

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ СРЕДСТВ ОБСЛЕДОВАНИЯ ДНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СРЕДСТВ OPENGL

А.А. Павлов, В.С. Быкова (Санкт-Петербург)

Введение. Применение различных средств обследования дна, например, гидролокатора бокового обзора (ГБО), многолучевого эхолота, профилографа (ПФ) в виде буксируемого модуля или в составе автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА) позволяет проводить исследования морского дна (обнаружение объектов в толще воды, реконструкция трехмерной формы рельефа дна и пр.). По результатам применения средств обследования дна формируются массивы данных, которые после их обработки используются в исследовательских целях. Задачи обработки полученных реальных данных со средств обследования дна, определения параметров (частота сигнала, период излучения, скорость движения, параметры алгоритмов обработки данных и пр.) их наилучшего совместного функционирования решаются нетривиально и требуют отладки соответствующих алгоритмов.

Опыт разработки АНПА, в частности, в АО «Концерн «НПО «Аврора», подтвердил высокую эффективность применения имитационно- и отладочно-моделирующих комплексов в вопросе отладки алгоритмов обнаружения объектов в процессе проведения исследований АНПА, постобработки полученных данных, отладки алгоритмов планирования совместного применения средств обследования дна [1].

Множество научных трудов посвящено вопросу моделирования средств обследования дна. В вопросе получения результатов применения средств обследования дна различают два основных подхода к формированию эхо-сигнала различных объектов рельефа дна. В первом подходе рассматривается распространение акустической волны как распространение света [2, 3]. Во втором подходе учитываются волновые свойства акустического импульса [4, 5]. Практическая реализация средств обследования дна может быть реализована как с использованием преимущественно вычислительных ресурсов центрального процессорного устройства (ЦПУ) с незначительным задействованием ресурсов графического процессорного устройства (ГПУ) [4, 5] так, и наоборот, с существенным задействованием ресурсов ГПУ [2, 3]. Модель донной обстановки может быть задана как аналитически [4], так и с использованием генерируемых в трехмерных редакторах файлов [1].

В данной работе при проведении моделирования средств обследования дна распространение акустической волны рассматривается как распространение света, все основные вычисления осуществляются преимущественно ресурсами ГПУ. Особенность работы заключается в том, что модель донной обстановки формируется по модульному принципу. Геометрические и акустические модели отдельных объектов донной обстановки формируются с использованием трехмерных редакторов файлов. Модульность заключается в том, что сформированные модели могут быть многократно использованы для генерации различных объектов. Донная обстановка формируется за счет описанных в таблицах базы данных, взаимосвязей сгенерированных объектов. Такой подход позволяет моделировать донную обстановку высокой детализации с множеством высокополигональных объектов с использованием инстансинг-технологии спецификации OpenGL [6], с минимальной нагрузкой вычислений ГПУ.

Формирование исходных данных для проведения имитационного моделирования. Исходными данными для имитационного моделирования являются:

- 1) модель донной обстановки;
- 2) комплекс моделей средств обследования дна.

Модель донной обстановки представляет собой совокупность взаимосвязанных моделей отдельных донных объектов. Каждый донный объект задается геометрической и акустической моделями. Геометрическая модель может быть сформирована при помощи любого современного 3D-редактора (Autodesk Maya, Autodesk 3ds Max, Blender, FreeCad и пр.) и экспортирована в файл соответствующего расширения (obj, 3ds, stl и пр.). В общем виде в файле соответствующего формата содержатся данные о координатах вершин, нормалей, образующих примитивы (треугольники, четырехугольники) и описывающих сложную поверхность модели, текстурные координаты (рис. 1).

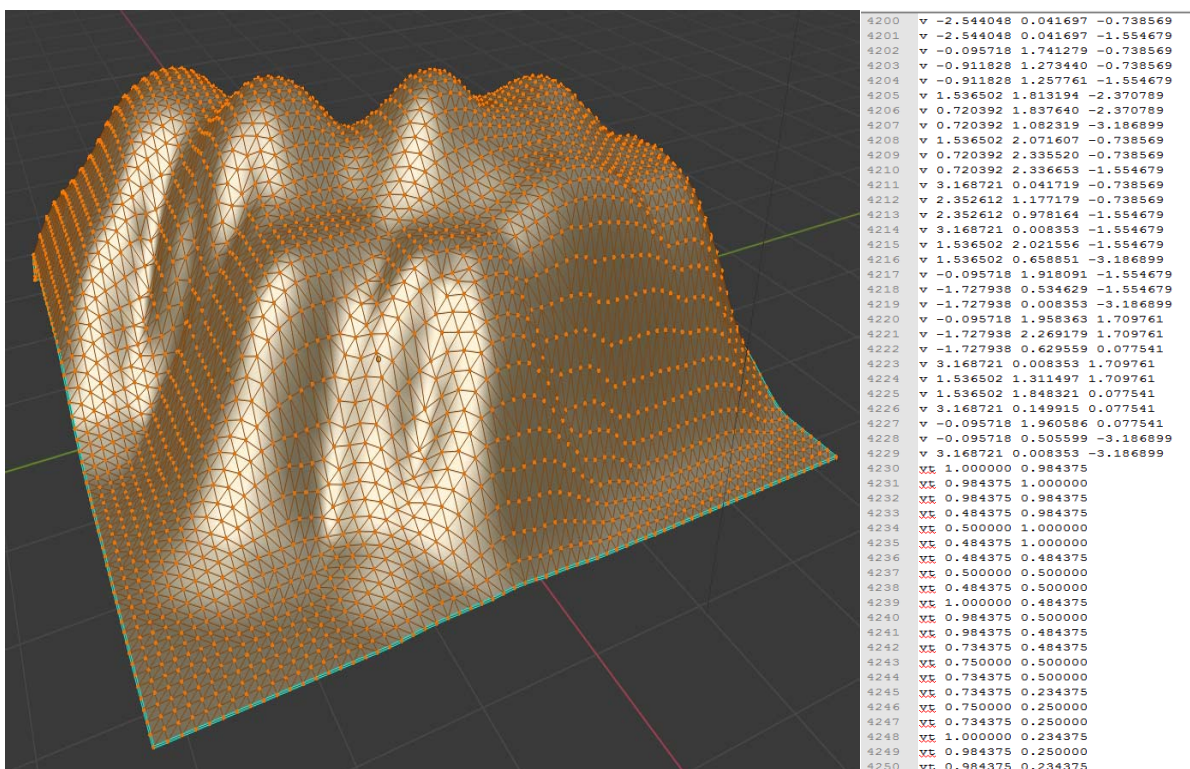


Рис. 1. Геометрическая модель донного объекта

Акустическая модель в общем виде описывается набором характеристик и их значений для каждой точки геометрической модели донного объекта. Например, в качестве характеристик могут быть представлены модель индикатрисы рассеивания, коэффициент отражения, коэффициент затухания и пр. Массив значений соответствующих характеристик может быть закодирован цветом и представлен изображением (текстурой). Взаимосвязь геометрической модели и акустической модели одного донного объекта (рис. 2) осуществляется через текстурные координаты, содержащиеся в файле геометрической модели.

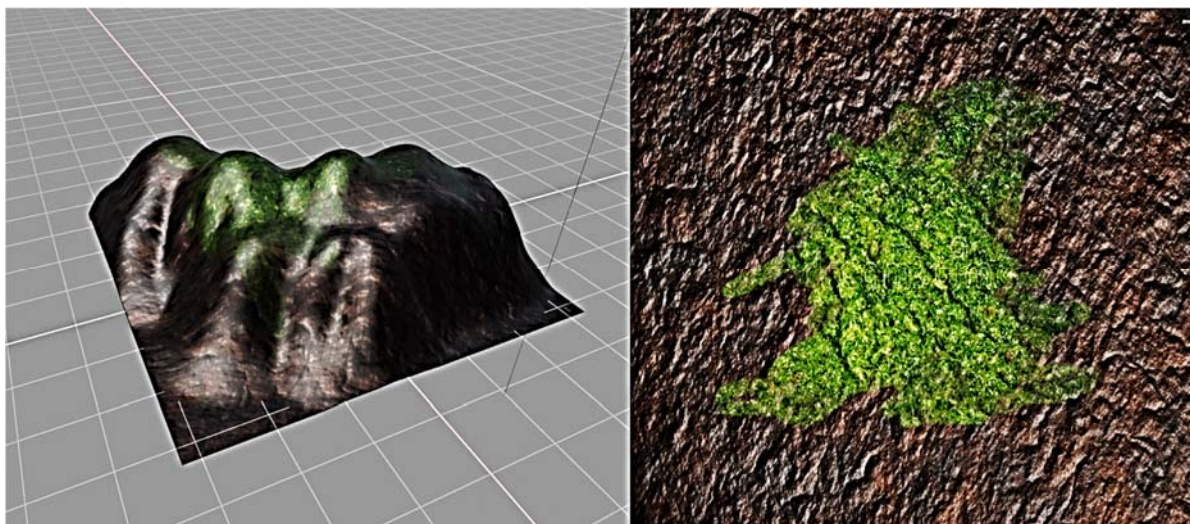


Рис. 2. Акустическая модель донного объекта

Формирование модели донной обстановки осуществляется путем считывания хранящихся в таблицах базы данных модели донной обстановки списка донных объектов и их параметров, задающих положение центра масс в пространстве, положение относительно центра масс и размер (рис. 3). В качестве системы управления базы данных может использоваться любая в зависимости от особенностей использования, хранящихся в БД, данных (размере, хранящихся данных, возможности асинхронного сетевого доступа к данным и пр.).

Рис. 3. Структура базы данных модели донной обстановки

Таким образом, использование описанных исходных данных позволяет формировать модель донной обстановки.

Комплекс моделей средств обследования дна (в общем случае) представляет собой совокупность заданных значений следующих характеристик: мощность акустического сигнала, разрешающая способность (интервал между отсчетами), количество отсчетов, ширина диаграммы направленности акустического луча в продольной, поперечной

плоскостях. Процесс расчета силы цели для точечного объекта исходя из особенностей работы средства обследования дна реализуется в шейдерной программе.

Для взаимодействия с моделью донной обстановки также необходимо понимать положение центра масс модели средства обследования дна и направление излучения акустического луча.

Процесс проведения имитационного моделирования. После формирования исходных данных для проведения моделирования в память ГПУ единожды передаются все данные по модели донной обстановки (рис. 4).

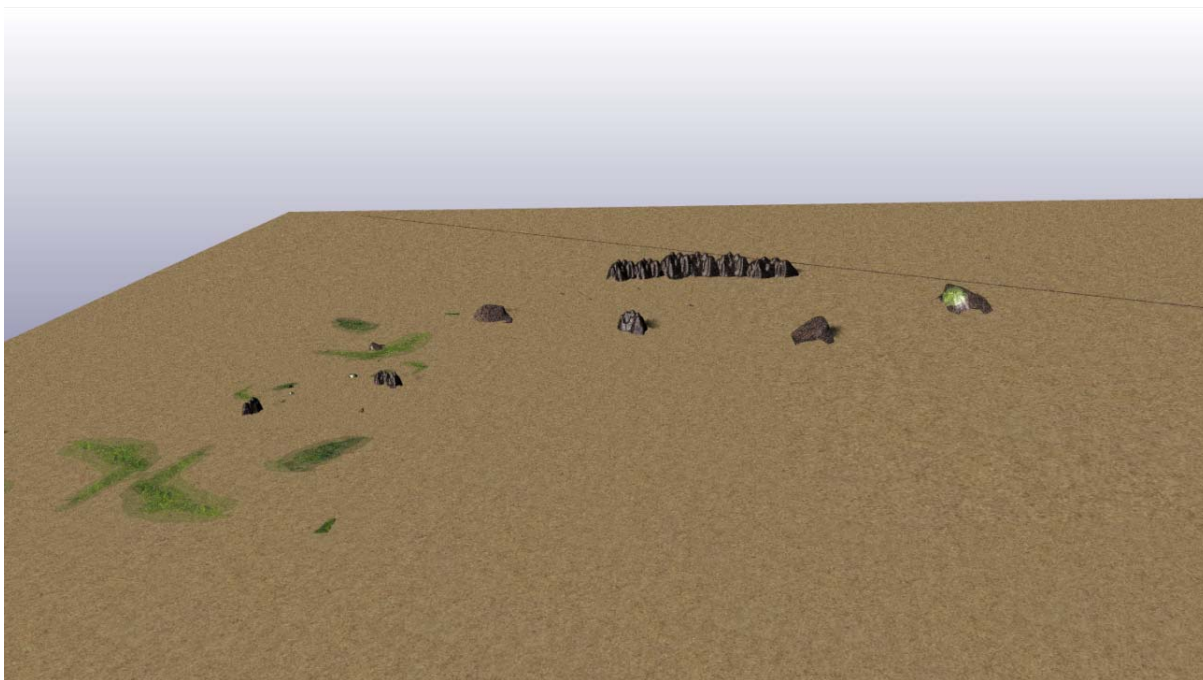


Рис. 4. Модель донной обстановки

Данные по средству обследования дна, прежде всего, данные, отражающие положение его центра масс в пространстве и направление излучения акустического луча, которые передаются в память ГПУ каждый момент времени.

В целом, процесс проведения имитационного моделирования можно разбить на следующие основные этапы:

Этап 1. Расчет карты теней относительно положения центра масс средства обследования дна и направления его работы. Формирование карты теней относится к классической задаче, решаемой на ГПУ [6];

Этап 2. Расчет акустического изображения донной поверхности относительно положения центра масс средства обследования дна и направления его работы с учетом рассчитанной карты теней. Формирование акустического изображения донной поверхности осуществляется ГПУ путем кодирования в цвет вычисленной силы цели для каждого точечного объекта донной поверхности;

Этап 3. Расчет карты дальностей элементов донной обстановки от положения центра масс средства обследования дна с учетом направления его работы. Дальность от центра масс до каждого элемента донной обстановки рассчитывается на ГПУ и кодируется цветом;

Этап 4. На основе полученных данных на этапах 2 и 3 формирование информационного массива, генерируемого средством обследования дна на каждом цикле излучения. Проводится декодирование цветов акустического изображения в массив сил цели точечных объектов и декодирование цветов карты дальностей в массив номеров отсчетов до каждого точечного объекта. Далее, в массив результатов работы

средства в соответствии с номером отсчета записывается среднее значение всех сил цели соответствующих точечных объектов.

Некоторые этапы в виду особенностей работы моделируемого средства обследуемого дна могут отличаться. Например, при моделировании работы ПФ первый этап отсутствует, а на втором этапе расчет акустического изображения осуществляется для каждого слоя наблюдаемого элемента донной обстановки. Этап 4 отличается у всех средств обследования дна по причине отличных по своей структуре информационных пакетов, содержащих результат работы средств.

Результаты моделирования. Проведем моделирование работы гидролокатора бокового обзора с использованием вычислительных ресурсов ГПУ и описанного подхода.

В качестве исходных данных примем следующие характеристики ГБО: мощность сигнала 50 дБ, разрешающая способность 0,02 м, количество отсчетов 40000 ед., ширина диаграммы направленности акустического луча в продольной плоскости ГБО 1.5 град., в поперечной плоскости – 72 град. с каждой стороны борта.

Движение центра масс ГБО зададим совокупностью прямых. Скорость движения по прямым примем равной 1,25 м/с, плоскость сканирования ГБО всегда будет перпендикулярна направлению движения его центра масс, период излучения ГБО примем равным 0.25 сек. Глубина погружения ГБО – 80 м, а максимальная глубина дна – 200 м.

Модель донной обстановки будет представлять собой список взаимосвязанных в рамках донной обстановки объектов с соответствующими акустическими и геометрическими моделями, заданная таблицей sceneTable БД (рис. 5).

sceneId	name	objectId	positionX	positionY	positionZ	rotateX	rotateY	rotateZ	scaleX	scaleY	scaleZ	reflectModelId
58	3 scene_Пн апр 10 16:30:48 2023	6	198.775	0.0	117.952	0.0	0.0	0.0	30.155	1.00089	30.0	1
59	3 scene_Пн апр 10 16:30:48 2023	6	258.454	0.0	117.878	0.0	0.0	0.0	30.155	1.00089	30.0	1
60	3 scene_Пн апр 10 16:30:48 2023	6	318.179	0.0	117.522	0.0	0.0	0.0	30.155	1.00089	30.0	1
61	3 scene_Пн апр 10 16:30:48 2023	6	377.766	0.0	117.644	0.0	0.0	0.0	30.155	1.00089	30.0	1
62	3 scene_Пн апр 10 16:30:48 2023	6	437.507	0.0	117.598	0.0	0.0	0.0	30.155	1.00089	30.0	1
63	3 scene_Пн апр 10 16:30:48 2023	6	495.796	0.0	117.492	0.0	0.0	0.0	30.155	1.00089	30.0	1
64	3 scene_Пн апр 10 16:30:48 2023	6	575.098	0.0	-20.3127	0.0	0.0	0.0	50.2583	1.00089	50.0	1
65	3 scene_Пн апр 10 16:30:48 2023	6	-79.6045	0.0	-316.393	0.0	0.0	0.0	50.2583	1.00089	50.0	1
66	3 scene_Пн апр 10 16:30:48 2023	6	19.9366	0.0	-315.94	0.0	0.0	0.0	50.3788	1.00089	50.0	1
67	3 scene_Пн апр 10 16:30:48 2023	6	119.666	0.0	-316.077	0.0	0.0	0.0	50.2583	1.00089	50.0	1
68	3 scene_Пн апр 10 16:30:48 2023	6	219.242	0.0	-316.396	0.0	0.0	0.0	50.2583	1.00089	50.0	1
69	3 scene_Пн апр 10 16:30:48 2023	6	318.872	0.0	-316.394	0.0	0.0	0.0	50.2583	1.00089	50.0	1
70	3 scene_Пн апр 10 16:30:48 2023	6	418.435	0.0	-316.162	0.0	0.0	0.0	50.2583	1.00089	50.0	1
71	3 scene_Пн апр 10 16:30:48 2023	6	517.787	0.0	-316.066	0.0	0.0	0.0	50.2583	1.00089	50.0	1
72	3 scene_Пн апр 10 16:30:48 2023	6	595.935	0.0	-298.203	0.0	0.0	0.0	30.2755	1.00089	30.0	1
73	3 scene_Пн апр 10 16:30:48 2023	1	2.08	-1.0	15.63	0.0	-6.0	0.0	5.0	5.0	5.0	3
74	3 scene_Пн апр 10 16:30:48 2023	1	37.824	-0.875	-6.91974	0.0	90.0	0.0	3.95522	5.13248	3.75	3
75	3 scene_Пн апр 10 16:30:48 2023	1	42.4003	-0.625	-4.45008	-3.0	29.0	0.0	3.95522	5.13248	3.75	3
76	3 scene_Пн апр 10 16:30:48 2023	1	125.039	-1.25	-63.4708	0.0	40.0	0.0	9.09473	8.88928	8.75	3
77	3 scene_Пн апр 10 16:30:48 2023	1	121.556	-1.0	-149.449	0.0	120.0	0.0	10.3796	10.1415	10.0	3
78	3 scene_Пн апр 10 16:30:48 2023	1	134.243	-1.25	-152.44	0.0	110.0	0.0	10.3796	10.1415	10.0	3
79	3 scene_Пн апр 10 16:30:48 2023	1	149.06	0.0	-152.777	0.0	105.0	0.0	11.6645	11.7695	11.25	3
80	3 scene_Пн апр 10 16:30:48 2023	1	161.609	-1.5	-155.484	0.0	75.0	0.0	12.5639	12.6461	11.625	3
81	3 scene_Пн апр 10 16:30:48 2023	1	177.849	-1.00002	-154.219	0.0	76.0	0.0	11.6645	11.7695	11.25	3
82	3 scene_Пн апр 10 16:30:48 2023	1	196.15	-2.125	-151.995	0.0	90.0	0.0	15.5191	10.7677	16.25	3
83	3 scene_Пн апр 10 16:30:48 2023	2	6.94369	-0.25	-3.85715	0.0	40.0	0.0	1.0	1.4762	1.0	3
84	3 scene_Пн апр 10 16:30:48 2023	2	319.337	-0.125	-179.952	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0	1.0	3
85	3 scene_Пн апр 10 16:30:48 2023	4	9.51402	-0.624996	2.16208	0.0	44.0	0.0	1.0	1.61957	1.0	2
86	3 scene_Пн апр 10 16:30:48 2023	4	25.07	-1.375	-13.5927	0.0	90.0	0.0	2.0	3.0136	2.29238	2
87	3 scene_Пн апр 10 16:30:48 2023	4	269.792	-5.625	-92.195	0.0	0.0	0.0	12.5	18.6577	17.3701	2
88	3 scene_Пн апр 10 16:30:48 2023	4	106.175	-0.25	-108.977	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0	1.0	2
89	3 scene_Пн апр 10 16:30:48 2023	4	129.027	-0.375	-126.774	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0	1.0	2
90	3 scene_Пн апр 10 16:30:48 2023	4	150.949	-0.375	-97.5092	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0	1.0	2
91	3 scene_Пн апр 10 16:30:48 2023	3	37.6595	-1.125	18.041	0.0	170.0	0.0	1.0	2.68963	1.0	3
92	3 scene_Пн апр 10 16:30:48 2023	3	25.131	-1.625	-43.8152	0.0	0.0	0.0	3.125	4.68648	3.1596	3
93	3 scene_Пн апр 10 16:30:48 2023	3	195.346	-4.75	-48.4159	0.0	180.0	0.0	9.5	15.2851	11.0781	3
94	3 scene_Пн апр 10 16:30:48 2023	3	65.6672	-3.875	-83.848	0.0	270.0	0.0	10.0	10.0626	10.2143	3
95	3 scene_Пн апр 10 16:30:48 2023	3	92.817	-0.374992	-119.275	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0	1.0	3
96	3 scene_Пн апр 10 16:30:48 2023	3	151.022	-0.375	-96.1481	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0	1.0	3
97	3 scene_Пн апр 10 16:30:48 2023	3	151.738	-0.25	-95.3514	0.0	90.0	0.0	1.0	1.0	1.0	3
98	3 scene_Пн апр 10 16:30:48 2023	3	319.336	-0.125015	-179.584	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0	1.0	3
99	3 scene_Пн апр 10 16:30:48 2023	7	253.001	0.0	-150.995	0.0	-31.0	0.0	375.0	27.2932	47.7227	4

Рис. 5. Список объектов модели донной обстановки

В списке объектов донной обстановки особый интерес будет представлять объект, отмеченный на рис. 5 звездочкой и представляющий собой трубопровод диаметром 2,5 м и длиной более 3000 м.

Рассмотрим результаты моделирования работы ГБО на участке траектории движения центра масс ГБО, выделенном на рис. 6 звездочкой. Видно, что исходя из заданной модели донной обстановки на данном участке траектории ГБО может наблюдать как скалу, так и трубопровод.

Рис. 6. Траектория движения центра масс ГБО

Проведем обработку полученных информационных массивов, генерируемых ГБО, на рассматриваемом участке траектории.

В результате, при заданных исходных данных по результатам измерений ГБО получим изображение дна донной поверхности с разрешением в 0,02 м. в поперечной плоскости движения центра масс ГБО и 0,3125 м. в продольной плоскости. На рис. 7 легко можно заметить как модель скалы (высотой 35 м.), так и модель трубопровода (диаметром 2,5 м.).



Рис. 7. Результаты измерений ГБО

Полученные результаты и их сравнение с заданной моделью донной обстановки позволяют говорить о корректности применения описанного в статье подхода.

Заключение

В работе описана имитационная модель средств обследования дна с использованием вычислительных ресурсов графического процессора на базе спецификации OpenGL, с использованием модульного принципа формирования модели донной обстановки. Приведенные результаты позволяют судить о применимости изложенного подхода в задачах отладки алгоритмов обнаружения объектов в процессе проведения исследований автономным необитаемым подводным аппаратом, а также постобработки полученных данных, отладки алгоритмов планирования совместного применения средств обследования дна (определение параметров их наилучшего совместного функционирования).

Дальнейшее направление развития описанной имитационной модели заключается в учете волновых свойств акустического импульса.

Работа проводилась при поддержке Российского научного фонда (проект 22-29-00320).

Литература

1. **Сурин С.Н., Балакин А.В., Мусатов Е.А., Челпанов А.С., Рожков Ю.Е., Попко А.О.** Опыт создания морской робототехнической платформы для АНПА малого класса // Подводные исследования и робототехника. 2022. 1 (39). С. 4–16. DOI: 10.37102/1992-4429_2022_39_01_01.
2. **Хмельнов А.Е., Золотарев В.В.** Моделирование гидролокационных изображений с использованием графических ускорителей // Подводные исследования и робототехника. 2011. 1 (11). С. 41–48.
3. **Багницкий А.В., Инзарцев А.В., Павин А.М., Мельман С.В., Морозов М.А.** Модельное решение задачи автоматической инспекции подводных трубопроводов с помощью гидролокатора бокового обзора // Подводные исследования и робототехника. 2008. 2 (6). С. 16–29.
4. **Павин А.М., Шилин К.Д.** Моделирование сигнала гидролокационных систем с веерообразной диаграммой направленности приемной антенны // Подводные исследования и робототехника. 2 (40), 2022. С. 19-28. DOI: 10.37102/1992-4429_2022_40_02_03.
5. **Мельман С.В., Бобков В.А., Инзарцев А.В., Павин А.М., Черкашин А.С.** Программный моделирующий комплекс для автономных подводных аппаратов на базе многопроцессорной архитектуры // Подводные исследования и робототехника. 2015. 1 (19). С. 23–32.
6. **Joey de Vries.** Learn OpenGL – graphics programming, 2020. p. 523. ISBN: 978-90-90-33256-7.