

**ОЛИМПИАДА ШКОЛЬНИКОВ «ШАГ В БУДУЩЕЕ»  
ПО ПРОФИЛЮ «ИНЖЕНЕРНОЕ ДЕЛО»**

*регистрационный номер*

**Секция:** Многоцелевые роботы и летательные аппараты (СМ11)  
*название секции*

Исследование и разработка автономного гидрофизического зонда как  
перспективного средства оперативной океанологии  
*название работы*

**Автор:** Нагорская Таисия Станиславовна  
*фамилия, имя, отчество*  
ГБОУ Школа №1517  
*наименование учебного заведения, класс*

**Научный руководитель:** Смирнов Иван Алексеевич  
*фамилия, имя, отчество*  
ФГУП "ЦНИИХМ"  
*место работы*  
Научный сотрудник  
*звание, должность*  
  
*подпись научного руководителя*

**Москва - 2024**

## АННОТАЦИЯ

Объектом исследования является распределенная сеть мониторинга подводной обстановки. Предмет исследования — сеть подводных гидрофизических зондов как средство оперативной океанологии (ОО).

Цель проекта — исследование и разработка автономного гидрофизического зонда как перспективного средства оперативной океанологии.

Изменение климата, постепенное повышение уровня океана и увеличение риска возникновения экстремальных погодных явлений и катастроф привели к необходимости развития оперативных систем мониторинга за акваториями и улучшения технологий и методов прогнозирования.

В ходе исследовательской части работы был проведен сравнительный анализ устройств, применяемых для мониторинга акваторий, в результате которого было выявлено, что одной из наиболее перспективных систем ОО является сеть дрейфующих профилирующих зондов.

Анализ отечественных систем мониторинга показал, что российские разработки значительно уступают зарубежным, таким образом, на основе данных об использовании дрейфующих профилирующих буюв как перспективного средства ОО и необходимости разработки отечественной системы мониторинга было принято решение о создании сети подводных автономных дрейфующих зондов для сбора гидрофизических данных о среде.

В результате практической части была разработана 3D-модель устройства в программе Autodesk Inventor Professional, на основе которой были проведены гидродинамический и прочностной расчеты в пакете САПР Solidworks для моделирования параметров зонда.

В результате проведения стендовых испытаний в бассейне были проверены герметичность и остойчивость разрабатываемого устройства. Для тестирования корректности работы программного кода также были проведены натурные испытания на открытой акватории, в результате которых прототип успешно отработал 20 циклов: оператор отправлял сигнал для запуска через сервер, за счет работы балластной системы устройство погружалось, параллельно получая информацию о свойствах среды с датчиков, а после всплытия пакет собранных данных отправлялся на компьютер оператора.

В результате проекта был разработан и собран автономный гидрофизический зонд.

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>АННОТАЦИЯ .....</b>	<b>2</b>
<b>СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ .....</b>	<b>6</b>
<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>7</b>
<b>1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ .....</b>	<b>12</b>
1.1 Общие сведения об оперативной океанологии .....	12
1.2 Анализ применяемых систем оперативной океанологии .....	12
1.2.1 Донные станции .....	12
1.2.2 Автономные необитаемые подводные аппараты .....	15
1.2.3 Автономные станции с поверхностным бумом.....	18
1.2.4 Буи-дрифтеры.....	20
1.2.5 Профилирующие буи.....	22
1.2.6 Современный уровень развития отечественной оперативной океанологии.....	25
1.2.7 Выводы по разделу .....	26
1.3 Предлагаемое решение .....	28
1.4 Моделирование параметров изделия .....	30
1.4.1 Гидродинамический расчет .....	30
1.4.2 Прочностной расчет.....	41
<b>2. ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ .....</b>	<b>52</b>
2.1 Определение общего вида и компоновки изделия .....	52
2.1.1 Эскизный проект .....	52
2.1.2 Разработка корпуса .....	53
2.1.3 Разработка системы изменения плавучести.....	54
2.1.4 Разработка аккумуляторной батареи .....	58
2.1.5 Разработка блока электроники .....	60
2.1.6 Разработки универсальных стыковочных элементов .....	63
2.2 Конструкторская документация .....	64
2.3 Прототипирование .....	66
2.4 Проведение стендовых испытаний .....	69
2.5 Проведение полигонных испытаний.....	70
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>87</b>

<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	<b>89</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ А.....</b>	<b>91</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....</b>	<b>94</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ В.....</b>	<b>104</b>

## СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ

АБС — автономная буйковая станция

АКБ — аккумуляторная батарея

АНПА — автономный обитаемый подводный аппарат

БС — балластная система

ДВНИГМИ — Дальневосточный научно-исследовательский гидрометеорологический институт

ИОРАН — Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук

ОКБ ОТ РАН — Опытное-конструкторское бюро океанологической техники Российской академии наук

ОО — оперативная океанология

ПАГИС — позиционная автономная гидрофизическая измерительная станция

СИП — система изменения плавучести

СУ — система управления

## ВВЕДЕНИЕ

В последние годы человечество все больше обеспокоено глобальным изменением климата и его региональными последствиями. Уровень моря повышается со скоростью 3,7 мм в год, ледяной покров Арктики сокращается, а районы высоких широт быстро нагреваются. Экстремальные погодные явления приводят к гибели людей. Кроме того, 9 из 10 самых теплых лет с 1880 года приходятся на 21 век [1].

Эти эффекты вызваны сочетанием долгосрочного изменения климата и естественной изменчивости. Их воздействие могут иметь как позитивные (увеличение вегетационного периода, открытие арктических судоходных путей), так и негативные последствия (прибрежные наводнения, сильные засухи, экстремальные и частые тепловые волны и погодные явления).

Более 90% избыточного тепла, поглощаемого Землей с 1970-х годов, сохраняется в океанах. Это связано с высокой теплоемкостью воды по сравнению с воздухом, большим объемом океана и его способностью переносить тепло с поверхности в его глубины. В результате океан, особенно его внутренняя часть, где краткосрочные колебания температуры от суточной до месячной невелики, идеально подходит для выявления долгосрочных тенденций потепления в нашей климатической системе. На рисунке 1 показаны данные о температуре, усредненные по мировому океану на глубине до 1900 метров с 2004 года. В то время как температура в верхних слоях колеблется в связи с краткосрочными климатическими явлениями, в более глубоких водах наблюдается постоянная тенденция к потеплению. Таким образом, эти данные указывают на общее потепление климата Земли.

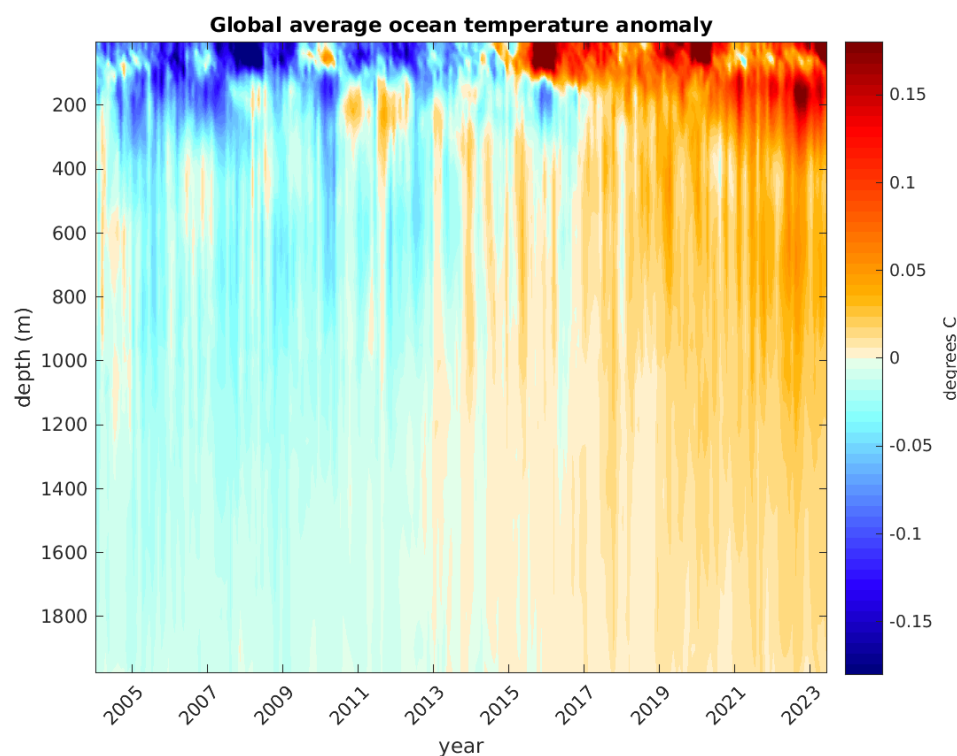


Рисунок 1 — Средняя температура океана

Кроме того, поверхность океана является хорошим местом для наблюдения за гидрологическим циклом (процесс циклического перемещения воды в земной биосфере, который включает в себя испарение воды, перенос паров воздушными течениями, их конденсацию, выпадение в виде осадков и перенос воды реками и другими водными объектами), поскольку соленость поверхности моря отражает локальный баланс испарения, которое ее увеличивает, и осадков, которые ее уменьшают. На рисунке 2 показаны данные о солености поверхности моря на апрель 2015 года и май 2022 года [2], которые показывают отчетливое уменьшение содержания солей в воде в пресных районах и его увеличение в районах с высокими показателями параметра.



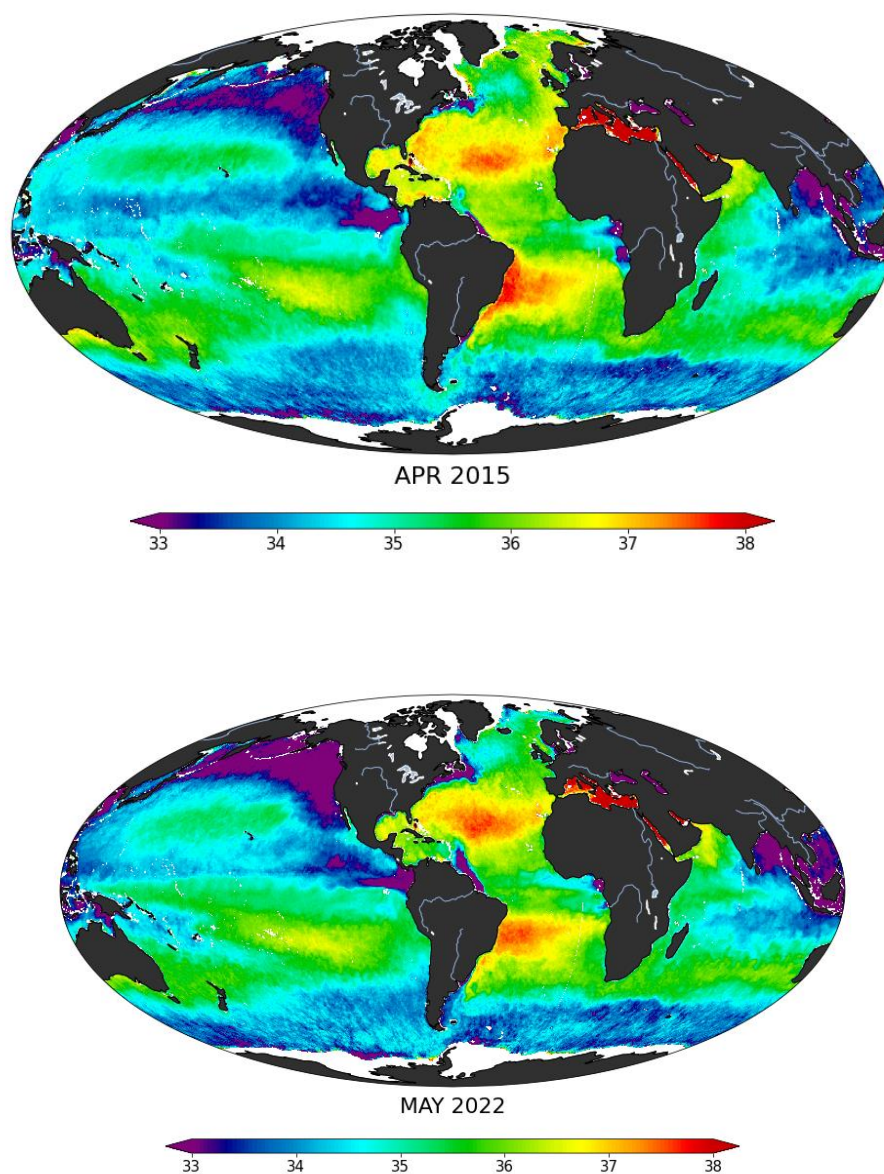


Рисунок 2 — Соленость поверхности моря на апрель 2015 года и май 2022 года

В то же время в современном мире глобализация деятельности приводит к увеличению зависимости экономики от различных природных явлений. Антропогенное воздействие на окружающую среду становится все более значитель-

ным, вызывая нарушение естественного равновесия природных процессов и повышение негативных последствий для человека. Влияние человеческой деятельности также приводит к существенным изменениям морских экосистем [3].

Результаты человеческой деятельности приводят к уменьшению разнообразия морской фауны и улова рыбы. Эксплуатация шельфа для добычи нефти и газа увеличивает вероятность возникновения крупных катастроф, которые негативно влияют на морские биологические и рекреационные ресурсы. В связи с этим интенсивное использование океана должно сопровождаться улучшением системы мониторинга морской среды. Надежная информация помогает избежать катастроф и оптимизировать производственные издержки, а умение прогнозировать состояние морской среды позволяет увеличить эффективность операций на море и предотвратить отрицательные последствия хозяйственной деятельности.

В ответ на запросы потребителей, связанные с использованием морских ресурсов, наблюдается тенденция развития систем оперативных наблюдений и прогнозов. Исследования в этой области составляют основу оперативной океанологии.

Начиная с 1980-х годов, в нашей стране началась работа по созданию научной базы для практической реализации методов оперативной океанологии, однако ситуация 1990-х на десятилетия отодвинула решение проблемы создания подобных систем. До сих пор эта проблема не решена на государственном уровне, что приводит к тому, что развитие российских систем мониторинга значительно уступает зарубежным. Кроме того, многие наработки связаны с использованием импортной техники, а попытки разработки собственных систем оперативной океанологии, предпринятые в последние годы, сталкиваются с трудностями научно-технического и методологического характера [4].

Таким образом, была выявлена необходимость разработки отечественных систем ОО, которые позволят преодолеть импортозависимость России в данной области, а также будут способствовать защите национальных интересов РФ, изучению обширных морских акваторий страны и развитию фундаментальной океанологической науки.

Целью проекта является исследование и разработка автономного гидрофизического зонда как перспективного средства оперативной океанологии.

Поставленная в проекте цель достигается выполнением следующих задач:

- провести анализ современного уровня развития отечественных и зарубежных систем ОО;
- обосновать целесообразность и применимость предлагаемого технического решения;
- разработать концепт устройства;
- спроектировать систему ОО;
- разработать и создать прототип;
- провести стендовые и натурные испытания.

# **1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ**

## **1.1 Общие сведения об оперативной океанологии**

Изменение климата, увеличение риска возникновения экстремальных погодных явлений и катастроф, а также повышение уровня океана привели к необходимости разработки оперативных систем наблюдения за акваториями и улучшения технологий и методов прогнозирования. В связи с этим в последние два десятилетия наблюдается тенденция постепенного перехода от преимущественно экспедиционных методов изучения Мирового океана и обширных акваторий с помощью научно-исследовательских судов и спутниковых наблюдений к созданию систем ОО.

## **1.2 Анализ применяемых систем оперативной океанологии**

Россия и другие мировые государства обладают системами ОО, в совокупности выполняющих функции по наблюдению за состоянием Мирового океана. К таким системам можно отнести:

- донные станции;
- автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА);
- автономные буйковые станции (АБС);
- буи-дрифтеры;
- профилирующие буи.

Рассмотрим подробнее каждую из перечисленных систем

### **1.2.1 Донные станции**

Донные геофизические обсерватории позволяют непрерывно измерять и регистрировать различные параметры, характеризующие состояние придонного

слоя воды и донных осадков, скорость и направление течений, уровень водной поверхности, а также регистрировать сигналы от удаленных источников, таких как сейсмические, акустические, электромагнитные [5]. Для связи донные станции могут использовать как подводный кабель, так и ретрансляционный буй.

Пример донной обсерватории представлен на рисунке 3.

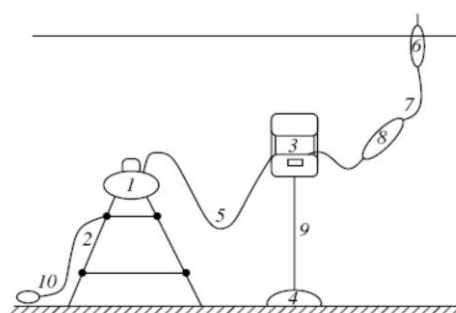


Рисунок 3 — Функциональная схема донной обсерватории

1 — приборный донный комплекс; 2 — треногаоснование; 3 — при-  
топленный буй; 4 — якорь; 5, 7 — кабель-трос; 6 — всплывающий радио-  
ретрансляционный буй; 8 — выюшка-противовес; 9 — буй-реп; 10 — аварий-  
ный трос

Донные обсерватория для изучения гидрофизических данных о среде об-  
ладают следующими преимуществами:

- широкий спектр направлений исследований: донная сейсмология, геомагнетизм, геодезия, физическая океанография.
- возможность установки большого количества приборов для измере-  
ния гидрофизических параметров;
- относительно высокая автономность при использовании подводного  
кабеля (около 10 лет);

- возможность оперативной связи с помощью ретрансляционного буя или подводного кабеля.

Однако донные обсерватории плохо пригодны для создания системы оперативной разведки и наблюдения по ряду причин:

- относительная сложность установки и демонтажа;
- отсутствие возможности снимать профили гидрофизических параметров;
- наличие линии связи как ограничивающего фактора по дальности размещения (при отсутствии ретрансляционного буя);
- статичность;
- относительно низкая автономность при использовании ретрансляционного буя (4–6 месяцев).

### 1.2.2 Автономные обитаемые подводные аппараты

В настоящее время все чаще для мониторинга акваторий применяют АНПА высокой автономности — глайдеры, которые перемещаются по специальной «пилообразной» траектории в заданном диапазоне глубин за счет изменения плавучести (см. рис. 4) [6].

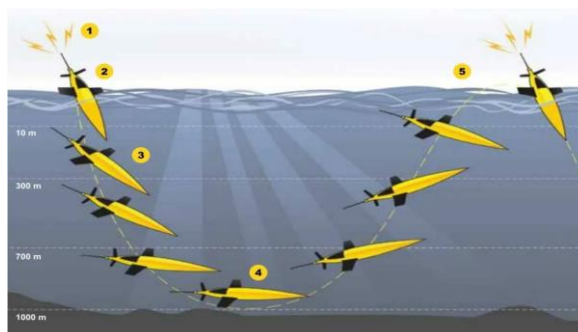


Рисунок 4 — Траектория движения глайдеров

В настоящее время в мире применяется более чем 400 глайдеров для исследовательских миссий. Распределение АНПА в сети по состоянию на декабрь 2023 г. показано на рис. 5 [7]. На схеме можно заметить, что в международной практике глайдеры в основном используются в прибрежных акваториях. Причиной этому может быть относительно низкая автономность устройств (4–8 месяцев) и сложная система автоматического управления.

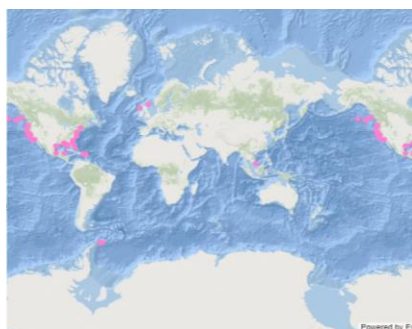


Рисунок 5 — Расположение глайдеров в глобальной сети по состоянию на декабрь 2023 г.

Таким образом, использование АНПА обладает следующим рядом преимуществ:

- использование в широком коридоре глубин (до 6000 м);
- сбор и передача информации в центр обработки в масштабе времени близком к реальному;
- возможность оперативной корректировки программного задания миссии при сеансе связи;
- относительно низкая стоимость производства и эксплуатации – не требует судна обеспечения, простая транспортировка, легкость развертывания системы.

Однако глайдеры, применяемые для создания системы ОО и наблюдения, обладают следующими недостатками:

- необходимость создания сложных систем автоматического управления и систем точной дифферентовки и изменения угла крена;
- сложность покрытия значительные по площадям акватории;
- относительно низкая автономность (4–8 месяцев).

### 1.2.3 Автономные станции с поверхностным буюм

Автономные буйковые станции (АБС) и поверхностные буи, на которых располагаются различные метеорологические и океанологические приборы, служат для исследования гидрофизических параметров в приповерхностном слое океана. Такие станции характеризуются простой конструкцией и невысокой стоимостью. Примеры автономных буйковых станций представлены на рисунке 6.

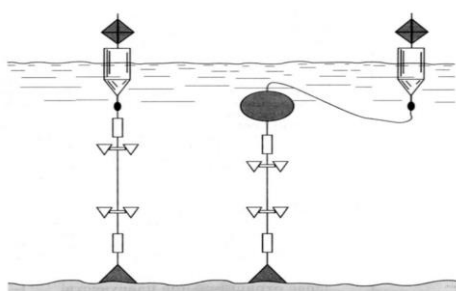


Рисунок 6 — Примеры автономных буйковых станций с поверхностным буюм (слева) и с несущим притопленным и маркировочным поверхностным буюм (справа)

Использование АБС обладает следующим рядом преимуществ:

- сбор и передача информации в центр обработки в масштабе времени близком к реальному;
- относительно низкая стоимость и простота конструкции;
- относительно высокая автономность (2 года);
- возможность установки широкого спектра измерительных приборов;



- возможность снимать профили гидрофизических параметров.

Однако АБС обладают следующими недостатками:

- относительная сложность установки и демонтажа;
- статичность;
- сильное влияние внешних факторов на работу устройства.

#### 1.2.4 Буи-дрифтеры

Дрифтеры — плавающие на поверхности моря устройства, которые предоставляют важные данные о температуре, солености поверхности моря, океанских течениях, высоте волн, атмосферном давлении, а также скорости и направлении приповерхностного ветра, используемые в климатических моделях. Структура дрифтера представлена на рисунке 7.

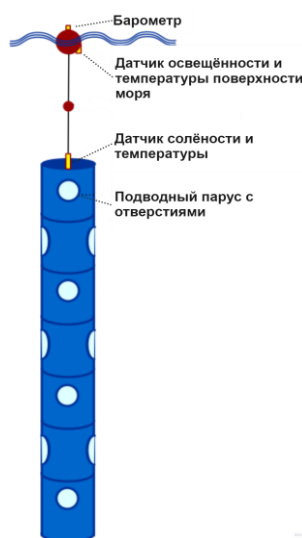


Рисунок 7 — Структура поверхностного дрейфующего буя

Распределение буйев в сети (регулируется специальным рабочим органом (ДВСП – Комиссия Сотрудничества по Буйам Сбора Данных)) по состоянию на 8 января 2024 г. показано на рис. 8 [8].

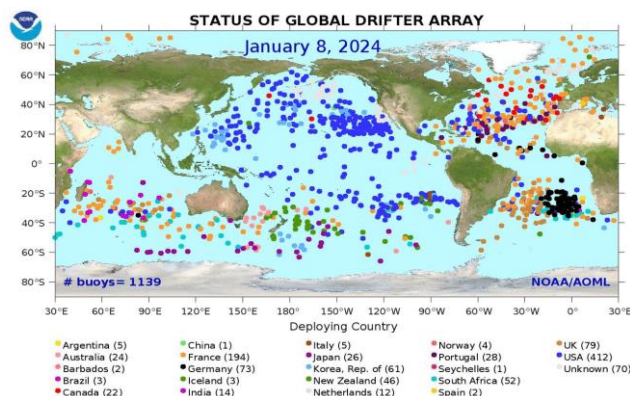


Рисунок 8 — Расположение дрейфующих буйев в глобальной сети по состоянию на 8 января 2024 г.

Использование дрейфующих буйев обладает следующим рядом преимуществ:

- сбор и передача информации в центр обработки в масштабе времени близком к реальному;
- относительная простота конструкции;
- относительно низкая стоимость производства и эксплуатации — не требует судна обеспечения, простая транспортировка, легкость разворачивания системы;
- возможность масштабирования сети;
- относительно высокая автономность (18–24 месяца);
- способность покрывать значительные по площадям акватории.

Однако буй-дрифтеры обладают следующими недостатками:

- отсутствие возможности снимать профили гидрофизических параметров.

### 1.2.5 Профилирующие буи

Этот тип технических средств мониторинга имеет возможность перемещения по глубине, что позволяет производить вертикальное профилирование водной толщи с измерением контролируемых показателей. К ним могут быть отнесены дрейфующие буи Argo, заякоренные стационарные буи.

На сегодняшний день самой развитой автономной системой сбора гидрофизических данных является международная сеть роботизированных дрейфующих профилирующих буев Argo [1].

Каждый буй Argo запускается с корабля и погружается на определенную глубину за счёт своей массы. Через десять дней балластная система (БС) перекачивает масло из резервуара внутри буя во внешнюю балластную емкость, заставляя буй сначала погружаться на 2 км, а затем аналогичным образом возвращаться на поверхность, измеряя свойства океана по мере его подъема. Данные и положение устройства передаются на спутники, а затем на принимающие станции на берегу. Алгоритм работы буя Argo представлен на рисунке 9.

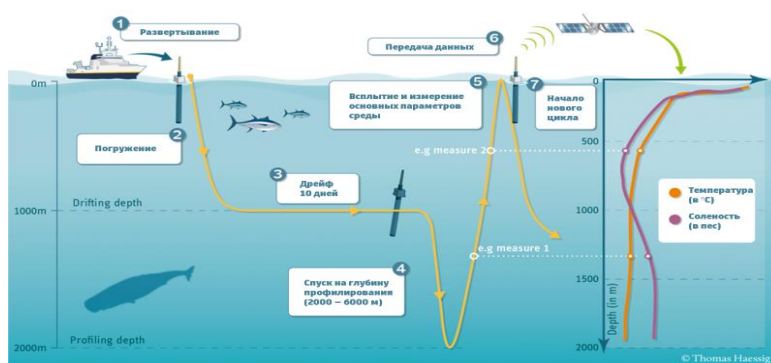


Рисунок 9 — Алгоритм работы буя Argo

По состоянию на 3 марта 2024 г., суммарное количество буйев, размещенных в Мировом океане, составляет 3908 устройства (см. рис. 10).

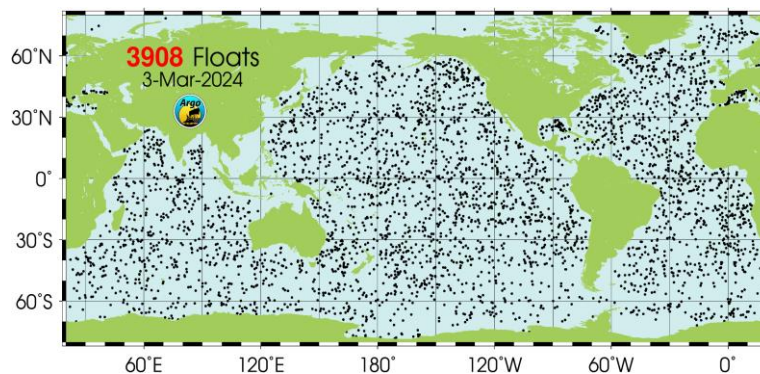


Рисунок 10 — Количество и распределение буев системы Argo по состоянию на 9 января 2024 г.

Использование профилирующих буев обладает следующим рядом преимуществ:

- сбор и передача информации в центр обработки в масштабе времени близком к реальному;
- возможность снимать профили гидрофизических параметров (до 6000 метров);
- относительно низкая стоимость производства и эксплуатации — не требует судна обеспечения, простая транспортировка, легкость развертывания системы;
- возможность масштабирования сети;
- относительно высокая автономность (4–5 лет);
- способность покрывать значительные по площадям акватории.

Однако профилирующие буи обладают следующими недостатками:

- необходимость создания сложной системы изменения плавучести.

### 1.2.6 Выводы по разделу

В результате проведения сравнительного анализа было выявлено, что одной из наиболее перспективных систем ОО является сеть дрейфующих профилирующих зондов. Буи для мониторинга окружающей среды предлагают пользователям множество преимуществ. Они обладают высокой степенью автономности и отличаются простотой эксплуатации, что значительно упрощает процесс развертывания системы. Одним из самых больших достоинств биев является их универсальность для мониторинга различных компонентов окружающей среды, включая профили гидрофизических параметров и океанические течения.

Россия по праву носит звание морской державы, однако при анализе отечественных систем ОО было выявлено, что развитие российских средств мониторинга значительно уступает зарубежным. Данный факт отмечен в «Стратегии развития морской деятельности Российской Федерации до 2030 года» (Распоряжение Правительства РФ № 1930-з от 30 августа 2019 года), где прямо указано на «недостаточное развитие российских океанографических автоматических и автономных средств измерений».

Таким образом, на основе данных об использовании дрейфующих профилирующих биев как перспективного средства ОО и необходимости разработки отечественной системы мониторинга было принято решение о создании сети подводных автономных дрейфующих зондов для сбора гидрофизических данных о среде.

### 1.3 Предлагаемое решение

В ходе проекта будет разработан автономный дрейфующий профилирующий зонд для изучения гидрофизических свойств среды. Разрабатываемое устройство будет состоять из следующих сборочных узлов: балластной системы

(БС) для изменения глубины погружения, блока питания, блока электроники и внешнего корпуса. Зонд будет оснащен радиомодулем для передачи и приема информации, а также GPS для определения своего местоположения. Одним из основных концептов устройства будет модульность, то есть аппарат имеет возможность менять компоновку в зависимости от требований пользователя. Также будет разработан сайт для предоставления пользователю полной информации об устройстве, визуализации собранных данных и управления зондом. За основу при проектировании буя будет принят профилограф компании MRV SYSTEMS – S2-A (см. рис. 11).



Рисунок 11 — Профилограф S2-A компании MRV SYSTEMS

Устройство будет иметь следующий принцип работы:

1. Устройство спускают на воду, и оно отправляет свое местоположение на сервер.
2. Оператор задает целевую глубину погружения устройства, время его дрейфа и запускает цикл.
3. Зонд погружается на заданную глубину. Параллельно идет считывание данных с датчиков с сохранением на SD-карту с некоторой периодичностью.

4. Устройство проводит на глубине заданное количество времени, считывание данных с датчиков продолжается.
5. Зонд всплывает на поверхность, снимая показателя среды, отправляет свое местоположение на сервер. Данные с SD-карты поступают на компьютер оператора для последующей визуализации. Цикл повторяется.

Целевая аудитория разрабатываемого устройство представлена на рисунке 12.

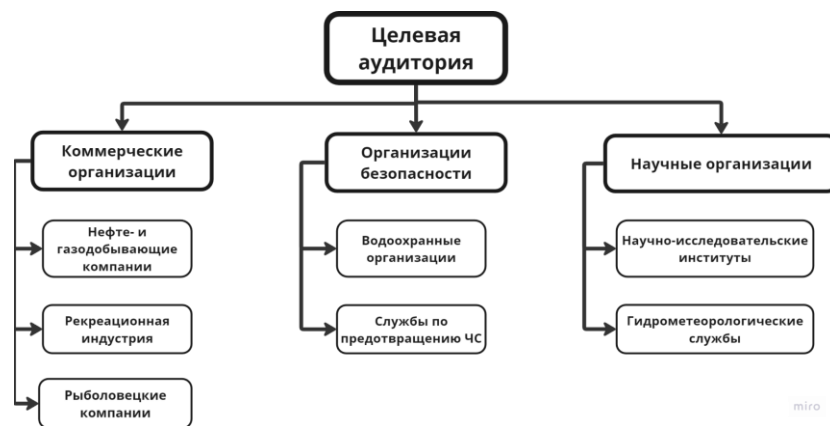


Рисунок 12 — Целевая аудитория

#### 1.4 Моделирование параметров изделия

В данном разделе будет рассмотрено моделирование прочностных, гидродинамических параметров разрабатываемого дрейфующего зонда.

Будет произведен численный расчет толщины стенок изделия, а затем произведено моделирование его прочного корпуса на заданной глубине для определения запасов по прочности и устойчивости.

Также будет проведено моделирование гидродинамического коэффициента сопротивления для различных конфигураций устройства и режимов его плавания.

#### 1.4.1 Гидродинамический расчет

В данном разделе будет рассмотрен расчет гидродинамических характеристик спроектированного дрейфующего зонда.

Цель расчета: получить гидродинамический коэффициент сопротивления устройства, а также сравнить полученные численные результаты с теоретическими оценками [9,10]. Выбрать наиболее подходящую геометрию обтекателей (сферические, плоские или конусообразные крышки).

Расчет будет производиться в пакете САПР Solidworks в дополнении Flow Simulation (FS).

Начальные данные для расчета приведены в таблице 12.

Таблица 1 - Начальные данные для гидродинамического расчета

Параметр	Значение	Единицы измерения
Число Рейнольдса (Re)	$1,5 \cdot 10^5$	
Характерный размер ( $d_{mid}$ )	90	мм
Характерная длина (L)	670	мм
Характерная площадь ( $\frac{S_{хар}}{2}$ )	0,00318	м <sup>2</sup>
Динамическая вязкость воды при 0 градусов ( $\mu$ )	$1,79 \cdot 10^{-3}$	Па · с
Плотность воды ( $\rho$ )	1025	кг/м <sup>3</sup>

Гидродинамический коэффициент сопротивления зонда может быть вычислен по следующей формуле:



$$C_z = \frac{F_z}{q_\infty \cdot \frac{S_{\text{хар}}}{2}} \quad (1)$$

где:

$q_\infty$  – скоростной напор (Па), вычисляемый по формуле:

$$q_\infty = \frac{\rho V^2}{2} \quad (2)$$

где:

$V$  – скорость невозмущенного набегающего потока (м/с):

$$V = \frac{Re \cdot \mu}{\rho \cdot d_{mid}} \quad (3)$$

Произведем расчет скорости невозмущенного набегающего потока и скоростного напора, согласно формулам (2) и (3):

$$V = \frac{1,5 \cdot 10^5 \cdot 1,79 \cdot 10^{-3}}{1025 \cdot 0,09} = 2,911 \frac{\text{м}}{\text{с}} \quad (4)$$

$$q_\infty = \frac{1025 \cdot 2,911^2}{2} = 4342,9 \text{ Па} \quad (5)$$

Таким образом, для вычисления гидродинамического коэффициента сопротивления, согласно (1) необходимо знать силу  $F_z$ , которая будет вычислена путем моделирования. Значения будут получены для нескольких ситуаций: погружение и всплытие устройства с плоскими, конусообразными и сферическими крышками.

Результаты моделирования гидродинамических параметров для трех конфигураций представлены на рисунках 13–15.

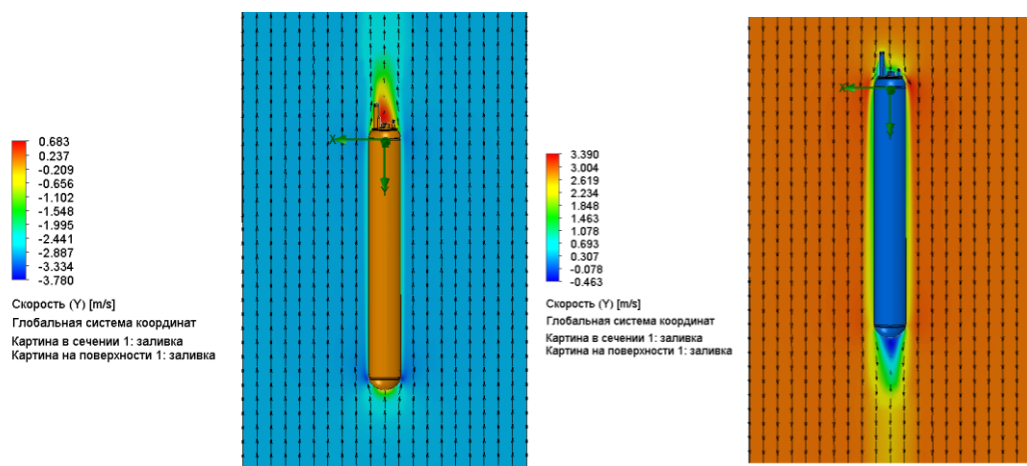


Рисунок 13 — Обтекание тела со сферическим дном при погружении и всплытии

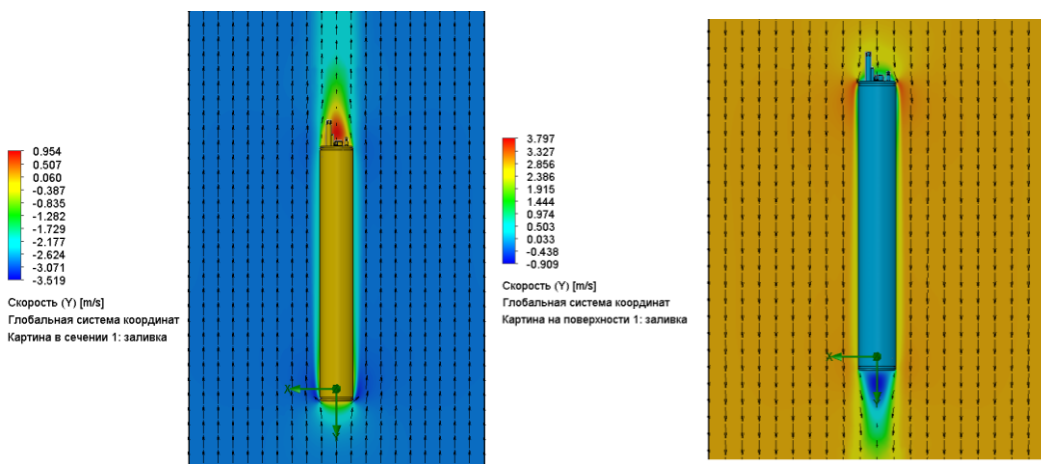


Рисунок 14 — Обтекание тела с плоским дном при погружении и всплытии

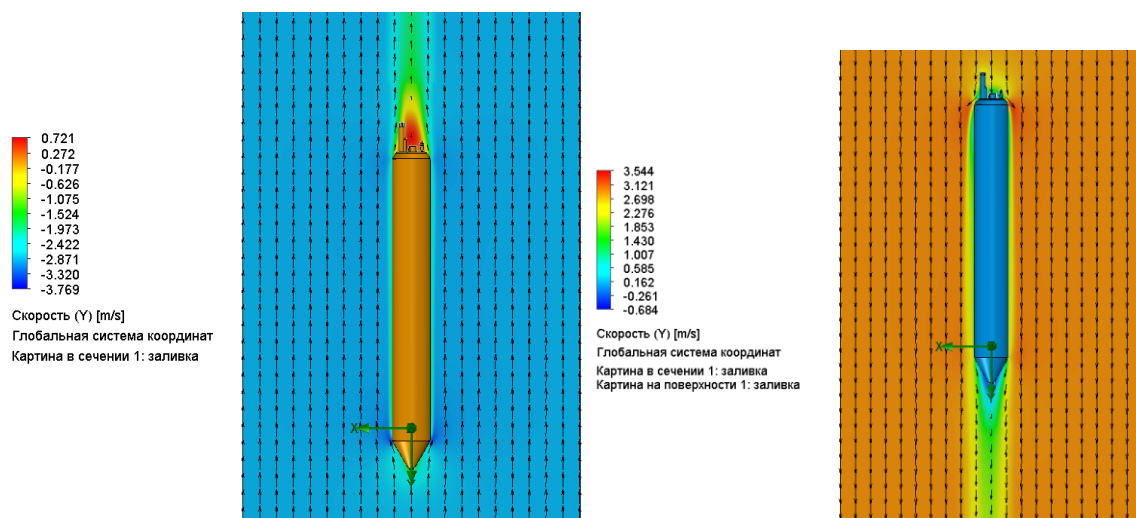


Рисунок 15 — Обтекание тела с конусообразным дном при погружении и всплытии

В результате моделирования были получены значения силы  $F_z$ , представленные в таблице 2.

Таблица 2 — Результаты моделирование гидродинамических параметров

Исследование	Значение, Н
Погружение со сферическим дном ( $F_z^{\text{Сп}}$ )	3,738
Всплытие со сферическим дном ( $F_z^{\text{СВ}}$ )	2,757
Погружение с плоским дном ( $F_z^{\text{Пп}}$ )	6,496
Всплытие с плоским дном ( $F_z^{\text{ПВ}}$ )	3,686
Погружение с конусообразным дном ( $F_z^{\text{Пп}}$ )	3,836
Всплытие с конусообразным дном ( $F_z^{\text{Пп}}$ )	2,555

Вычислим гидродинамические коэффициенты сопротивления с учетом полученных значений  $F_z$  (см. таблица 3).

Таблица 3 — Гидродинамические коэффициенты сопротивления

Исследование	Значение, $\frac{H}{m^2 \cdot Pa}$
Погружение со сферическим дном ( $C_z^{Cп}$ )	0,27
Всплытие со сферическим дном ( $C_z^{Cв}$ )	0,20
Погружение с плоским дном ( $C_z^{Пп}$ )	0,47
Всплытие с плоским дном ( $C_z^{Пв}$ )	0,27
Погружение с конусообразным дном ( $C_z^{Кп}$ )	0,28
Всплытие с конусообразным дном ( $C_z^{Кв}$ )	0,19

Выводы по главе: Значение гидродинамического коэффициента  $C_z^{Cп}$  с точностью до сотых совпадает с табличным значением для упрощенного тела цилиндрической формы со скругленными концами. Значения коэффициента  $C_z^{Cв}$  отличаются от табличного на 29%. Значения коэффициента  $C_z^{Пв}$  и  $C_z^{Пп}$  отличаются от табличного (для упрощенного тела цилиндрической формы с плоскими гранями [9]) в среднем на 58%. Значения коэффициента  $C_z^{Кв}$  и  $C_z^{Кп}$  отличаются от табличного (для упрощенного тела цилиндрической формы с конусообразными концами) в среднем на 67%. Расхождение теоретических значений и значений, полученных при моделировании, обусловлено сложной геометрией верхней крышки зонда, которая отличается от примитивных форм, рассматриваемых в сборнике. Средние значения коэффициентов для тела со сферическими и конусообразными концами равны, а среднее значение гидродинамического коэффициента для тела с плоскими гранями превышает значение для тела со скругленными (или конусообразными) концами на 36%. Значение коэффициента  $C_z^{Кп}$  превышает  $C_z^{Cп}$ , значение коэффициента  $C_z^{Cв}$  превышает  $C_z^{Кв}$  поэтому для моделирования корпуса устройства было принято решение выбрать сферическую нижнюю крышку (при вертикальном погружении сопротивление оказывает нижняя крышка) и конусообразную верхнюю (при вертикальном всплытии сопротивление оказывает верхняя крышка).

#### 1.4.2 Прочностной расчет

Цель расчета: вычислить толщину обтекателей разрабатываемого зонда, вычислить предельную глубину работы устройства, провести моделирование полученных результатов для определения запасов по прочности и устойчивости.

Начальные данные для прочностного расчета приведены в таблице 4.

Таблица 4 - Начальные данные для гидродинамического расчета

Параметр	Значение	Единицы измерения
Коэффициент Пуассона (оргстекло)	0,15	
Модуль нормальной упругости (оргстекло)	3	ГПа
Предел текучести (оргстекло)	110	МПа
Коэффициент Пуассона (PLA-пластик)	0,4	
Модуль нормальной упругости (PLA-пластик)	3	ГПа
Предел текучести (PLA-пластик)	50	МПа
Наружный радиус оболочки	45	мм
Толщина цилиндрической оболочки	3	мм

Устройство заполнено воздухом с нормальным атмосферным давлением. Избыточное давление на предельной глубине:

$$p = \rho g h \quad (6)$$

Максимальное (критическое) давление, допустимое для неподкрепленной цилиндрической оболочки из условий устойчивости, может быть определено по формуле [11]:

$$p_{кр} = \frac{t_1^3 E_1 \eta_1 \eta_2}{4R^3(1 - \mu_1^2)} \quad (7)$$

Из формул (1) и (2) получаем, что предельная глубина работы зонда:

$$h = \frac{t_1^3 E_1 \eta_1 \eta_2}{4R^3(1 - \mu_1^2)\rho g} \quad (8)$$

где:

$\mu_1$  – коэффициент Пуассона (оргстекло),  $E_1$  – модуль нормальной упругости (оргстекло),  $\eta_1 = 1,0$  – поправочный коэффициент, учитывающий отклонение от геометрической формы и влияние технологии изготовления оболочки при больших глубинах и толщинах,  $\eta_2$  – поправочный коэффициент, учитывающий влияние напряжений на устойчивость оболочки (для предварительных расчетов принять равным 0,7),  $R$  – наружный радиус оболочки.

Тогда максимальная глубина погружения:

$$h = \frac{3^3 \cdot 3 \cdot 10^9 \cdot 1 \cdot 0,7}{4 \cdot 45^3 (1 - 0,15^2) \cdot 1025 \cdot 9,81} = 17 \text{ м} \quad (9)$$

Определим толщину неподкрепленной сферической оболочки из условий устойчивости. Допустимое критическое давление для неподкрепленной цилиндрической оболочки может быть определено по формуле:

$$p_{кр} = \frac{t_2^2 E_2 k_{сф}}{R^2(1 - \mu_2^2)} \quad (10)$$

где:

$k_{сф}$  — поправочный коэффициент, учитывающий правильность формы и технологию изготовления (для предварительных расчетов принять равным 0,5).

Тогда толщина сферической оболочки будет вычисляться по формуле:

$$t_2 = R \sqrt[3]{\frac{\rho g h (1 - \mu_2^2)}{E_2 k_{\text{сф}}}} \quad (11)$$

$$t_2 = 45 \sqrt[3]{\frac{1025 \cdot 9,81 \cdot 17 \cdot (1 - 0,4^2)}{3 \cdot 10^9 \cdot 0,5}} = 2,1 \text{ мм} \quad (12)$$

Таким образом, расчетные значения предельной глубины работы устройства и толщины сферической части устройства:

- $h = 39,7$  мм при  $t_1 = 3$  мм (толщина цилиндрической части зонда)
- $t_2 = 2,1$  мм – толщина сферической части зонда

Для проверки вычисленных параметров прочного корпуса необходимо провести численное моделирование всестороннего обжатия его внешним давлением, а также провести расчет на потерю устойчивости.

Результатом выполнения анализа является получение смещений или деформаций детали под действием внешних нагрузок, на основе которых можно прогнозировать возникновение изломов или критических деформаций.

Расчет будет проводиться в пакете САПР Solidworks.

Проведем расчет на статическую прочность корпуса. Давление разрушения обечайки (цилиндрической части прочного корпуса) принимаем равным приложенному к корпусу давлению, при котором внутреннее напряжение в модели (эквивалентное напряжение по Мизесу) достигает величины предела текучести материала: 110 МПа или контактное давление в модели достигает 1,5 предела текучести материала:  $110 \cdot 1,5 = 165$  МПа (для оргстекла). Аналогично для материала крышки имеем: предел текучести 50 МПа или контактное давление 75 МПа.

Примем следующие допущения и корректировки для обеспечения соответствия модели поставленной задаче, а также для оптимизации параметра времени расчета:

- внешние приборы и устройства (антенны, датчики и пр.) в расчете не участвуют;
- расчетной принимается 1/4 часть сборки прочного корпуса вдоль оси вращения в силу его симметрии.

Следует отметить, что расчет производится в линейной постановке. Таким образом, давление разрушение модели возможно найти по максимальным внутренним напряжениям.

На рисунке 16 представлены наиболее нагруженные участки обечайки и крышек по результатам моделирования.

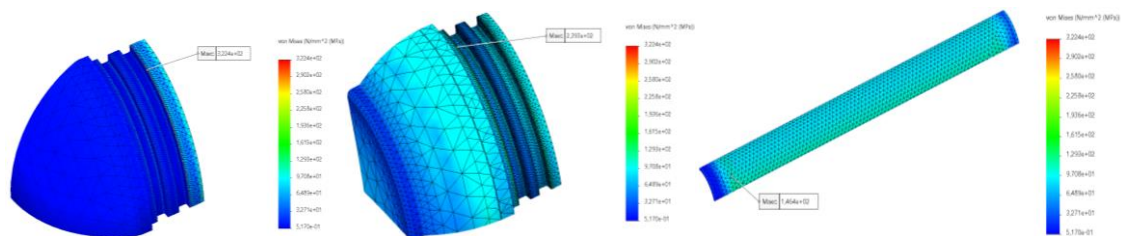


Рисунок 16 — Наиболее нагруженные участки задней, передней крышки и обечайки

Как видно из рисунка 16, максимальные напряжения в обечайке и крышке составляют:

$$p_{\text{обечайки}}^{10\text{МПа}} = 146 \text{ МПа} \quad (13)$$

$$p_{\text{крышки}}^{10\text{МПа}} = 239 \text{ МПа} \quad (14)$$

Как говорилось, ранее, давление разрушения модели по внутренним напряжениям можно найти из пропорции:



$$p_{обечайки}^{Max} = \frac{110 \text{ МПа} \cdot 10 \text{ МПа}}{146 \text{ МПа}} = 7,5 \text{ МПа} \quad (15)$$

$$p_{крышки}^{Max} = \frac{50 \text{ МПа} \cdot 10 \text{ МПа}}{239 \text{ МПа}} = 2,1 \text{ МПа} \quad (16)$$

Максимальные контактные давления в модели составляют:

$$p_{обечайки}^{10 \text{ МПа}} = 34 \text{ МПа} \quad (17)$$

$$p_{крышки}^{10 \text{ МПа}} = 62 \text{ МПа} \quad (18)$$

Расчет производится в линейной постановке. Контактное давление в обечайке достигает 1,5 предела текучести материала:  $110 \cdot 1,5 = 165 \text{ МПа}$ , в крышке — 75 МПа. Тогда давление разрушения модели по контактному давлению можно найти из пропорции:

$$p_{обечайки}^{контактMax} = \frac{165 \text{ МПа} \cdot 10 \text{ МПа}}{34 \text{ МПа}} = 48,5 \text{ МПа} \quad (19)$$

$$p_{крышки}^{контактMax} = \frac{75 \text{ МПа} \cdot 10 \text{ МПа}}{62 \text{ МПа}} = 12,1 \text{ МПа} \quad (20)$$

Расчет на потерю устойчивости обечайки производим в SolidWorks при помощи линейного анализа потери устойчивости.

Исследование будет производиться для цилиндрического прочного корпуса с закреплениями без разрезов по осям симметрии.

Создаем сетку для расчетов с учетом размеров элементов и приемлемого времени расчета (см. рис. 17).

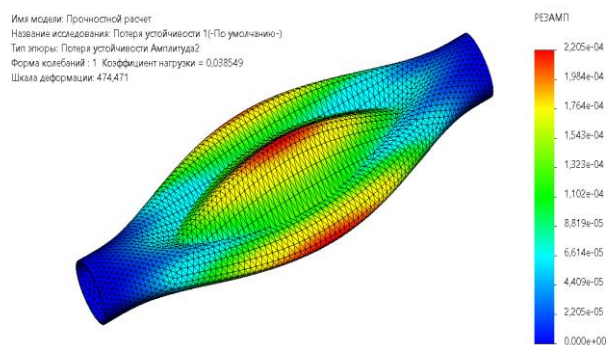


Рисунок 17 — Результат моделирования прочного корпуса на устойчи-  
ВОСТЬ

Согласно проведенному исследованию, значение коэффициента нагрузки составляет 0,0385. Коэффициент нагрузки показывает, во сколько раз можно увеличить приложенное к корпусу давление прежде, чем он потеряет устойчивость. Тогда критическое давление потери устойчивости корпуса составляет:

$$p_{\text{корпуса}}^{\text{устойчMax}} = 10 \text{ МПа} \cdot 0,0385 = 385 \text{ кПа} \quad (21)$$

В предыдущих пунктах были получены критические давления в обечайке, представленные в таблице 5.

Таблица 5 — Критические давления в обечайке

Параметр	Значение	Ед. Изм.
По эквивалентным напряжениям ( $p_{\text{обечайки}}^{\text{Max}}$ )	7,5	МПа
По контактному давлению ( $p_{\text{обечайки}}^{\text{контактMax}}$ )	48,5	МПа
По устойчивости ( $p_{\text{корпуса}}^{\text{устойчMax}}$ )	385	кПа

Расчет рабочего давления производится по меньшему из них ( $p_{\text{корпуса}}^{\text{устойчMax}}$ ). Испытательное давление превышает рабочее на 25%, и при испытании запас прочности (устойчивости) должен быть не менее 25%. Тогда рабочее давление равняется:

$$p_{\text{обечайки}}^{\text{рабочее}} = \frac{p_{\text{корпуса}}^{\text{устойчMax}}}{1,25 \cdot 1,25} = \frac{385 \text{ кПа}}{1,25 \cdot 1,25} = 246 \text{ кПа} \quad (22)$$

Давление на глубине 17 метров, согласно формуле (12), составляет:

$$p = 1025 \cdot 10 \cdot 17 = 174,25 \text{ кПа} \quad (23)$$

$p_{\text{обечайки}}^{\text{рабочее}}$  превышает вычисленное значение, таким образом устройство выдержит пребывание на глубине 17 метров.

Выводы по разделу: в результате прочностного расчета были определены предельная глубина работы устройства и толщина сферической части корпуса, такие как:

- При толщине цилиндрической части корпуса  $t_1=3$  мм предельная глубина работы зонда  $h = 17$  м;
- толщина сферической части корпуса  $t_2 = 2,1$  мм.

Было проведено моделирование на прочность и устойчивость корпуса, по результатам которых было подтверждено, что конструкция выдержит пребывание на глубине 17 метров.

## 2. ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

### 2.1 Определение общего вида и компоновки изделия

#### 2.1.1 Эскизный проект

К разрабатываемому изделию предъявляются следующие основные требования (см. рис. 18).

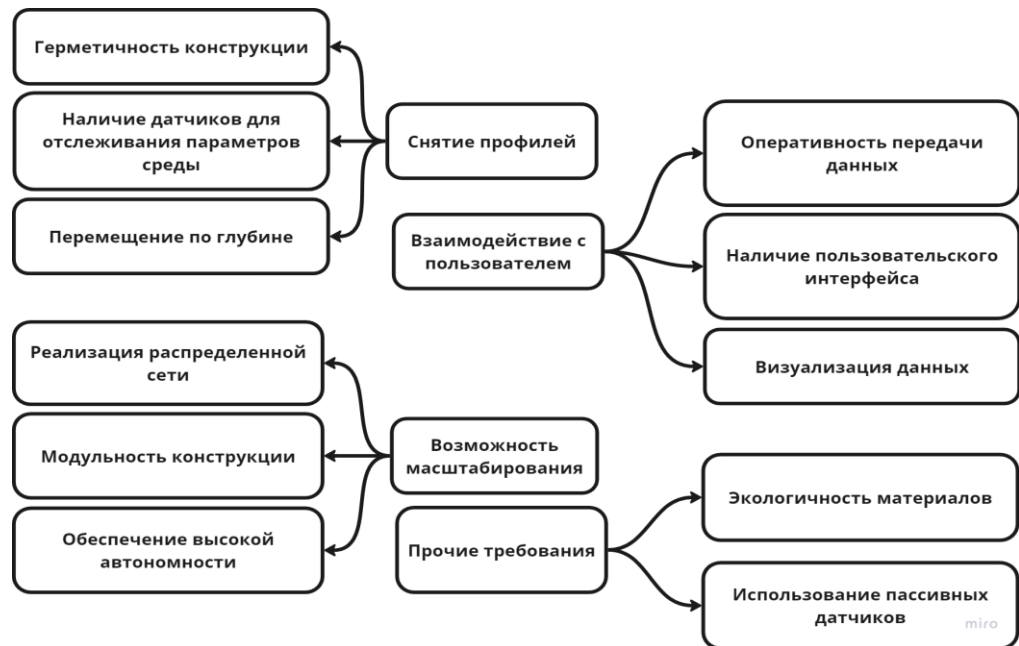


Рисунок 18 — Техническое задание

Разрабатываемый зонд конструктивно состоит из следующих сборочных узлов:

- СИП;
- аккумуляторная батарея (АКБ);
- блок электроники;
- внешний корпус.

3D-модель устройства представлена на рисунке 19.

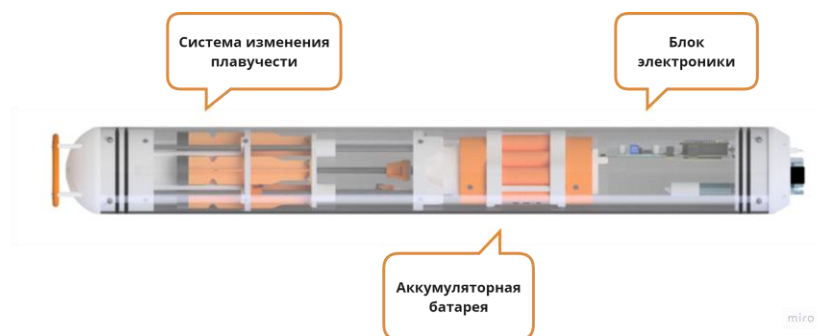


Рисунок 19 — Компоновка зонда

### 2.1.2 Разработка корпуса

Верхняя часть корпуса представляет собой конусообразную крышку с плоским фланцем для размещения средств связи и датчиков. Прочный корпус выполнен из акриловой трубы внешним диаметром 90 мм, толщиной стенок 3 мм и длиной 690 мм. Нижняя часть корпуса выполнена в виде сферической крышки. Герметизация трубы осуществляется посредством установки в крышки радиального уплотнения, состоящего из двух резиновых колец по ГОСТ 9833–73 размера 078-084-36. Обтекатели крепятся к корпусу винтами.

### 2.1.3 Разработка системы изменения плавучести

Одним из основных узлов зонда является СИП (см. рис. 20).



Рисунок 20— 3D-модель СИП

В разрабатываемом устройстве в качестве балластной емкости выступают шприцы суммарном объемом 200 мл, которые зафиксированы в нижней крышке при помощи эпоксидного клея. Решение объединить элемент корпуса и крепление для шприцов в одну деталь обусловлено необходимостью обеспечения герметичности изделия, так как при такой конфигурации забортная вода поступает в балластную емкость напрямую через отверстия в нижней крышке. Для перемещения поршней вдоль вертикальной оси была реализована передача «винт-гайка».

Для ограничения работы сервопривода было принято решение использовать механических концевых датчиков (см. рис. 21). Этот способ позволяет обеспечить надежность срабатывания системы. Датчики располагаются на прижимной пластине для шприцов и креплении для сервопривода.



Рисунок 21— Расположение механических концевых датчиков

Для фиксации продольного габарита БС и обеспечения соосности модуля в конструкцию были добавлены направляющие валы (см. рис. 22). Позиционирования элементов осуществляется при помощи винтов и лысок на валах.

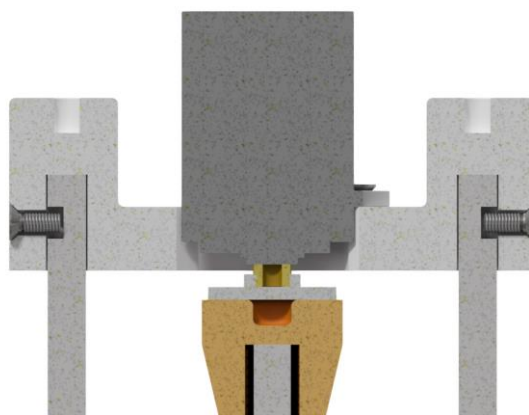


Рисунок 22— Направляющие валы

#### 2.1.4 Разработка аккумуляторной батареи

В ходе работы над данным узлом был произведен расчет энергопотребления, в результате которого было выявлено, что для отработки устройством 100 циклов необходимо 24 литий-ионных батарей 18650. Одним из основных концептов устройства является модульность, поэтому было принято решение разработать блоки АКБ (см. рис. 23) 2S6P (буква S указывает на количество последовательно соединенных батарей, а P — параллельно соединенных), которые можно будет подключать параллельно для увеличения емкости. С целью контроля процесса заряда АКБ, индивидуального контроля зарядного процесса и балансировки будет подключена плата BMS.



Рисунок 23 — 3D-модель АКБ

### 2.1.5 Разработка блока электроники

В ходе работы над проектом была разработана основная печатная плата (см. рис. 24) для микроконтроллера, драйверов датчиков и других электронных компонентов.

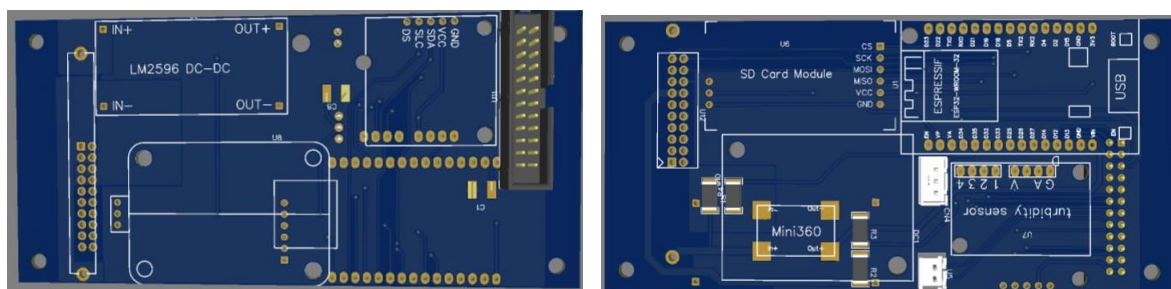


Рисунок 24 — Основная печатная плата

Для крепления платы был спроектирован кронштейн, к которому она присоединяется винтами. Модель представлена на рисунке 25.



Рисунок 25 — 3D-модель блока электроники



Для расположения датчиков и средств связи используется верхняя часть корпуса (см. рис. 26). Каждый элемент крепится в конусообразную крышку при помощи эпоксидного клея.



Рисунок 26— Расположение датчиков в верхнем обтекателе

#### 2.1.6 Разработки универсальных стыковочных элементов

Одним из основных концептов устройства является модульность, то есть пользователь в зависимости от своих требований имеет возможность менять компоновку, например, для увеличения продолжительности работы зонда может быть добавлен дополнительный блок АКБ. В связи с этим были разработаны детали универсальной стыковки отсеков. Крепление осуществляется при помощи 3 винтов (см. рис. 27).



Рисунок 27— Винтовое соединение

Для соединения электронных компонентов и проводки кабелей были разработана печатные платы, на которых располагаются информационные и силовые разъемы (см. рис. 28).

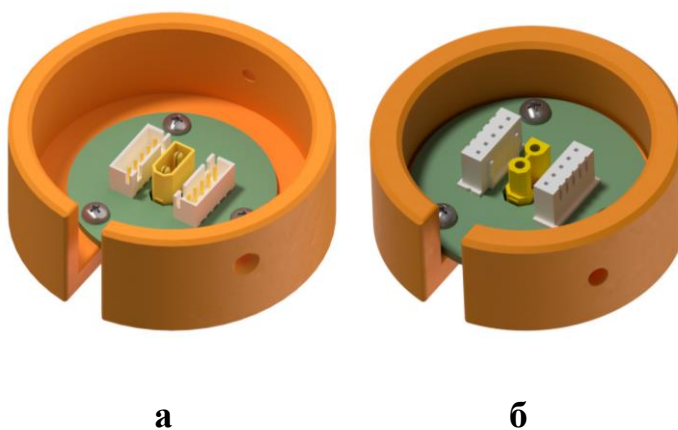


Рисунок 28— Макетные платы с разъемами на примере винтового соединения:

*а* — разъемы папа; *б* — разъемы мама

## 2.2 Конструкторская документация

По результатам выполнения конструкторской части была составлена конструкторская документация, которая состоит из сборочных чертежей устройства и его узлов (см. Приложение Б), спецификаций и чертежей деталей.

На рисунках 29 и 30 представлен сборочный чертеж профилографа и спецификация.

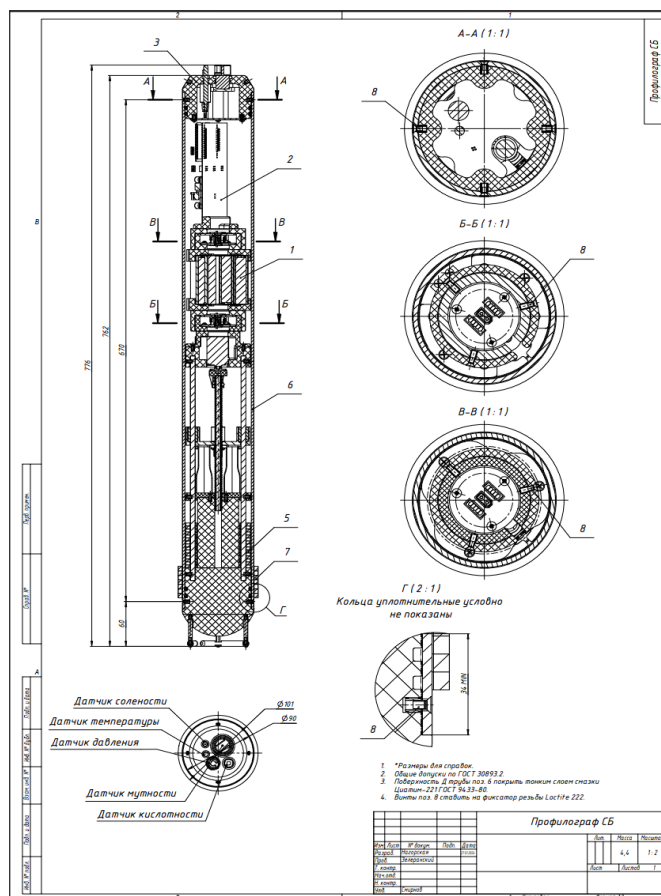


Рисунок 29 — Сборочный чертеж профилографа



Большая часть спроектированных деталей была изготовлена при помощи аддитивных технологий 3D-печати. Детали, к которым предъявлялись повышенные требования к герметичности, были напечатаны с применением фотополимерных SLA технологий. Опорные детали были напечатаны с применением FDM технологий.

## 2.4 Проведение полигонных испытаний

С целью тестирования программного кода устройства для полного цикла (цикл включает в себя погружение, сбор информации с датчиков, всплытие, передача данных на компьютер оператора) в реальных условиях были проведены натурные испытания на открытой акватории. Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи:

- a. подтвердить результаты стендовых испытаний (герметичность прототипа и массу навески);
- b. проверить работоспособность СИП;
- c. протестировать работу MQTT-сервера на воде, проверить стабильность WI-FI соединения;
- d. проверить корректность работы написанного кода в реальных условиях;
- e. собрать данные о среде и распределении гидрофизических параметров, сохранить их в виде таблицы на GOOGLE SHEETS и в формате CSV.

Испытания проводились в притоке реки Клязьма по адресу Набережная, 12, Долгопрудный, Павельцево м-н (см. рис. 32).

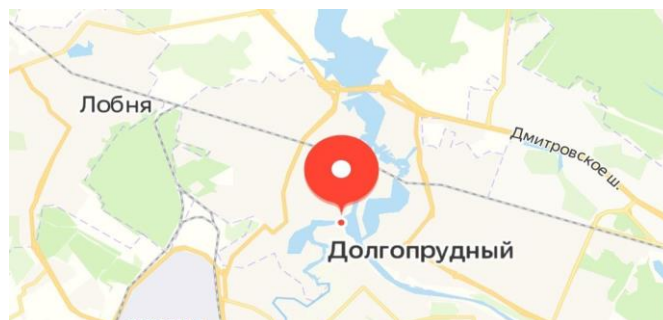


Рисунок 32— Место проведения испытаний

В состав рабочей группы вошли конструктор, электронщик и программист команды, разрабатывающей устройство, преподавательский состав из четырёх человек, операторы и родители.

Для проведения испытаний было использовано следующее оборудование: разработанный прототип, три надувные ПВХ лодки (с возможностью якорения), спасательные жилеты, инструменты для работы с устройством, набор свинцовых грузов.

В ходе подготовки к испытаниям был составлен план в соответствии с поставленными задачами (см. рис. 33). В рамках первого этапа проведения испытаний было необходимо промерить глубину водоема в месте, выбранном для запуска устройства, и соотнести полученные данные с габаритами зонда, в случае необходимости выбрать более подходящую локацию; подтвердить результаты стендовых испытаний. В рамках второго этапа были поставлены следующие задачи:

- проверить и отладить работу MQTT-сервера;
- проверить работоспособность системы изменения плавучести;
- проверить работу датчиков, получить с них записанные данные;

По результатам этого этапа устройство должно отработать 20 циклов — количество циклов, на которое рассчитана аккумуляторная батарея.

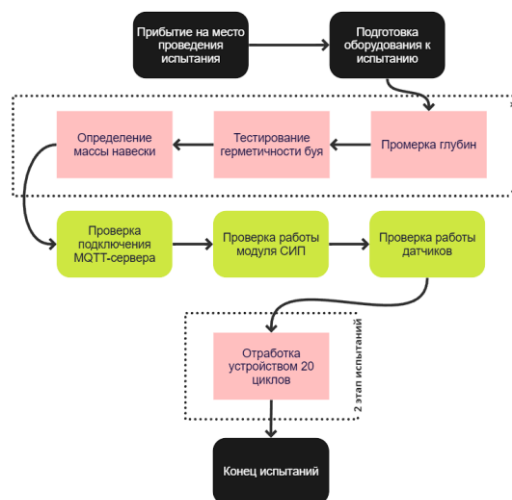


Рисунок 33 — Roadmap испытаний

Карта местности с отмеченными местами проведения запусков представлена на рисунке 34.



Рисунок 34— Места запуска устройства

Прототип был доставлен на место испытания в разобранном виде, чтобы предотвратить его поломку из-за резких перепадов температур, поэтому перед

первым этапом испытаний необходимо было герметично собрать зонд (см. рис. 35).



Рисунок 35— Сборка устройства

Первый запуск устройства (см. рис. 36) был произведен в месте, отмеченном на карте под номером 1.





### Рисунок 36— Первый спуск устройства на воду

В соответствии с составленным планом в начале была промерена глубина реки с использованием ручного лота (груз и веревка с метровыми метками). Среднее значение глубины в месте проведения испытаний составило 4.54 м. При сравнении продольного габарита устройства, численно равного 0.8 м, с глубиной в месте проведения испытаний, которая в 5.6 раз превышает размеры прототипа, был сделан вывод, что данный участок водоема подходит для проведения испытаний.

По результатам стендовых испытаний при массе навески 2100 г. устройство обладает около нейтральной плавучестью. Масса забортной воды при верхнем положении поршней в СИПе – 200 г. Соответственно для корректной работы устройства необходимы дополнительные свинцовые грузы массой более 1900 г.

Выводы по результатам первого испытания:

- среднее значение глубины в месте запуска устройства — 4.5 м;
- при массе грузов 2100 г. устройство обладает нейтральной плавучестью;
- определена масса грузов для отработки устройством полного цикла — более 1900 г.

В ходе подготовки ко второму этапу испытаний потребовалось частично разобрать устройство, чтобы загрузить на микроконтроллер код для полного цикла. В процессе работы было установлено, что датчик давления работал некорректно, таким образом, было принято решение регулировать время полного цикла прототипа перед началом его работы при помощи MQTT-сервера, а движение поршней в балластной системе ограничивать концевыми датчиками.

Также были проведены проверки подключения прототипа к MQTT-серверу и сбора данных с последующем отправлением информации в таблицу.

Второй запуск был проведен в месте, отмеченном на карте под номером 2.

Сигнал о запуске цикла передавался устройству через MQTT-сервер с телефона (см. рис. 37). Каждый цикл занимал 2 минуты (время, которое было задано оператором). Система изменения плавучести, которая отвечает за погружение и всплытие зонда, отработала циклы в штатном режиме. Следует отметить, что при всплытии устройство еще некоторое время совершает затухающие колебания вдоль вертикальной оси, во время которых WIFI-соединение его с компьютером нестабильно из-за периодического погружения зонда под воду, поэтому подключение MQTT-сервера для передачи данных по подсчетам происходит через 30 секунд с момента первого выхода изделия на поверхность.

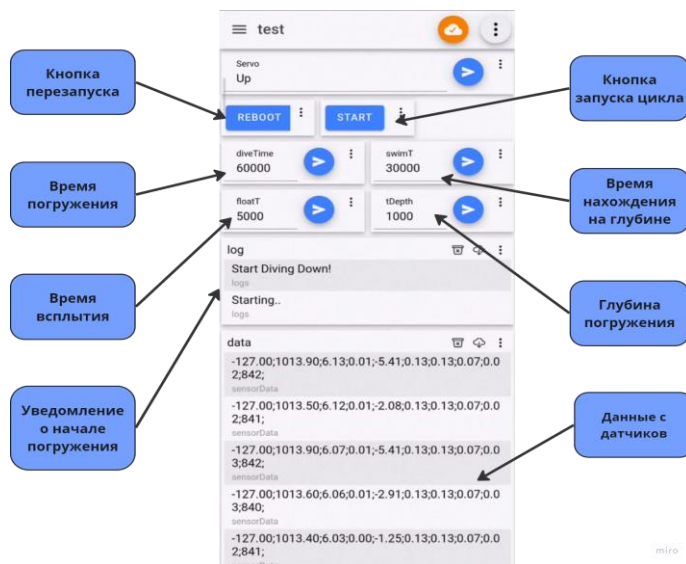


Рисунок 37— Управление устройством через MQTT-сервер

В ходе испытаний данные о гидрофизических свойствах среды были сняты только с комплексного датчика давления и температуры. Другие датчики

(температуры, мутности, кислотности, проводимости) в рамках испытания не были подключены.

После отработки устройством 4 циклов было принято решение продолжить испытания в месте, отмеченном на карте под номером 3, так как во второй локации прототип слишком сильно сносило течением, что осложняло наблюдения за его работой. На новом месте была поставлена задача проверки работоспособности системы на маленьких интервалах: время, отведенное на полный цикл, было уменьшено до 1 минуты. После каждого всплытия устройство отправляло пакет данных через сервер на компьютер оператора, который перенаправлял их в GOOGLE SHEETS. В рамках испытаний на третьей локации зонд успешно отработал 12 циклов. Этапы цикла представлены на рисунках 38–40.



Рисунок 38— Спуск устройства на воду



Рисунок 39— Всплытие устройства



Рисунок 40 — Прототип отправляет данные на сервер

Текущего на момент начала испытаний уровня заряда аккумулятора хватило для проведения 12 тестов, тогда как, согласно расчетам, зонд должен был отработать 20 циклов. Таким образом, можно сделать вывод о необходимости учитывать сильное влияние внешних факторов на аккумулятор. По результатам испытаний также выявилась необходимость в системе контроля заряда аккумуляторной батареи: прототип успел закончить 12 цикл (устройство успешно всплыло и передало собранный пакет данных оператору), однако оставшегося заряда АКБ не хватило, чтобы начать новый. В следующих прототипах, с целью избежать разрядки аккумулятора на глубине, будет предусмотрена система экстренного всплытия устройства.

Выводы по результатам второго испытания:

- СИП работает корректно;
- MQTT-сервер работает корректно;
- устройство успешно отправляет данные с датчиков в GOOGLE SHEETS;

- необходимо разработать систему контроля заряда аккумуляторной батареи и систему экстренного всплытия.

При анализе результатов, полученных с датчиков, были выявлены следующие проблемы: в ходе испытаний информация о гидрофизических свойствах среды была снята с комплексного датчика давления и температуры, у которого канал температуры работал корректно (показания согласуются с реальными), а канал определения давления некорректно, предположительно по механической причине. Также на данный момент не была проведена калибровка датчиков, поэтому данные еще требуют дополнительной обработки. Следует заметить, что сбой в работе датчика никак не сказался на выполнении устройством цикла, так как его параметры задавались оператором вручную. Данные о температуре, собранные с прототипа представлены на рисунке 41.

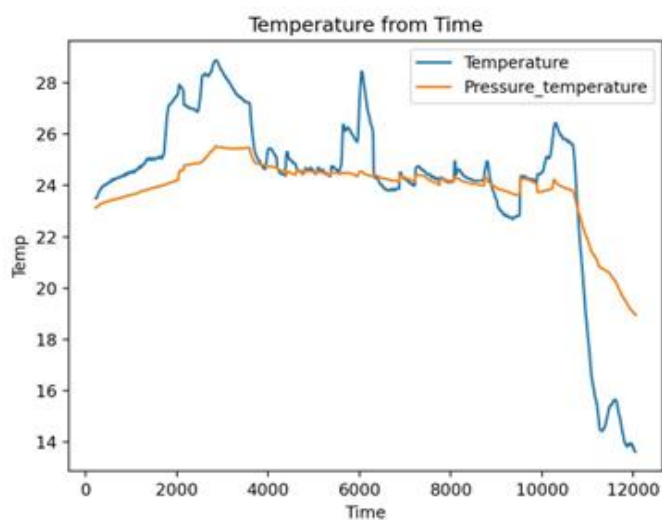


Рисунок 41— Данные о температуре, собранные с прототипа

По результатам проведенных испытаний были успешно выполнены следующие задачи:

- успешная герметизация устройства;

- определение необходимой массы навески в соответствии с поставленными задачами;
- проверка работы MQTT-сервера;
- успешная отправка данных с датчиков в GOOGLE SHEETS;
- проверка корректности работы СИПа.

Также были выявлены следующие проблемы:

- проблемы с работой датчика давления (i2c);
- нехватка заряда АКБ для продолжительной работы, сильное влияние внешних факторов. Выявлена необходимость разработать систему контроля заряда аккумуляторной батареи и систему экстренного всплытия.

Подводя итоги, были проведены натурные испытания для тестирования конструкции и программного кода разрабатываемого устройства, в результате которых были выявлены сильные и слабые стороны первого прототипа. Основываясь на полученном опыте, будут определены пути дальнейшего развития проекта. Так при разработке второго прототипа, наравне с общей модернизацией устройства, особое внимание будет уделено проблемам, которые возникли при первом запуске зонда.

Вторые натурные испытания прошли в бассейне на базе учебно-методического отдела ГКУ ДПО «УМЦ ГО и ЧС» (см. рис. 42).



Рисунок 42— Испытания в МЧС

В ходе отработки цикла устройство снимало показатели с датчиков, представленные на рисунке 43. На момент проведения данных испытаний измерительные приборы также не были откалиброваны.

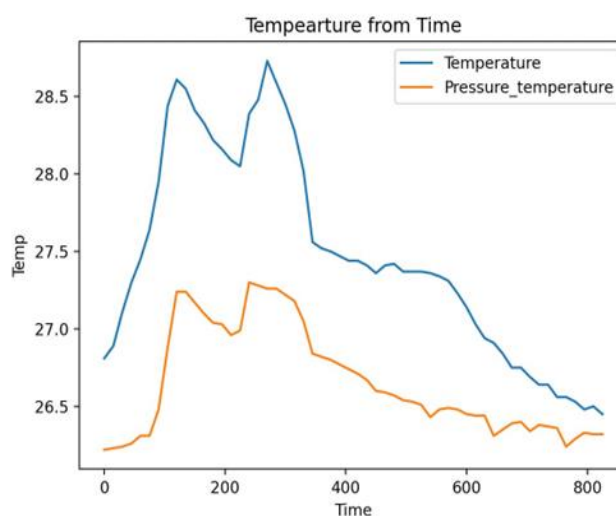


Рисунок 43— Данные о температуре, собранные с датчиков

Результатом проведения испытаний стало предоставление учебно-методическим отделом рецензии на разработанное устройство.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы над проектом были выполнены следующие задачи:

- проведен анализ современного уровня развития отечественных и зарубежных систем оперативной океанологии;
- на основе технического задания разработан концепт устройства;
- проведено моделирование прочностных и гидродинамических параметров изделия;
- разработан и собран прототип аппарата;
- проведены полунатурные и натурные испытания.

Таким образом, цель проектной работы — исследование и разработка автономного гидрофизического зонда как перспективного средства оперативной океанологии была достигнута.

В результате работы был проведен обзор современного уровня развития зарубежных и отечественных систем мониторинга акваторий, рассмотрены их состав, функции, проанализированы их достоинства и недостатки при решении задач оперативной океанологии.

При проведении гидродинамического и прочностного расчетов были получены следующие данные:

- предельная глубина работы зонда  $h = 17$  м;
- толщина сферической части корпуса  $t_2 = 2,1$  мм;
- наилучшим гидродинамическим характеристикам соответствуют сферическая нижняя и конусообразная верхняя крышки.



В результате работы над проектом был спроектирован автономный профилирующий зонд, выполняющий функции сбора и передачи информации о гидрофизическом состоянии акваторий.

Были проведены стендовые и полигонные испытания, результаты которых подтвердили соответствие устройства техническому заданию.

Материалы по проекту(фото- и видеоматериалы, 3D-модели и так далее) представлены в Приложении В.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Миссия Argo // Международная программа по сбору океанологических данных Argo. URL: <https://argo.ucsd.edu/> (дата обращения: 12.05.2023).
2. SMAP (Soil Moisture Active Passive) Maps: RSS (Really Simple Syndication) Salinity // NASA Salinity. URL: <https://salinity.oceansciences.org/smap-salinity.htm> (дата обращения: 03.01.2024).
3. Коротаев Г.К. Оперативная океанография – новая ветвь современной океанологической науки / Г.К. Коротаев // Вестник российской академии наук. – Севастополь: МГИ РАН. – 2018. – Т. 88. – №7. – С. 579-588. DOI: 10.31857/S086958730000081-7
4. Коваленко В.В. Методические основы построения систем оперативной океанографии в приложении к задачам подводного наблюдения / В.В. Коваленко, А.А. Родионов, Р.Е. Ванкевич // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. – 2021. – Т. 14, № 3. – С. 4-19. DOI: 10.7868/S2073667321030011
5. Донные геофизические обсерватории: методы конструирования и области применения/ П. Башилов [и др.]. – Научное приборостроение. – 2008. – С. 86-91.
6. Использование морской робототехники в задачах оперативной океанографии: отечественный и зарубежный опыт / В.Ю. Занин, А.М. Маевский, И.В. Кожемякин // Морские информационно-управляющие системы. – СПб. – 2020. – №1 (17). – С. 94-102.
7. GLIDERS // Coriolis : In situ data for operational oceanography. URL:<https://www.coriolis.eu.org/Observing-the-Ocean/GLIDERS> (дата обращения: 16.05.2023)

8. Observing system monitoring center // PMEL Dash Portal.  
URL:[https://viz.pmel.noaa.gov/osmc/?color\\_by=platform\\_type](https://viz.pmel.noaa.gov/osmc/?color_by=platform_type) (дата обращения: 15.06.2023)
9. Егоров В.И. Подводные буксируемые системы / В.И. Егоров. – Л.: Судостроение, 1981. – 304 с.
10. Труды ЦАГИ им. Н.Е. Жуковского, выпуск 1413. Аэродинамические характеристики острых и притупленных конусов при дозвуковых и сверхзвуковых скоростях / В.Г. Артонкин, П.Г. Леутин, К.П. Петров и др. – Москва: Изд. ЦАГИ, 1972. – 93 с.
11. Самоходные необитаемые подводные аппараты / Под общ. Ред. И.Б. Иконникова, Л.: Судостроение, 1986. – 264 с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

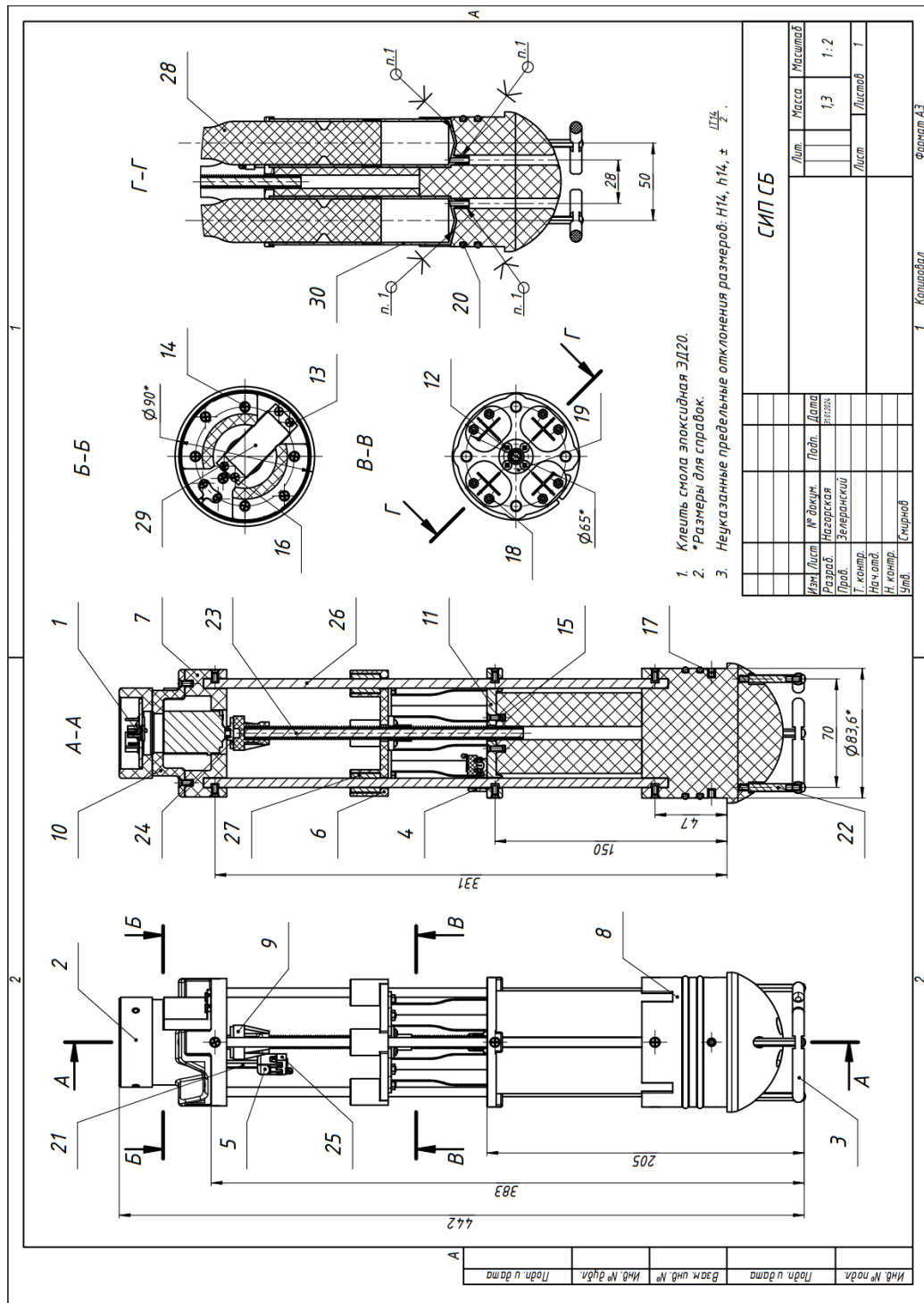
### Расчет себестоимости устройства

Название компонента	Количество, шт	Цена, руб.
<b>Система изменения плавучести (СИП)</b>		
Направляющие валы	4	600
Трапецеидальный винт и гайка	1	370
Шприцы медицинские	4	30
Диск для сервопривода 25T	1	50
Механические концевые датчики	2	140
Линейные подшипники	4	410
Сервопривод	1	480
<b>АКБ</b>		
Стойки	3	295
Термоусадка (диаметр окружности – 80мм)	1	250
BMS-плата	1	68

Литий-ионные аккумуляторы 18650	12	250
Комплект разъемов XT30 (мама-папа)	2	150
<b>Система управления</b>		
ESP-32 Wroom 30 PINS	1	300
Преобразователи напряжения LM2596	2	60
Резисторы 4.7 кОм	3	4
Стабилизаторы напряжения 3.3В AMS1117	2	350
<b>Система датчиков</b>		
Датчик PH	1	3800
Датчик мутности	1	1600
Датчик температуры	1	330
Датчик давления	1	4100

TDS/EC-метр	1	1500
<b>Стыковка отсеков</b>		
Труба акриловая	1	1800
Кольца резиновые уплотнительные 078-084-36	4	130
<b>Винты, гайки и втулки</b>		
Винты М3	100	10
Гайки М3	14	15
Втулки вплавляемые М3	54	10
<b>ИТОГО:</b>		26375

## Сборочный чертеж системы изменения плавучести



# Спецификация

[illegible]



## Спецификация

Формат	Зона	Поз.	Обозначение	Наименование	Кол.	Примечание
				<u>Документация</u>		
А3			СИП СБ	Сборочный чертеж		
				<u>Сборочные единицы</u>		
		1		Макетная плата (Разъемы мама)	1	
				<u>Детали</u>		
А3		2		Замок верхний	1	
А3		3		Кольцо	2	
А3		4		Крепление для концевика 1	1	
А3		5		Крепление для концевика 2	1	
А3		6		Кронштейн поршни СИП	1	
А3		7		Кронштейн сервопривод СИП	1	
А2		8		Кронштейн шприцы СИП	1	
А3		9		Муфта	1	
А3		10		Переходник СИП	1	
А3		11		Фиксатор СИП	1	
				<u>Стандартные изделия</u>		
		12		Винт М3х6 ГОСТ 17473-80	11	
		13		Винт М3х6 ГОСТ 17475-80	4	
		14		Винт М3х8 ГОСТ 17475-80	22	
		15		Винт М3х10 ГОСТ 17475-80	15	
Подп. и дата		СИП СБ				
Инв. № дубл.		Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата
		Разраб.	Нагорская			27.01
Взам. инв. №		Пров.	Зелеранский			
		Нач. отд.				
Подп. и дата		Н.контр				
		Утв.	Смирнов			
Инв. № подл.						Литера
						Лист
						Листов
						1
						2

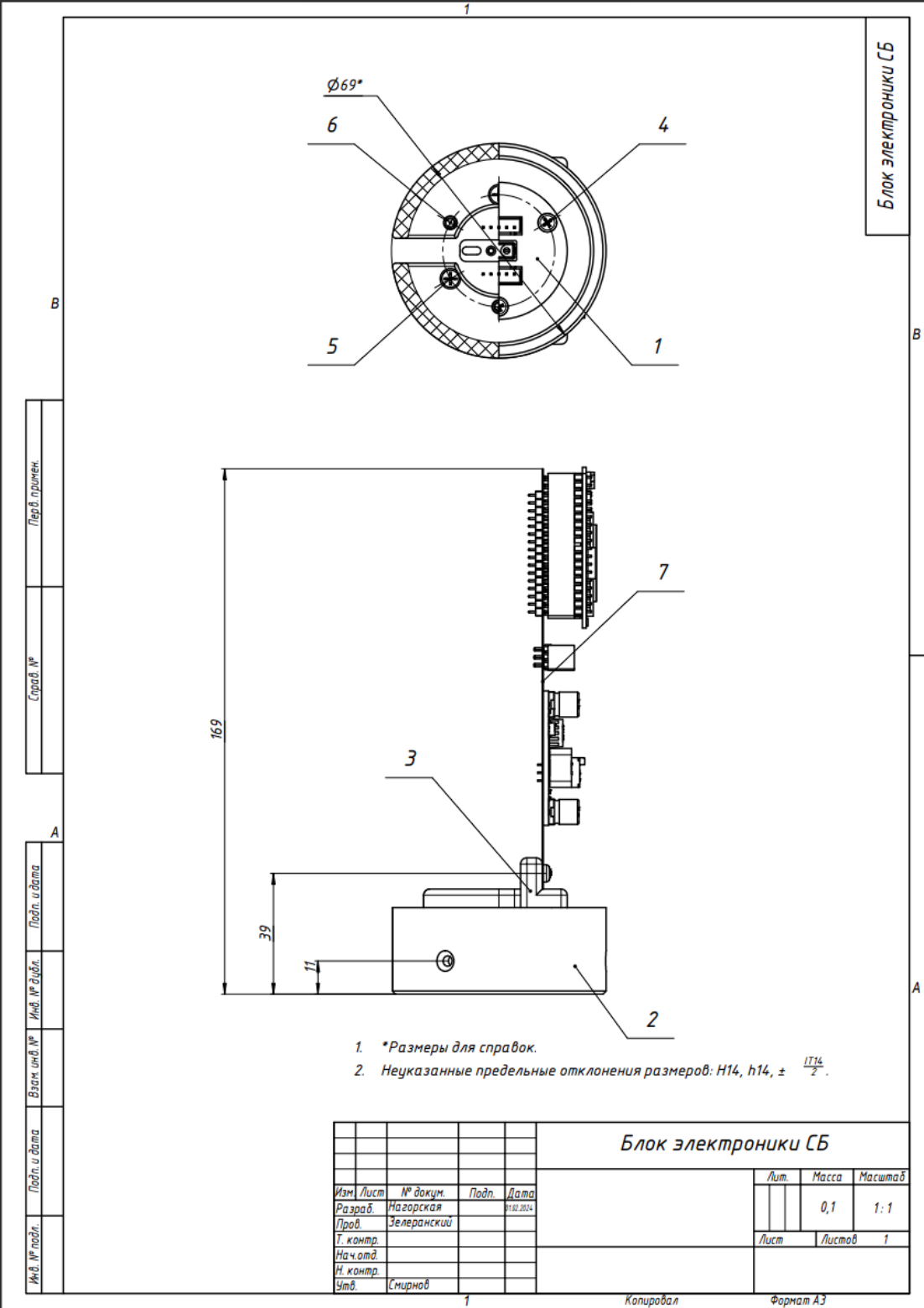
## 66



# Спецификация

[illegible]

Сборочный чертеж блока электроники



# Спецификация

[illegible]

## 70



# Спецификация

[illegible]

## Чертежи деталей

Для ознакомления с чертежами деталей можно перейти по QR-коду.





## **ПРИЛОЖЕНИЕ В**

### **Материалы проекта**

Для ознакомления с фото- и видеоматериалами, программным кодом, 3D-моделями устройства и электрическими схемами можно перейти по QR-коду.

