

УДК 681.883

## Моделирование процесса выполнения гидролокационной съемки с использованием многолучевого эхолота

Фомина Е. С., Миронов А. С.

**Постановка задачи:** Оценка качества данных, полученных в результате проведения гидролокационной съемки, является необходимым условием при решении картографических и измерительных задач. Имитационное моделирование с учетом параметров оборудования, движения надводного робототехнического комплекса с установленным гидролокационным оборудованием, параметров среды распространения, особенностей поглощения и отражения гидроакустических волн является одним из инструментов, позволяющих минимизировать ошибку при обработке данных. **Целью работы** является разработка и реализация имитационной модели процесса проведения гидролокационной съемки с помощью многолучевого эхолота, установленного на робототехническом комплексе. **Используемые методы:** системный анализ, имитационное моделирование, численные методы, методы математической статистики. **Новизна:** имитационная модель процесса проведения гидролокационной съемки, позволяющая проводить предварительную оценку погрешности измерения высоты донных объектов и элементов дна в зависимости от параметров используемого оборудования и условий акватории. **Результат:** создана имитационная модель процесса проведения гидролокационной съемки с использованием многолучевого эхолота. Проведенное моделирование на основе реальных данных для автономного необитаемого надводного аппарата показало возможность его использования для проведения гидролокационной съемки на участках акваторий с низкой и средней степенью расчлененности рельефа дна. При сильно расчленённом рельефе погрешность определения глубины может достигать 0,7 м, что выходит за рамки принятых допустимых пределов равных 0,1 м. **Практическая значимость:** представленное решение предлагается использовать в виде обеспечения гидроакустических исследований с применением гидролокационного оборудования при установке на надводных робототехнических комплексах.

**Ключевые слова:** многолучевой эхолот, реконструкция дна, гидролокация, эхолотация, имитационное моделирование, надводный робототехнический комплекс.

### Актуальность и постановка задачи

Необходимость изучения подводной обстановки, определена интересом к данной задаче в нефтегазовой, оборонной, транспортной и других отраслях, приводит к совершенствованию робототехнических комплексов (РК) надводного и подводного базирования. Несмотря на практическую значимость разработки РК, агрессивность водной среды, в которой они функционируют, делает процесс их разработки и тестирования довольно сложным. Разработке сложных гидроакустических комплексов и систем посвящен ряд работ российских и зарубежных ученых, [1-5].

Корректная интерпретация данных, получаемых с гидроакустических сенсоров надводных и подводных РК, невозможна без комплексной оценки как

#### Библиографическая ссылка на статью:

Фомина Е. С., Миронов А. С. Моделирование процесса выполнения гидролокационной съемки с использованием многолучевого эхолота // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 3. С. 184-202. DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10306.

#### Reference for citation:

Fomina E. S., Mironov A. S. Modeling the Process of Performing a Sonar Survey Using a Multi-Beam Echo Sounder. *Systems of Control, Communication and Security*, 2020, no. 3, pp. 184-202 (in Russian). DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10306.

характеристик контрольно-измерительного оборудования системы, так и методики проведения работ. Данную оценку можно получить при всестороннем функциональном исследовании робототехнического комплекса непосредственно перед выполнением миссии в зоне проведения работ. Но, ввиду дороговизны эксплуатации любого РК [6], одним из путей замены указанного выше процесса является использование имитационного моделирования [7].

Такой подход к решению основной задачи гидролокационной съемки – реконструкции поверхности дна – уменьшает риск возникновения сбоев робототехнического комплекса, снижает вероятность планирования и проведения неэффективных миссий и последующей обработки неинформативных данных, и в целом позволяет снизить затраты на натурные испытания, [8].

Имитационное моделирование также позволяет провести тестирование и оптимизацию как алгоритмов взаимодействия элементов в сложной системе, которую представляет собой робототехнический комплекс, так и алгоритмов функционирования каждого элемента в отдельности.

Сложность создания имитационных моделей автономных надводных и подводных РК в общем случае обусловлена необходимостью одновременного планирования миссии с учетом динамики движения аппарата, решения навигационной задачи, распознавания объектов на дне и построения рельефа дна, [9]. При этом эти задачи могут быть напрямую связанными между собой. Инструментарий требует разработки математической модели трехмерной среды визуализации, описание режима функционирования аппарата в реальном времени, моделирование получения гидроакустического отклика, должен характеризоваться высокой скоростью, гибкостью, способностью работать на различных конфигурациях компьютеров.

В настоящее время отечественными и зарубежными авторами опубликованы работы, направленные на создание различных моделей.

Авторами статьи [10] рассматриваются вопросы моделирования задач управления автономными роботизированными комплексами в режиме реального времени. Разработанная авторами модель решает задачи управления движением аппарата, автоматической навигации, а также машинного зрения и распознавания объектов. Датчики глубины, акселерометры, компасы и лаги для простоты имитируются, основываясь на данных о положении и ориентации робота в среде, которые известны из данных о движении аппарата-носителя. Для повышения реалистичности в показаниях этих приборов могут вноситься искажения, шумы или имитироваться поломки. Существенным недостатком работы является сведение моделирования гидроакустической части аппаратуры (однолучевого дальномера, гидролокатора бокового обзора (ГБО) и гидролокатора секторного обзора) к имитации фотоаппарата.

В работе [11] приводится реализация плагина к открытой системе моделирования робототехнических систем Gazebo, позволяющая моделировать внешние помехи, ошибки датчиков и двигателей. Моделируемая система вычисляет параметры движения автономного аппарата при заданных характеристиках робота и среды и формирует гидроакустический отклик с учетом затухания и потерь на рассеяния волны в воде. Недостатком данной модели является ее при-

менимость в рамках определенной системы, и невозможность использования с некоторыми типами оборудования.

В работе [12] приводится программный моделирующий комплекс, разработанный для эффективной отладки алгоритмов управления автономных подводных аппаратов, выступающих в качестве носителей видео- и гидроакустической аппаратуры для получения информации о состоянии морского дна. Авторами спроектирована модель аппарата, позволяющая выполнять подключения различных модулей: регуляторов движения, выбора трассы, бортовых датчиков, в том числе, моделируемых. Недостатком модели является отсутствие гидроакустических средств в системе технического зрения модели. Как известно, использование оптической информации для формирования батиметрической карты не всегда эффективно ввиду недостаточной освещенности на глубине и наличия взвесей в водной среде.

Помимо моделирования всей системы автономного аппарата-носителя, отдельного внимания требует моделирование получения гидроакустического отклика. Формирование отклика может производиться путем использования гидроакустического оборудования для площадной съемки дна (ГБО или многолучевым эхолотом (МЛЭ)) или при съемке профилометром или эхолотом путем траления, [13].

В работе [14] представлена модель МЛЭ, включающая в себя моделирование приемопередатчика и формирования отклика с учетом характера распространения эхо-сигнала в водной среде. В данной модели также учитывается изменение скорости распространения гидроакустической волны в зависимости от глубины водоема, эффекты обратного рассеяния при отражении. Недостатком можно отметить то, что морское дно рассматривается как Ламбертова поверхность, работа модели оценивается по моделям плоского дна с постоянной глубиной и на моделях равномерно-изогнутого дна.

В работе [15] показаны возможности симуляции многолучевого эхолота с линейно-частотно-модулированными импульсами и тональным импульсом. Работа модели оценена при съемке плоского дна с искусственными мишенями. В работе авторами проведена оценка помехоустойчивости модельного МЛЭ при присутствии шума в гидроакустическом канале. Результатами моделирования является распознавание мишеней на сформированной карте дна. Недостатком данной модели также является ее работа только с плоским дном и искусственно сформированными мишенями примитивных форм.

Применение ГБО для решения задач поиска подводных объектов рассматривается в работе [16]. Авторы рассматривают вопросы автоматической инспекции подводных трубопроводов и для оценки применимости ГБО для этой задачи формируют модель ландшафта морского дна, по результатам съемки которого проводится анализ состояния объектов на нем. Недостатком работы является ее применение только для объектов протяженной формы (трубопроводов, кабелей), преимуществом – достаточно высокий уровень детализации модельных поверхностей.

Известно несколько работ по моделированию работы гидролокационных устройств и получения гидролокационных изображений (ГЛИ). Так, в работе

[17] для тестирования алгоритмов распознавания образов приводится модель генерации ГБО-изображений с использованием шейдеров. Результатом работы модели является получение модельного ГЛИ с образами объектов и смазывание мишеней и областей акустической тени. Согласно источнику, данная модель не поддерживает оценку влияния бортовых датчиков и движение аппарата-носителя, а рассматривает только вопросы генерации ГЛИ при известных конфигурациях внешней среды для отладки алгоритмов пост-обработки.

В работе [18] авторы приводят имитационную модель реверберации морского дна для получения корректного гидроакустического отклика и проводят ее оценку путем симуляции многолучевого зондирования. Недостатком модели является пренебрежение авторами некоторыми важными параметрами при моделировании среды: фазовыми флуктуациями, учетом подводной топографии, температурой океана, соленостью и др.

Задачи картографирования дна по данным ГБО ставятся в работе [19]. В данной работе рассматривается кинетическая модель переноса акустического излучения при малых отклонениях уровня дна от заданной горизонтальной плоскости с введением ограничения на направленность приемных антенн гидролокатора. При анализе серии вычислительных экспериментов выявлена прямая зависимость ширины диаграммы направленности на четкость восстанавливаемого рельефа дна.

В качестве вывода к представленному обзору можно сделать следующее заключение: большинство существующих моделей основаны не на комплексном моделировании, а на моделировании отдельных инструментов, не привязаны к реальным устройствам и оборудованию. Все модели можно условно разделить на следующие категории:

- 1) моделирование движения РК и его ориентация в пространстве [10-12];
- 2) контрольно-измерительная аппаратура в составе РК (гидролокаторы бокового обзора, эхолоты, бортовые датчики) [12-13, 15];
- 3) эмуляция и постобработка гидролокационных изображений и батиметрических карт [17];
- 4) моделирование среды распространения и условий отражения гидроакустического сигнала от донной поверхности [11, 18-19].

Целью представленной работы является разработка и реализация имитационной модели процесса проведения гидролокационной съемки с помощью многолучевого эхолота, установленного на надводном автономном аппарате. Модель учитывает параметры зондирующего импульса, влияние которых на точность восстановления рельефа донной поверхности было рассмотрено авторами в работе [20]. Особенности формирования лучей в МЛЭ, свойства среды распространения, потери на отражение и поглощение в неоднородном дне также влияют на конечную батиметрическую карту дна и учитываются в представленной модели. Модель предназначена для оценки эффективности использования МЛЭ в составе РК, с учетом параметров движения комплекса, а именно значений курса, крена, дифферента, регистрируемых бортовыми датчиками комплекса.

## Моделирование

В рамках представленного исследования авторами была разработана и реализована имитационная модель процесса осуществления гидролокационной съемки с использованием многолучевого эхолота, установленном на РК. На рис. 1 представлена структурная схема разработанной имитационной модели.



Рис. 1. Структурная схема разработанной имитационной модели

Основными блоками модели являются:

- 1) блок моделирования гидролокационной аппаратуры – отвечает за функциональное моделирование гидролокационной аппаратуры, установленной на надводном РК;
- 2) блок моделирования параметров зондирующего импульса – отвечает за формирование импульса с учетом входных параметров частоты сигнала, частоты посылок, устройства приемоизлучателя, сектора обзора и учет влияния условий среды на распространение, с учетом потерь на отражение и поглощение в донной поверхности;
- 3) блок моделирования движения РК – учитываются данные GPS, бортовых датчиков курса, крена, дифферента, скорости РК;
- 4) блок моделирования поверхности дна – блок интерполяции данных и визуального отображения;
- 5) анализ данных эксперимента – интерпретация модельных данных.

Ниже подробно рассматриваются особенности реализации каждого блока имитационной модели.

*Блок моделирования гидролокационной аппаратуры.* Основными производителями гидролокационного оборудования являются фирмы: Teledyne, Kongsberg, R2Sonic, Lowrance, Garmin. Среди отечественных производителей оборудования можно выделить научно-производственные фирмы «Экран»

(гидролокаторы и интерферометрические ГБО «Гидра»), ОАО «Практик-НЦ» (эхолоты «Практик»).

Как указывалось выше, в представленной работе в качестве базового гидролокационного оборудования выступает МЛЭ. В таблице 1 приведены основные параметры гидролокационного оборудования, которые как правило представляются большинством производителей и которые, как следствие, должны быть в дальнейшем учтены при создании модели. К таким параметрам относятся: зона охвата, количество лучей, диаграмма направленности, частота излучения, диапазон рабочих глубин. Помимо количественных характеристик важным параметром МЛЭ является его физическое исполнение. Выделяют две основные структуры построения МЛЭ: плоская (линейная) и сферическая (цилиндрическая) (рис. 2).

Таблица 1 – Сводная характеристика параметров МЛЭ

Модель МЛЭ	Параметры	Значение параметра
WASSP WMB-160	Зона охвата, град.	120
	Количество лучей	112
	Диаграмма направленности	1,0°×3,5°
	Частота излучения, кГц	160
	Диапазон глубин, м	2 – 200
KONGSBERG EM3002	Зона охвата, град.	130
	Количество лучей	130
	Диаграмма направленности	1,5°×1,5°
	Частота излучения, кГц	293, 300, 307
	Диапазон глубин, м	0,5 – 150
SeaBat 7160	Зона охвата, град.	150
	Количество лучей	150
	Диаграмма направленности	1,0°×1,0°
	Частота излучения, кГц	12, 24
	Диапазон глубин, м	2 – 200
SeaBat T20-S	Зона охвата, град.	140, 165
	Количество лучей	75
	Диаграмма направленности	2,0°×1,0°
	Частота излучения, кГц	200, 400
	Диапазон глубин, м	0,5 – 180

Плоская структура приемопередатчика (рис. 2а) подразумевает равное расстояние между приемниками 1...6. Сферическая структура (рис. 2б) строится на основе равных расстояний между источником излучения  $T$  и приемниками 1...6, что соответствует равному отклонению угла при формировании батиметрической карты.

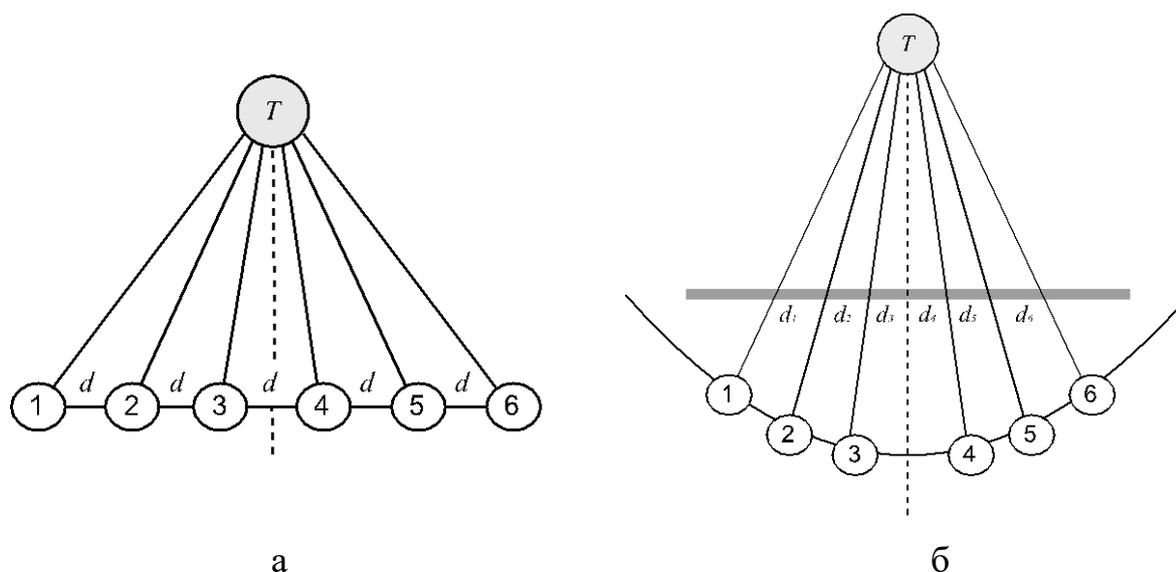


Рис. 2. Структуры построения МЛЭ, а – плоская, б – сферическая,  $T$  – источник излучения, 1-6 – приемники,  $d_1-d_2$  – линейное расстояние между приемниками

В разработанной модели МЛЭ рассматривается плоская структура, так как путем геометрических преобразований сферическое расположение приемников можно представить в виде плоской структуры с различным расстоянием  $d_1 \dots d_6$  между приемниками 1...6.

Для получения батиметрической информации картографируются участки поверхности дна, перпендикулярные направлению РК. Такие участки принято называть полосой обзора (ПО), а размер полосы в направлении поперек движения – шириной полосы обзора. Ширина  $D$  полосы обзора с некоторой погрешностью может быть определена как

$$D = h \cdot \sin \alpha + \Delta D,$$

где  $h$  – глубина водоема в точке излучения  $S$ ,  $\alpha$  – ширина диаграммы направленности передающей антенны, равная произведению величины угла  $\theta$  на количество приемников,  $\Delta D$  – погрешность ширины ПО, вызванная неравномерностью рельефа, движением аппарата-носителя и систематические ошибки углового смещения осей антенн МЛЭ по углам дифферента, крена и курса.

ПО формируется из значений батиметрии, каждое из которых получено при пересечении диаграмм направленности, передающей и приемной антенн. Каждому пересечению соответствует одно значение из облака точек, которое представляет собой цифровую модель донной поверхности. Это значение рассчитывается для каждого приемного луча, для этого по направлению распространения луча делается срез по глубине с шагом  $\Delta h$  в направлении от приемника до дна, (рис. 2а). Смещение центральной точки пятна облучения относительно центра ПО  $C_{xi}$  для приемника  $P_i$  вычисляется по формуле:

$$C_{xi} = \frac{id}{\tan(i\theta)}.$$

Диаметр пятна облучения  $d$  на данном срезе  $\Delta h$  определяется как

$$d = \Delta h \frac{\theta}{a}.$$

*Блок моделирования параметров зондирующего импульса.* Морское дно представляет собой отражающую и рассеивающую границу и зачастую имеет сложную, многослойную структуру. Потери на отражение сигнала от донной поверхности трудно оценить и предсказать.

Для определения затухания звука в акватории известны эмпирические формулы Шихи и Хелли, Шулькина-Марша, Франсуа-Гаррисона. В модели используется зависимость Шулькина-Марша, которая учитывает зависимость коэффициента затухания от солености и температуры воды. Коэффициент затухания  $\delta$  при частоте излучения 340 кГц, температуре пресной воды 15° С составляет 23,27 дБ/км. Исходя из данных, представленных в таблице 2, современные МЛЭ поддерживает работу излучателя на частотах 200...600 кГц, расчет коэффициента затухания проведен на этих режимах работы при условиях, описанных выше (рис. 3).

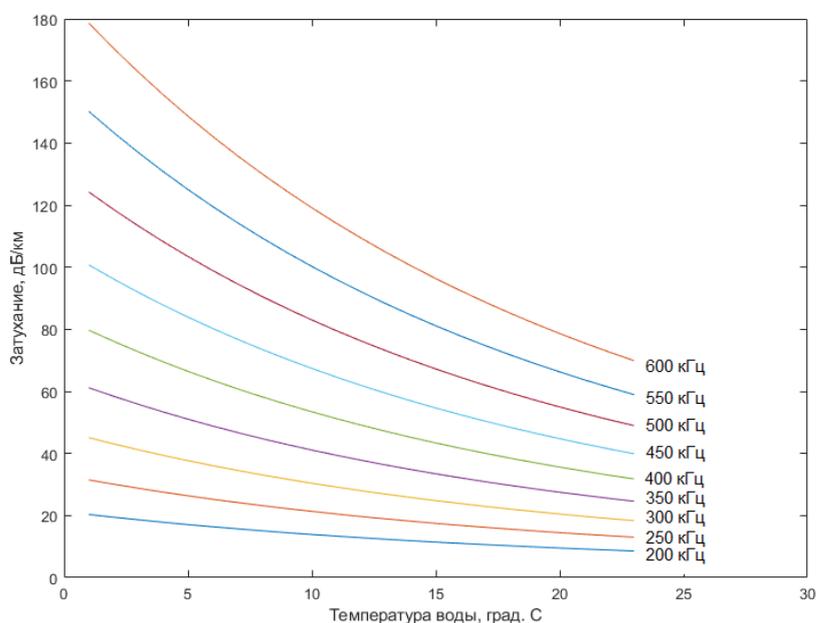


Рис. 3. Зависимость коэффициента затуханий гидроакустической волны для частот излучения 200-600 кГц в температурном диапазоне 0-15° С

Интенсивность падающей волны  $I_\delta$  может быть вычислена исходя из известного коэффициента затухания  $\delta$  и расстояния  $R$  до точки отражения:

$$I_\delta = IR\delta \cdot 10^{-3},$$

где  $I$  — мощность излучателя. Согласно теории Рэлея, потери при отражении  $\rho$  на границе раздела сред можно представить как

$$\rho = 10 \lg \frac{I_\rho}{I_\delta} = 10 \lg \left[ \frac{m \sin \theta_1 - \sqrt{n^2 - \cos^2 \theta_1}}{m \sin \theta_1 + \sqrt{n^2 - \cos^2 \theta_1}} \right]^2,$$

где:  $I_\rho$  — интенсивность отраженной волны;  $m$  и  $n$  — коэффициенты, равные соответственно отношениям  $p_2/p_1$  и  $c_1/c_2$ ;  $\theta_1$  — угол падения излученной волны. В рассматриваемой модели, дно представлено как однородная поглощающая жидкость, потери при отражении от которого определяется плотностью, скоро-

стью звука и коэффициентом поглощения. Коэффициент поглощения  $\beta$  является частотно-зависимой характеристикой и задается выражением

$$\beta = k \cdot f^m,$$

где коэффициенты  $k$  и  $m$  являются постоянными для различных типов грунтов и выбираются исходя из условий проведения гидроакустической съемки. Влияние поглощения было рассмотрено Маккензи [21], который модифицировал теорию Рэлея:

$$I_\delta = I_\rho + I_\beta,$$

где  $I_\beta$  – интенсивность поглощенной в грунт волны. Таким образом, интенсивность  $I$  принимаемой на приемник  $P_i$  волны может быть представлена в следующей форме

$$I = (I_\delta - I_\beta) R_i \delta \cdot 10^{-3},$$

где  $R_i$  – длина траектории от точки отражения до приемника  $P_i$ .

В реальных условиях эксплуатации эхолотов невозможно представить получение одним приемником одного эхо-сигнала, как правило, в таких ситуациях идет речь о суммарном акустическом поле нескольких отраженных волн. В модели результирующая гидроакустическая волна будет результатом суперпозиции отраженных от элемента дна акустических волн. Суммарное колебание будет равно алгебраической сумме колебаний, создаваемых отдельными волнами  $I = \sum i_j$ , с одинаковой частотой колебаний  $f$ , но с различной амплитудой  $A_j$  и начальной фазой  $\varphi_j$ .

*Блок моделирования движения РК.* Современные автономные необитаемые аппараты представляют собой отдельный класс робототехнических объектов с присущими им задачами, особенностями технологии, составом систем и функциональными свойствами. Для обследования дна малых водоемов, рек и в прибрежной мелководной части морей удобно устанавливать гидроакустическое оборудование на автономные надводные аппараты (АНА), рис. 4. Гидроакустическая съемка с использованием АНА используется для широкого спектра коммерческих, военных и научных задач. В современных неуправляемых АНА осуществляется передача информации от бортовых датчиков в режиме реального времени и производится корректировка движения по обратной связи, что обеспечивает их автономность при сборе информации. При размещении гидролокационного оборудования на АНА на качество гидроакустического отклика влияют параметры движения аппарата, такие как курс, крен, дифферент. Это увеличивает погрешность определения глубины водоема и абсолютного расположения объектов на дне, следовательно, ухудшает точность определения направления на цель обследования [22-23].

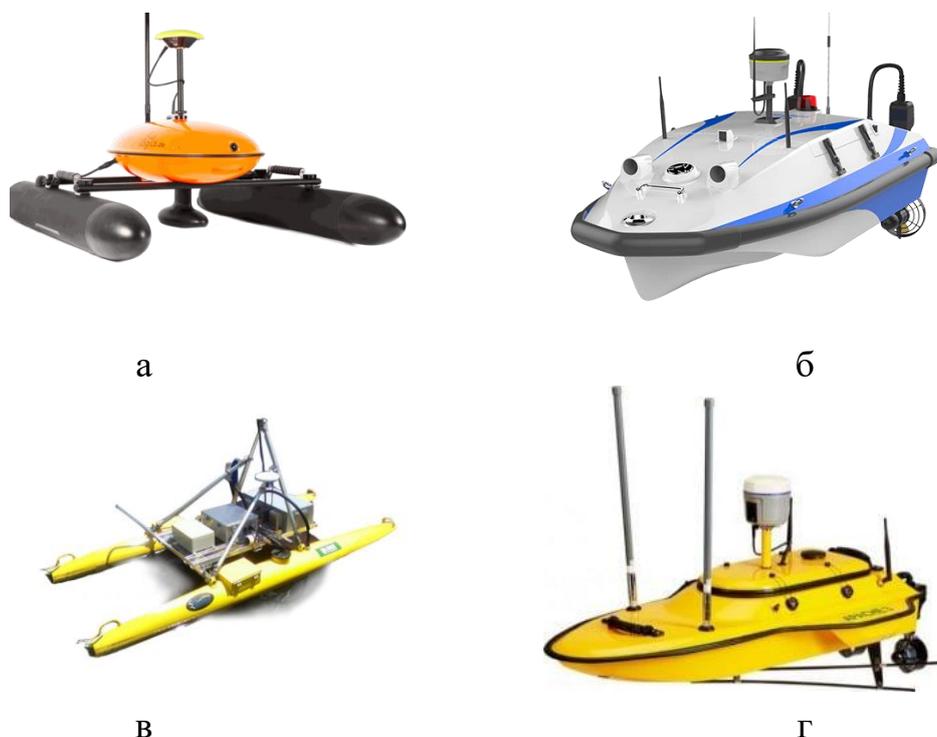


Рис. 4. Автономные надводные аппараты, а – Sonobot EvoLogics, б – OceanAlpha, в – АНА на основе EdgeTech 2200/2205, г – APACHE 3

Рассмотрим АНА Sonobot фирмы EvoLogics как платформу для установки гидролокационного оборудования разного типа. АНА в стандартном исполнении состоит из корпуса, поперечной устойчивой балки и пантонов с гидроструйными движителями. Для автономной манипуляции аппаратом предусмотрена станция управления со штативом, управляющий компьютер, блок радиоуправления. Платформа оснащена датчиками GPS, определения курса, крена, дифферента, углового ускорения, скорости, однолучевым эхолотом для промера глубин и имеет характеристики, представленные в таблице 2. В расширенном варианте Sonobot может быть оснащен ГБО DeepView DE680 SAR, однолучевой эхолот может быть заменен на МЛЭ.

Таблица 2 – Сводная характеристика комплекса Sonobot

Наименование датчика	Функция	Особенности
GPS Javad Delta G3T	Датчик картирования	Автономная точность до 2 м, точность DGPS в режиме реального времени до 0,5 м
Xsens MTi-30	Датчик движения	Статическая погрешность курса, крена, дифферента 0,2', динамическая – 0,5'
DeepView DE680 SAR	Гидролокатор бокового обзора	Опционально; частота 670 кГц, разрешение 2 см, вертикальный угол развертки – 60°, максимальная рабочая глубина 100 м
837B Delta T 300	Многочуевой эхолот	Опционально; частота 260 кГц, сектор обзора 120°, диаграмма направленности 3,0°×0,75°

Оценка среднеквадратичного отклонения этих величин была проведена на серии прямолинейных участков миссий, проводимых на акватории р. Амур. Значения СКО рассчитаны при доверительной вероятности  $Q=0,9$  и на доверительном интервале  $\varepsilon = 0,05$  и приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Оценка точности выполнения миссий АНА

Параметр	Разброс СКО параметра
Отклонение координаты, град.	$7,5384 \cdot 10^{-8} - 1,4671 \cdot 10^{-7}$
Курс, рад.	0,0049 – 0,0071
Крен, рад.	0,0053 – 0,0066
Дифферент, рад.	0,0727 – 0,0818

Участок траектории, сконфигурированной при проведении миссии АНА Sonobot (рис. 5) был получен при прохождении миссий в режиме автопилота.

Полученные координаты уже содержат в себе ошибку позиционирования датчика GPS и смещение, вызванное качкой АНА. Смещение освещенной зоны (рис. 5 б), полученное в результате коррекции данных информацией с бортовых датчиков АНА, показывает, что ошибка пространственной локализации объектов на дне может достигать нескольких метров при точности определения параметров аппарата носителя согласно таблице 3.

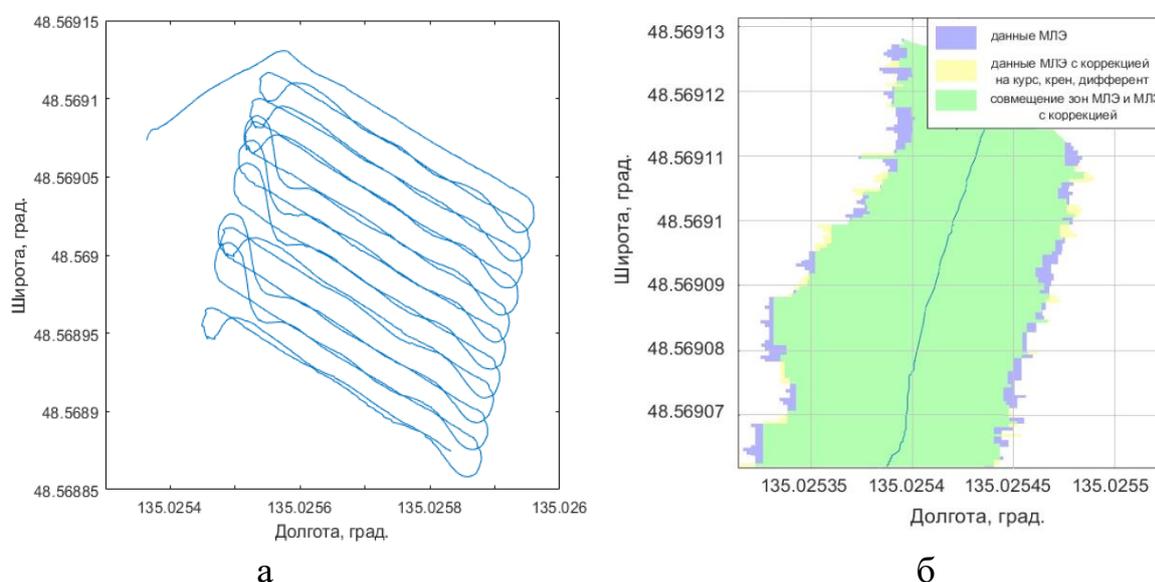
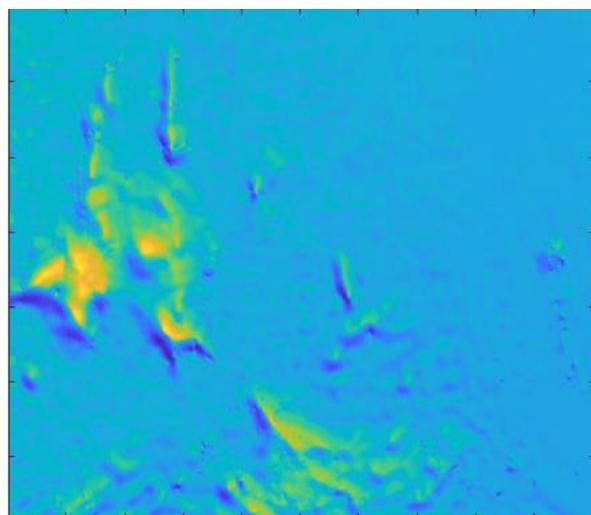


Рис. 5. Траектория движения АНА, а – данные GPS миссии, б – смещение зоны освещения гидролокационным оборудованием при коррекции данных параметрами качки АНА

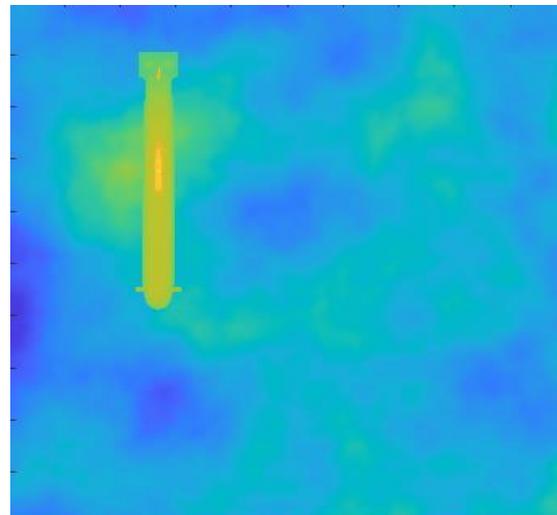
*Блок построения модели дна.* Для оценки возможности применения АНА как аппарата-носителя гидроакустического оборудования разного типа, была создана серия батиметрических поверхностей различного индекса расчлененности рельефа  $I$ , рис. 6.  $I$  дна модельных акваторий был рассчитана путем сум-

мирования количества горизонталей  $G$  к числу выделенных горизонталей  $n$  на участке:

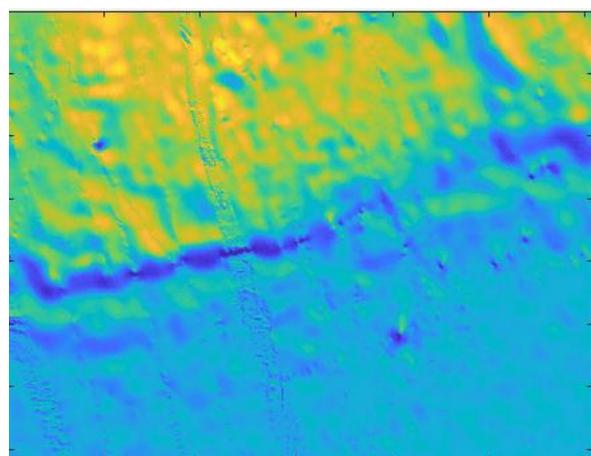
$$I = \frac{\sum G}{n}.$$



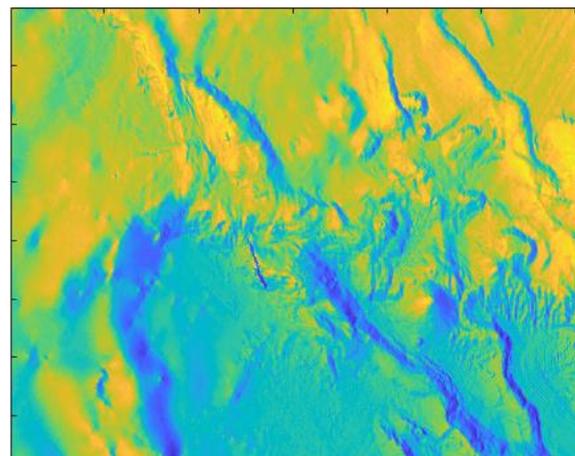
$I = 0,1667$



$I = 0,28$



$I = 0,61$



$I = 0,75$

Рис. 6. Цифровые поверхности для оценки модели

В качестве модели выбран эхолот со следующими техническим характеристикам: обзор с разрешением по глубине в 1 см на диапазоне глубин 0,5-150 м, размер сектора обзора на оба борта составляет  $130^\circ$ , диаграмма направленности  $1,5^\circ \times 1,5^\circ$ . Диаграмма направленности формируется в режиме равного расстояния между лучами. МЛЭ может работать с максимальной частотой посылок 40 Гц. Для данного эхолота была промоделирована съемка модельных акваторий (рис. 6) по модельным траекториям (рис. 5) с параметрами движения аппарата-носителя согласно таблице 3. Результаты моделирования цифровых поверхностей (ЦП) приведены на рис. 7.

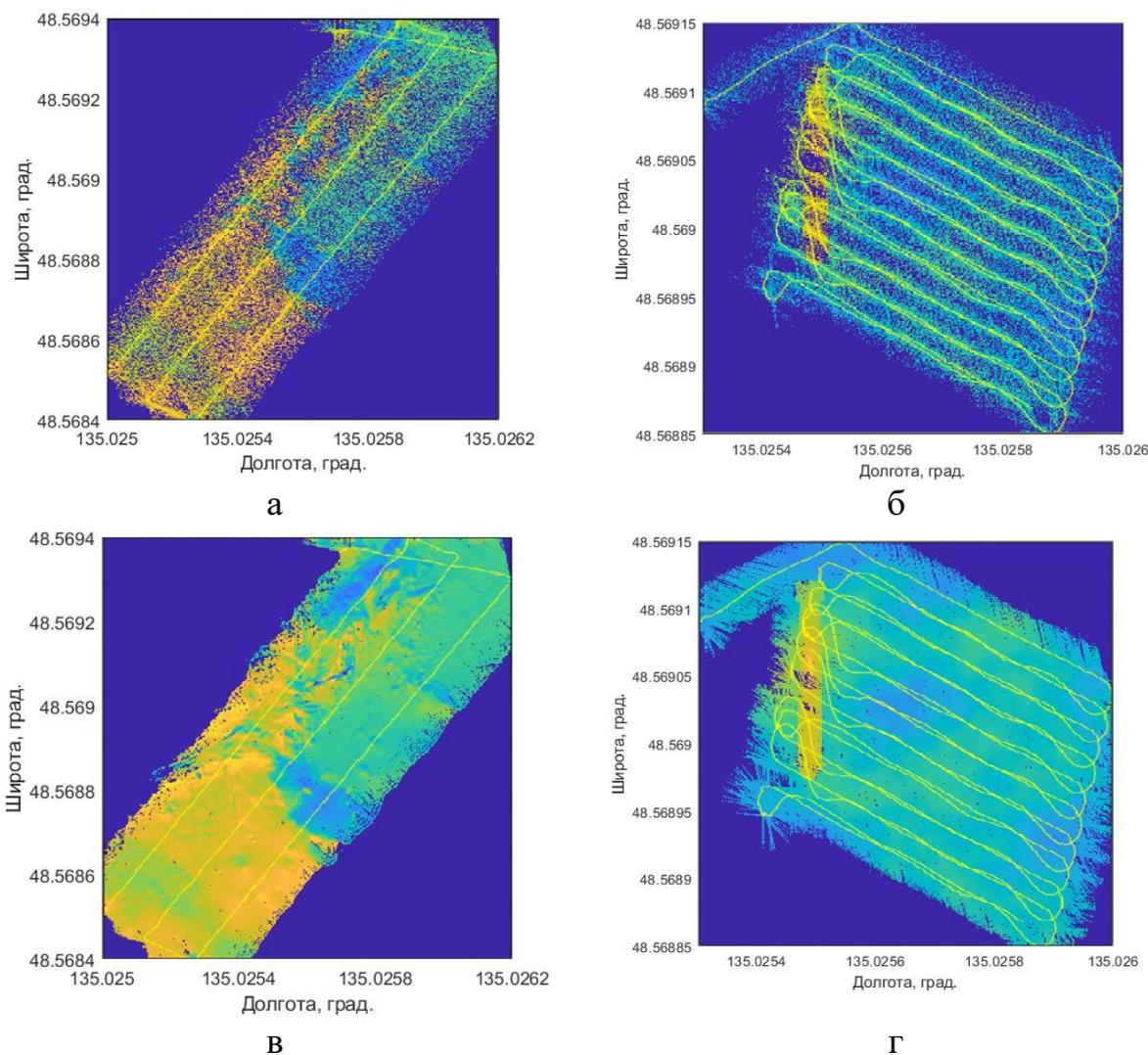


Рис. 7. Моделирование гидроакустической съемки

### Оценка результатов моделирования

Для оценки результатов было выполнено сравнение обработанной батиметрической карты, полученной при прохождении миссий МЛЭ, при съемке которым не возникает дополнительного движения за счет движения аппарата-носителя, с батиметрической картой, полученной при эмуляции установки МЛЭ на АНА. С помощью датчиков в составе АНА, при получении каждой ПО фиксируется также значения курса, крена и дифферента аппарата-носителя. Анализ погрешностей проводился по ошибке вычисления батиметрической карты, причем данные с эхолота, не подверженного качке, считаются достоверными. Для оценки расхождения данных были построены гистограммы разницы глубин (рис. 8) и представлены участки гистограмм для батиметрических карт, полученных в результате прохождения миссий, изображенных на рис. 7.

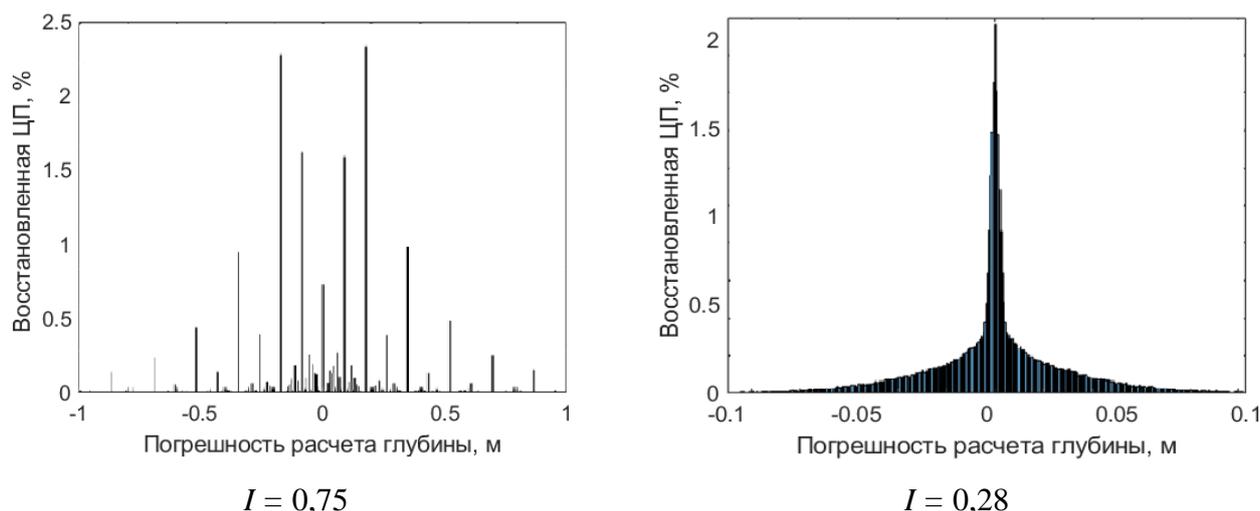


Рис. 8. Гистограммы погрешностей определения глубины в картографической сетке

По результатам моделирования серии моделей донной поверхности было выявлено, что погрешность расчета батиметрической карты зависит от степени расчлененности рельефа. Для моделей рельефа с низкой степенью расчлененности ошибка батиметрии находится в допустимых пределах, до 0,1 м, [20]. При сильнорасчлененном рельефе донной поверхности ( $I > 0,6$ ) погрешность выходит за пределы допустимой и использование АНА в качестве аппарата-носителя гидроакустической аппаратуры не представляется возможным.

### Заключение

В статье описан процесс создания имитационной модели процесса проведения гидролокационной съемки с применением многолучевого эхолота, установленного на надводном роботизированном комплексе, представляющего собой автономный надводный аппарат с датчиками определения параметров движения – GPS, курса, крена, дифферента. В основу модели многолучевого эхолота взята модель приемоизлучателя с плоской структурой антенны. Представлены результаты имитационного моделирования, позволяющие предложить рекомендации о возможности использования реального надводного роботизированного комплекса Sonobot в акваториях с низкой и средней степенью расчлененности рельефа дна, в то время как использование комплекса для исследования водоемов с сильнорасчлененным рельефом не будет удовлетворять необходимой точности реконструкции дна.

### Литература

1. Агеев М. Д. Автономные подводные роботы. Системы и технологии. – М.: Наука, 2005. – 398 с.
2. Киселев Л. В., Юдаков А. А. Динамика подводного робота при траекторном обследовании объектов // Подводные роботы и их системы. 1992. № 5. С. 28-50.
3. Матвиенко Ю. В., Костенко В. В., Борейко А. А. Разработка подводного роботизированного комплекса «Галтель» // Материалы 6-й научно-

технической конференции «Технические проблемы освоения Мирового океана» (Владивосток, 28 сентября – 2 октября 2015 г.). – Владивосток: Дальнаука, 2015. С. 4-7.

4. Wadoo S., Kachroo P. Autonomous Underwater Vehicles. Modeling, Control Design and Simulation. – CRC Press, NW, 2010. – 165 p.

5. Braginsky B., Guterman H. Obstacle Avoidance Approaches for Autonomous Underwater Vehicle: Simulation and Experimental Results // IEEE Journal of Oceanic Engineering. 2016. Vol. 41. №. 8. P. 882-892.

6. Гуренко Б. В., Федоренко Р. В., Береснев М. А., Сапрыкин Р. В., Переверзев В. А. Разработка симулятора автономного необитаемого подводного аппарата // Инженерный Вестник Дона. 2014. №3.

7. Бобков В. А., Морозов М. А. Моделирование работы гидролокационных устройств средствами машинной графики // Подводные исследования и робототехника. 2012. № 1 (13). С.46-51.

8. Мартынова Л. А., Гриненков А. В., Пронин А. О., Куликовских Ю. В. Исследование функционирования мультиагентной системы управления автономного необитаемого подводного аппарата с помощью имитационного моделирования // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2017. № 5. С. 52–65.

9. Демин А. Ю., Сорокин В. А., Анферов И. А., Хамухин А. А. Визуализация процесса имитационного моделирования группы автономных необитаемых подводных аппаратов // Известия ЮФУ. Технические науки. 2016. № 1 (174). С.77-87.

10. Мельман С. В., Бобков В. А., Инзарцев А. В., Павин А. М. Программный моделирующий комплекс для автономных подводных аппаратов на базе многопроцессорной архитектуры // Подводные исследования и робототехника. 2015. № 1 (19). С.23-32.

11. Manhaes M. M., Scherer S. A., Douat L. UUV Simulator: A Gazebo-based package for underwater intervention and multi-robot simulation // OCEANS 2016 MTS/IEEE, Monterey, USA, 2016. P. 1-6.

12. Бобков В.А., Борисов Ю. С., Инзарцев А. В., Мельман С. В. Моделирующий программный комплекс для исследования методов управления движением автономного подводного аппарата // Программирование. 2008. № 5. С. 257-266.

13. Долотов С. А., Каевицер В. И., Разманов В. М., Смольянинов И. В., Саворский А. В. Применение низкочастотного эхолота-профилографа с многоэлементной излучающей антенной и широкополосным лчм зондирующим сигналом для исследования морского дна // Известия ТРТУ. 2004. № 5 (40). С. 273-279.

14. Jung D., Kim J., Byun G. Numerical modeling and simulation technique in time-domain for multibeam echo sounder // International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering. 2018. Vol. 10. № 2. P.225-234.

15. Blachet A., Lonmo T., Austeng A, Hansen R. Sonar data simulation with application to multi-beam echo sounders // Underwater Acoustics Conference and Exhibition, Skiathos, Greece, 2017. P. 265-270.

16. Багницкий А. В., Инзарцев А. В., Павин А. М., Мельман С.В. Модельное решение задачи автоматической инспекции подводных трубопроводов с помощью гидролокатора бокового обзора // Подводные исследования и робототехника. 2011. № 1 (11). С. 17-23.

17. Хмельнов А. Е., Золотарев В. В. Моделирование гидролокационных изображений с использованием графических ускорителей // Подводные исследования и робототехника. 2011. № 1 (11). С. 41-48.

18. Jiang Y., Luo Y., Shi J. The research on simulation of seabed reverberation model based on multi-beam sounding system // IEEE/OES China Ocean Acoustics (COA), Harbin, China, 2016. P. 115857-115864.

19. Прохоров И. В., Сущенко А. А., Кан В. А. Об одной задаче определения донной поверхности по данным гидролокатора бокового обзора // Актуальные проблемы вычислительной и прикладной математики. Труды Международной конференции, посвященной 90-летию со дня рождения академика Г. И. Марчука. – Новосибирск, 2015. – С. 597-602.

20. Миронов А. С., Фомина Е. С. Методы обработки сигналов в гидролокационных системах при решении задачи зондирования донной поверхности // Труды СПИИРАН. 2018. № 4 (59). С. 140-163.

21. Mackenzie K. V. Reflection of Sound from Coastal Bottoms // The Journal of the Acoustical Society of America. 1959. № 31. P.131-141.

22. Hare R. Depth and Position Error Budgets for Multibeam Echosounding // International Hydrographic Review. 1995. № 2. P. 37-69.

23. Барашок П. И. Причины возникновения артефактов в форме «волн» на цифровых моделях рельефа дна // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2017. № 3. С. 537-551. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-537-551.

### References

1. Ageev M. D. *Avtonomnye podvodnye roboty. Sistemy i tehnologii* [Autonomous Underwater Robots. Systems and Technologies]. Moscow, Science Publ., 2005. 398 p. (in Russian).

2. Kiselev L. V., Yudakov A. A. Dinamika podvodnogo robota pri traektornom obsledovanii obektov [Dynamics of an Underwater Robot During Trajectory Inspection of Objects]. *Podvodnye roboty i ikh sistemy*, 1992, no. 5, pp. 28-50 (in Russian).

3. Matvienko Yu. V., Kostenko V. V., Borejko A. A. Razrabotka podvodnogo robotizirovannogo kompleksa «Galtel» [Development of the Underwater Robotic Complex "Galtel"]. *Materialy 6-j nauchno-tehnicheskoy konferencii «Tehnicheskie problemy osvoenija Mirovogo okeana»* [Materials of the 6th Scientific and Technical Conference "Technical Problems of the Development of the World Ocean"]. Vladivostok, 2015, pp. 4-7 (in Russian).

4. Wadoo S., Kachroo P. *Autonomous Underwater Vehicles. Modeling, Control Design and Simulation*. CRC Press, NW, 2010. 165 p.

5. Braginsky B., Guterman H. Obstacle Avoidance Approaches for Autonomous Underwater Vehicle: Simulation and Experimental Results. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2016, vol. 41, no. 8, pp. 882-892.

6. Gurenko B. V., Fedorenko R. V., Beresnev M. A., Saprykin R. V., Pereverzev V. A. Development of Autonomous Underwater Vehicle Simulation. *Engineering Journal of Don*, 2014, no. 3. (in Russian).

7. Bobkov V. A., Morozov M. A. Modelirovanie raboty gidrolokacionnyh ustrojstv sredstvami mashinnoj grafiki [Modeling the Operation of Sonar Devices Using Computer Graphics]. *Underwater Investigations and Robotics*, 2012, no. 1, pp. 46-51 (in Russian).

8. Martynova L. A., Grinenkov A. V., Pronin A. O., Kulikovskikh Yu. V. Issledovanie funkcionirovaniya multiagentnoj sistemy upravleniya avtonomnogo neobitaemogo podvodnogo apparata s pomoshchyu imitacionnogo modelirovaniya [Investigation of the Functioning of a Multi-Agent Control System for an Autonomous Underwater Vehicle Using Simulation Modeling]. *H&ES Research*, 2017, no. 5, pp. 52–65 (in Russia).

9. Demin A. Yu., Sorokin V. A., Anferov I. A., Khamukhin A. A. Visualizing of of Unmanned Underwater Vehicles Group Simulation Modeling. *Izvestiya Engineering Science. Southern Federal University*, 2016, no. 1, pp. 77-87(in Russian).

10. Melman S. V., Bobkov V. A., Inzarcev A. V., Pavin A. M. Programmnyj modeliruyushchij kompleks dlya avtonomnyh podvodnyh apparatov na baze mnogoprocessornoj arhitektury [Simulation Software for Autonomous Underwater Vehicles Based on Multiprocessor Architecture]. *Underwater Investigations and Robotics*, 2015, no. 1, pp. 23-32 (in Russian).

11. Manhaes M. M., Scherer S. A., Douat L. UUV Simulator: A Gazebo-Based Package for Underwater Intervention and Multi-Robot Simulation. *OCEANS 2016 MTS/IEEE*, Monterey, USA, 2016, pp. 1-6.

12. Bobkov V. A., Borisov Yu. S., Inzarcev A. V., Melman S. V. Simulation program complex for studying motion control methods for autonomous underwater vehicles. *Programming and Computer Software*, 2008, no. 5, pp. 257-266 (in Russian).

13. Dolotov S. A., Kaevitser V. I., Razmanov V. M., Smol'ianinov I. V., Savorskiy A. V. Primenenie nizkochastotnogo ehkholota-profilografa s mnogoehlementnoj izluchayushchej antennoj I shirokopolosnym LCHM zondiruyushchim signalom dlya issledovaniya morskogo dna [Application of a low-frequency Echo Sounder-Profilometer with a Multi-Element Emitting Antenna and a Broadband Chirp-Sounding Signal for the Study of the Seabed]. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*, 2004, no. 5(40), pp. 273-279 (in Russian).

14. Jung D., Kim J., Byun G. Numerical modeling and simulation technique in time-domain for multibeam echo sounder. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 2018, vol. 10, no. 2, pp. 225-234.

15. Blachet A., Lonmo T., Austeng A., Hansen R. Sonar Data Simulation with Application to Multi-Beam Echo Sounders. *Underwater Acoustics Conference and Exhibition*, Skiathos, Greece, 2017, pp. 265-270.

16. Bagnitskiy A. V., Inzartsev A. V., Pavin A. M., Melman S. V. A Model Solution of an Automatic Underwater Pipelines Inspection Problem Using Side Scan Sonar. *Underwater Investigations and Robotics*, 2011, no. 1 (11), pp. 17-23 (in Russian).

17. Hmelnov A. E., Zolotarjov V. V. Simulating the Sonar Images by Using the Graphics Accelerators. *Underwater Investigations and Robotics*, 2011, no. 1(11), pp. 41-48 (in Russian).

18. Jiang Y., Lu Y., Shi J. The Research on Simulation of Seabed Reverberation Model Based on Multi-Beam Sounding System. *IEEE/OES China Ocean Acoustics (COA)*, Harbin, China, 2016, pp. 115857-115864.

19. Prokhorov I. V., Sushchenko A. A., Kan V. A. Ob odnoj zadache opredeleniya donnoj poverhnosti po dannym gidrolokatora bokovogo obzora [On one Problem of Determining the Bottom Surface from Side-Scan Sonar Data]. *Aktual'nye problemy vychislitel'noj i prikladnoj matematiki. Trudy Mezhdunarodnoj konferencii, posvjashhennoj 90-letiju so dnja rozhdenija akademika G. I. Marchuka*. [Actual problems of computational and applied mathematics. Proceedings of the International Conference dedicated to the 90th anniversary of the birth of Academician G.I. Marchuk]. Novosibirsk, 2015, pp. 597-602 (in Russian).

20. Mironov A. S., Fomina E. S. Methods of sonar signal processing to solve the sensing bottom surface problem. *SPIRAS Proceedings*, 2018, no. 4 (59), pp. 140-163 (in Russian).

21. Mackenzie K. V. Reflection of Sound from Coastal Bottoms. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1959, no. 31, pp. 131-141.

22. Hare R. *Depth and Position Error Budgets for Multibeam Echosounding*, International Hydrographic Review, Monaco, 1995. 35 p.

23. Barashok P. I. Causes of Wave Artefacts Appearances on the Seabed Digital Terrain Models. *The scientific journal Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova*, 2017, no. 3, pp. 537-551. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-537-551 (in Russian).

**Статья поступила 04 августа 2020 г.**

### **Информация об авторах**

*Фомина Екатерина Сергеевна* – преподаватель кафедры вычислительной техники. Тихоокеанский Государственный Университет. Область научных интересов: программные средства определения координат в морской среде. E-mail: fominaekt@gmail.com

*Миронов Андрей Сергеевич* – кандидат технических наук, доцент. Доцент кафедры вычислительной техники. Тихоокеанский Государственный Университет. Область научных интересов: подводная робототехника; обработка сигналов; аппаратные и программные средства определения координат в морской среде. E-mail: andrei.s.mironov@yandex.ru

Адрес: 680035, Россия, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, д. 136.

## Modeling the Process of Performing a Sonar Survey Using a Multi-Beam Echo Sounder

E. S. Fomina, A. S. Mironov

**Purpose:** Assessment of the quality of data obtained as a result of sonar survey is a prerequisite for solving cartographic and measurement issues. Simulation model is taking into account the parameters of the equipment, movement of a surface robotic complex with installed sonar equipment, parameters of the transmission medium, features of absorption and reflection of hydroacoustic waves allows minimizing the mistake in data processing. The purpose of the present paper is to develop and implement a simulation model of the process of conducting a sonar survey using a multibeam echo sounder installed on a unmanned surface vehicle. **Methods:** system analysis, simulation, numerical methods, methods of mathematical statistics. **Novelty:** a simulation model of the process of conducting a sonar survey using a multibeam echo sounder, which allows for a preliminary assessment of the mistake in measuring the height of bottom objects and bottom elements, depending on the parameters of the equipment used and the conditions of the water area. **Results:** a simulation model of the sonar survey process using a multibeam echo sounder was created. The modeling carried out on the basis of real data for an unmanned surface vehicle showed the possibility of its use for carrying out sonar surveys in water areas with a low and medium terrain ruggedness index relief. With a highly terrain ruggedness index, the mistake in determining the depth can reach 0.7 meters, which goes beyond the accepted permissible limits equal to 0.1 meters. **Practical relevance:** the presented solution is proposed to be used in the form of providing hydroacoustic research using multibeam echo sounders and other types of sonar equipment when installed on unmanned surface vehicle.

**Key words:** multibeam echo sounder, bottom reconstruction, sonar, echolocation, simulation, unmanned surface vehicle.

### Information about Authors

*Ekaterina Sergeevna Fomina* – Lecturer at the Department Computer Science. Pacific National University. Field of research: software for positioning in the marine environment. E-mail: fominaekt@gmail.com

*Andrey Sergeevich Mironov* – Ph.D. of Engineering Sciences, Associate Professor. Associate Professor at the Department of Computer Science. Pacific National University. Field of research: underwater robotics; signal processing; hardware and software for positioning in the marine environment. E-mail: andrei.s.mironov@yandex.ru

Address: Russia, 680035, Khabarovsk, Tikhookeansky st., 136.