

# ПРИМЕНЕНИЕ АНПА «ММТ-3500» ДЛЯ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В АТЛАНТИЧЕСКОМ СЕКТОРЕ АНТАРКТИКИ

**Р.А. Бабаев, А.И. Боровик, Ю.В. Ваулин,  
Г.Д. Елисеенко, Д.Н. Михайлов, Н.А. Найдено**

Представлены результаты применения АНПА «ММТ-3500» для глубоководных исследований в Антарктике, проводимых в течение ряда лет Российской академией наук. В 2022 году состоялась комплексная экспедиция АМК-87 на НИС «Академик Мстислав Келдыш» (87-й рейс), в которой АНПА «ММТ-3500» использовался для исследования глубоководных экосистем Антарктики. АНПА был создан в ИПМТ ДВО РАН и оснащен комплексом аппаратуры для биологических, гидрофизических и геофизических измерений по программе экспедиционных работ. Устройство АНПА и состав его систем были предварительно модернизированы с учетом задач, входящих в программу данных работ. С помощью АНПА были выполнены обзорные эхолокационная и фотографическая съемки дна и биологических объектов, измерения гидрофизических характеристик водной среды по различным пространственным разрезам на трех глубоководных станциях. Комплекс работ обеспечивался с помощью навигационной системы повышенной точности определения координат АНПА и целей, системы поддержки деятельности операторов АНПА. В работе представлены научные материалы, полученные в ходе глубоководных погружений АНПА и дана оценка результатов проведенных исследований.

**Ключевые слова:** автономный необитаемый подводный аппарат (АНПА), глубоководные исследования, мониторинг морских донных экосистем, навигационный комплекс, Антарктика.

## Введение

АНПА являются активно развивающимся средством исследования и освоения Мирового океана. Отечественными и зарубежными исследователями уже накоплен опыт использования АНПА в арктических и антарктических экспедициях [1–6]. АНПА позволяют получить непрерывную картину распределения физических и гидрохимических параметров окружающей среды. При этом одним из самых перспективных методов глубоководных исследований является бесконтактный мониторинг морских донных экосистем с использованием АНПА.

В связи с этим для проведения комплексных биологических исследований (совместно с гидрофизическими, гидрохимическими и другими работами) в экспедициях в Атлантическом секторе Антарктики целесообразно использовать АНПА, проектируемые для работы в экстремальных условиях полярных широт.

В 79-м рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш» (2020 г.) ИПМТ ДВО РАН принимал участие

с АНПА «ММТ-3000», который использовался при выполнении комплексных исследований экосистем Антарктики и глубоководных биологических ресурсов южных морей. В результате работ были получены данные в области морской биологии, гидрофизики и гидрохимии, изучены характер рельефа и структура морского дна [7]. Замечания и рекомендации, полученные во время этой экспедиции, позволили сформулировать техническое задание для нового аппарата «ММТ-3500», специально предназначенного для работы в экстремальных условиях Антарктики.

87-й рейс НИС «Академик Мстислав Келдыш» (19 января – 14 февраля 2022 г.), в котором принял участие ИПМТ ДВО РАН с новым АНПА «ММТ-3500», был направлен на исследования, необходимые для оценки современного состояния экосистем Антарктики, их уязвимости при воздействии промысла, влияния климатических изменений на морские природные комплексы Антарктики, роли Южного океана в глобальных климатических изменениях [8].

При этом особенно актуальны изучение и оценка гидрофизических процессов, определяющих состояние морской среды, гидрохимических условий и их пространственной изменчивости, структуры, функциональных параметров и продуктивности экосистемы антарктических вод в ключевых районах океанографических фронтов, крупномасштабной и локальной циркуляции Южного океана [9].

АНПА «ММТ-3500» позволяет существенно упростить решение поставленных задач, а также получить новые уникальные данные о состоянии экосистем Антарктики и Южного океана, влиянии на них текущих климатических изменений.

### ■ Задачи и условия применения АНПА «ММТ-3500» для исследований в Антарктике

Применение АНПА «ММТ-3500» в комплексной экспедиции АМК-87 требовало оценки тех требований и перечня задач, которым должны были удовлетворять системы аппарата для обеспечения их надежного функционирования в достаточно сложных условиях района работ. Прежде всего требовалось определить эксплуатационные и точностные характеристики систем АНПА с учетом особенностей решаемых задач. Условиями района работ были обусловлены следующие задачи:

- съемка рельефа дна гидролокатором бокового обзора (ГБО), многолучевым эхолотом (МЛЭ) и фотокамерой с импульсным светильником для оценки возможности использования трала Сигсби;
- маршрутные измерения гидрофизических параметров водной среды (давления, температуры, электропроводности, солености, скорости звука в воде, рН, растворенного кислорода, мутности воды, хлорофилла-а, ФАР) и фото-, видеосъемка дна для визуальной оценки распределения глубоководных биологических ресурсов южных морей;
- адаптация программного комплекса для сбора данных и автоматического распознавания отдельных классов биологических объектов на полученных фото-, видеоизображениях; формирование обучающей выборки нейросети, используемой при распознавании морских животных;
- модернизация системы поддержки деятельности операторов АНПА и ее тестирование на основе экспериментальных данных;
- отладка программного обеспечения систем навигации и управления АНПА для работы в условиях южных широт.

### ■ Характеристики и функциональные свойства АНПА «ММТ-3500»

АНПА «ММТ-3500» предназначался для выполнения глубоководных комплексных исследований экосистем Антарктики и оценки биологических ресурсов южных морей до глубин 3500 м. При разработке АНПА «ММТ-3500» его конструкция и состав систем были определены с учетом перечисленных выше задач и условий применения в глубоководных районах Антарктики. В состав штатных систем АНПА были включены: система энергообеспечения (СЭО), движительно-рулевой комплекс (ДРК), система бортового управления, навигации и связи (СБУНС), информационно-измерительный комплекс (ИИК). Кроме того, было разработано новое программное обеспечение, позволяющее планировать и симулировать миссии АНПА, просматривать состояние и управлять всеми подсистемами, а также осуществлять постобработку данных, получаемых в процессе выполнения миссий.

#### *Основные характеристики АНПА «ММТ-3500»*

- максимальная рабочая глубина погружения, м – 3500;
- масса в воздухе, кг – 390;
- размеры, м: 3,86×0,58×1,00;
- маршевая скорость движения относительно воды, м/с: 0... 2,5;
- время автономной работы/пробег со скоростью 0,8 м/с – до 20 часов/ 100 км;
- время замены аккумуляторной батареи (АКБ) не более 30 минут.

Система управления движением как подсистема СБУНС осуществляет при движении АНПА стабилизацию следующих параметров: курса, глубины погружения, расстояния до дна (высоты) и расстояния до нижней кромки льда (при работе подо льдом). Ходовые и динамические свойства АНПА обеспечивают обход препятствий по трассе движения. В аварийном режиме (выходе из строя компьютера автопилота, полном разряде группы АКБ, обрыве цепи питания, коротком замыкании в нагрузке, выходе из строя ДРК и т.п.) осуществляются аварийное всплытие и передача координат АНПА средствами радиосвязи. При работе подо льдом предусмотрен режим автоматического возвращения АНПА к судну-носителю или береговой базе после завершения миссии.

Внешний вид АНПА ММТ-3500 изображен на рис. 1.

Состав и характеристики систем АНПА «ММТ-3500» имеют ряд особенностей, обусловленных на-

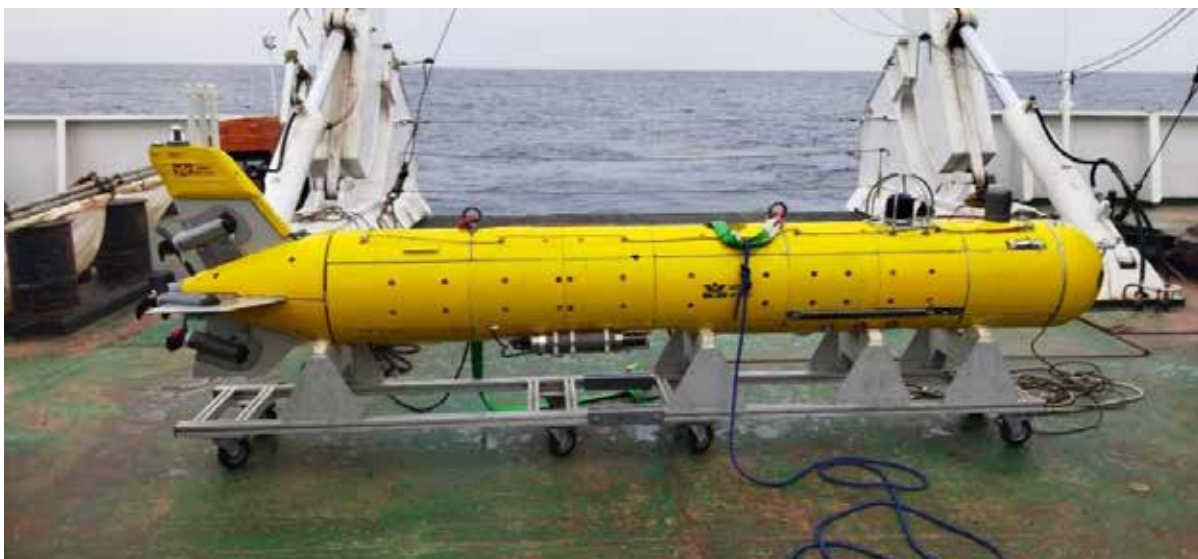


Рис. 1. АНПА «ММТ-3500» на борту НИС «Академик Мстислав Келдыш»

значением и условиями применения аппарата в Антарктике.

#### ■ Двигательно-рулевой комплекс (ДРК)

ДРК АНПА «ММТ-3500» состоит из пяти взаимозаменяемых двигателей (четыре кормовых маршевых и один вертикальный подруливающий) с герморазъединителями для снятия двигателя с АНПА при обслуживании и ремонте. ДРК обеспечивает движение и управление АНПА во всем диапазоне скоростей и маневрирование в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Детальному анализу динамических характеристик АНПА «ММТ-3500» на основе модельных и экспериментальных данных посвящена работа [10].

#### ■ Система энергообеспечения (СЭО)

В состав СЭО входят два модуля аккумуляторных батарей с возможностью резервирования питания потребителей и зарядное устройство. СЭО обеспечивает питание всех устройств (включая дополнительное оборудование мощностью до 100 Вт) во всех режимах работы, питание устройств обеспечения поиска аппарата, входящих в состав контрольно-аварийной системы (КАС) АНПА, в течение 24 часов в режиме ожидания подъема на поверхность в аварийном режиме (при неисправности основных подсистем АНПА), а также автоматический заряд батареи АНПА до 95% емкости в течение не более 4 часов.

#### ■ Система бортового управления, навигации и связи (СБУНС)

##### *Состав и характеристики:*

- бортовой компьютер на базе модуля COM ExpressType 10 Mini CEM846PG-E3845-4G с программным обеспечением;
- навигационно-пилотажные датчики с магнитным компасом типа Vectornav VN-100T-CR;
- доплеровский лаг МТСР.1.00.0.0.00.00 ТУ (производства ИПМТ ДВО РАН);
- датчик глубины с разрешающей способностью 0,005 МПа и пределом систематической составляющей погрешности  $\pm 0,07$  МПа (производства ИПМТ ДВО РАН);
- семиканальная эхолокационная система (ЭЛС) МТСР.1.00.0.0.00.00 ТУ (производства ИПМТ ДВО РАН);
- бортовая инерциальная навигационная система (БИНС) ГЛ-90;
- индукционный (вертушечный) лаг ИУПМ.402131.001 (производства ИПМТ ДВО РАН);
- приемник спутниковой навигационной системы (СНС) GPS/ГЛОНАС Trimble (обеспечивает определение местоположения АНПА с погрешностью не более 20 м);
- гидроакустическая система навигации и связи (ГАСНС) с ультракороткой базой (модель EvoLogic S2CR 15/27);
- ГАСНС с длинной базой (производства ООО «Аквателеком»);
- модуль радиосвязи 3D Link (производства ООО «ПЛАЗ»);

- датчики нахождения АНПА на поверхности и в воде (производства ИПМТ ДВО РАН);
- измеритель температуры и электропроводности воды (производства ИПМТ ДВО РАН).

### Функции

СБУНС обеспечивает:

- осуществление всех предусмотренных режимов управления движением;
- информационный обмен между подсистемами;
- определение навигационно-пилотажных параметров (курса, глубины погружения и расстояния до дна или до нижней кромки ледового покрытия, линейных и угловых скоростей);
- верификацию загружаемой миссии, диагностику бортовых устройств и действия по восстановлению работоспособности оборудования, адаптацию к возникающим неисправностям или изменению/сокращению миссии при возникновении неисправных дефектов;
- определение погрешности навигации с использованием гидроакустической системы навигации и связи (ГАСНС) не более 1% от дальности;
- управление АНПА и обмен информацией по радиосвязи на расстоянии до 10 км со скоростью не менее 10 кбит/с;
- комплексирование всех данных от системы навигации и связи, а также решение навигационной задачи и расчет скорости звука по параметрам от ИПС с погрешностью не более  $\pm 10$  м/с.

## ■ Контрольно-аварийная система (КАС)

### Состав и характеристики:

- комплект датчиков затекания;
- электромагнит аварийного балласта;
- приемник СНС (GPS/ГЛОНАСС);
- спутниковая (Iridium) система связи;
- ГАСНС УКБ (модель EvoLogic S2CR 15/27);
- ГАСНС ДБ (производства «Аквателеком»);
- модуль радиосвязи 3D Link (производства ООО «ПЛАЗ»);
- светомаяк;
- аварийная линия энергоснабжения устройств КАС.

### Функции

КАС обеспечивает всплытие АНПА на поверхность посредством отдачи аварийного балласта при любой аварии, связанной с невозможностью АНПА продолжать управляемое движение (выход из строя

компьютера автопилота, полный разряд группы АКБ, затекание прочного контейнера, обрыв цепи питания, короткое замыкание в нагрузке, выход из строя ДРК и т.п.), передачу на поверхность координат АНПА средствами радиосвязи, передачу в толще воды дальности до АНПА средствами гидроакустической связи и подачу на поверхность световых сигналов от светомаяка для упрощения поиска АНПА в ночное время суток.

## ■ Информационно-измерительный комплекс (ИИК)

### Состав, характеристики и функции:

- цифровая фотосистема с фотокамерой Vieworks VH-11MG2-C6 и импульсным источником света ИУПМ.676289.001 обеспечивает цветную фотосъемку дна с разрешением  $4008 \times 2672$  (11MP) на расстояниях 1...5 м;
- гидролокатор бокового обзора (ГБО) разработки ИПМТ ДВО РАН; ГБО с рабочей частотой 470 кГц обеспечивает обзорно-поисковую съемку дна с полосою обзора не менее  $2 \times 150$  м, разрешающей способностью по дальности не более 5 см и по азимуту не более  $0,5^\circ$ , возможностью сохранения ГБО-грамм в формате XTF;
- донный акустический профилограф разработки ИПМТ ДВО РАН обеспечивает акустическое профилирование дна с расстояния 10...20 м, вертикальным разрешением не более 0,2 м, глубиной проникновения 1...20 м в зависимости от типа грунта, возможность сохранения профилограмм в формате SEG-Y;
- логгер Idronaut OS310 с датчиками определения параметров воды: давления, температуры, электропроводности, солености, скорости звука в воде, pH, растворенного кислорода, мутности воды, хлорофилла-а и ФАР;
- многолучевой эхолот МЛЭ R2 Sonic 2020 (256 лучей) с диапазоном рабочих частот 200...400 кГц и частотой 700 кГц в режиме сверхвысокого разрешения, шириной луча от  $1^\circ$  до  $4^\circ$ , регулируемым углом обзора от  $10^\circ$  до  $160^\circ$ ;
- программное обеспечение компьютера оператора обладает эргономичным интерфейсом и отображает географическое положение АНПА, состояние бортовых систем АНПА, наличие и характер аварийных ситуаций на борту АНПА, остаточный заряд АКБ, уровни принятого гидроакустического сигнала для прогнозирования потери связи;
- пользовательский интерфейс судового поста оператора предусматривает изменение миссии в процессе работы АНПА с помощью телекоманд и содер-



жит инструменты для создания, редактирования и верификации программ-заданий (миссий) для АНПА.

### ■ Навигационный комплекс (НК)

Функциональная схема навигационного комплекса АНПА «ММТ-3500» представлена на рис.2. НК включает в себя бортовые навигационно-пилотажные датчики (общие с СБУНС), приемник СНС и гидроакустическую систему навигации и связи с ультракороткой базой ГАСНС УКБ. Для повышения точности НК на АНПА «ММТ-3500» была установлена бесплатформенная оптоволоконная инерциальная навигационная система (ИНС) ГЛ-90 производства ООО «Гиролаб». Поскольку магнитный (индукционный) компас не обеспечивает необходимую точность измерения курса при работе в районах с магнитными аномалиями или в условиях со значительными электромагнитными помехами, на АНПА ММТ-3500 для измерения курса использовалась ИНС ГЛ-90, а индукционный компас, интегрированный в навигационно-пилотажные датчики VN-100T-CR, служил в качестве резервного датчика на аварийный случай. Это позволило значительно повысить точность измерения курса с погрешностью  $0,2^\circ/\cos$  (широты).

Для навигационного комплекса АНПА «ММТ-3500» было разработано новое программно-алгоритмическое обеспечение, позволившее улучшить характеристики бортовой системы за счет комплексирования отдельных подсистем и устройств. В состав

комплекса был включен модуль динамики АНПА, позволяющий отслеживать характеристики движения АНПА в реальном времени с учетом управляющих воздействий на движительную систему и встроенной модели АНПА. Использование данных от модуля динамики позволило повысить надежность и точность НС АНПА за счет обеспечения непрерывности работы НК даже в условиях кратковременных сбоев отдельных датчиков и систем.

### ■ Система интеллектуальной поддержки деятельности операторов (СИПДО) АНПА

СИПДО формирует предупреждения для операторов АНПА и рекомендации по планированию и перепланированию рабочей миссии на основе обработки навигационной информации и данных от бортовых систем аппарата. К основным функциям системы относятся:

- сбор и обработка в режиме реального времени данных от судового оборудования, бортовых систем АНПА, систем гидроакустической и радиосвязи при разных взаимных расположениях судна-носителя и АНПА на разных дистанциях;
- отображение на едином экране загруженной карты местности, положения судна и АНПА, планируемых, рекомендуемых и реальных траекторий движения;
- передача на аппарат телекоманд с целью коррекции траектории движения или аварийной остановки работы;

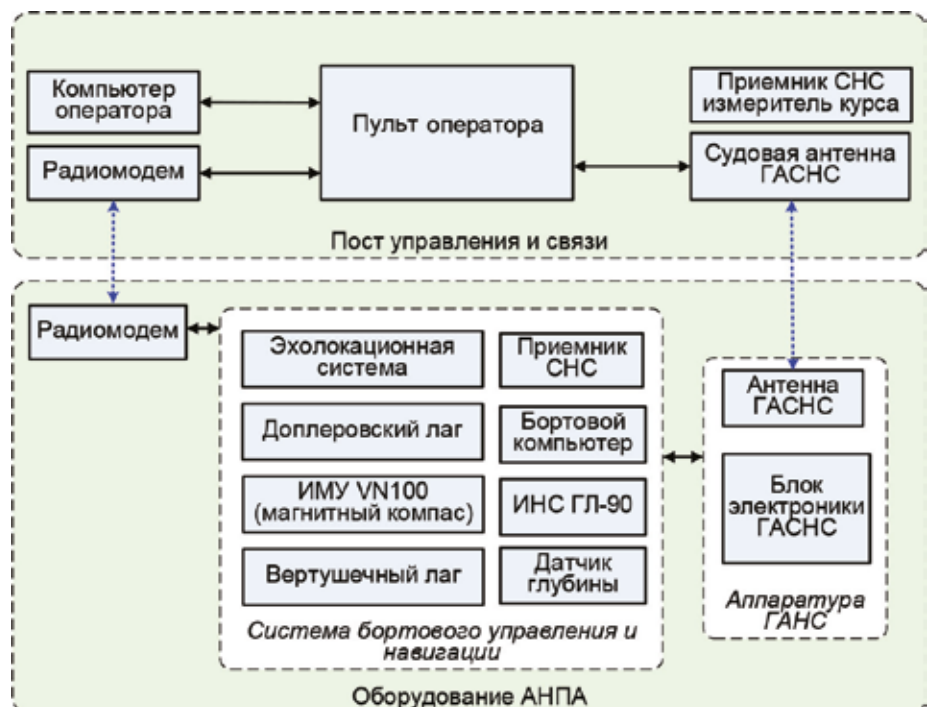


Рис. 2. Функциональная структурная схема навигационного комплекса

- выработка и отображение рекомендаций судоводителю и оператору АНПА.

Система позволяет отслеживать и предотвращать (заранее предупреждая оператора и судоводителя о проблеме и предлагая метод ее решения) следующие аварийные ситуации:

- выход АНПА из зоны действия гидроакустической навигационной системы с ультракороткой базой при выполнении миссии;
- выход АНПА из зоны действия радиосвязи при нахождении на поверхности воды;
- отсутствие связи (любого типа) с АНПА продолжительное время;
- нахождение АНПА вблизи обеспечивающего судна и наличие опасности столкновения;
- отклонение АНПА от запланированного курса или выбранных параметров движения во время выполнения миссии;
- нахождение АНПА в опасной близости к донной поверхности;
- работа АНПА на высоте большей, чем максимально допустимая для эффективной работы бортовой навигационной системы;

Базовый интерфейс СИПДО показан на рис. 3.

Базовый интерфейс СИПДО использовался для обеспечения условий работы оператора в рабочих запусках АНПА.

### ■ Результаты работы АНПА в районах океанографических станций 7277, 7299, 7368

В соответствии с программой экспедиционных работ осуществлялись погружения АНПА «ММТ-3500» в районе океанографических станций 7277, 7299, 7368, удаленных друг от друга на достаточно большие расстояния и с глубиной моря от 1090 м до 1815 м (рис. 4). Погружения на большую глубину осуществлялись по спирали, а вблизи дна аппарат переходил на траектории, соответствующие заданной миссии. В процессе рабочих запусков АНПА производились ГБО-съемка, МЛЭ-съемка и фотосъемка дна, гидрофизические измерения параметров водной среды, навигационная привязка всей информации к географическим координатам и оценка точности навигационных измерений. Ниже приведены данные, иллюстрирующие характер движения АНПА и результаты его работы на трех океанографических станциях.

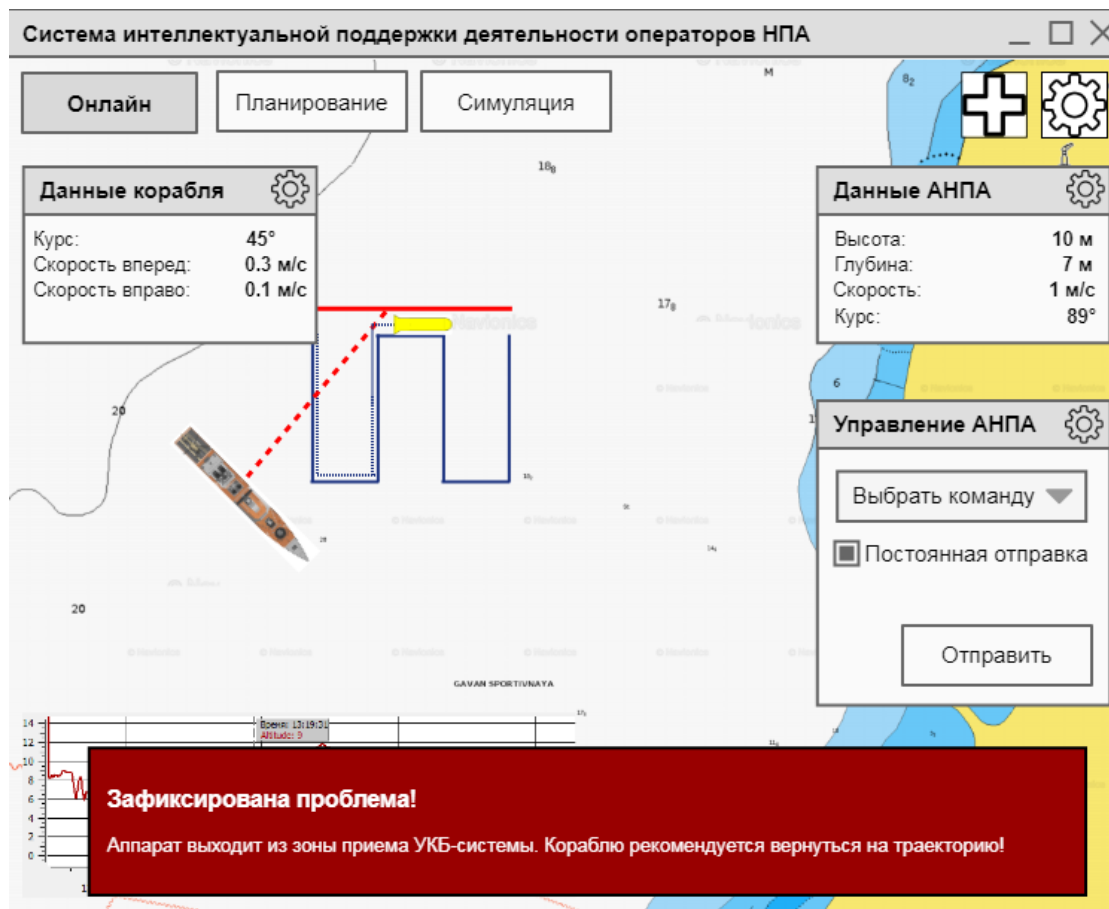


Рис. 3. Базовый интерфейс СИПДО



Рис. 4. Карта района экспедиционных работ

#### Работа АНПА на станции 7277

Станция 7277 расположена в районе подводной горы Тропик с координатами N23.9219, W20.698 и глубинами моря в диапазоне 1140–1090 м. Погружение АНПА было выполнено с целью тестирования программно-аппаратного комплекса при работах в реальных экспедиционных условиях и на большой глубине. В данной миссии продолжительностью 3 часа 17 минут аппарат выполнил два взаимобратных галса длиной 1800 м каждый. При движении прямым галсом производилось тестирование рабо-

ты МЛЭ с изменением высот съемки от 10 до 30 м и тестированием работы ГБО при высоте 7 м. На обратном галсе проводилась фотосъемка дна камерой VN11 с расстояния 1,5...3 м. На рис. 5 изображены траектория АНПА и графики изменения глубины и высоты во время выполнения миссии (иллюстрации получены путем обработки данных с помощью программы IMTPLooker).

На рис. 6 показаны примеры фотографий, полученных путем постобработки, для чего в ПО IMTPLooker были внесены дополнительные данные о координатах и параметрах работы и размерах изображений.

На рис. 7 показан пример ГБО-изображения с эффективной шириной полосы съемки около 300 м при движении аппарата на высоте 7 м. На рис. 8 показан фрагмент изображения рельефа дна, полученный в районе работ с помощью МЛЭ.

При выполнении данной миссии с помощью датчика параметров среды Idronaut 310 были получены значения всех измеряемых океанографических параметров вдоль траектории аппарата и во время заглупления и всплытия. Графики изменения некоторых океанографических параметров в зависимости от глубины приведены на рис. 9.

Работа бортовой навигационной системы (БНС) иллюстрируется рис.10, на котором показаны данные расчета координат АНПА по отдельным подсистемам. Как следует из результатов измерений, за время работы АНПА вне зоны действия УКБ ГАНС скорость накопления погрешности БНС составила 93 м/ч. С помощью УКБ ГАНС погрешность вычисления координат была скорректирована, и на момент всплытия и обсервации по данным GPS погрешность составила 26 м.

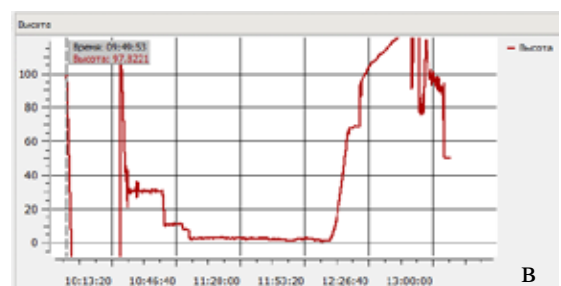
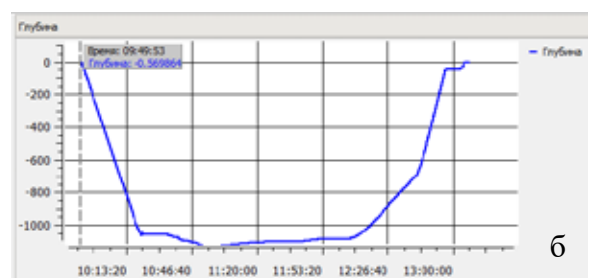
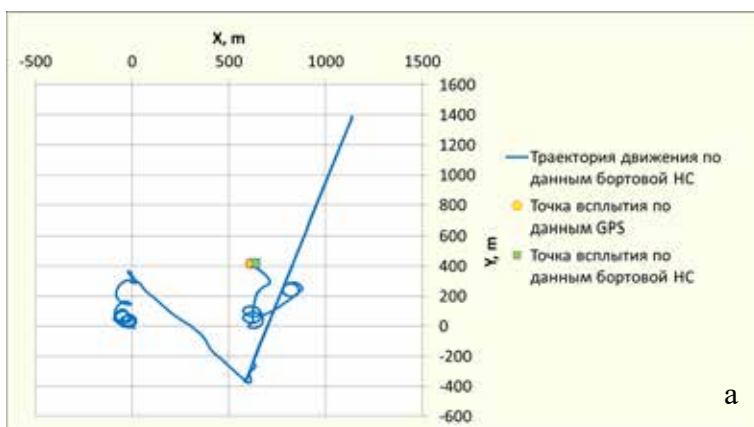


Рис. 5. Траектория движения АНПА (а), графики изменения глубины (б) и высоты (в) в миссии на ст. 7277



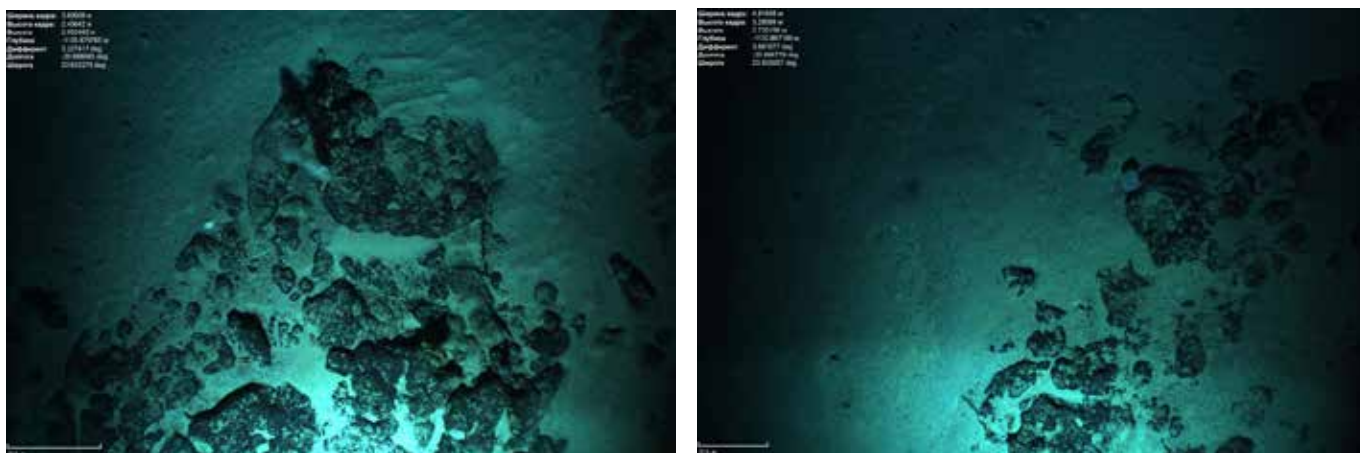


Рис. 6. Пример фотографий дна, полученных в тестовой миссии на ст. 7277

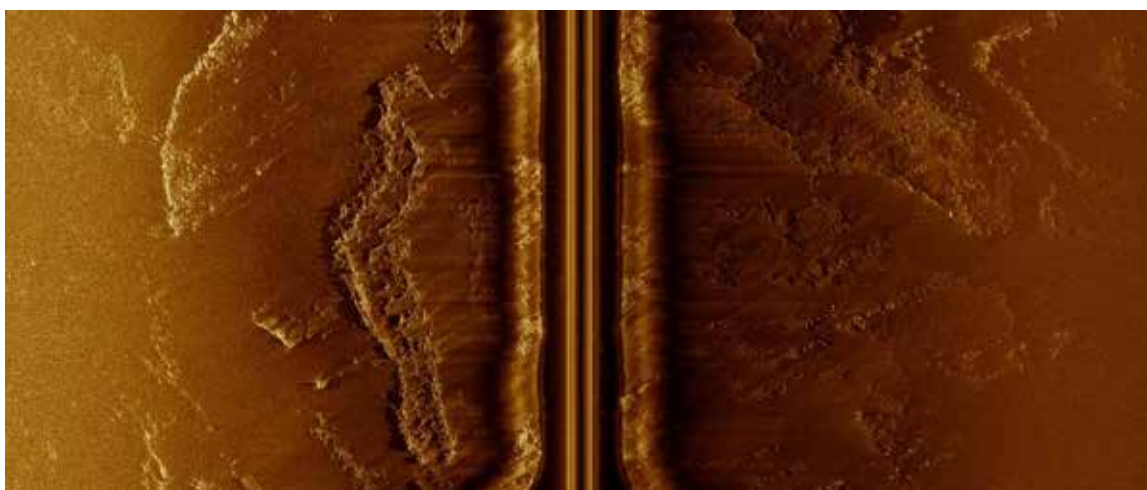


Рис.7. Фрагмент ГБО-съемки дна в районе ст. 7277

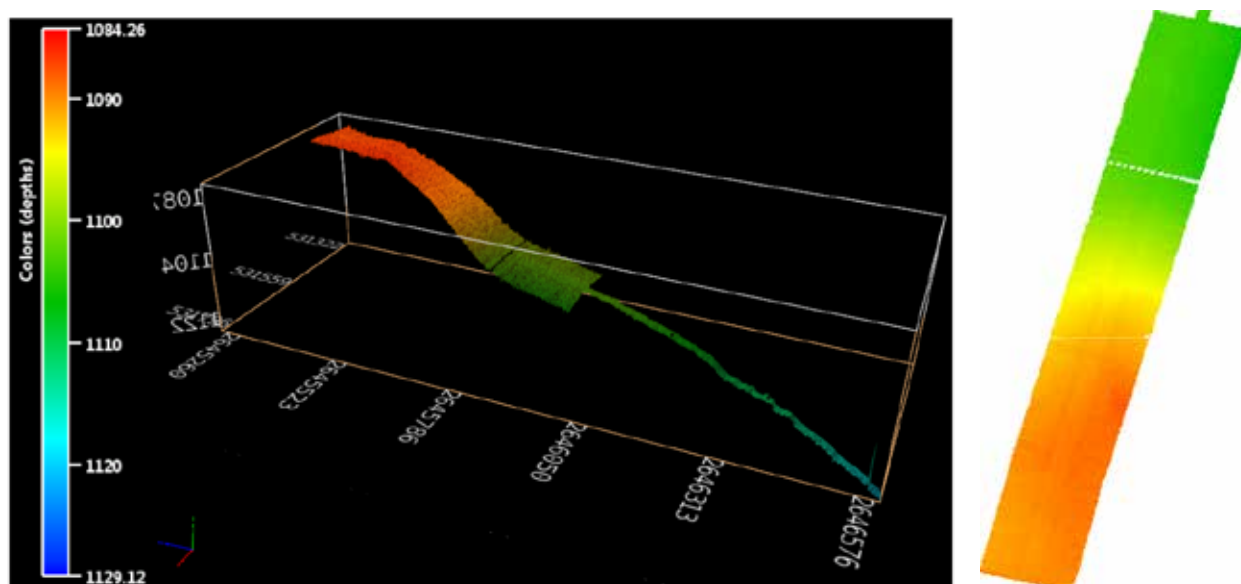


Рис.8. Фрагмент изображения рельефа дна, полученного по данным МЛЭ на ст. 7277



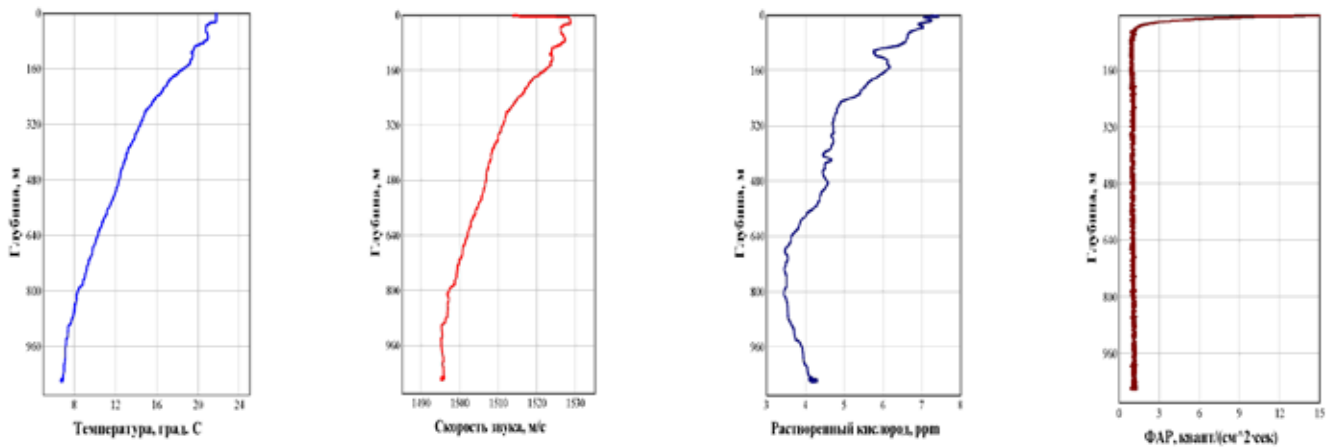


Рис. 9. Вертикальные разрезы скорости звука, насыщения кислородом, температуры и фотосинтетически активной радиации (ФАР), полученные на ст. 7277

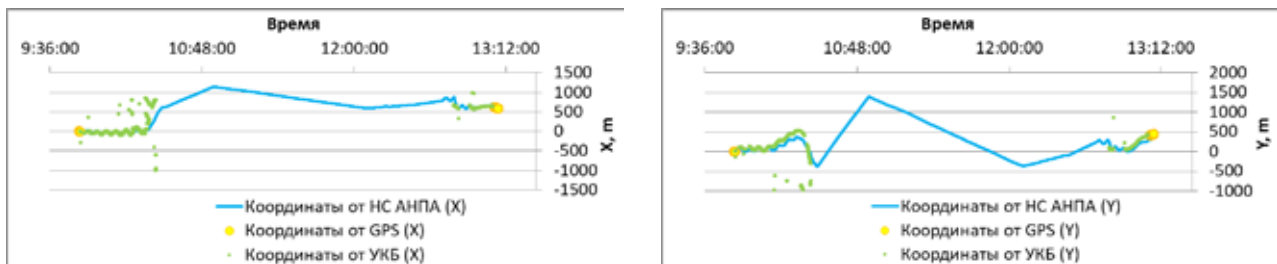


Рис. 10. Данные расчета координат по отдельным системам



Рис. 11. Данные измерителей скорости



Рис. 12. Изменение курса по данным ИНС и магнитного компаса

На рис. 11 показаны результаты измерений скорости движения различными измерителями: доплеровским лагом, модулем динамики, относительным лагом. Использование различных измерителей скорости обеспечивает непрерывность измерений и, кроме того, резервирование в аварийной ситуации. На рис. 12 показаны результаты измерения курса с помощью ИНС ГЛ-90 и магнитного компаса ИМУ VN100. Разница в показаниях в отдельные моменты времени достигала  $5^\circ$ , что, очевидно, обусловлено погрешностями измерителей.

#### Работа на станции 7299

Станция 7299 расположена в проливе Брансфилда с координатами S62.5194, W58.1309 и глубиной моря 1797...1815 м. Работа АНПА выполнялась 22.01.2022 г., продолжительность миссии составляла 5 часов 28 минут. В данной миссии аппарат выполнил два взаимобратных галса на высоте 30...40 м со съемкой рельефа дна с помощью МЛЭ (использовались параметры работы, отобранные во время выполнения тестового запуска в районе подводной горы Тропик) и один галс на высоте 1,5 м с фотосъемкой дна. Длина каждого галса составляла 1900 м, максимальная наклонная дальность акустической связи – 2800 м. На одном из рабочих участков было выполнено тестирование совместной работы ГБО и МЛЭ (при частоте излучателя 350 кГц), чтобы убедиться в отсутствии их взаимовлияния. Одновременно производились измерения параметров водной среды датчиком Idronaut 310. Траектория АНПА и графики изменения глубины и высоты во время выполнения данной миссии изображены на рис. 13.

Методика обработки всех материалов, полученных в данной миссии, аналогична той, которая была

отработана на станции 7277 и применялась в дальнейшем на станции 7368.

Примеры фотосъемки дна приведены на рис. 14. По данным МЛЭ с использованием ПО Sonarwiz была построена трехмерная батиметрическая карта дна в районе работ (рис. 15). Данные ГБО-съемки, полученные в результате постобработки «сырых» данных в штатном ПО MViewer, изображены на рис. 16.

Полученные данные были использованы бентосным отрядом экспедиции для оценки возможности использования трала, а также качественной и количественной оценки морской флоры и фауны в районе.

Перед выполнением данной миссии набор измеряемых датчиком Idronaut 310 параметров был модифицирован: к списку основных параметров была добавлена потенциальная температура, увеличено записываемое количество знаков после запятой всех параметров. Полученные значения всех измеряемых океанографических параметров вдоль траектории движения аппарата и во время заглупления и всплытия были переданы океанологическому отряду экспедиции для дальнейшего анализа. Графики изменения некоторых океанографических параметров в зависимости от глубины приведены на рис. 17.

Работа БНС показана рис. 18. Скорость накопления погрешности навигации при работе АНПА в автономном режиме в данном запуске составила 36 м/ч. На момент всплытия и обсервации по данным GPS погрешность составила 40 м. На рис. 19 показаны результаты измерений скорости движения различными измерителями.

На рис. 20 приведены значения курса по данным ИНС и магнитного компаса для данного запуска. Расхождения в показаниях достигали  $30^\circ$ . Это объяс-

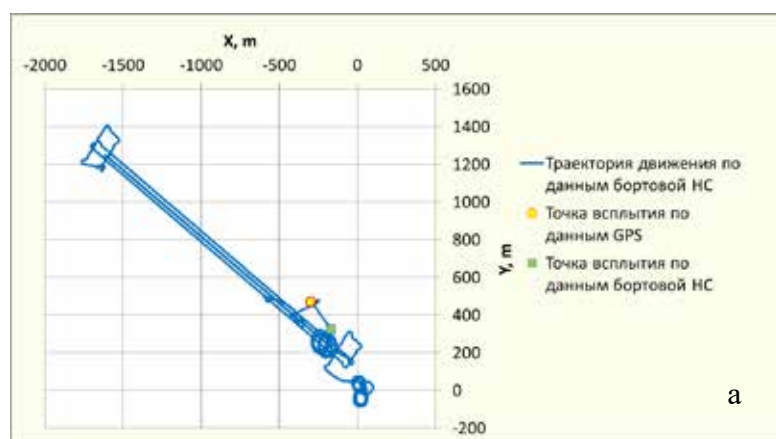
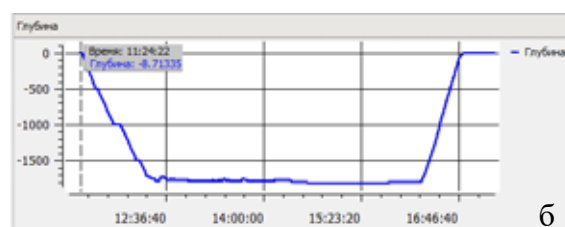


Рис. 13. Траектория АНПА (а), изменение глубины (б) и высоты (в) в миссии на ст. 7299



В

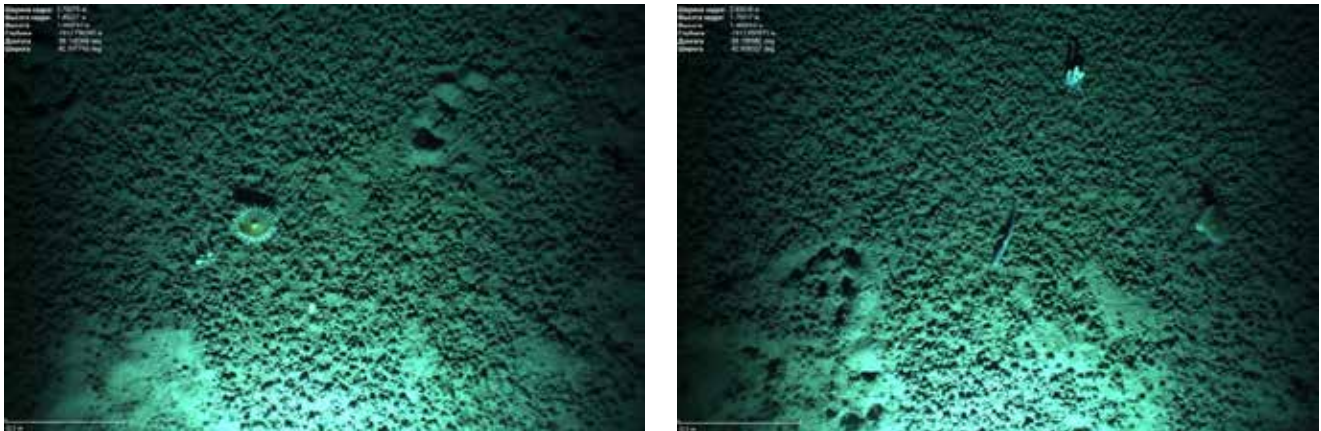


Рис.14. Примеры фотографий дна, полученных в миссии на ст. 7299

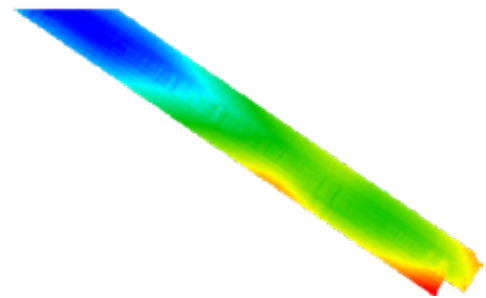
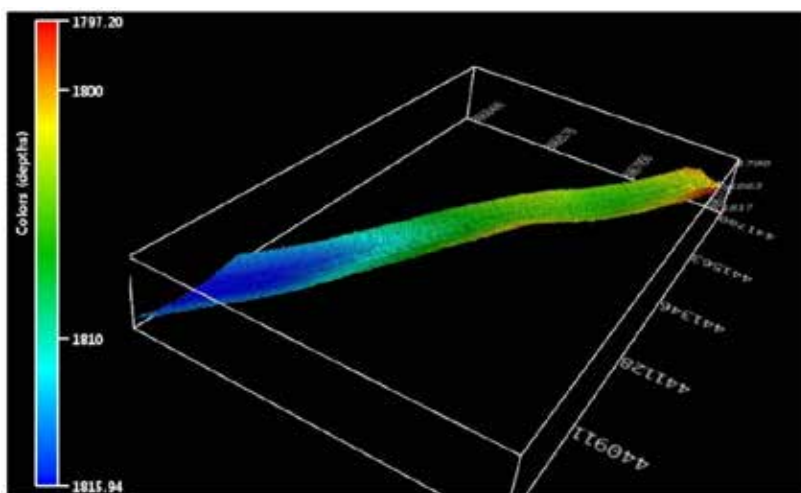


Рис.15. Фрагмент изображения рельефа дна, полученного по данным МЛЭ на ст. 7299

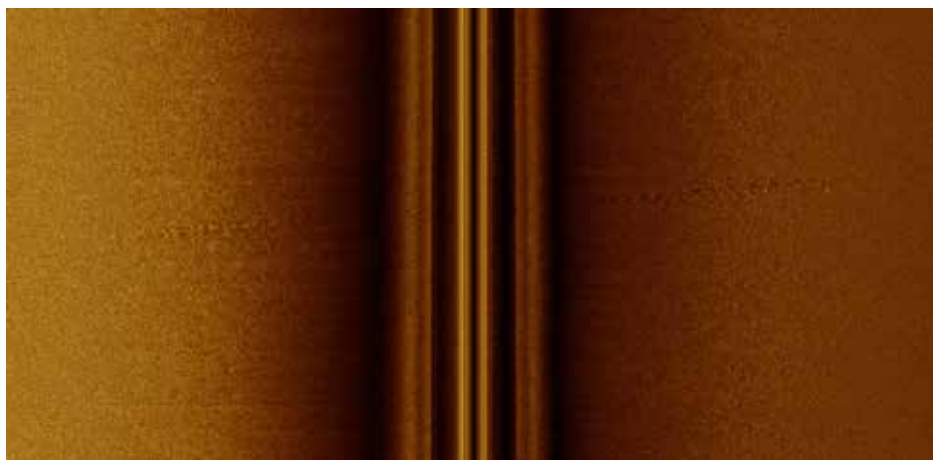


Рис. 16. Пример ГБО-съемки дна в районе работ на ст. 7299

няется сбоем процедуры автокалибровки магнитного компаса. На точность работы НС в целом это не оказало влияния, поскольку в течение всего времени ИНС как основной источник данных о курсе работала без сбоев.

#### Работа на станции 7368

Станция 7368 расположена в районе Оркнейских островов с координатами S61.2028, W47.091и глубиной моря 1420...1508 м. Миссия выполнялась 07.02.2022 г. с продолжительностью 5 часов 45 ми-

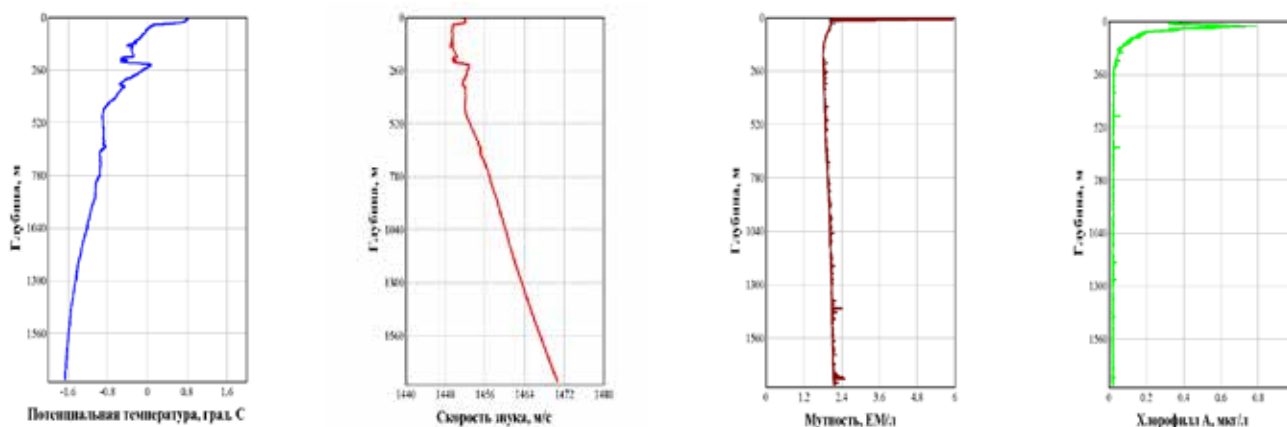


Рис. 17. Вертикальные разрезы скорости звука, фотосинтетически активной радиации (ФАР) и водородного показателя на ст. 7299

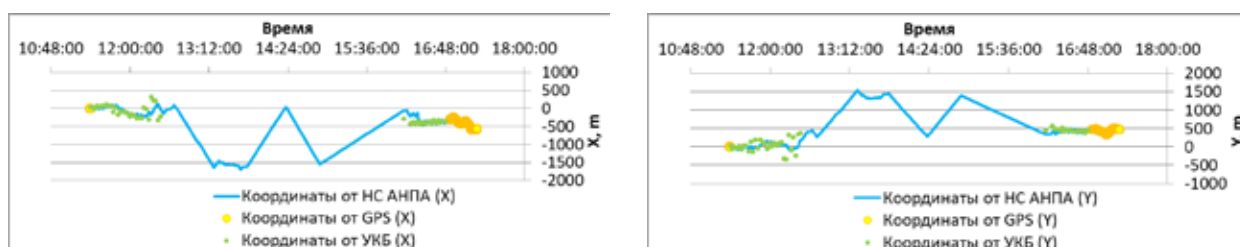


Рис. 18. Данные расчета координат по отдельным системам



Рис. 19. Показания ДЛ и других измерителей скорости

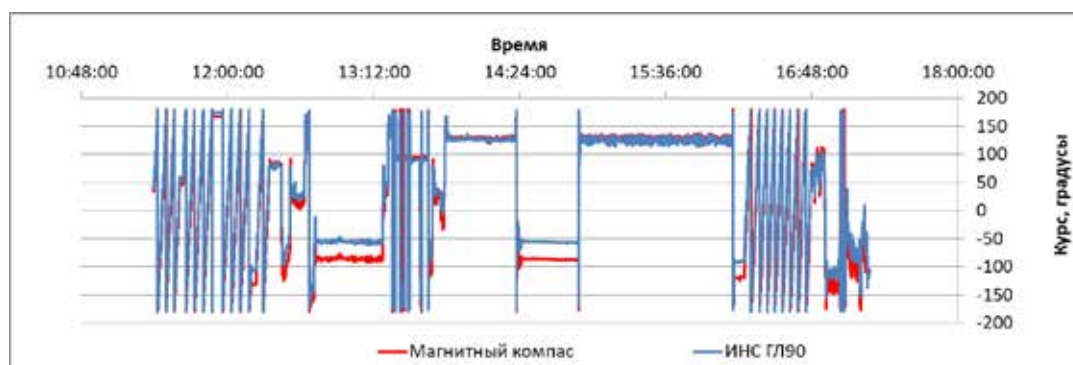


Рис. 20. Показания измерителей курса (ИНС, магнитный компас)

нут. В ходе данной миссии аппарат выполнил движение по сложной траектории на высоте 20 м со съемкой рельефа дна с помощью МЛЭ и ГБО, а также один галс на высоте 1,5 м с фотосъемкой дна. Длина

траектории составляла 1900 м (2850 м с учетом поперечных галсов), максимальная наклонная дальность акустической связи – 2800 м. Траектория АНПА и графики изменения глубины и высоты аппарата во



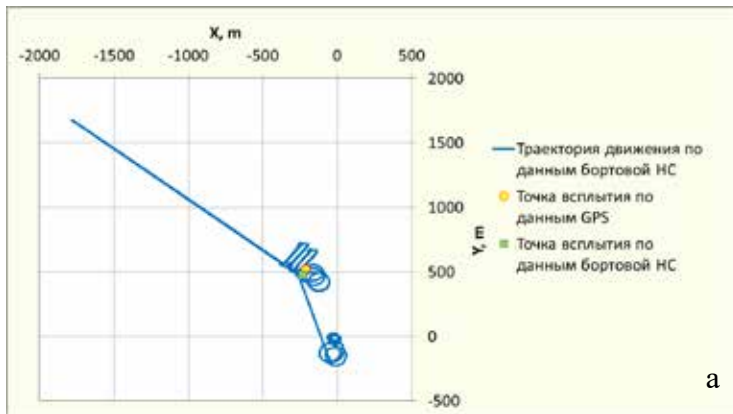


Рис.21.Траектория АНПА (а), изменение глубины (б) и высоты (в) во время миссии на ст. 7368

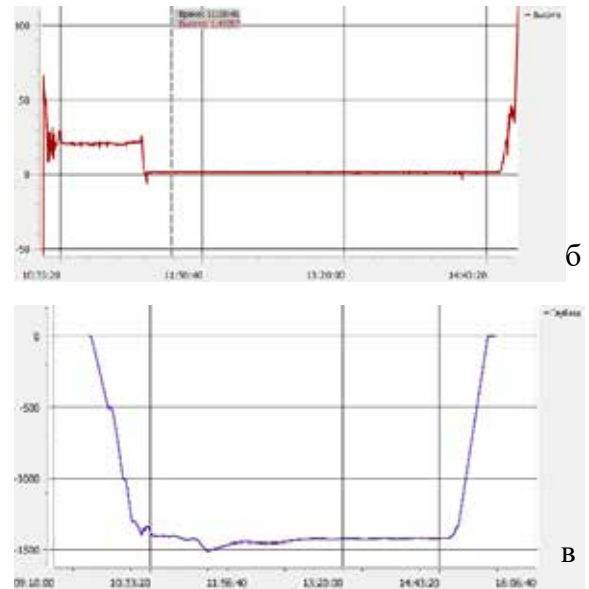


Рис. 22. Фотографии дна, полученные во время миссии на ст. 7368

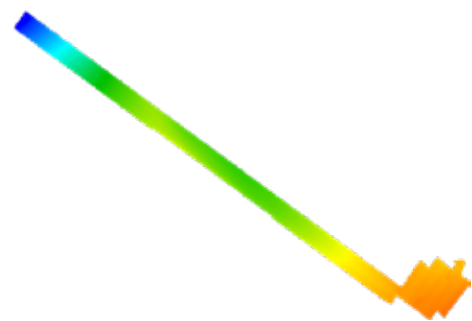
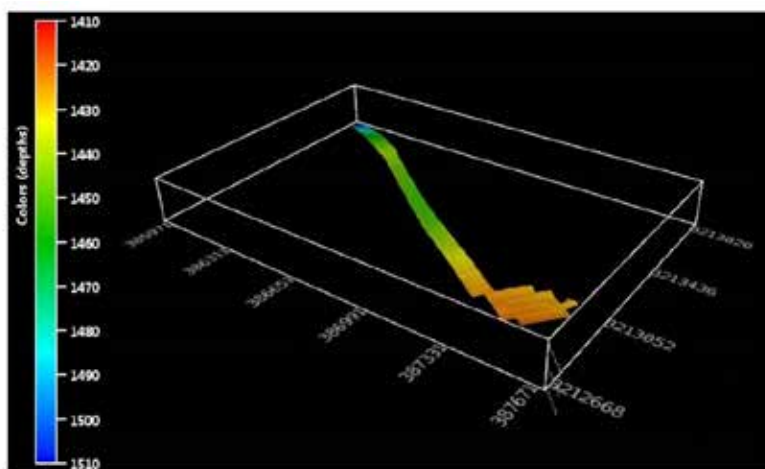


Рис. 23. Изображение рельефа дна, полученное по данным МЛЭ на ст. 7368

время выполнения данной миссии изображены на рис. 21.

Полученные при выполнении миссии примеры фотографий с информацией о высоте, глубине и ко-

ординатам, в которых был снят каждый кадр, приведены на рис. 22. По данным МЛЭ с использованием ПО Sonarwiz была построена трехмерная батиметрическая карта дна в районе работ (рис. 23). Данные

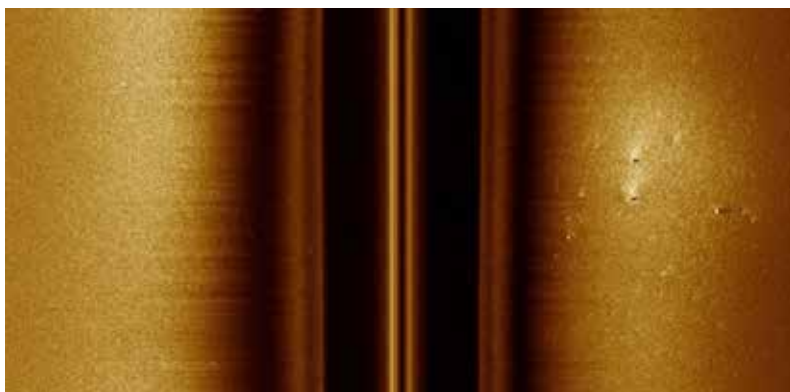


Рис. 24. Фрагмент ГБО-съемки дна в районе работ на ст. 7368

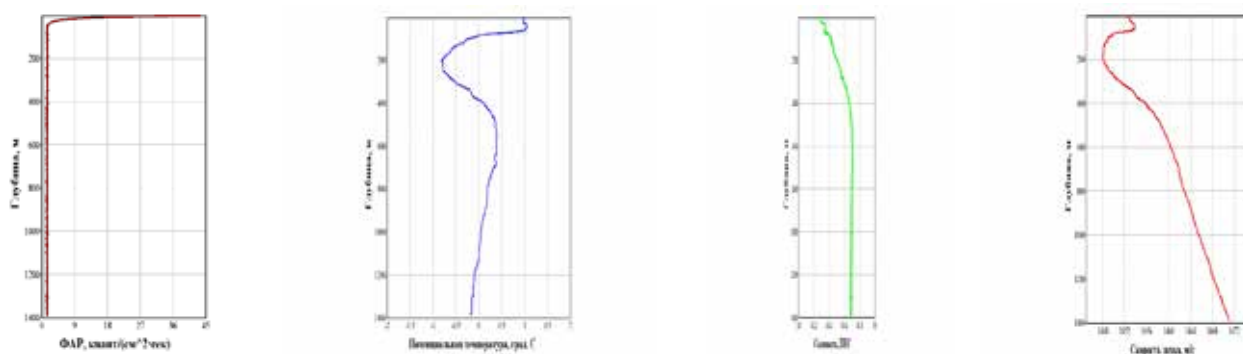


Рис. 25. Вертикальные разрезы скорости звука, фотосинтетически активной радиации (ФАР), солёности и потенциальной температуры, полученные на ст. 7368

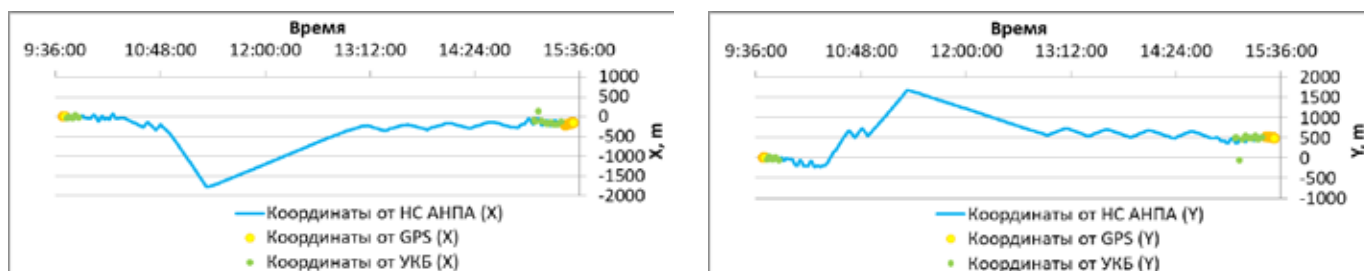


Рис. 26. Данные расчета координат по отдельным системам



Рис. 27. Показания ДЛ и других измерителей скорости

ГБО-съемки, полученные в результате постобработки «сырых» данных в штатном ПО MViewer, изображены на рис. 24.

Полученные данные были использованы бентосным отрядом экспедиции для оценки возможности

использования трала, а также качественной и количественной оценки морской флоры и фауны в районе.

При подготовке данной миссии был модифицирован импульсный источник света – изменен угол наклона и яркость вспышки, что позволило полу-



Рис. 28. Показания измерителей курса (ИНС, магнитный компас)

чить фотоснимки с более равномерным освещением.

Одновременно с производились измерения параметров среды датчиком Idronaut 310, фиксируя основные измеряемые параметры с временной привязкой к движению аппарата. Графики изменения некоторых океанографических параметров с глубиной приведены на рис. 25.

Результаты работы НС АНПА представлены на рис. 26, 27 и 28.

Скорость накопления погрешности координат составила 9 м/ч. На момент всплытия и обсервации по данным GPS погрешность составила 51 м. Расхождения в показаниях ИНС и магнитного компаса достигали 32°.

## ■ Выводы

1. Разработан и изготовлен новый АНПА «ММТ-3500», предназначенный для выполнения глубоководных биологических и гидрофизических исследований в Антарктике. По программе экспедиционных работ на НИС «Академик Мстислав Келдыш» (87-й рейс) выполнена съемка рельефа дна трассы суммарной длиной более 6 км с помощью МЛЭ и ГБО. Выполнен бесконтактный мониторинг морской донной экосистемы, в результате получены 10890 фотографий морского дна на глубинах до 1800 м. Фотографии предназначены для формирования обучающей выборки и обучения НС, а также последующего автоматического распознавания отдельных классов биологических объектов. Также получены следующие физические и гидрохимические параметры воды по маршруту следования АНПА: давление, температура

(в том числе потенциальная), электропроводность, соленость, скорость звука в воде, pH, растворенный кислород, мутность воды, хлорофилл-а и ФАР.

2. Экспериментально подтверждена эффективность комплексированной (интегральной) НС, обеспечивающей высокоточное определение координат аппарата. Общая погрешность измерения координат в рабочих запусках лежала в пределах от 26 до 51 м при продолжительности миссий более 5 ч.

3. Получен большой объем экспериментальных данных, позволивший выработать рекомендации для оператора АНПА с целью усовершенствования системы интеллектуальной поддержки деятельности оператора.

4. На основе съемки МЛЭ, ГБО и фотосъемки дна выполнена оценка применимости трала Сигсби в районе работ.

5. Получены данные, предназначенные для визуальной оценки распределения глубоководных биологических ресурсов южных морей.

Авторы выражают благодарность экипажу НИС «Академик Мстислав Келдыш» за высокопрофессиональное обеспечение запусков АНПА. Авторы признательны всем сотрудникам ИПМТ ДВО РАН, принимавшим участие в разработке, изготовлении и испытаниях АНПА «ММТ-3500».

Работа выполнена в рамках темы государственного задания «Разработка робототехнического комплекса и методов его использования для исследования глубоководных экосистем» (FWFG-2022-0003).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Боженев Ю.А. Использование автономных необитаемых подводных аппаратов для исследования Арктики и Антарктики // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2011. Т. 4. № 1. С. 47–68.
2. Dowdeswell J.A., Evans J., Mugford R. et al. Autonomous Underwater Vehicles and Investigations of the Ice-Ocean Interface in Antarctic and Arctic Waters // *J. Glaciol.* 2003. V. 54, N 187. P. 661–672.
3. Stephen McPhail. AUTOSUB Operations in the Arctic and the Antarctic // *Proc. Intern. Sci. Workshop* 11–13 April 2007. SUT. P. 28–39.
4. Инзарцев А.В., Каморный А.В., Львов О.Ю., Матвиенко Ю.В., Рылов Н.И. Применение автономного необитаемого подводного аппарата для научных исследований в Арктике // *Подводные исследования и робототехника*. 2007. № 2 (4). С. 5–14.
5. Инзарцев А.В., Киселев Л.В., Костенко В.В., Матвиенко Ю.В., Павин А.М., Щербатюк А.Ф. Подводные робототехнические комплексы: системы, технологии, применение / под ред. Л.В. Киселева. Владивосток: Дальпресс, 2018. 367 с.
6. Inzartsev A.V., Kiseljev L.V., Kostenko V.V., Matviyenko Yu.V., Pavin A.M., Scherbatjuk A.F. Integrated Positioning System of Autonomous Underwater Robot and Its Application in High Latitudes of Arctic Zone // *Gyroscopy and Navigation*. 2010. V. 1, No. 2. P. 107–112.
7. Бабаев Р.А., Боловин Д.А., Борейко А.А., Боровик А.И., Ваулин Ю.В., Коноплин А.Ю., Трегубенко Д.И., Михайлов Д.Н., Щербатюк А.Ф. Технология использования АНПА для исследования глубоководных экосистем Атлантического сектора Антарктики // *Подводные исследования и робототехника*. 2020. № 2 (32). С. 13–21.
8. Морозов Е.Г., Флинт М.В., Орлов А.М., и др. Гидрофизические и экосистемные исследования в Атлантическом секторе Антарктики (87-й рейс научно-исследовательского судна «Академик Мстислав Келдыш») // *Океанология*. 2022. Т. 62. № 5. С. 1–3.
9. Морозов Е.Г., Флинт М.В., Спиридонов В.А., Тараканов Р.Ю. Программа комплексных экспедиционных исследований экосистемы Атлантического сектора Южного океана (декабрь 2019 г. - март 2020 г.) // *Океанология*. 2019. Т. 59, № 6. С. 1086–1088.
10. Киселев Л.В., Костенко В.В., Медведев А.В. К оценке динамических характеристик АНПА «МТ-3500» на основе модельных и экспериментальных данных // *Подводные исследования и робототехника*. 2022. № 3 (41). С. 33–44.

## Об авторах

**БАБАЕВ Роман Алексеевич**, инженер 1-й категории лаборатории систем управления

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий ДВО РАН

Адрес: 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5а

**Научные интересы:** моделирование и проектирование электрических узлов автономных, телеуправляемых и гибридных подводных роботов

Тел.: +7 (999) 058-58-60

E-mail: soratori@mail.ru

ORCID: 0000-0002-1477-7123

Resercher ID: GNP-6546-2022

**БОРОВИК Алексей Игоревич**, к.т.н., с.н.с. лаборатории систем навигации и обработки сенсорной информации

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий ДВО РАН

Адрес: 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5а

**Научные интересы:** программное обеспечение робототехники, программные системы управления роботами, автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА), гидроакустические системы связи, средства подводной навигации

Тел.: +7 (904) 629-72-14

E-mail: leksys@halt.ru, alexeyborovick@ya.ru

SPIN-код: 9325-4973

ORCID: 0000-0002-9696-2751

WoS Researcher ID: AGW-6948-2022

Scopus ID: 57205501843

**ВАУЛИН Юрий Валентинович**, к.т.н., в.н.с. лаборатории систем навигации и обработки сенсорной информации

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий ДВО РАН

Адрес: 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5а

**Научные интересы:** навигационные системы автономных, телеуправляемых и гибридных подводных роботов

Тел.: +7 (924) 233-26-07

E-mail: vau2000@mail.ru

SPIN-код: 1090-5709

ORCID: 0000-0002-5369-4427

Scopus ID: 6506163609

**ЕЛИСЕЕНКО Григорий Дмитриевич**, н.с. лаборатории систем управления

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий ДВО РАН

Адрес: 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5а

**Научные интересы:** создание систем управления подводных необитаемых подводных аппаратов

Тел.: +7 (924) 123-35-47

E-mail: eliseenko@marine.febras.ru, eliseenko\_g@mail.ru

SPIN-код: 7355-3862

ORCID: 0000-0003-0386-0068

Resercher ID: GNP-8630-2022

Scopus ID: 57188865031

**МИХАЙЛОВ Денис Николаевич**, с.н.с. лаборатории исполнительных устройств и систем телеуправления

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий ДВО РАН

Адрес: 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5а

**Научные интересы:** теория и практика создания движительно-рулевых комплексов и систем энергообеспечения автономных, телеуправляемых и гибридных подводных роботов

Тел.: +7 (924) 233-26-07

E-mail: denmih@marine.febras.ru, denmih@list.ru

SPIN-код: 1940-6170

ORCID: 0000-0002-2427-8459

Resercher ID: P-4784-2017

Scopus ID: 57215280371

**НАЙДЕНКО Николай Александрович**, научный сотрудник  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий ДВО РАН

Адрес: 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5а

**Научные интересы:** теория и практика создания движительно-рулевых комплексов и систем энергообеспечения автономных, телеуправляемых и гибридных подводных роботов

Тел.: +7 (951) 007-65-96

E-mail: nna0502@gmail.com

ORCID: 0000-0002-5685-1838