabilities of some systems used to survey the deep-sea floor / Kleinrock, M. C. // CRC handbook of geophysical exploration at sea, edited by R. A. Geyer. – 1992. – № 2. – С. 35–86.
7. Processing and interpretation of 95 kHz backscatter data from shallow-water multibeam sonars / Clarke, J. E. [и др.] // OCEANS’93. Engineering in Harmony with Ocean. – 1993. – № 1. – С. 437–442.
8. Interpretation of Sea Beam backscatter data collected at the Laurentian fan off Nova Scotia using acoustic backscatter theory / Robert C. Tyce [и др.] // The Journal of the Acoustical Society of America. – 1995. – № 97 (3). – С. 1545–1558.
9. Contribution of multibeam acoustic imagery to the exploration of the sea bottom / Augustin, J. M. [и др.] // Marine Geophysical Researches. – 1996. – № 18 (2). – С. 459–486.
10. Mitchell, Neil C. Processing and analysis of Simrad multibeam sonar data / Mitchell, Neil C. // Marine Geophysical Researches. – 1996. – № 18 (6). – С. 729–739.

11. Nos hydrographic specifications and deliverables [Электронный ресурс] – Введ. 2017-04-01. – Режим доступа: <https://nauticalcharts.noaa.gov/publications/docs/standards-and-requirements/specs/hssd-2017.pdf>, свободный. – Загл. с экрана.
12. СП 47.13330.2012. Инженерные изыскания для строительства [Электронный ресурс] – Введ. 2013-07-01. – Режим доступа: <http://meganorm.ru/Index2/1/4293788/4293788799.htm>, свободный. – Загл. с экрана.
13. ГОСТ 5180-2015. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик [Электронный ресурс] – Введ. 2016-04-01. – Режим доступа: <http://internet-law.ru/gosts/gost/61055/>, свободный. – Загл. с экрана.
14. ГОСТ 25100-2011. Грунты. Классификация [Электронный ресурс] – Введ. 2013-01-01. – Режим доступа: <http://www.internet-law.ru/gosts/gost/52227>, свободный. – Загл. с экрана.
15. ГОСТ 28168-89. Почвы. Отбор проб [Электронный ресурс] – Введ. 1990-03-31. – Режим доступа: <http://www.internet-law.ru/gosts/gost/38689/>, свободный. – Загл. с экрана.
16. Фирсов Ю. Г. Способы сбора данных обратного рассеивания морского дна, реализованные в современных многолучевых эхолотах / Ю. Г. Фирсов, Е. Н. Колосков, Б. А. Корнипаев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. – 2016. – № 6 (40). – С. 95–105.
17. Herman Medwin. Fundamentals of Acoustical Oceanography/ Herman Medwin, Clarence S. Clay. – М.: Academic Press, 1998. – 712 с.
18. Hellequin L. Processing of high-frequency multibeam echo sounder data for seafloor characterization / Hellequin L., Boucher JM, Lurton X. // IEEE Journal of Oceanic Engineering. – 2003. – № 28. – С. 78–89.
19. SeaBat 7125 - Survey Equipment Services [Электронный ресурс] / Teledyne Marine – М.: teledynemarine.com, 2018. – Режим доступа:

- http://www.seservices.com/images/Reson_7125_brochure.pdf свободный. – Загл. с экрана.
20. SeaBat T20-P [Электронный ресурс] / Teledyne Marine – М.: teledynemarine.com, 2018. – Режим доступа: <http://www.teledynemarine.com/seabat-t20-p?BrandID=17> свободный. – Загл. с экрана.
21. Visualizing Samsonfish (*Seriola hippos*) with a Reson 7125 Seabat multibeam sonar / Miles J. G. Parsons, Iain M. Parnum, Robert D. McCauley // ICES Journal of Marine Science. – 2013. – № 70 (3). – С. 665–674.
22. Trevorrow MV. Volumetric multibeam sonar measurements of fish, zooplankton and turbulence / Trevorrow MV // IEEE Journal of Oceanic Engineering. – 2005. – № 32. – С. 192–201.
23. A new methodology for the quantitative visualization of coherent flow structures in alluvial channels using multibeam echo-sounding (MBES)/ Best J [и др.] // Geophysical Research Letters. – 2010. – № 37(L06405). – С. 600–610.
24. Фирсов Ю. Г. Применение современных гидрографических технологий для изучения рельефа и донного газопроявления в северных морях России / Ю. Г. Фирсов, Е. Н. Колосков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. – 2015. – № 3 (31). – С. 54–62.
25. D. Lockhart. New Developments in Multi-beam Backscatter Data Collection and Processing / D. Lockhart, E. Saade, J. Wilson // Marine Technology Society Journal. – 2001. – № 4 (35). – С. 46–50.
26. SeaBat 8125. Ultra High Resolution Focused Multibeam Echosounder System. Operator's manual. Version 3.01 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.oceanscan.net/gallery/PDFs/8125_OpMan_301.pdf, свободный. – Загл. с экрана.

27. Parnum I. M. Benthic habitat mapping using multibeam sonar systems: PhD thesis / I. M. Parnum. – Australia: Curtin University of Technology, 2007. – 208 с.
28. The Ultra-High Resolution Future of Hydrography [Электронный ресурс] / RESON Inc – М.: Reson.com – Режим доступа <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download;jsessionid=9B016CAED1F251D708FAC87B6E972159?doi=10.1.1.501.2750&rep=rep1&type=pdf> свободный. – Загл. с экрана.
29. SeaBat 7125. Operator's manual. Version 3.00 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/230690358_High-frequency_multibeam_echo-sounder_measurements_of_seafloor_backscatter_in_shallow_water_Part_1_-_Data_acquisition_and_processing, свободный. – Загл. с экрана
30. How-to methods used to acquire sonar imagery, [Электронный ресурс] / QPS – М.: confluence.qps.nl – Режим доступа <https://confluence.qps.nl/qinsy/en/how-to-methods-used-to-acquire-sonar-imagery-52101176.html> свободный. – Загл. с экрана.
31. Gavrilov AN. Fluctuations of seafloor backscatter data from multibeam sonar systems / Gavrilov AN, Parnum IM // IEEE Journal of Oceanic Engineering. – 2010. – № 35. – С. 209–219.
32. Gavrilov AN. High-frequency multibeam echo-sounder measurements of seafloor backscatter in shallow water: Part 1 – Data acquisition and processing / Gavrilov AN, Parnum IM // International Journal of the Society for Underwater Technology. – 2011. – № 30 (1). – С. 3–12.
33. Backscatter measurements by seafloor-mapping sonars. Guidelines and Recommendations / Lurton X [и др.] – М: Geohab. – 2015. – 200 с.
34. Gavrilov AN. High-frequency multibeam echo-sounder measurements of seafloor backscatter in shallow water: Part 2 Mosaic production, analysis and classification / Gavrilov AN, Parnum IM // International Journal of the Society for Underwater Technology. – 2011. – № 30 (1). – С. 13–26.

35. Quester Tangent from Seabed Classification to Rapid Transit [Электронный ресурс] / Hydro-International – М.: hydro-international.com – Режим доступа <https://www.hydro-international.com/content/article/quester-tangent> свободный. – Загл. с экрана.
36. Giuseppe Masetti. A Bathymetry- and Reflectivity-Based Approach for Seafloor Segmentation / Giuseppe Masetti, Larry Alan Mayer, Larry Guy Ward // Geosciences. – 2018. – № 1(8). – С. 1 – 16.
37. Geocoder [Электронный ресурс] / The Center for Coastal and Ocean Mapping/Joint Hydrographic Center (CCOM/JHC) – М.: ccom.unh.edu – Режим доступа <http://ccom.unh.edu/theme/data-processing/geocoder> свободный. – Загл. с экрана.
38. Luciano E. Fonseca. Geocoder: An Efficient Backscatter Map Constructor / Luciano E. Fonseca, Brian R. Calder // The Center for Coastal and Ocean Mapping/Joint Hydrographic Center (CCOM/JHC). – М: University of New Hampshire, Durham. – 2005. – 9 с.
39. HYPACK User Manual [Электронный ресурс]. – М.: HYPACK (Xylem Inc), 2018. – Режим доступа: <http://www.hypack.com/File%20Library/Resource%20Library/Manuals/2018-HYPACK-User-Manual.pdf>, свободный. – Загл. с экрана.
40. Technical note: FMGT - R2Sonics backscatter processing [Электронный ресурс] / QPS – М.: confluence.qps.nl – Режим доступа <https://confluence.qps.nl/fledermaus/technical-information/technical-note-fmgt-r2sonics-backscatter-processing> свободный. – Загл. с экрана.
41. QPS. Сбор, обработка, представление данных, доступ к данным [Электронный ресурс] / QPS – М.: confluence.qps.nl – Режим доступа <http://www.qps.nl/download/attachments/14778751/QPS+Brochure-Russian.pdf?version=5&modificationDate=1435222658920> свободный. – Загл. с экрана.
42. Fledermaus [Электронный ресурс] / QPS – М.: confluence.qps.nl – Режим доступа

<http://www.qps.nl/display/fledermaus/main;jsessionid=DB58935FC928D09221F4B1CA1E20AAF4> свободный. – Загл. с экрана.

43. Импорт формата Kongsberg *.all в QINSy [Электронный ресурс] / QPS – М.: confluence.qps.nl – Режим доступа <https://confluence.qps.nl/qinsy/ru/import-formata-kongsberg-all-v-qinsy-35587275.html> свободный. – Загл. с экрана.
44. Calculation of absorption of sound in seawater [Электронный ресурс] / National Physical Laboratory (United Kingdom) – М.: npl.co.uk – Режим доступа <http://resource.npl.co.uk/acoustics/techguides/seaabsorption/> свободный. – Загл. с экрана.
45. Фирсов Ю. Г. Основы гидроакустики и использования гидрографических сонаров: учеб. пособие / Ю. Г. Фирсов. – СПб.: Нестор-история, 2010. – 348 с.