

*На правах рукописи*

**Анисимов Иван Михайлович**

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ВИЗУАЛЬНЫХ  
НАБЛЮДЕНИЙ С БОРТА ГЛУБОКОВОДНЫХ БУКСИРУЕМЫХ АППАРАТОВ**

Специальность 1.6.17 – Океанология

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Москва – 2024

Работа выполнена в Федеральном бюджетном учреждении науки Институте океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук (ИО РАН)

**Научный руководитель:** доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник Лаборатории гидролокации дна ИО РАН  
**Римский-Корсаков Николай Андреевич**

**Официальные оппоненты:** **Вельтищев Вадим Викторович**, доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», факультет «Специальное машиностроение». Заведующий кафедрой «Подводные аппараты и роботы».

**Носов Виктор Николаевич**, доктор технических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ордена Ленина и Ордена Октябрьской Революции Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, заведующий Лабораторией физико-химических процессов и динамики поверхности океана.

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий им. академика М. Д. Агеева Дальневосточного отделения Российской академии наук.

Защита состоится «\_\_» \_\_\_\_\_ г. в \_\_ ч \_\_ мин на заседании диссертационного совета 24.1.090.03 (Д 002.239.03) при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук по адресу: Нахимовский пр., д. 36, г. Москва, 117997.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте <http://www.disser.ocean.ru> Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук Института.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
кандидат геолого-минералогических наук

Политова Надежда Вячеславовна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность исследования.

В современном состоянии изменяющегося климата и ввиду особого внимания к природным и техногенным воздействиям на окружающую среду становится все более важным проведение регулярных мониторинговых исследований акваторий. Неотъемлемой частью таких исследований является изучение поверхности дна, донного грунта, животных и растений прямыми и дистанционными методами. Видовой состав и численность донных животных являются важнейшими маркерами состояния экосистем, а в случае исследования промысловых видов представляют прямой экономический интерес. Структура донного микрорельефа позволяет судить о гидрологических режимах акватории, интенсивности осадконакопления, а также о явлениях, связанных с подводной разгрузкой природных газов, флюидов и вулканической деятельностью.

Интенсивные исследования окружающей среды придонной области ряда районов Мирового океана связаны также с наличием подводных техногенных объектов. К ним относятся различные технические сооружения (трубопроводы, различных типов и назначения), либо их отдельные подводные части, (мостовые опоры, пирсы и эстакады), а также объекты, часто представляющие навигационные и экологические подводные опасности, такие как затопленные суда, самолеты, инженерные конструкции, археологические объекты, часто скрытые под слоем осадочного материала, ядерно и радиационно опасные объекты (ЯРОО) и захоронения радиоактивных отходов (РАО). Исследование таких объектов включает их идентификацию и определение местоположения.

Обозначенные выше задачи могут быть эффективно решены с помощью буксируемых необитаемых подводных аппаратов (БНПА), оснащенных системами подводного наблюдения. Неоспоримым преимуществом использования БНПА является их более низкая стоимость в сравнении с автономными (АНПА) и телеуправляемыми (ТНПА) аппаратами. Это является следствием отсутствия подвижных механизмов и движителей, а также в виду отсутствия необходимости

применения сложных алгоритмов для организации движения аппарата в водной толще. В связи с этим, БНПА являются зачастую оптимальным средством для решения обозначенного круга задач.

Несмотря на то, что необитаемые подводные аппараты (НПА), в т. ч. и БНПА получили широкое применение в исследованиях поверхности дна, серийно они не производятся, за исключением буксируемых гидролокаторов бокового обзора (ГБО) применение которых определяется стандартами, нормами и правилами проведения проектных изыскательских и геолого-разведочных работ. Таким образом, не существует готовых технических решений *исследовательских глубоководных аппаратных комплексов*, для наблюдений подводных техногенных и природных объектов и явлений. Кроме того, в большинстве случаев каждый БНПА рассчитан на решение определенного круга научно-исследовательских задач, в соответствии с которыми производится его комплектация. Комплексы для визуальных наблюдений, в составе БНПА, обладают различными характеристиками в зависимости от требуемого режима работы, поэтому не существует универсального решения, позволяющего одинаково эффективно проводить все возможные исследования поверхности дна.

В этой связи, решение рассмотренных выше задач исследования поверхности дна и подводных ландшафтов (совокупность рельефа дна, подводных объектов, животных и растений) требует разработки и создания нового специального программно-аппаратного комплекса для подводных визуальных наблюдений.

**Цель работы:** повышение эффективности исследования поверхности дна, в том числе микрорельефа дна, природных и техногенных объектов на придонных маршрутах с использованием систем подводного видения в составе глубоководных БНПА. В соответствии с поставленной целью в диссертационной работе решались следующие **задачи:**

1. Анализ актуальных проблем и задач исследования мезо- и микро масштабных свойств и параметров подводных объектов естественного и искусственного происхождения.

2. Анализ существующих систем подводного видения, а также методов обработки подводных видео- и фотоизображений, выявление их достоинств и недостатков.

3. Разработка экспериментального фототелевизионного комплекса для визуальных наблюдений поверхности дна, природных и техногенных объектов.

4. Натурные испытания и внедрение экспериментального образца программно-аппаратного фототелевизионного комплекса в составе глубоководного БНПА «Видеомодуль» в рамках выполнения программ фундаментальных исследований ИО РАН, в том числе в арктических морях России.

5. Исследование и разработка технологии измерения объектов, видимых в кадре, в том числе методов калибровки подводных фото- и видеокамер, а также разработка метода оценки точности измерений.

6. Исследование и разработка технологии программного комплексирования результатов видеосъемки и гидролокационных изображений.

**Научную новизну исследования** составляют **основные положения, выносимые на защиту:**

- Разработан, изготовлен и апробирован программно-аппаратный фототелевизионный комплекс для визуальных наблюдений поверхности дна, устанавливаемый на глубоководный БНПА, включающий в себя фото- и видеокамеры, источники света и систему масштабирования;

- Разработан и апробирован метод автоматизированного измерения объектов на видеоизображениях с помощью системы лазерных указателей, использующий алгоритмы компьютерного зрения и учитывающий перспективные искажения изображения;

- Разработан метод оценки неопределённости измерений объектов на изображении, основанный на анализе разброса измерений расстояния между случайно выбранными точками поверхности дна в пределах содержащей их последовательности кадров;

- Разработана и апробирована методика комплексирования видео и гидролокационных изображений, основанная на построении панорамного видеоизображения и сопоставления его с временной разверткой гидролокационных данных.

**Научная и практическая значимость работы** заключается в следующем:

- Разработанный автором программно-аппаратный фототелевизионный комплекс для подводных визуальных наблюдений позволяет проводить высокоразрешающую фото- и видеосъемку поверхности дна и подводных объектов в глубоководных районах Мирового океана;

- Разработанный автором оригинальный метод измерений объектов в кадре, основанный на использовании системы лазерных указателей с последующей коррекцией искажений, позволяет автоматизировать процесс измерения донной фауны и прочих объектов с погрешностью в единицы миллиметров на откорректированном видеоизображении;

- Разработанный автором метод комплексирования видео- и гидролокационных изображений позволяет представлять эти изображения в одинаковом формате и масштабе и накладывать их одно на другое, что повышает оперативность и точность (т.е. эффективность) взаимной интерпретации этих изображений;

- С помощью разработанного и созданного автором фототелевизионного комплекса для визуальных наблюдений поверхности дна и подводных объектов в составе БНПА «Видеомодуль» получен уникальный массив данных о составе и распределении донных биологических сообществ в различных районах Российского Арктического региона, а также новейшие данные о состоянии ЯРОО и РАО, захороненных в Новоземельской впадине и заливах Новой Земли.

**Достоверность научных результатов** обеспечивается: (1) апробацией программно-аппаратного комплекса и методик работы в морских экспедициях в процессе исследований поверхности дна, донных животных и подводных техногенных объектов; (2) тестированием работы алгоритмов на различных выборках фото- и видеоданных, полученных в ходе морских экспедиций в

различных районах Мирового океана; (3) статистическим анализом оценок неопределённости измерений по материалам видеоданных.

**Личный вклад автора** заключается в:

- разработке, изготовлении и испытаниях программно-аппаратного комплекса для визуальных наблюдений поверхности дна;
- разработке метода измерений объектов на поверхности дна с использованием системы лазерных указателей и алгоритмов компьютерного зрения;
- разработке метода оценки неопределённости измерений по материалам видеосъемки;
- разработке метода комплексирования гидролокационных и видео данных;
- подготовке полученных результатов к публикации в ведущих российских научных журналах, представлении их на международных конференциях.

**Апробация диссертационной работы.** Результаты настоящей работы докладывались на международных конференциях «Методы и средства океанологических исследований» (МСОИ 2019, 2021, 2023 гг.) в Институте океанологии, г. Москва; на конференции «Комплексные исследования Мирового океана» в 2019 г., г. Севастополь; на конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики» в 2020 г., Санкт-Петербург; на конференции «Моря России: Вызовы отечественной науки» в 2022 г., г. Севастополь, на конференции «Комплексные исследования Мирового океана» в 2024 г., г. Владивосток.

**Публикации по теме диссертации.** По теме диссертации опубликовано 18 работ, в том числе 5 статей в рецензируемых журналах из списка ВАК, 11 тезисов докладов на конференциях, 1 свидетельство на программу для электронных вычислительных машин, 1 заявка на патент полезной модели.

**Благодарности.** Автор выражает глубокую благодарность своему научному руководителю, д.т.н. Н. А. Римскому-Корсакову. Автор благодарит коллектив Лаборатории гидролокации дна ИО РАН, в особенности Пронина А. А., Белевитнева Я. И., Муравья В. О., Лесина А. В., Лежнина В. А. за ценные научные консультации, плодотворное сотрудничество и неоценимую поддержку. Автор выражает глубокую

благодарность академику М. В. Флинту, а также С. Г. Пояркову, Я. В. Щегловой за организацию морских экспедиций, результаты которых легли в основу данной работы. Автор выражает благодарность экипажу НИС «Академик Мстислав Келдыш» и лично капитану Ю. Н. Горбачу. Автор благодарит коллектив Лаборатории экологии прибрежных и донных сообществ ИО РАН, в особенности к.б.н. А. К. Залота, к.б.н. А. А. Удалова за плодотворное сотрудничество и неоценимый вклад в развитие совместных исследований. Автор выражает благодарность зав. Лабораторией оптики океана ИО РАН, к.ф.-м.н. Д. И. Глуховцу за внимательное прочтение и оценку диссертации, а также за ценные рекомендации и замечания. Автор выражает глубокую признательность к.г.-м.н. Н. В. Политовой за помощь и рекомендации в подготовке диссертации. Автор сердечно благодарит свою супругу к.б.н. Лифанчук А. В. за огромную поддержку в ходе написания диссертации.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **Введении** представлена общая характеристика работы, краткий обзор состояния проблемы; обоснована актуальность темы диссертации; сформулирована основная цель исследования, изложены поставленные задачи. Представлены основные положения, выносимые на защиту, научная и практическая значимость работы, обозначен личный вклад автора.

В **Главе 1** проанализированы существующие типы систем для визуального наблюдения поверхности дна и их реализации в составе буксируемых аппаратов, а также методы и средства обработки данных с целью их параметризации и проведения количественных оценок. В **подразделе 1.1** рассмотрены актуальные проблемы исследований поверхности дна. Выделено два случая: исследование океанологических объектов и техногенных объектов. Показана необходимость совмещения фото-, видео- и гидролокационной съемки для получения наиболее полной информации об исследуемых объектах. В **подразделе 1.2** рассмотрены существующие типы оптических систем подводного видения. Выделен наиболее распространенный тип, представляющий собой фототелевизионный комплекс, состоящий из источника света с широкой диаграммой направленности, и

разнесённую с ним на небольшое расстояние фото- или видеокамеру с более узкой диаграммой направленности, что в совокупности с излучателем позволяет получать одинаково экспонированное изображение при изменении (в некоторых пределах) наклона системы и изменении высоты над объектом. Отдельно рассмотрены особенности формирования подводного изображения, связанные с присутствием помехи обратного рассеяния (ПОР) и радиальной дисторсии, возникающей при использовании плоско-параллельного иллиuminатора. В **подразделе 1.3** проводится анализ существующих буксируемых систем для маршрутных визуальных наблюдений. Рассматривается базовая конфигурация таких систем, состоящая из одной или более камер, источников света, устройства записи и/или передачи данных и источника питания. Рассмотрены существующие реализации БНПА, оснащенные системами подводного видения. Отдельно рассмотрены отечественные аппараты: технологический комплекс «Абиссль-3», с рабочей глубиной до 6000 м, выполненный в виде многозвенной модульной схемы, содержащей заглубитель, фототелевизионный комплекс и гидроакустическую систему; буксируемое устройство для картографирования объектов морского дна, с рабочей глубиной до 500 м, предназначенный для осмотровых работ и оснащенный фототелевизионным комплексом с возможностью передачи данных по кабель-тросу в режиме реального времени; буксируемая видеосистема легкого класса, с рабочей глубиной до 500 м, предназначенная для буксировки на тросе с записью данных во внутренний накопитель. В **подразделе 1.4** рассмотрены средства обработки подводных фото- и видеоизображений, основанные либо на методах фотограмметрии, позволяющих восстановить трехмерную структуру поверхности дна и объектов, либо на применении масштабирующих линеек. Вторым способом является более простым для реализации, однако область его применения ограничена. Далее в работе рассматривается вопрос преодоления этого ограничения. В **подразделе 1.5** рассмотрен математический аппарат, необходимый для применения методов параметризации подводных изображений, а именно: центральная проекция, связывающая сцену в трёхмерном пространстве и её изображение, полученное с

данного ракурса (вид); триангуляция трехмерных точек объекта по двум известным видам сцены, разнесенным в пространстве.

**Глава 2** посвящена описанию разработанного автором фототелевизионного комплекса для визуальных наблюдений поверхности дна, подробному изложению методики проведения маршрутных наблюдений, а также описанию массива данных, полученных в результате эксплуатации разработанного фототелевизионного комплекса в составе БНПА.

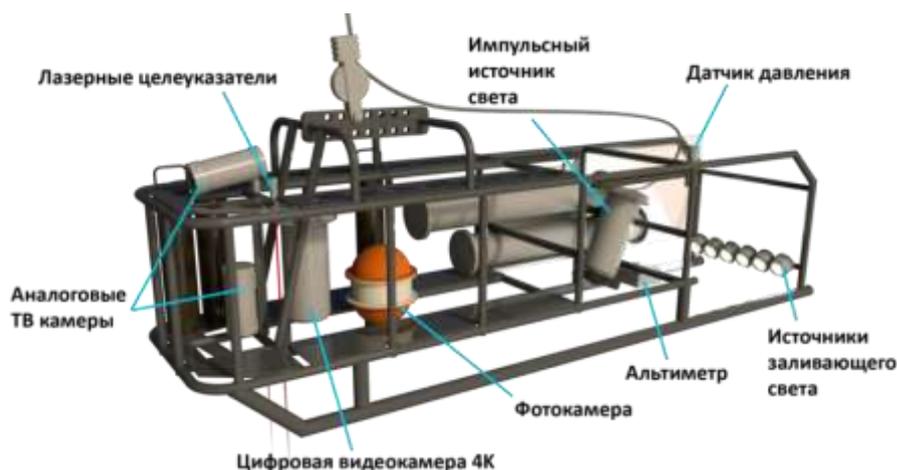


Рисунок 1. БНПА «Видеомодуль», схематическое изображение с указанием основных систем в составе аппарата.

В **подразделе 2.1** приведено описание разработанного в Институте океанологии БНПА «Видеомодуль» (рисунок 1), для оснащения которого был разработан фототелевизионный комплекс. Рассматриваются прочие системы аппарата: высокочастотный ГБО, глубомер, альтиметр, инклинометр. Проводится анализ вращений БНПА относительно точки подвеса, по результатам которого делается вывод о том, что в пределах 1-2 секунд движение аппарата можно считать поступательным, что будет использовано далее при разработке алгоритма коррекции перспективы изображения. В **подразделе 2.2** рассматриваются компоненты разработанного автором фототелевизионного комплекса. Видеосистема реализована на базе IP-камеры видеонаблюдения Weward BD3670M, позволяющей осуществлять как запись данных на внутренний накопитель, так и осуществлять передачу видеопотока по локальной сети в реальном времени. Видеосистема имеет угол обзора  $74^\circ$  в воде и позволяет различить в кадре объекты величиной порядка 1

см. Фотосистема реализована на базе фотокамеры Sony ILCE7SM2 с объективом, обеспечивающим угол обзора  $54^\circ$  в воде. Фотосистема позволяет различить в кадре объекты величиной порядка 1 мм. Система освещения состоит из источников заливающего света на базе матричных светоизлучающих диодов (6 шт. по 30 Вт), а также импульсного источника света на базе фотовспышки Godox AD200 (200 Вт). Система масштабирования представляет собой два параллельных лазерных указателя, проецирующих на поверхность дна две отметки на фиксированном расстоянии в 20 см друг от друга. В **подразделе 2.3** рассмотрен программный комплекс для регистрации данных БНПА, в том числе разработанное автором программное обеспечение для отображения и записи показаний датчиков БНПА и их синхронизации с фото и видео данными. Отображение данных на видеозаписях выполнено в виде подключаемых субтитров. В **подразделе 2.4** рассматриваются методические аспекты проведения визуальных наблюдений применительно к исследованиям океанологических и техногенных объектов. В случае океанологических объектов выполняются прямолинейные трансекты, в ходе которых происходит непрерывная видеозапись и фотосъемка с постоянным интервалом. Аппарат при этом буксируется на расстоянии 1 – 1.5 м над грунтом со скоростью 0.5 узла. При просмотре видеозаписей поверхности дна специалист-наблюдатель может произвести описание зафиксированных организмов, определить их скученность и мозаичность, а также оценить их размер с помощью лазерной масштабной линейки (рисунок 2). В случае исследования техногенных объектов (таких как РАО) требуется, как правило, уточнения координат их местоположения с помощью гидролокатора бокового обзора, а затем визуальный осмотр. Маршрут движения судна строится по схеме «звездочка», т.е. представляет собой систему галсов, пересекающихся в точке, соответствующей предварительно определенному местоположению объекта, и ориентированных вдоль направлений север – юг, восток – запад, северо-восток – юго-запад и северо-запад – юго-восток. В ходе буксировки, при первом проходе расстояние до грунта выдерживается заведомо выше оценочной максимальной высоты исследуемого объекта с целью получения качественного гидролокационного изображения. При дальнейших проходах расстояние

выбирается таким образом, чтобы обеспечить попадание значительной части объекта в поле зрения объектива.



Рисунок 2. Стоп-кадр видеосъемки поверхности дна в центральной части Карского моря, снятый БНПА «Видеомодуль» в 76 рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш», 2019 г. На снимке присутствует краб-стригун с шириной карапакса 4.4 см, рассчитанной относительно расстояния между лазерными отметками, которое на дне составляет 20 см.

В подразделе 2.5 рассматривается массив данных, полученный с помощью фототелевизионного комплекса в составе БНПА. Испытания комплекса в составе проводились в ходе экспедиционных исследований на НИС «Академик Мстислав Келдыш» (АМК), ИО РАН. Исследования велись, в основном, в арктических регионах, а именно: в Карском, Баренцевом, Восточно-Сибирском море и море Лаптевых, а также в Южной Атлантике. С помощью БНПА «Видеомодуль» были получены уникальные видео- и фотоматериалы, характеризующие поверхность дна в различных районах Мирового океана, а также новейшие данные о состоянии РАО в Карском море и заливах Новой Земли, в том числе проведена идентификация нескольких ранее не опознанных объектов.

**Глава 3** посвящена разработке метода измерений объектов на поверхности дна и исследованию величины неопределённости измерений, достижимой с помощью видеосистемы аппарата. В подразделе 3.1 рассмотрен процесс калибровки фото- и видеокамеры, учитывающий влияние плоско-параллельно иллюминатора. В качестве калибровочного стенда используется аквариум с водой, в который

помещена калибровочная таблица в виде шахматного узора, а камеры размещены вне аквариума перпендикулярно стенке. В результате калибровки получены значения фокусного расстояния, центра проекции и коэффициентов радиальной дисторсии для фото- и видеокамеры. В **подразделе 3.2** рассматривается возможность аппроксимации дна плоскостью для дальнейшего масштабирования с помощью лазерной масштабной линейки. Исследуются отдельные фрагменты видеозаписей, на основе которых построены 3D облака точек исследуемых участков дна. Для каждого облака точек была определена аппроксимирующая плоскость и вычислена погрешность, определяемая отношением расстояния от реальной точки облака до найденной плоскости к высоте камеры над грунтом. Анализ полученных значений погрешности показал, что медианное значение погрешности для визуально ровного дна не превышает **1%**, а общий размах – **4%**. Для сравнения, медианное значение погрешности для участка дна с явно выраженными неровностями составило более **3%**, а размах – **14%**. Таким образом, сделан вывод о целесообразности аппроксимации поверхности дна плоскостью в случае отсутствия в кадре резких перепадов микрорельефа и крупногабаритных объектов. В **подразделе 3.3** приводится описание разработанного автором метода коррекции перспективы изображения в случае ровного дна. Метод состоит из двух этапов, первым из которых является нахождение ориентации плоскости дна относительно камеры:

- в паре последовательных видеокадров, полученных с разницей не более 2 секунд, с помощью алгоритмов поиска особенностей (детекторов) и алгоритмов описания найденных особенностей (дескрипторов) находятся соответствия – точки на изображениях, соответствующие одним и тем же точкам сцены;

- из найденных соответствий формируются вектора движения (направленные отрезки, проведенные между парами соответствий) и рассчитывается фокус расширения (ФР) – точка, в которой сходятся вектора движения. Т.к. временной интервал между парой кадров не превышает 2 с, вращением аппарата можно пренебречь. Геометрия формирования ФР представлена на рисунке 3;

- из известных параметров калибровки камеры и ФР находится 3D вектор смещения камеры и вычисляются две матрицы проекций, которые описывают положение камеры при съемки обоих кадров;

- из известных матриц проекций и соответствий методом триангуляции вычисляется разреженное 3D облако точек, которое затем аппроксимируется плоскостью и вычисляется ее нормаль  $\mathbf{n}$ ;

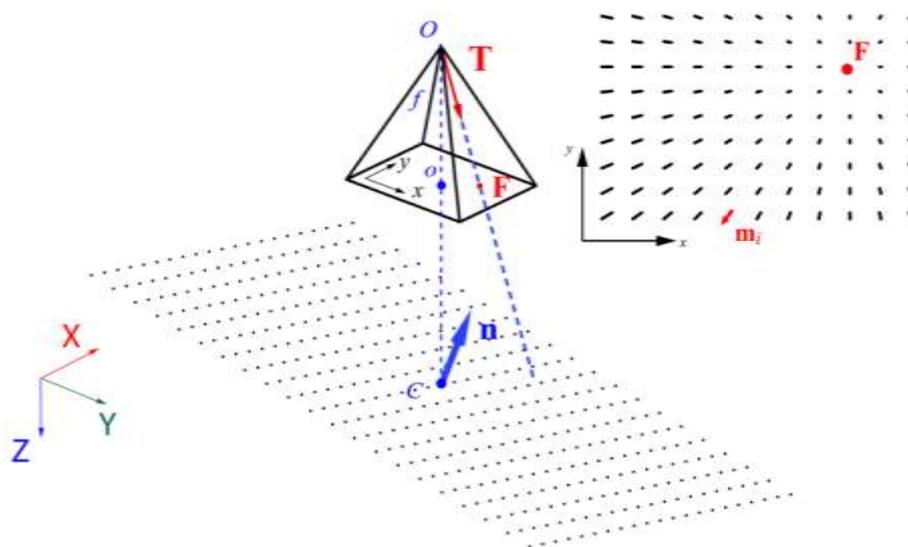


Рисунок 3. Геометрия сцены и формирование ФР. Рассмотрен случай, когда ФР находится в границах изображения:  $O$  – центр проекции и начало координат сцены;  $C$  – центр плоскости сцены;  $\mathbf{n}$  – нормаль плоскости сцены;  $o$  –принципиальная точка и начало координат плоскости изображения;  $f$  – фокусное расстояние;  $\mathbf{T}$  – вектор смещения камеры;  $\mathbf{F}$  – ФР. В правом верхнем углу изображена плоскость изображения с отмеченной точкой  $F$  и векторами движения, образованными смещением точек изображения:  $\mathbf{m}_i$  –  $i$ -й вектор движения

Вторым этапом является виртуальный поворот плоскости дна таким образом, чтобы получить «вид сверху». Такой поворот называется обратным перспективным преобразованием (ОПП). Для вычисления ОПП сначала решается прямая задача – нахождение преобразования, в результате которого изображение плоскости дна, параллельной плоскости изображения, трансформируется в изображение наклонной плоскости дна с известной нормалью  $\mathbf{n}$ . Процесс формирования прямого перспективного преобразования показан на рисунке 4. Обратное перспективное преобразование находится путем вычисления обратной матрицы прямого преобразования. В результате работы описанного метода генерируется

выпрямленное изображение участка дна, на котором далее можно проводить измерения объектов путем сравнения их размеров с лазерной масштабной линейкой.

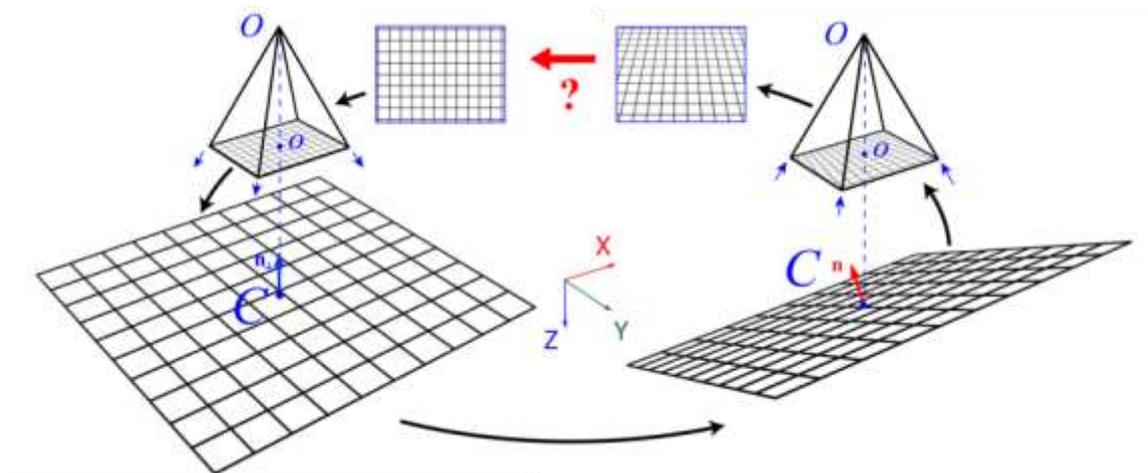


Рисунок 4. Прямое перспективное преобразование неискаженного изображения в искаженное: слева показан процесс проецирования изображения на параллельную плоскость с нормалью  $\mathbf{n}_\perp$ ; справа показано проецирование наклонной плоскости с нормалью  $\mathbf{n}$  на новое изображение. Стрелками по краям плоскостей изображения обозначено направление проецирования. В средней части рисунка показан вид соответствующих изображений. Неизвестное преобразование (ОПП) обозначено стрелкой со знаком вопроса.

В подразделе 3.4 предложена методика оценки неопределённости измерений, основанная на анализе натуральных данных при неизвестных истинных размерах исследуемых объектов. Для анализа была подготовлена подборка фрагментов видеозаписей из нескольких экспедиций, в которых производились исследования работа с использованием БНПА «Видеомодуль». В основе методики анализа лежит измерение на видеоизображении одного и того же объекта в пределах последовательности кадров, на которых виден этот объект. Распределение измерений объекта не является нормальным, поэтому классические статистические оценки (среднее значение, среднеквадратическое отклонение) не применимы для описания разброса измерений, и в качестве оценки разброса был использован размах. Для проведения измерений была создана программа на языке Python, с помощью которой на необработанной видеозаписи случайным образом выделяется набор точек, положение которых отслеживается в пределах последовательности кадров, на которых они видны. После этого генерируется массив значений расстояния между парами точек. Для каждой последовательности значений

вычисляется ее размах. Далее отслеженные положения точек преобразуются в соответствии с геометрическими коррекциями изображения: коррекцией дисторсии (на основе найденных на этапе калибровки коэффициентов радиальной дисторсии) и коррекцией перспективы (раздел 3.3). Из преобразованных массивов также вычисляются последовательности значений расстояния между парами точек и размах. В результате работы программы для исследуемой видеозаписи генерируется три массива значений размаха измерений, которые и являются мерой оценки неопределённости измерений. В таблице 1 приведены медианные значения размаха (в мм) для каждой видеозаписи (в шапке таблицы указаны номера соответствующих станций НИС «Академик Мстислав Келдыш»).

Таблица 1. Медианные значения размаха измерений (мм) каждого видео исходные данные, данные с коррекцией дисторсии и данные с коррекцией перспективы.

	6902	6904	6907	6911	6916	6919	6922	7022	7164	7494	7498	7505
<b>Без коррекции</b>	15.0	19.8	8.8	12.6	9.1	18.8	12.3	19.5	36.5	21.6	18.2	17.0
<b>Дисторсия</b>	15.0	19.2	9.4	12.9	9.0	21.0	11.8	27.4	35.9	26.3	20.1	22.9
<b>Перспектива</b>	9.9	6.3	2.6	7.4	4.0	8.7	7.2	14.3	30.9	19.1	7.0	6.2

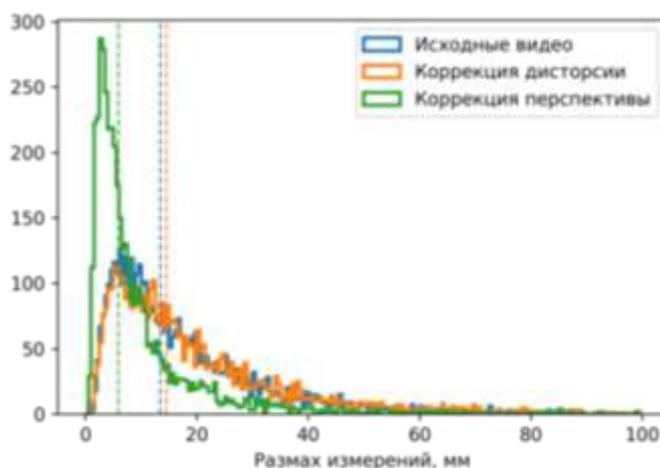


Рисунок 5. Общие гистограммы распределения размаха измерений для всех видеозаписей.

Пунктирными линиями соответствующих цветов отмечены медианные значения размаха: без коррекции – **13.4** мм, с коррекцией дисторсии – **14.5** мм, с коррекцией перспективы **5.9** мм.

На рисунке Рисунок 5 представлены гистограммы распределений размаха измерений для всех видеозаписей и приведены медианные значения. Статистический анализ полученных распределений размаха показал, что применение коррекции перспективы снижает медианное значение размаха более чем

в 2 раза, что говорит об эффективности предложенного автором метода коррекции перспективы.

**Глава 4** посвящена описанию алгоритма комплексирования данных, получаемых с помощью фототелевизионного комплекса и ГБО в составе аппарата. В **подразделе 4.1.** раскрывается проблема совмещения видео- и гидролокационных данных, заключающаяся в необходимости представления видеоизображения в виде временной развертки – панорамного изображения. В **подразделе 4.2** приведено описание алгоритма составления панорамного видеоизображения на базе видеоряда и объединения видео- и гидролокационных изображений с целью взаимного дополнения и интерпретации информации, полученной с помощью этих двух систем. Работа алгоритма построения комплексного изображения происходит следующим образом: на первом этапе создается панорама на основе выбранного фрагмента видеозаписи. Фрагмент разбивается на видеокадры, производится поиск и сопоставление особых точек, на основе которых все изображения (видеокадры) помещаются в общую систему координат с определенным смещением относительно друг друга. Из каждого видеокадра определенным образом выбирается по одному узкому фрагменту (далее – строка). Фрагменты, выстраиваясь один за другим, образуют результирующее изображение. В **подразделе 4.3** описан второй этап построения комплексного изображения: каждой строке панорамного видеоизображения ставится в соответствие строка изображения, полученного с помощью ГБО, с левого и правого канала (борта) соответственно. Все три изображения соединяются вместе таким образом, что в центре находится панорамное видеоизображение, а слева и справа от него – сонограммы соответствующих каналов ГБО. В **подразделе 4.4** представлены результаты работы алгоритма на примере четырех маршрутов, выполненных в экспедициях НИС «Академик Мстислав Келдыш» 2018 и 2019 гг. в Карское море (рисунок 6). Изображение 2 представляет реакторный отсек АПЛ К-19. Хорошо заметна сетчатая структура шпангоутов и стрингеров разрушенного легкого корпуса отсека, повторяющаяся на видео и гидролокационном изображении. При этом на панораме заметны такие мелкие объекты, как отдельные детали оборудования межкорпусного

пространства. Примечательно, что объект на панораме и на гидролокационном изображении ориентирован по-разному. Это говорит о том, что при проходе по маршруту БНПА сносило в сторону, и направление буксировки не совпадало с ориентацией видеокадра в горизонтальной плоскости. Изображения 3 и 4 хорошо демонстрируют ограничения метода подводной видеосъемки в отсутствие дополнительных данных, получаемых с помощью ГБО. Группа контейнеров с твердыми радиоактивными отходами на изображении 3 и баржа с ТРО на изображении 4 обильно покрыты водорослями, что затрудняет визуальную идентификацию отдельных частей изображения. Для звуковых волн морская растительность практически прозрачна, поэтому на гидролокационных изображениях детали объекта различаются более четко. При этом отдельные видимые детали на видеоизображении позволяют судить о состоянии объекта и возможных его повреждениях.

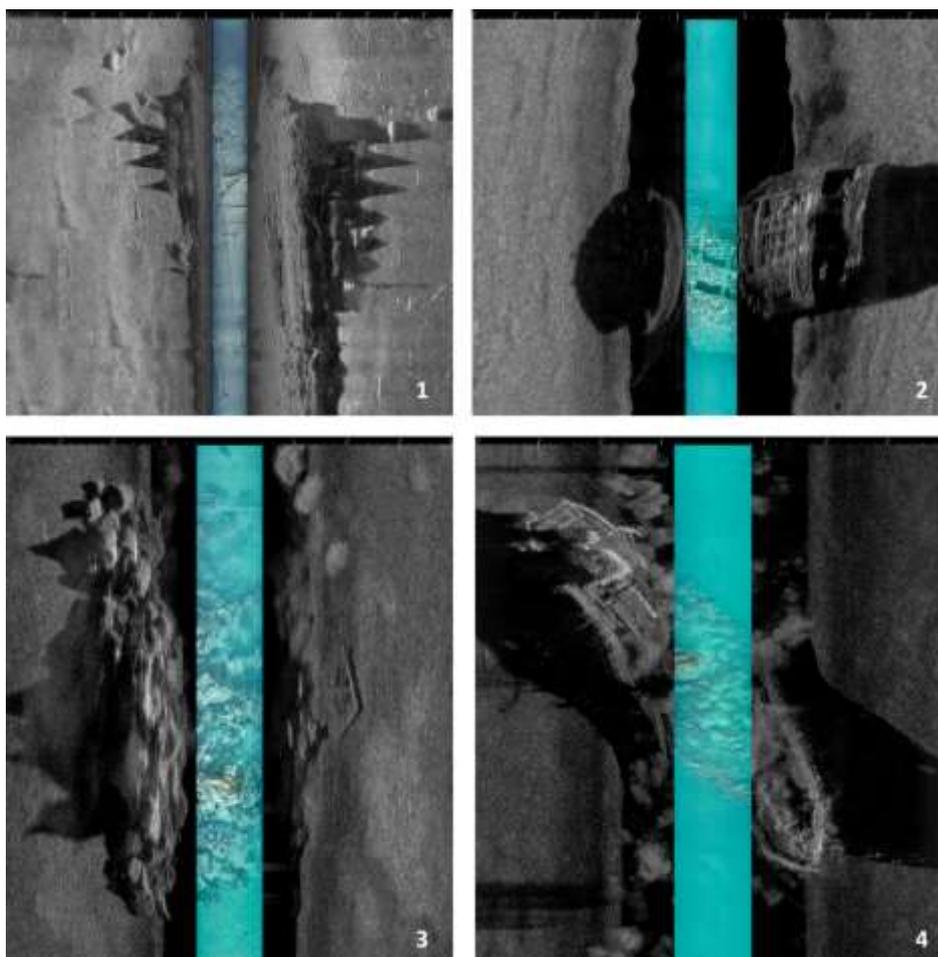


Рисунок 6. Комплексные изображения объектов, исследованных в заливе Абросимова и Новоземельской впадине с использованием видеосистемы и гидролокатора бокового обзора

БНПА «Видеомодуль», соответствующие трансектам 1-4. 1 – танкер ТНТ-15; 2 – реакторный отсек АПЛ К-19; 3 – объект 31 – свалка ТРО; 4 – затопленная баржа с ТРО.

В **Заключении** сформулированы основные выводы работы:

1. **Выполнен анализ актуальных проблем и задач** исследования мезо- и микро масштабных свойств и параметров подводных объектов естественного и искусственного происхождения, в результате которого определены основные подходы к дистанционным исследованиям океанологических и техногенных объектов, основанные на сочетании разномасштабных визуальных наблюдений и гидролокационной съемки.

2. **Выполнен анализ существующих систем подводного видения**, а также **методов обработки** подводных видео-, фото- и акустических изображений, в результате которого:

- выделены основные существующие типы систем подводного видения и их реализации в составе буксируемых аппаратов, в т.ч. в отечественном сегменте. Обоснована необходимость создания нового фототелевизионного комплекса;
- рассмотрены методы параметризации фото- и видеоизображений, основанные на применении масштабирующих лазерных систем и фотограмметрических методов. Показано, что в ряде случаев для параметризации данных наиболее удобным является использование лазерной масштабной линейки.

3. **Разработан и создан экспериментальный фототелевизионный комплекс** для визуальных наблюдений поверхности дна, природных и техногенных объектов, а именно:

- **создан и апробирован программно-аппаратный комплекс**, предназначенный для установки на глубоководный БНПА, включающий в себя видеокамеру высокого разрешения, фотокамеру, источники заливающего света, импульсные источники света, подзорную видеосистему для управления БНПА, а также лазерную масштабирующую систему. Видеосистема

обеспечивает распознаваемость объектов порядка 1 см, фотосистема – порядка 1 мм;

- для регистрации показаний вспомогательных датчиков БНПА **разработано ПО**, реализующее отображение и запись показаний датчиков, а также синхронизацию их с видеоданными, что обеспечивает эффективную интерпретацию получаемой фото- и видеоинформации в процессе обработки данных.

4. Проведены **натурные испытания** и внедрение экспериментального образца программно-аппаратного фототелевизионного комплекса в составе глубоководного БНПА «Видеомодуль» в рамках выполнения программ фундаментальных исследований ИО РАН, в том числе в арктических морях России. По результатам испытаний:

- **разработана и апробирована** методика эксплуатации БНПА для биологических исследований и для поиска и идентификации подводных объектов;
- **получены уникальные данные** о составе и численности донных животных и растений в различных частях Мирового океана, а также новые данные о местоположении и состоянии захоронений радиоактивных отходов в Карском море и заливах Новой Земли.

5. Проведено **исследование и разработка** технологии **измерения объектов**, видимых в кадре, в том числе методов калибровки подводных фото- и видеокамер, а также метода **оценки точности** измерений, в результате которых:

- показано, что в отсутствии на дне выраженных неровностей рельефа и крупногабаритных объектов (высотой более 10 см), при высоте аппарата над грунтом 1 м и более, поверхность дна может быть **аппроксимирована плоскостью**. При этом относительная погрешность измерений, связанная с перепадом высоты объектов в кадре, не превышает 2 %;
- разработан **метод измерения объектов на поверхности дна**, основанный на **коррекции перспективных искажений** и дисторсии

изображения, причем коррекция перспективы производится на основе вычисления ориентации камеры относительно поверхности дна по двум последовательным видеокадрам. Предложенный метод использует непосредственно информацию, извлекаемую из калиброванного изображения, и не требует использования датчиков ориентации аппарата в пространстве;

- **разработан метод оценки неопределённости измерений** с помощью лазерных указателей по материалам натуральных данных, без необходимости помещения в кадр объектов известного размера. С его помощью оценена эффективность **метода коррекции перспективных искажений**, показывающая статистически значимое снижение разброса измерений более чем в 2 раза.

б. Проведено исследование и разработка технологии комплексирования результатов видеосъемки и гидролокационных изображений, в результате которых:

- **разработан алгоритм комплексирования гидролокационных и видеоизображений**, основанный на построении панорамного видеоизображения, представляющего собой развертку видеозаписи во времени построчно, и сопоставлении его с гидролокационным изображением; качественно **показана эффективность** такого представления информации для лучшей интерпретации получаемых данных.

В **приложении 1** приведено описание программного обеспечения Ocean Record, разработанного автором и предназначенного для регистрации показаний датчиков аппарата.

В **приложении 2** приведены аббревиатуры и сокращения, используемые в тексте.

## **РАБОТЫ, ОПУБЛИКОВАННЫЕ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

*Статьи, опубликованные в изданиях перечня ВАК:*

1. **Анисимов И. М., Тронза С. Н.** Программное комплексирование данных синхронной видеосъемки и гидролокационного обзора поверхности дна // Океанология. 2021. Т. 61. № 3. С. 479-490. DOI: 10.31857/S0030157421030023

2. **Анисимов И. М.**, Залота А. К., Лесин А. В., Муравья В. О. Особенности исследования биологических и техногенных объектов с использованием глубоководных буксируемых аппаратов // *Океанология*. 2023. Т. 63. № 5. С. 840-852. DOI: 10.31857/S0030157423050027

3. Римский-Корсаков Н. А., Флинт М.В., Поярков С.Г., **Анисимов И. М.**, Белевитнев Я.И., Пронин А. А., Тронза С. Н. Развитие технологии комплексных инструментальных подводных наблюдений применительно к экосистемам Российской Арктики // *Океанология*. 2019. Т. 59. № 4. С. 679-683. DOI: 10.31857/S0030-1574594679-683

4. Римский-Корсаков Н. А., Флинт М. В., Казеннов А. Ю., **Анисимов И. М.**, Поярков С. Г., Пронин А. А., Тронза С.Н. Результаты исследования объектов, представляющих экологическую угрозу, в заливе Абросимова (Новая Земля, Карское море) // *Океанология*. 2020. Т. 60. № 5. С. 720-728. DOI: 10.31857/S0030157420050214

5. Римский-Корсаков Н. А., Казеннов А. Ю., Кикнадзе О.Е., Пронин А.А., **Анисимов И. М.**, Лесин А. В., Муравья В. О. Исследование объектов, представляющих экологическую угрозу, в заливе Цивольки (Новая Земля, Карское море) // *Океанологические Исследования*. 2023. Т. 51. № 3. С. 73-83. DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2023.51(3).3

*Тезисы докладов на конференциях:*

6. Пронин А. А., Римский-Корсаков Н. А., **Анисимов И. М.**, Белевитнев Я. И., Тронза С. Н., Лесин А. В. Исследования в районах подводной разгрузки газообразных углеводородов в море Лаптевых с помощью буксируемого подводного аппарата "Видеомодуль" // *Современные методы и средства океанологических исследований (МСОИ-2019): Материалы XVI Всероссийской научно-технической конференции*, Москва, 15–17 мая 2019 года. Том II. Москва: Издательский дом Академии имени Н.Е. Жуковского, 2019. С. 178-181.

7. **Анисимов И. М.**, Белевитнев Я. И. Оценка фотометрических и электрических характеристик источников искусственного заливающего света для глубоководных визуальных наблюдений // *Современные методы и средства океанологических*

исследований (МСОИ-2019): Материалы XVI Всероссийской научно-технической конференции, Москва, 15–17 мая 2019 года. Том II. Москва: Издательский дом Академии имени Н.Е. Жуковского, 2019. С. 136-140.

8. Белевитнев Я. И., **Анисимов И. М.**, Лесин А. В. Методические особенности исследования метана в акваториях // Современные методы и средства океанологических исследований (МСОИ-2019): Материалы XVI Всероссийской научно-технической конференции, Москва, 15–17 мая 2019 года. Том II. Москва: Издательский дом Академии имени Н.Е. Жуковского, 2019. С. 132-134.

9. **Анисимов И. М.**, Тронза С. Н. Синхронная гидролокационная и видеосъемка при подводных исследованиях // Современные методы и средства океанологических исследований (МСОИ-2019): Материалы XVI Всероссийской научно-технической конференции, Москва, 15–17 мая 2019 года. Том II. Москва: Издательский дом Академии имени Н.Е. Жуковского, 2019. С. 140-142.

10. **Анисимов И. М.**, Белевитнев Я. И., Краснова В. В., Кузьмин В. Ю., Марин В. М. Система панорамного видеонаблюдения для подводных визуальных исследований // Комплексные исследования Мирового океана: Материалы IV Всероссийской научной конференции молодых ученых, Севастополь, 22–26 апреля 2019 года. Севастополь: Морской гидрофизический институт РАН, 2019. С. 349-350.

11. **Анисимов, И. М.**, Римский-Корсаков Н. А., Тронза С. Н. Комплексование гидроакустической и видео информации // Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики: труды XV Всероссийской конференции, Санкт-Петербург, 21–25 сентября 2020 года. Санкт-Петербург: Б. и., 2020. С. 316-318.

12. **Анисимов И. М.**, Муравья В. О., Тронза С. Н. Применение метода комплексования гидролокационных и видео данных в исследованиях подводных потенциально опасных объектов в Карском море и заливах Новой Земли // Современные методы и средства океанологических исследований (МСОИ-2021): Материалы XVII Всероссийской научно-технической конференции, Москва, 18–20 мая 2021 года. Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН. Том 2. – Москва: ИО РАН, 2021. С. 91-94.

13. **Анисимов И. М.**, Лесин А. В., Муравья В. О., С. Н. Тронза Построение трехмерных моделей затопленных объектов по данным подводной фото и видео съемки // Комплексные исследования Мирового океана: Материалы VI Всероссийской научной конференции молодых ученых, Москва, 18–24 апреля 2021 года. Москва: Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук, 2021. С. 524-525.

14. Муравья В. О., **Анисимов И. М.**, Н. А. Римский-Корсаков Повышение точности построения 3D-моделей затопленных объектов в Карском море с помощью калибровки видеокамеры // Моря России: Вызовы отечественной науки : Тезисы докладов Всероссийской научной конференции, Севастополь, 26–30 сентября 2022 года. Севастополь: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр "Морской гидрофизический институт РАН", 2022. С. 231-232.

15. Удалов А. А., **Анисимов И. М.**, Муравья В. О., Лесин А. В., Кузьмин В. Ю., Залота А. К., Чикина М. В. Исследования донной фауны в 89 рейсе НИС "Академик Мстислав Келдыш" с использованием БНПА "Видеомодуль" // Современные методы и средства океанологических исследований (МСОИ-2023): Материалы XVIII международной научно-технической конференции в 2-х томах, Москва, 23–25 мая 2023 года / Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН. Том 1. Москва: ИО РАН, 2023. С. 155-158.

16. **Анисимов И. М.** Система панорамного видеонаблюдения для подводных визуальных исследований // Комплексные исследования Мирового океана: Материалы VIII Всероссийской научной конференции молодых ученых, Владивосток, 13–17 мая 2024 года. Владивосток: ЦКП «Приморский океанариум», 2024. С. 609-610.

*Патент:*

17. Подводная оптическая система визуального наблюдения / **Анисимов И.М.** Заявка № 2024109629/20.

*Свидетельство на программу для электронных вычислительных машин:*

18. Свидетельство Российской Федерации № 2024617580 о государственной регистрации программы для ЭВМ «Программа для регистрации показаний датчиков буксируемого аппарата» / **Анисимов И.М.** Заявитель и правообладатель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт океанологии им. П.П.Ширшова Российской академии наук // Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 03 апреля 2023 г.

*Статьи в других рецензируемых изданиях*

**Анисимов, И. М.** О выборе источников искусственного освещения для буксируемого необитаемого подводного аппарата "Видеомодуль" / Океанологические исследования. 2018. Т. 46, № 3. С. 214-224. DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2018.46(3).13. EDN YWRMOD.

**Анисимов И. М.,** Римский-Корсаков Н. А., Тронза С. Н. Развитие глубоководных технологий визуальных наблюдений рельефа дна и подводных объектов / Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2019. № 10. С. 149-153. DOI: 10.17513/mjpf.12883. EDN OZHFLM.

**Анисимов, И. М.** Повышение точности измерений объектов на поверхности дна по видеоизображениям с лазерной масштабной линейкой / Подводные исследования и робототехника. 2023. № 4(46). С. 16-28. DOI: 10.37102/1992-4429\_2023\_46\_04\_02. EDN KIQQPF.