

**ОТЧЕТ ПО ПРОЕКТУ РНФ №22-69-00231 «ПРИНЦИПЫ
ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ БЕСПРОВОДНЫХ НОДАЛЬНЫХ
СЕЙСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПОД УПРАВЛЕНИЕМ
ГРУППЫ БЕСПИЛОТНЫХ ВОЗДУШНЫХ СРЕДСТВ
НА ТРУДНОДОСТУПНЫХ ТЕРРИТОРИЯХ СО СЛОЖНЫМ
РЕЛЬЕФОМ МЕСТНОСТИ» ЗА 2025 Г.**

1. РАЗРАБОТКА ЦИКЛОГРАММ И ПРОТОТИПА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ РАЗВЕДКИ МЕСТНОСТИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТОЧЕК УСТАНОВКИ СЕЙСМИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ, ДОСТАВКИ СЕЙСМИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ НА ТОЧКИ УСТАНОВКИ, ОБЕСПЕЧЕНИЯ СЪЕМА ДАННЫХ С СЕЙСМИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ, ДОСТАВКИ СЕЙСМИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ ДЛЯ ВОЗВРАТА УСТАНОВЛЕННЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ

В рамках проекта в 2025 году разработан и реализован комплекс полётных циклограмм, обеспечивающих сквозной технологический процесс автоматизированного сейсмического мониторинга с использованием группы БВС.

Циклограммы охватывают все ключевые этапы полевой апробации разработанных решений: от первичного обследования территории и определения оптимальных точек размещения сейсмодатчиков до их доставки, перестановки, последующего сбора сейсмических данных и возврата БВС на стартовую площадку. Структура циклограмм построена на принципах модульности, воспроизводимости и автономности, что позволяет осуществлять сложные многоэтапные миссии в условиях ограниченной радиовидимости и неоднородного рельефа без постоянного вмешательства оператора.

В данном разделе приводится расширенное описание каждой из основных циклограмм проекта: «Предварительная разведка», «Доставка, перестановка и возврат сейсмических модулей» и «Съём данных с сейсмических модулей», включая их функциональное назначение, последовательность операций, задействованные программно-аппаратные компоненты и показатели работоспособности при полевых апробациях. Визуализация разработанных циклограмм представлена на рисунках 1.1–1.3.

Операция					
Составление полетной миссии сканирования	ПО Наземной Станции				
Загрузка миссии на БВС		ПО Наземной Станции			
		ПО БВС			
Выполнение миссии и сбор данных			ПО Наземной Станции		
			ПО БВС		
			ПО Сбору Данных		
Обработка данных на земле				ПО Обработки Данных	
Определение подходящих точек установки сенсоров					ПО Определения Точек Установки Сенсоров

Рисунок 1.1 – Циклограмма этапа «Предварительная разведка»

Операция					
Составление полетной миссии для каждого БВС	ПО Наземной Станции ПО Определения Точек Установки Сенсоров				
Построение бесколлизонных траекторий		ПО построения траекторий			
		ПО Наземной Станции			
Подключение к каждому БВС			ПО Наземной Станции ПО БВС		
Загрузка миссии на каждый БВС				ПО Наземной станции ПО БВС	
Запуск миссии одновременно для всех БВС				ПО Наземной Станции ПО БВС	
Выполнение миссии каждым БВС					ПО Наземной Станции ПО БВС

Рисунок 1.2 – Циклограмма этапа «Доставка, перестановка и возврат сейсмических модулей»

Операция				
Составление полетной миссии сбора данных с сенсоров	ПО Наземной Станции ПО Сбору Данных с Сенсоров ПО БВС сборщика данных			
Загрузка миссии на БВС		ПО Наземной Станции ПО БВС сборщика данных		
Выполнение миссии и сбор данных с сенсоров			ПО Наземной Станции ПО Сбору Данных с Сенсоров ПО Сенсоров ПО БВС сборщика данных	
Обработка полученных с сенсоров данных				ПО Обработки Данных с Сенсоров

Рисунок 1.3 – Циклограмма этапа «Съем данных с сейсмических модулей»

1.1. Описание циклограммы «Предварительная разведка»

Циклограмма «Предварительная разведка» (рис. 1.1) представляет собой первый этап сквозного технологического процесса проекта и направлена на формирование информации о разведке местности для последующего размещения сейсмических сенсоров. В рамках данной циклограммы задействованы следующие программные компоненты (акторы):

- 1) Программное обеспечение наземной станции (ПО НС): предназначено для построения, загрузки и мониторинга полётного задания БВС оператором, а также отслеживания корректности его выполнения.
- 2) Бортовое программное обеспечение БВС (ПО БВС): развернуто на борту аппарата и отвечает за корректное выполнение миссии.
- 3) Модуль сбора данных с лидарной системы (ПО СЛД): развернуто на борту аппарата и производит сбор данных с лидара данного БВС.
- 4) Программный комплекс обработки полученных с БВС сейсмических данных (ПО ОД).
- 5) Подсистема определения точек установки сейсмических модулей (ПО ОТУС): отвечает за определение допустимых зон установки сейсмодатчиков.

Процесс начинается с формирования полётного задания БВС в программной среде наземной станции. Оператор задаёт полигональную зону сканирования, указывает высоту полёта, требуемую степень горизонтального и вертикального перекрытия снимков, скорость движения аппарата и параметры бортовой камеры. На основе этих данных ПО НС автоматически генерирует оптимальную сканирующую траекторию, рассчитывает скорости движения БВС и частоту срабатывания фотокамеры. Дополнительно в начальной точке сканирующего маршрута формируется триггерный сигнал, предназначенный для инициации сбора лидарных данных, что обеспечивает синхронизацию двух потоков сенсорной информации.

Описанная последовательность составления полетной миссии сканирования представлена на рисунке 1.4.

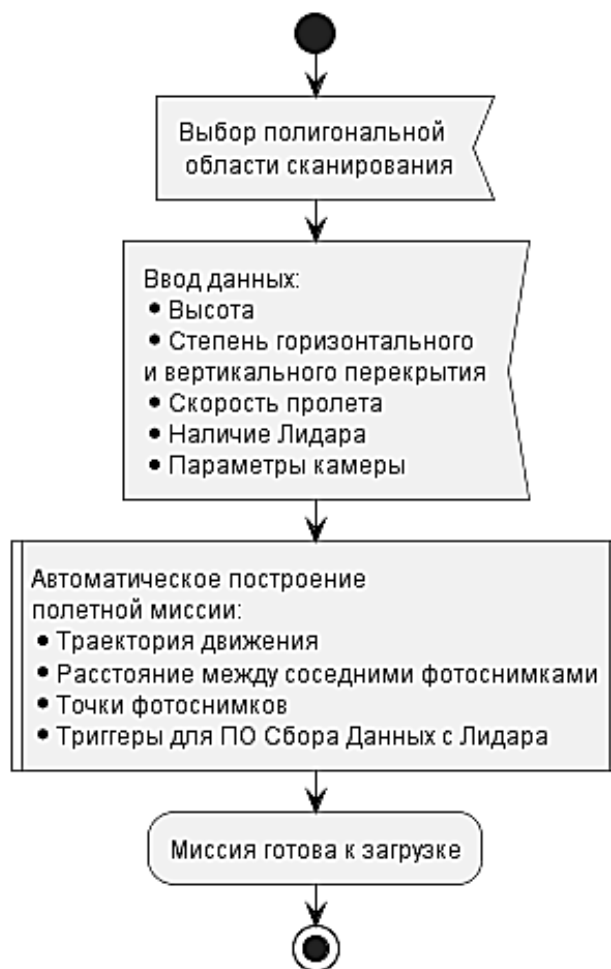


Рисунок 1.4 – Этапы составления полетной миссии сканирования

На рисунке 1.5 представлена последовательность загрузки миссии на БВС, которая осуществляется пошагово: для каждой из N путевых точек выполняется передача с обязательным подтверждением приёма, что гарантирует целостность и корректность загруженного плана.

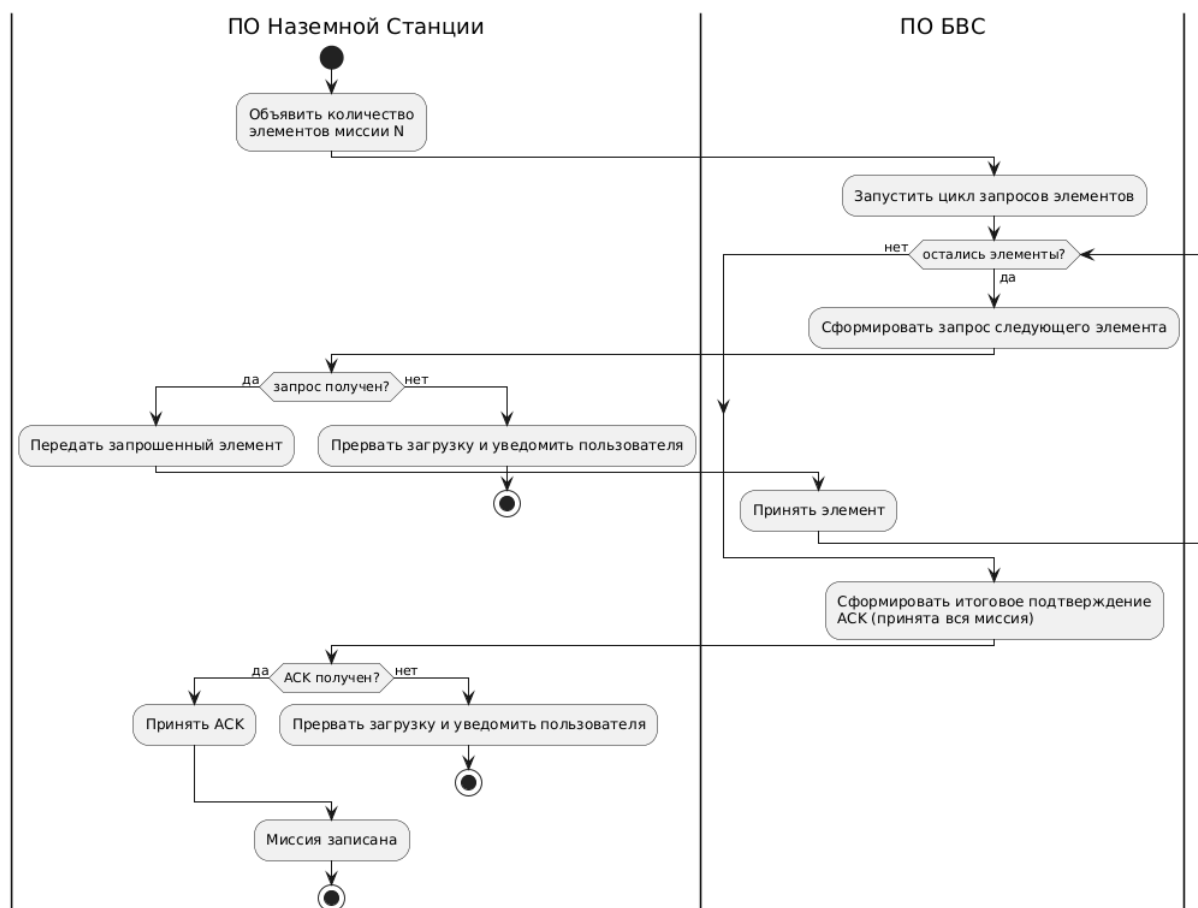


Рисунок 1.5 – Процесс загрузки сформированной миссии на БВС

После начала выполнения миссии со стороны наземной станции БВС осуществляет взлёт, следование по прямолинейному участку к началу сканирующей траектории и в расчётной точке одновременно запускает процессы фотографирования местности и сбора данных с лидарной системы. В ходе пролёта обеспечивается соблюдение заданных параметров перекрытия снимков, а в финальной точке сканирования оба процесса корректно завершаются. На протяжении всего полёта ПО НС обеспечивает непрерывный мониторинг состояния оборудования и прогресса выполнения миссии. Алгоритм выполнения рассматриваемой полетной миссии показан на рисунке 1.6.

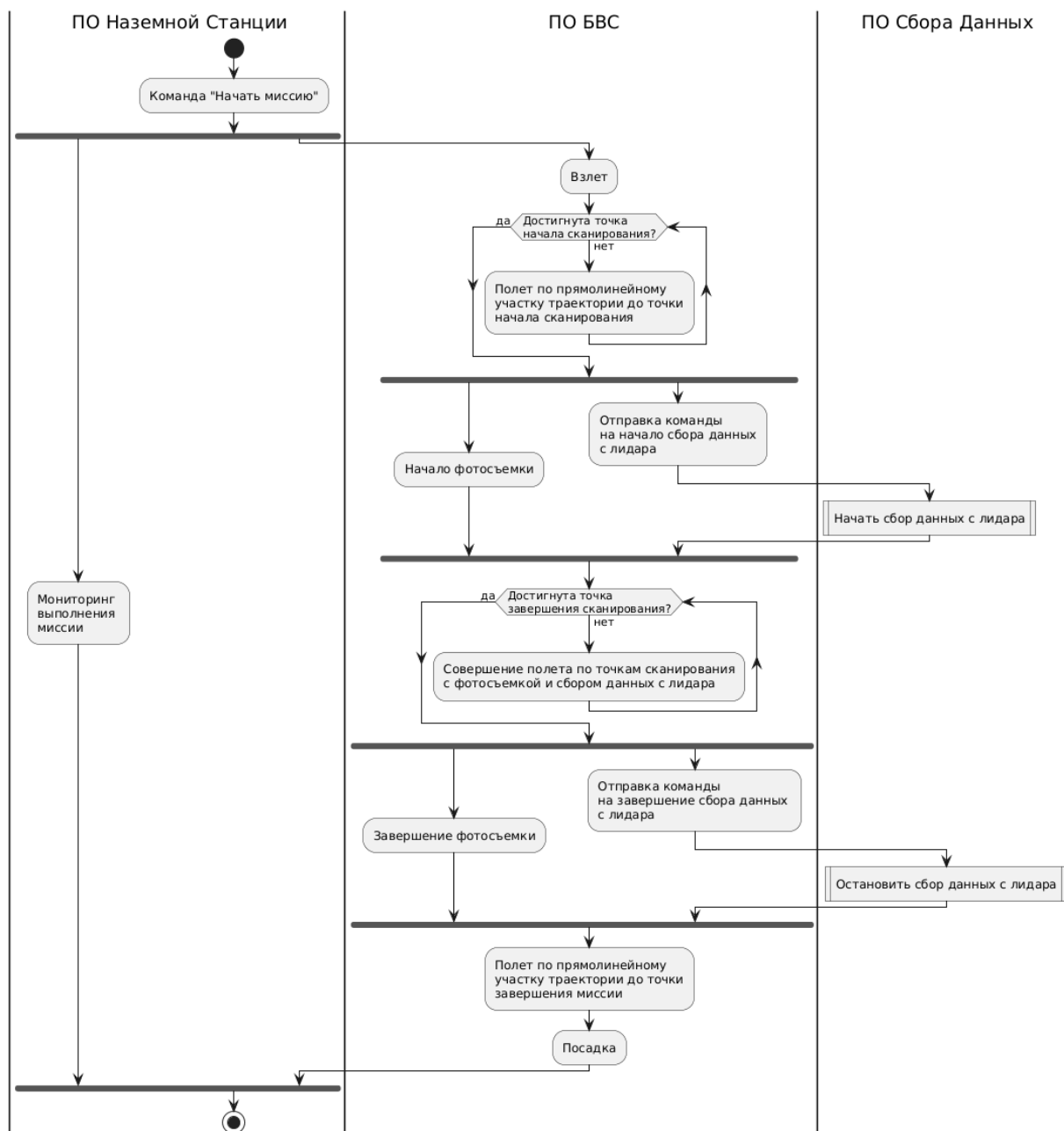


Рисунок 1.6 – Процесс выполнения полетной миссии сканирования

По завершении полёта осуществляется наземная обработка полученных данных в рамках автоматизированного процесса (рис. 1.7) – с БВС запускается последовательная загрузка аэрофотоснимков и лидарных данных.

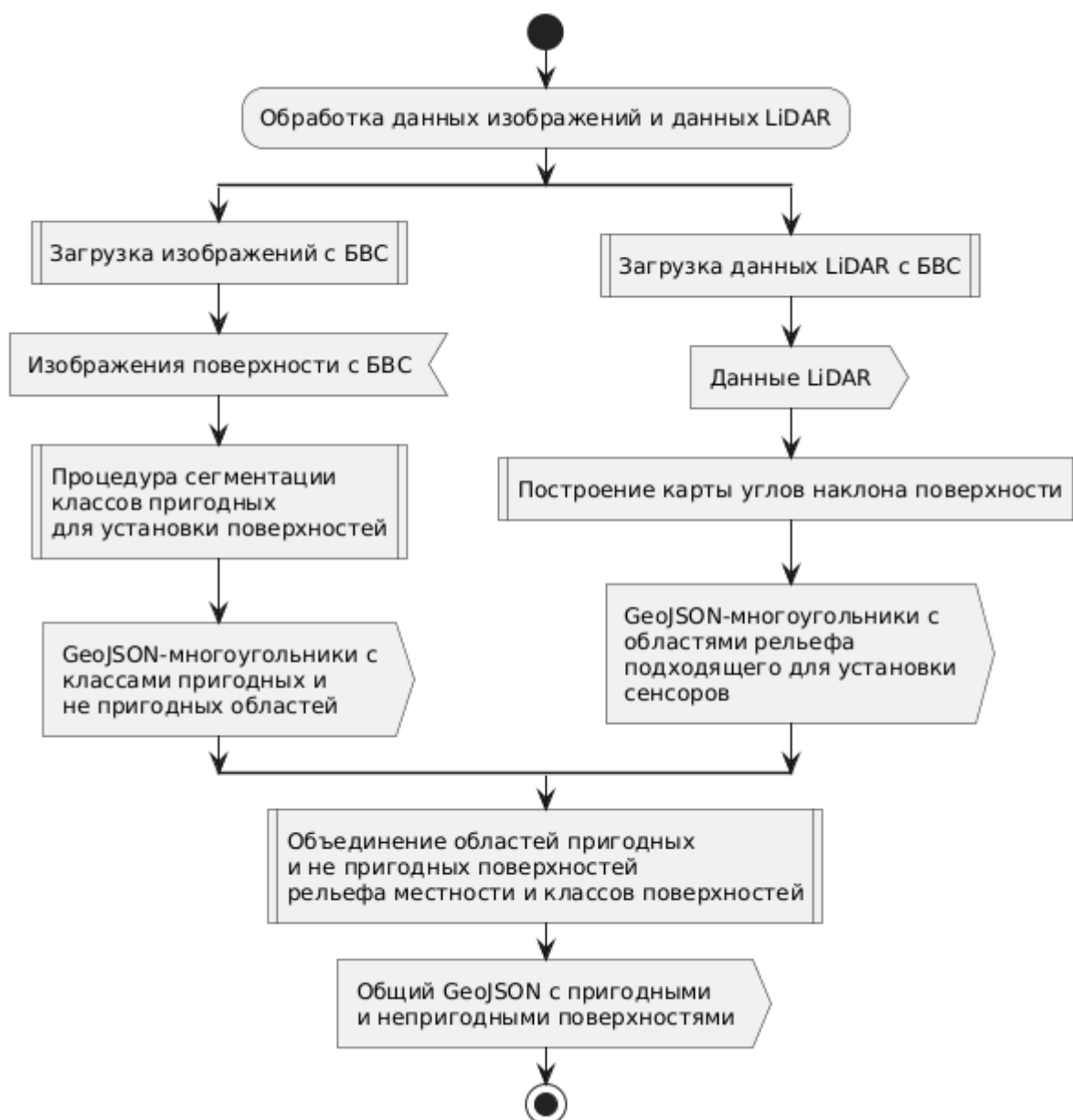


Рисунок 1.7 – Процесс обработки данных изображений и LiDAR

Модуль семантической сегментации на основе глубокой нейронной сети классифицирует каждый пиксель изображений на категории пригодных и непригодных для установки сенсоров поверхностей, таких как открытая почва, растительность, водные объекты, искусственные сооружения и лесные массивы. Полученные сегментационные маски проходят процесс геопривязки с использованием метаданных о положении и ориентации БВС в момент съёмки, после чего преобразуются в векторное представление в формате GeoJSON (рис. 1.8).



Рисунок 1.8 – Процесс работы модуля семантической сегментации на основе глубокой нейронной сети

Параллельно на основе лидарных данных строится цифровая модель рельефа, по которой вычисляется карта углов наклона поверхности. Области с уклонами, превышающими допустимый порог, исключаются из рассмотрения посредством бинарной фильтрации, оставшиеся – также векторизуются в формате GeoJSON с геопривязкой.



Рисунок 9 – Процесс вычисления карты углов наклона поверхности

На заключительном этапе происходит пространственное пересечение обоих векторных слоёв: слоя пригодных поверхностей по семантическим признакам и слоя допустимых уклонов по топографическим характеристикам. Результатом является итоговая векторная карта зон, удовлетворяющих совокупности требований: отсутствие растительного или искусственного покрова, минимальная шероховатость, достаточная

несущая способность грунта и уклон в пределах допустимых значений. Эта карта служит основой для последующего выбора финальных координат размещения сейсмических модулей. Такой подход обеспечивает как техническую осуществимость установки, так и надёжность регистрации сейсмических сигналов в ходе последующих экспериментов.

Таким образом, циклограмма «Предварительная разведка» реализует полностью автоматизированный, воспроизводимый и объективный подход к планированию полевых испытаний в условиях сложного рельефа и неоднородного ландшафта.

1.2. Описание циклограммы «Установка, перестановка и возврат сейсмических модулей»

Основным этапом технологического процесса в выполняемом исследовании является циклограмма «Установка, перестановка и возврат сейсмических модулей» (рис. 1.2). Она обеспечивает автономное размещение, последующую перестановку и возврат группы сейсмических модулей с использованием координированной работы нескольких БВС. Реализация предполагает тесную интеграцию следующих акторов: программного обеспечения наземной станции, системы определения точек установки сенсоров, модуля построения бесколлизийных траекторий, бортового программного обеспечения БВС-носителей и программного обеспечения воздушного ретранслятора (БВС-ретранслятора), обеспечивающего устойчивый обмен служебной информацией в условиях ограниченной радиовидимости.

Первым этапом реализации циклограммы является предварительное глобальное планирование, выполняемое оператором в среде ПО наземной станции. На данном этапе не формируются индивидуальные полётные задания, а задаются высокоуровневые параметры групповой миссии. Оператор инициирует создание миссии доставки сейсмодатчиков, указывает количество задействованных БВС-носителей, определяет наличие или отсутствие ретранслятора и получает от системы отображение оптимальных точек установки сейсмических модулей. Указанные точки вычисляются заранее на основе данных предварительной разведки. Оператор распределяет БВС-носители по целевым точкам, задаёт стартовые позиции, а также определяет координаты, высоту и длительность висения для БВС-ретранслятора. Полученная предварительная конфигурация сохраняется как основа для последующего детального планирования.

На рисунке 1.10 показана последовательность выполнения первого этапа рассматриваемой циклограммы.

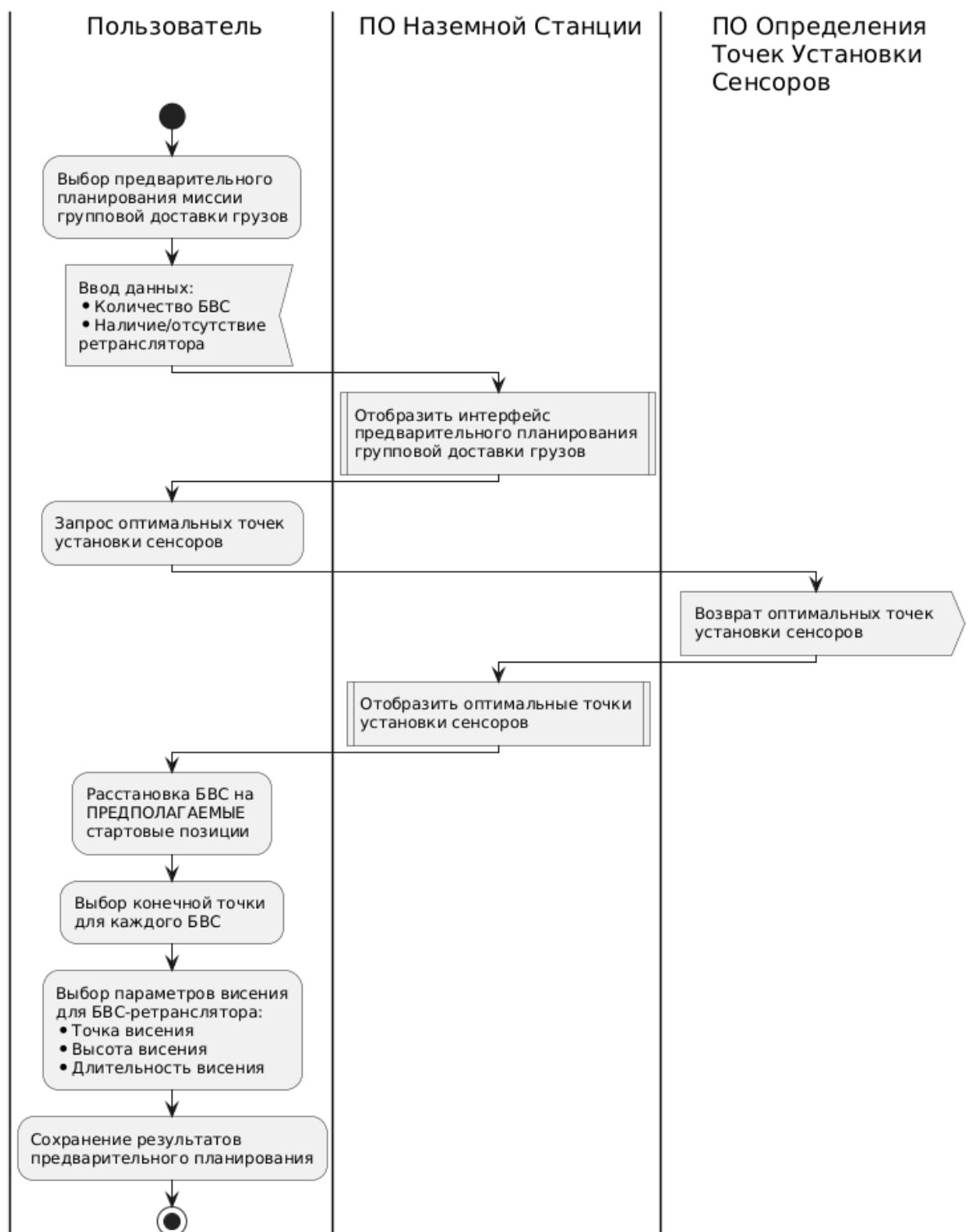


Рисунок 1.10 – Процесс первого этапа реализации циклограммы №2

Перед началом детализации миссии обеспечивается корректное подключение всей группы БВС к наземной станции (рис. 1.11). Данная операция возможна при соблюдении ряда предварительных условий: каждый аппарат должен обладать уникальным и заранее настроенным идентификатором MAVLink SYSTEM_ID и быть зарегистрирован в базе ПО НС как соответствующая модель. Кроме того, программная среда станции должна

однозначно сопоставлять все поступающие телеметрические сообщения конкретному аппарату. После включения аппаратов они начинают передавать Heartbeat-сообщения, по которым ПО наземной станции автоматически идентифицирует и регистрирует каждый БВС, отображая в интерфейсе состояние подключения группы. Необходимо отметить, что ручное управление БВС в данном сценарии не было предусмотрено из соображений безопасности.

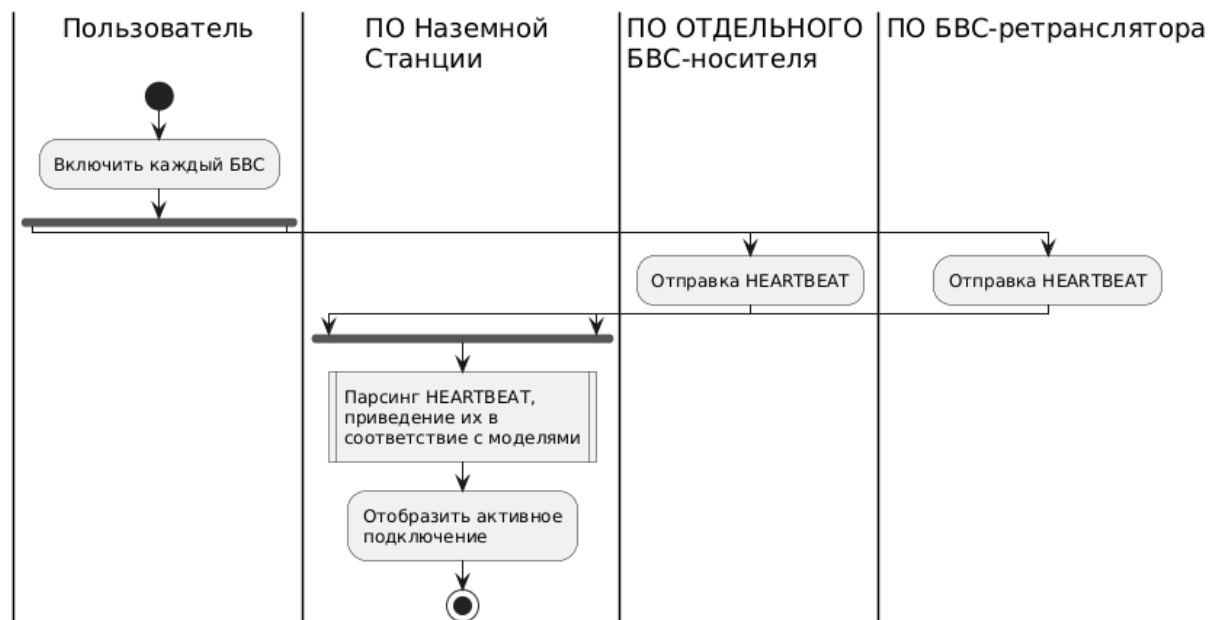


Рисунок 1.11 – Процесс подключения группы БВС к наземной станции

На следующем этапе, процесс которого представлен на рисунке 1.12, оператор переходит к детальному планированию индивидуальных полётных заданий. В интерфейсе группового планирования каждая модель, зарегистрированная в системе, соотносится с конкретным БВС из предварительной конфигурации, включая выделение модели, соответствующей ретранслятору. Система автоматически обновляет координаты стартовых позиций на основе реального положения аппаратов и инициирует модуль построения траекторий. Последний формирует пространственно разнесённые, бесколлизийные маршруты для всех БВС-носителей с учётом их стартовых и целевых позиций, а также геометрии рельефа и зоны работы. Сгенерированные миссии отображаются в интерфейсе, где оператор при необходимости может внести корректировки. В указанном интерфейсе доступно определение специфических действий БВС в конечной точке, таких как активация механизма установки сейсмического модуля. После завершения планирования миссии готовы к загрузке.

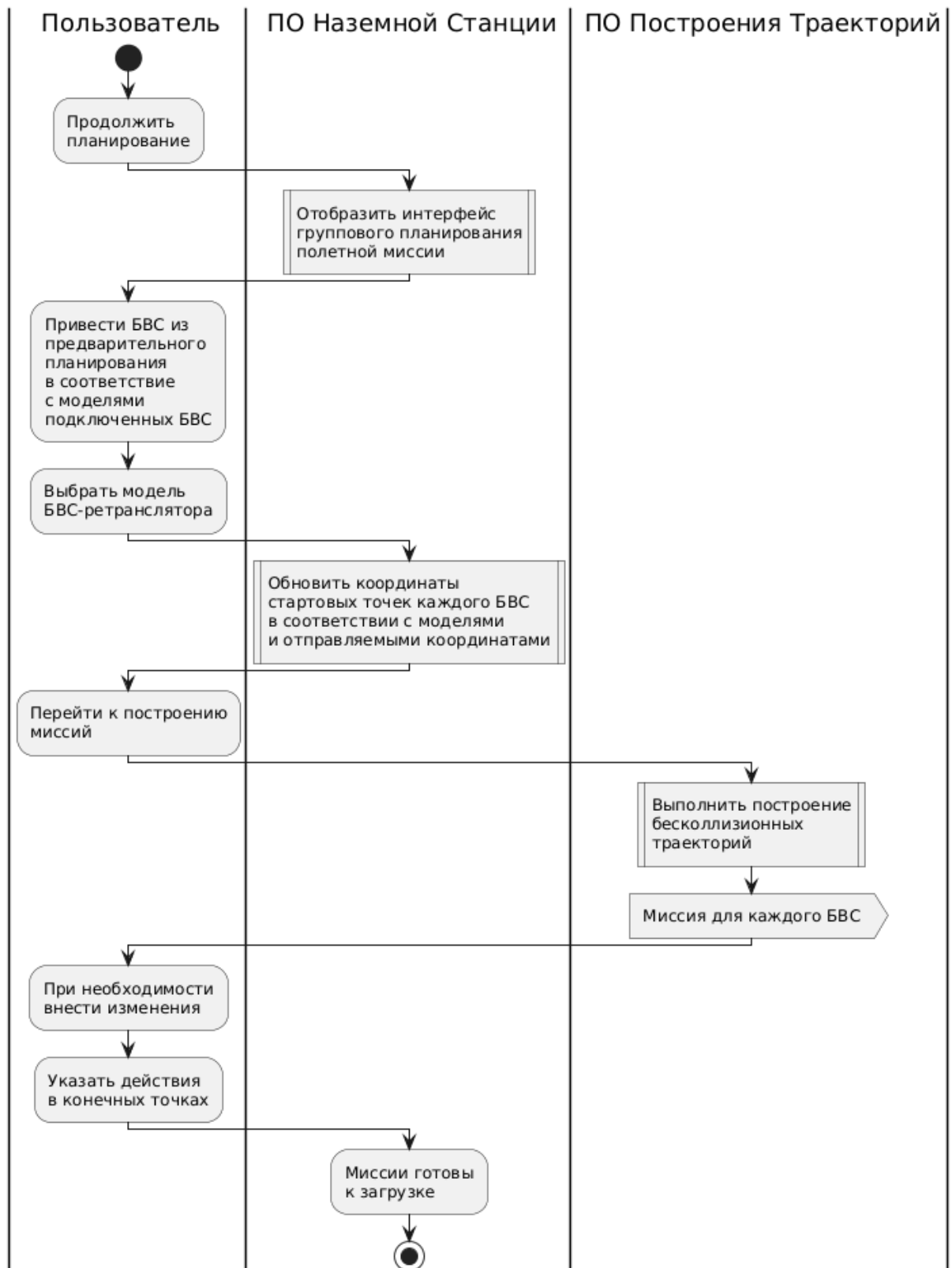


Рисунок 1.12 –Процесс планирования траекторий движения

Загрузка миссий осуществляется последовательно на каждый БВС с подтверждением приёма, обеспечивая целостность передаваемых данных (рис. 1.13).



Рисунок 1.13 – Порядок загрузки миссий на БВС

Перед запуском миссии реализуется этап групповой предполётной подготовки посредством специализированного интерфейса: ПО НС отображает сводный статус готовности всех бортов, и после подтверждения оператором инициируется одновременный запуск миссии для всей группы БВС (рис. 1.14).

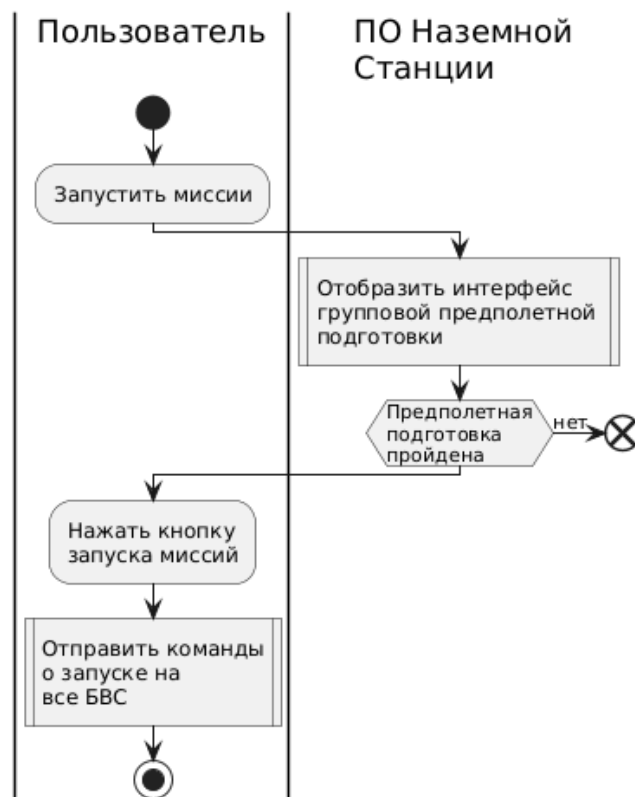


Рисунок 1.14 – Процесс групповой предполётной подготовки БВС

В ходе выполнения миссии ПО НС обеспечивает непрерывный мониторинг состояния всех аппаратов. БВС-ретранслятор выполняет взлёт, перемещение в заданную точку и удержание позиции висения на расчётной высоте в течение всего времени активности группы, обеспечивая стабильный двухканальный обмен данными между наземной станцией и аппаратами-носителями. Каждый БВС-носитель, в свою очередь, осуществляет взлёт со своей стартовой позиции, следует по индивидуальной траектории к целевой точке, выполняет посадку и запускает цикл установки сейсмического модуля. После завершения установки сейсмодатчика соответствующий БВС переходит в режим ожидания. Аналогичная последовательность повторяется при перестановке сейсмических модулей на новые точки и при завершающем этапе возврата всех БВС на стартовую площадку.

На рисунке 1.15 представлен процесс группового функционирования БВС.

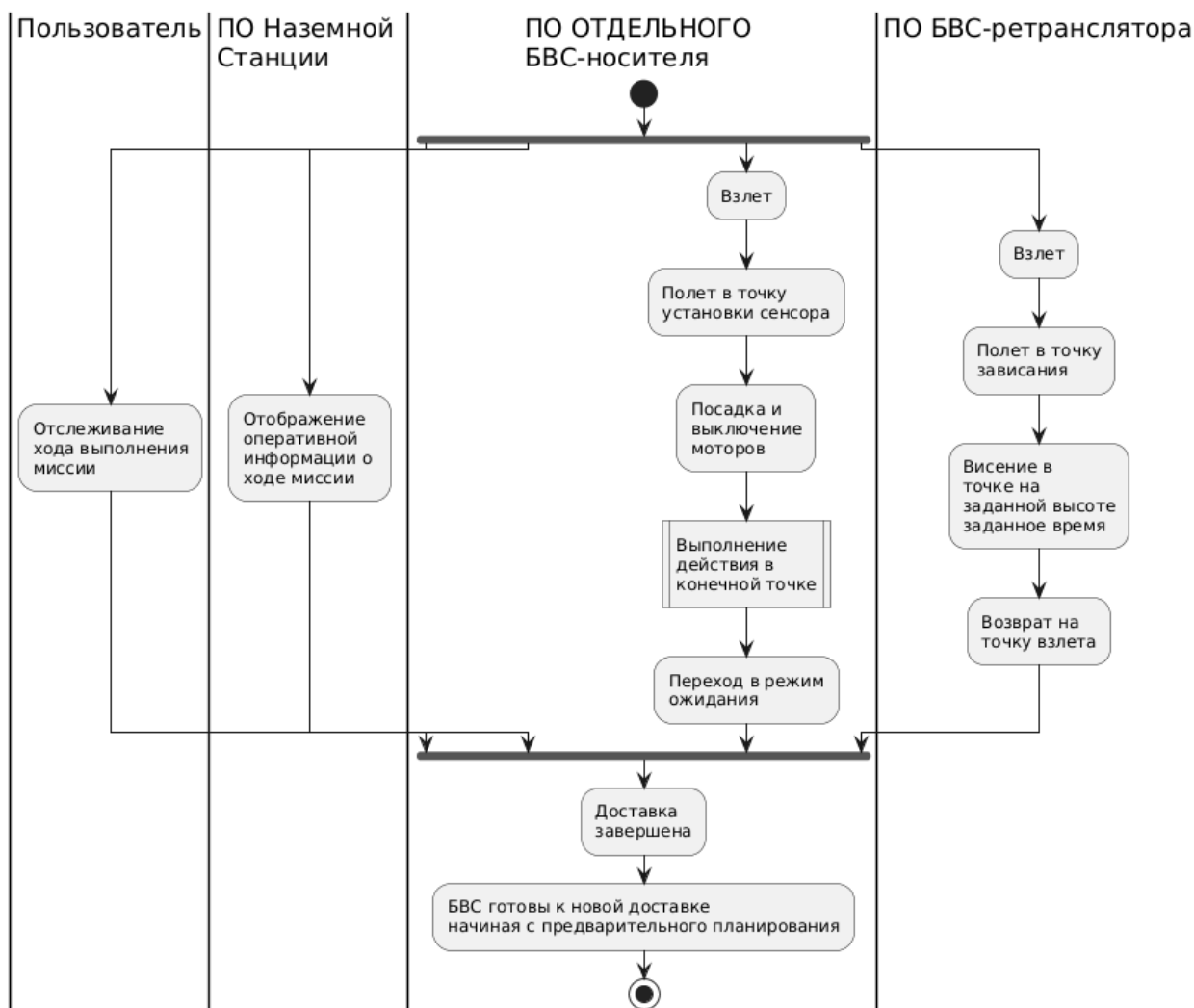


Рисунок 1.15 – Процесс группового функционирования

В рамках представленного описания циклограмма «Установка, перестановка и возврат сейсмических модулей» обеспечивает полностью автоматизированный,

безопасный и координированный процесс размещения сенсоров в сложных условиях местности. Предложенное решение демонстрирует высокую степень автономности, надёжности группового взаимодействия БВС и устойчивости к внешним факторам, включая экранирование радиосигнала.

1.3. Описание циклограммы «Съём данных с сейсмических модулей»

Рассматриваемая циклограмма (рис. 1.3) является завершающим этапом технологического процесса, который направлен на съём зарегистрированных сейсмических данных из размещённых в грунте датчиков посредством специализированного БВС-сборщика. Предлагаемый сценарий предполагает тесную кооперацию ряда программных компонентов и состоит из: программного обеспечения наземной станции, бортового ПО БВС-сборщика, модуля сбора данных с сенсоров, встроенного ПО сейсмических модулей, а также наземного программного комплекса обработки полученных данных.

Корректное функционирование циклограммы возможно исключительно при соблюдении ряда условий. Прежде всего, между программными средами наземной станции, БВС и сбора данных, должна быть реализована сквозная синхронизация по времени, которая обеспечивает согласованность операционных этапов. Кроме того, должны быть определены и протестированы следующие командные интерфейсы:

- 1) Отправка сигнала на начало и окончание сбора данных от бортовой системы к модулю сбора.
- 2) Наличие в полётной миссии специализированного элемента «Начать сбор данных с сенсора N», который может быть реализован через аппаратные интерфейсы (например, GPIO).

Кроме того, модуль сбора данных должен поддерживать идентификацию и адресацию конкретного сейсмического модуля по уникальному идентификатору. Данный ID должен быть известен как на стороне наземной станции (для предоставления оператору возможности выбора целевого сейсмодатчика), так и на борту БВС (для корректной маршрутизации команд). При этом каждый сейсмический модуль должен обеспечивать однозначную идентификацию посредством уникальных параметров беспроводной сети (SSID, MAC-адрес, тип аутентификации и др.).

Первым шагом в представленной циклограмме является формирование полётного задания в интерфейсе ПО наземной станции. Оператор определяет линейную траекторию движения, указывая стартовую и конечную точки, и координаты расположения отдельного сейсмического модуля, подлежащего опросу. Для каждой точки установки сейсмодатчика

задаётся команда, которая инициирует процедуру сбора данных, а также параметры зависания:

- 1) Высота, на которой БВС будет удерживать позицию
- 2) Временной интервал, в течение которого система будет пытаться установить соединение с целевым сенсором.

По истечении заданного времени без успешного подключения БВС-сборщик автоматически переходит к следующему этапу миссии, что обеспечивает устойчивость сценария к возможным сбоям беспроводной связи.



Рисунок 1.16 – Процесс планирования миссии сбора данных

После планирования миссия загружается на БВС-сборщик в соответствии с процедурой, описанной в циклограмме «Предварительная разведка» (рис. 1.1) – для каждой путевой точки осуществляется передача с обязательным подтверждением, гарантируя целостность полётного плана.

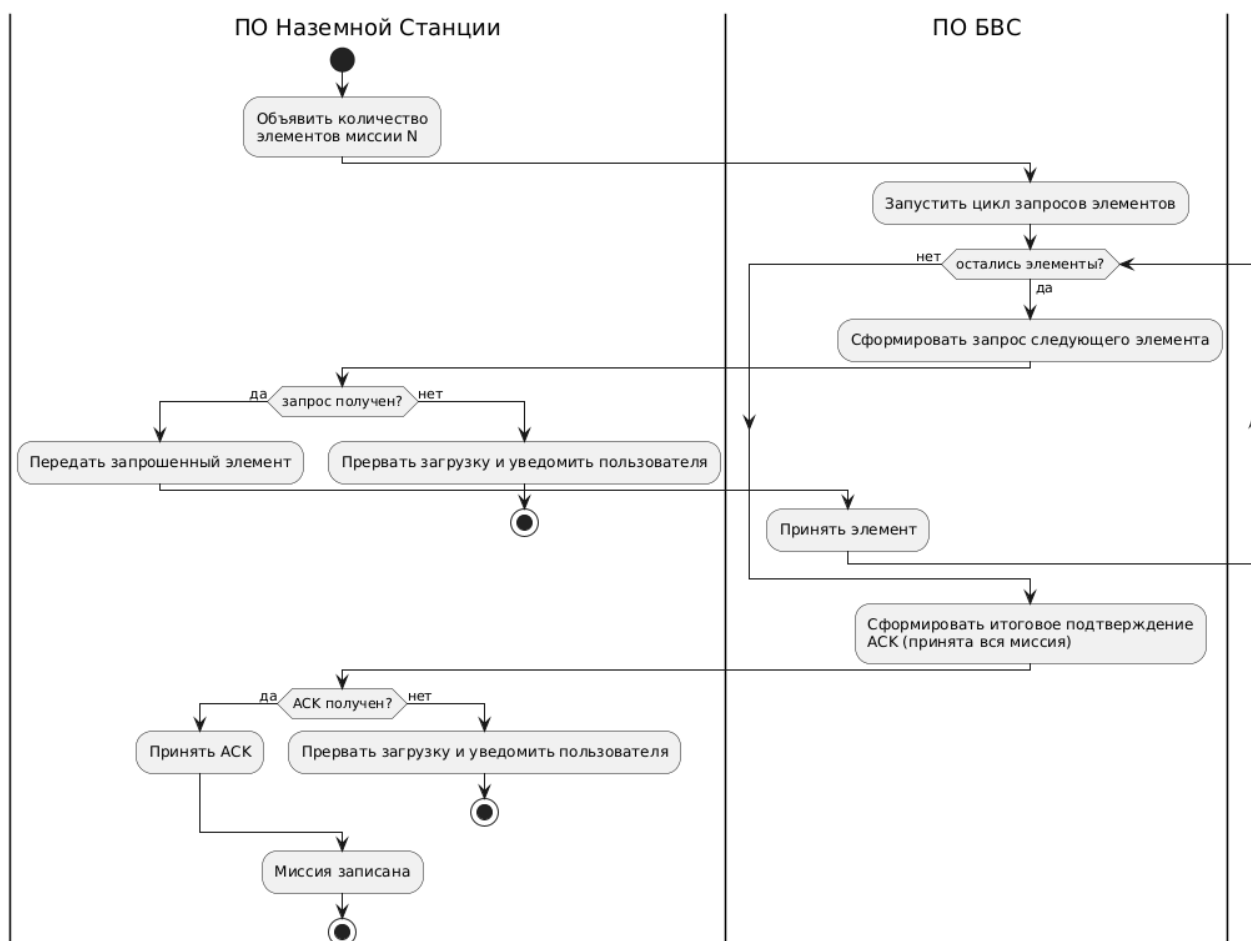


Рисунок 1.17 – Процесс загрузки миссии на БВС-сборщик

На этапе выполнения миссии ПО наземной станции обеспечивает непрерывный мониторинг состояния полёта и обмена данными, ознакомиться с которым оператор может в режиме реального времени. БВС-сборщик данных взлетает и следует к первой точке, где расположен целевой сейсмический модуль. По достижении расчётной позиции бортовая система инициирует команду «Начать сбор данных с сенсора N», в ответ на которую модуль сбора данных активирует процедуру сканирования доступных беспроводных сетей. При обнаружении Wi-Fi сети, соответствующей идентификатору целевого сенсора, устанавливается защищённое соединение. Следующим шагом выполняется обмен данными между ПО сбора данных и сейсмического датчика, то есть извлекается заданный объем информации, например, короткий фрагмент записи или полный файл. По завершении передачи модуль сбора данных отправляет сигнал «Сбор данных окончен» на бортовую систему управления, которая в ответ возобновляет выполнение полётного задания. В результате чего БВС-сборщик перемещается к следующей точке, где повторяет вышеуказанный процесс или завершает миссию в конечной позиции.

Если целевая Wi-Fi сеть не обнаружена в течение заданного временного окна задействуется альтернативный алгоритм действий. В этом случае БВС-сборщик

продолжает миссию без ожидания – перемещается к следующей точке для съема данных, либо завершает миссию в конечной позиции. Такой сценарий предотвращает блокировку выполнения последующих этапов и обеспечивает его общую надёжность.

После завершения полёта полученные данные передаются в представленное ранее ПО их обработки, где выполняется верификация, структурирование и подготовка данных к последующему анализу или архивированию.

На завершающем этапе циклограммы «Съём данных с сейсмических модулей», рассмотренной ранее, реализуется процедура обработки и интерпретации извлечённой информации. Данный процесс происходит на основе программного модуля, который осуществляет конвертацию, структурирование и предварительную валидацию данных без необходимости вмешательства оператора. Рассматриваемый компонент функционирует как закрытая система, на вход которой поступают необработанные массивы сейсмических записей, а на выходе формируются структурированные наборы данных, готовые к последующему анализу и визуализации результатов.

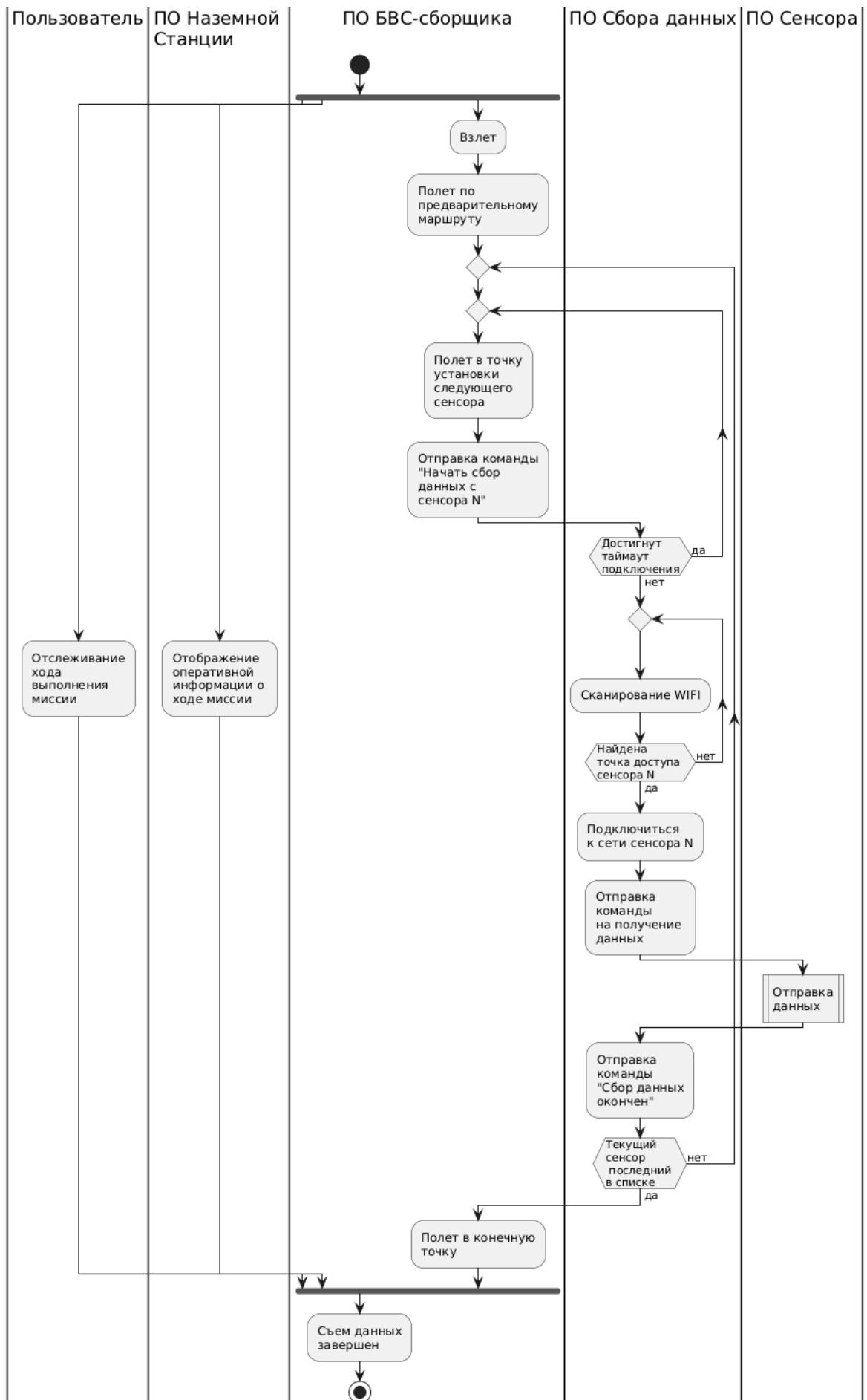


Рисунок 1.18 – Процесс выполнения миссии и съема данных с сейсмодатчиков

2. МОДЕРНИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ СЕЙСМИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ И ДОРАБОТКА ПРОТОТИПОВ ДЛЯ ИНТЕГРАЦИИ С СИСТЕМОЙ УСТАНОВКИ СЕЙСМИЧЕСКОГО МОДУЛЯ В СОСТАВЕ БВС ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА КОНТАКТА С ГРУНТОМ

В ходе выполнения проекта в 2025 году была разработана и реализована новая концепция установки сейсмических датчиков с применением БВС, оснащенных навесным механизмом, обеспечивающим механическое заглубления датчика в грунт посредством углубления щупа-сверла.

В классическом виде сейсмическая коса использует отдельные датчики для обеспечения сейсмических измерений. В предыдущих работах [Крестовников К.Д. Aerial Manipulation System for Automated Installation Seismic Activity Sensors Lecture Notes in Computer Science. - International Conference on Interactive Collaborative Robotics., vol. 14898, pp. 368-380. DOI: 10.1007/978-3-031-71360-6_28] рассматривалась схема, при которой БВС переносит сейсмический датчик, оставляет его в точке измерения, после чего возвращается, захватывает датчик и уносит его на точку базирования. Такой подход требовал манипуляционного захвата, высокой точности посадки и ровной опорной поверхности. В ходе развития проекта концепция была изменена: механизм установки выполнен как постоянный бортовой модуль, жёстко закреплённый на БВС, и обеспечивает механическое заглубление датчика непосредственно при посадке в точку измерения. Такое решение позволило снизить требования к повторным заходам при посадке на датчик и улучшило контакт датчика с грунтом.

2.1 Назначение и принцип работы системы установки сейсмического модуля для повышения качества контакта с грунтом

Полевые эксперименты с опытными образцами цифровых сейсмических модулей, проведенные на предшествующем этапе проекта, показали, что качество данных существенно зависит от условий контакта модуля с грунтом. Если сравнивать сейсмодатчики, установленный и заглубленный в грунт вручную – на достаточно твердом грунте система фиксирует практически идентичные данные. В то же время даже невысокий травяной покров существенно изменяет характер регистрируемых данных, увеличивая или ослабляя сигнал в зависимости от его частоты. Это объясняется тем, что модуль, который опирается на травяной покров, представляет собой колебательную систему, усиливающую колебания на частоте своего резонанса и ослабляющую на частотах выше него.

Рассматриваемая проблематика не является новой для данной области и широко освещена в научно-технических исследованиях. Известно, что получаемое качество

сейсмических данных находится в прямой зависимости от контакта датчика с грунтом [B. Q. Zhang, H. Zhou, G. F. Li, and J. Q. Guo, “Geophone-seabed coupling effect and its correction,” *Appl. Geophys.*, vol. 13, no. 1, pp. 145–155, 2016.]. Применительно к системам, предусматривающим автономную установку сейсмомодуля без участия оператора, отдельные технические решения ранее были представлены в зарубежных исследованиях [C. R. Miller, C. A. Link, and M. A. Speece, “Modified Land Streamer Configuration for Shallow Seismic Data Acquisition,” 16th EEGS Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, Apr 2003, cp-190-00082.][S. K. V. Sudarshan, L. Huang, C. Li, R. Stewart, and A. T. Becker, “Seismic surveying with drone-mounted geophones,” *IEEE Int. Conf. Autom. Sci. Eng.*, vol. 2016-November, pp. 1354–1359, 2016.].

Однако указанные подходы обеспечивают надёжный контакт датчика с грунтом лишь в строго определённых и существенно ограниченных условиях эксплуатации. В связи с этим в рамках рассматриваемого этапа проекта проведена разработка и изготовлены прототипы устройств, реализующих новый принцип установки и фиксации сейсмодатчиков на поверхности грунта. Предложенный метод направлен на расширение диапазона применимости и повышение надёжности сцепления в разнообразных полевых условиях.

На рисунке 2.1 представлен общий вид предлагаемой системы, основанной на вкручивании сейсмодатчика в подстилающую поверхность. Данная система состоит из: двух пластин, направляющих, возвратных пружин, мотор-редуктора, концевого выключателя, сейсмодатчика с винтом и блока электроники.

Пластина 1 выполнена неподвижной и жёстко закреплена на нижней части БВС, к ней крепятся блок электроники 8 и направляющие элементы конструкции 3. Пластина 2 представляет собой подвижную часть конструкции и обеспечивает линейное перемещение вдоль направляющих 7 за счёт применения линейных подшипников 6. Мотор-редуктор 4 закрепляется к подвижной пластине болтами 12. Мотор-редуктор 4 фиксируется на подвижной пластине посредством крепёжных болтов 12 и передаёт крутящий момент через вал на сейсмодатчик 9, который посредством резьбового соединения с винтом 10 вкручивается в грунт, обеспечивая его надёжную фиксацию и контакт с поверхностью. Следует отметить, что в свободном состоянии, а также при перемещении БВС система имеет вид, представленный на рисунке 2.1.

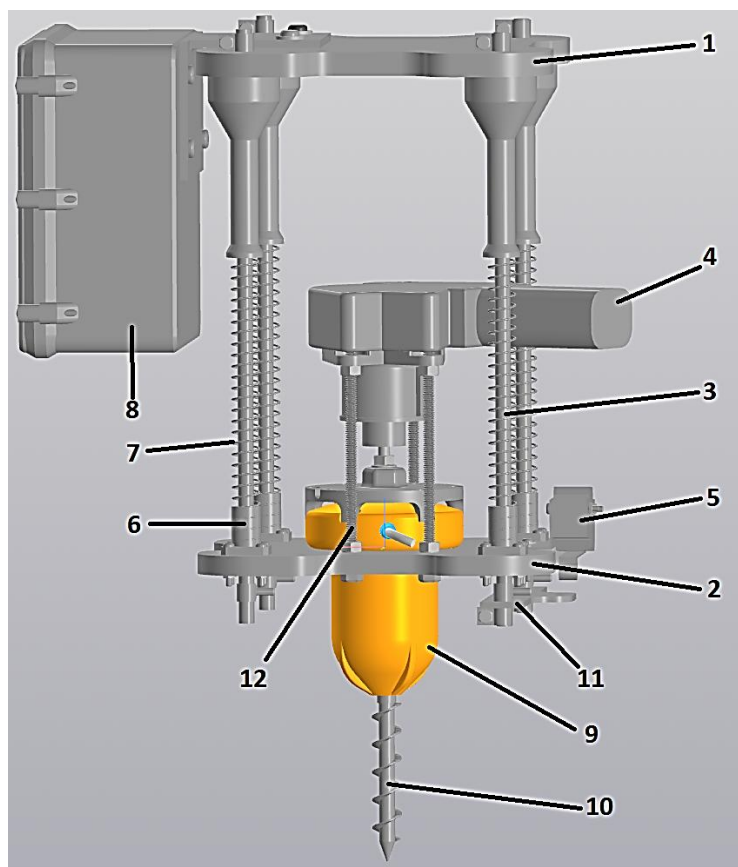


Рисунок 2.1 – Общий вид 3D-модели механизма заглубления датчика

При посадке БВС сейсмодатчик упирается винтом в грунт и смещается вверх совместно с подвижной пластиной до положения, показанного на рисунке 2.2.

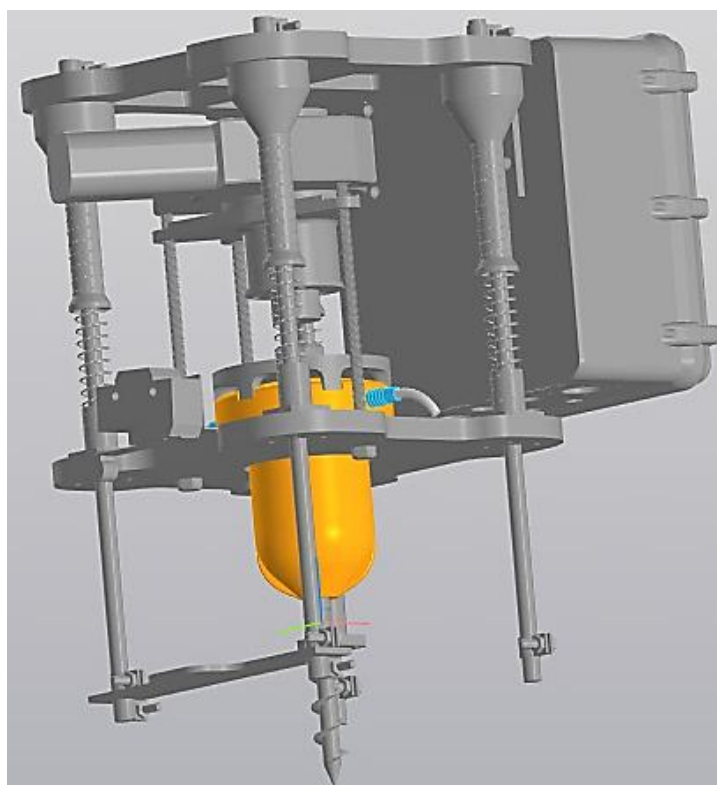


Рисунок 2.2 – Позиционирование системы после посадки БВС

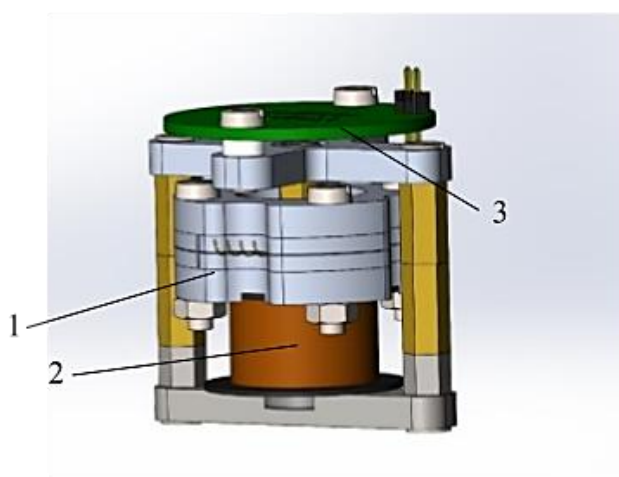
После приземления с БВС поступает управляющий сигнал на «релейную развязку», которая размещена в блоке электроники. В указанный момент на мотор-редуктор подаётся электропитание, инициируя процесс вкручивания сейсмодатчика в грунт. Следует отметить, что возвратные пружины 3 способствуют опусканию подвижной пластины вниз за счёт создания восстанавливающего усилия, обеспечивающего перемещение механизма в рабочее положение.

По мере того, как сейсмодатчик вместе с подвижной пластиной опускаются вниз, происходит размыкание концевого выключателя 5 и, тем самым, прекращается подача управляющего сигнала на «релейную развязку», а также дальнейшее заглубление датчика посредством рассматриваемого механизма.

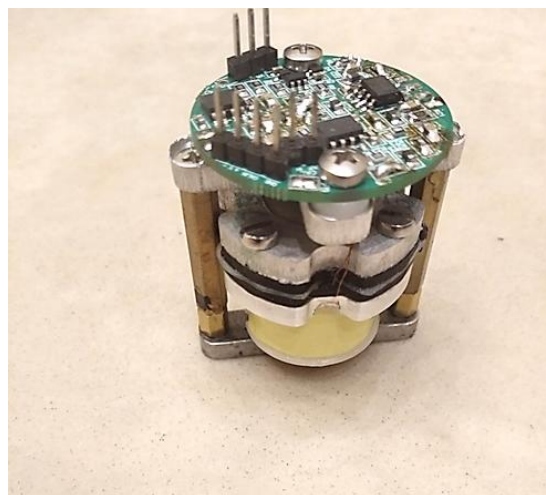
После завершения записи сейсмических данных БВС по второму каналу подает сигнал на «релейную развязку» для выкручивания сейсмомодуля. В зависимости от плотности грунта при выкручивании датчик либо частично извлекается из поверхности, либо осуществляется локальное разрыхление грунта, что обеспечивает условия для беспрепятственного отрыва от подстилающей поверхности и последующего взлёта БВС.

2.2 Реализация и настройка сейсмического датчика

Сборка сейсмического датчика осуществляется в соответствии с компоновкой, представленной на рисунке 2.3. Схематическое устройство датчика изображено на рисунке 2.3 (а), а его реальный внешний вид — на рисунке 2.3 (б). Корпус преобразователя 1 выполняет функцию инерционной массы, что позволяет минимизировать уровень собственного шума и обеспечить широкую полосу регистрируемых частот при малых габаритах и низкой массе устройства. Сейсмодатчик дополнительно оснащён системой обратной связи 2 и электронной платой 2, предназначенной для формирования стандартизированной амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) выходного сигнала.



а)



б)

Рисунок 3 – Опытный образец сейсмического датчика: а) 3D-модель устройства; б) фактический внешний вид

Реализация требуемого частотного отклика электронной платы (рис. 2.3) основана на принципе глубокой отрицательной обратной связи. Данный метод широко применяется в разработке сейсмических приборов и позволяет существенно расширить как рабочий частотный, так и динамический диапазоны измерений [Havskov, J., Alguacil, G. (2016). Seismic Sensors. In: Instrumentation in Earthquake Seismology. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-319-21314-9_2][M.J. Usher, R.F. Burch, C. Guralp, Wide-band feedback seismometers. Physics of the Earth and Planetary Interiors, Volume 18, Issue 2, 1979, Pages 38-50, DOI: 10.1016/0031-9201(79)90130-4.]. Следует отметить, что данный подход ранее успешно использовался в молекулярно-электронных датчиках с платиновыми электродами [C. Xu et al., Temperature compensation of the mems-based electrochemical seismic sensors, Micromachines, vol. 12, no. 4, 2021. DOI: 10.3390/mi12040387][G. Li, J. Wang, D. Chen, J. Chen, L. Chen, and C. Xu, An electrochemical, low-frequency seismic micro-sensor based on MEMS with a force-balanced feedback system, Sensors (Switzerland), vol. 17, no. 9, 2017. DOI: 10.3390/s17092103][J. Lin, H. Gao, X. Wang, C. Yang, Y. Xin, and X. Zhou, Effect of temperature on the performance of electrochemical seismic sensor and the compensation method, Meas. J. Int. Meas. Confed., vol. 155, p. 107518, 2020. DOI: 10.1016/j.measurement.2020.107518][А. Л. Ронжин, В. М. Агафонов, И. В. Горчаков, Я. А. Гордеев, Построение устойчивой обратной связи для молекулярно-электронного датчика с малым демпфированием, Труды МФТИ, vol. 17, no. 2, pp. 141–152, 2025.]. Однако его адаптация для систем с углеродными электродами сопряжена с рядом особенностей, обусловленных геометрическими и конструктивными различиями преобразующего элемента.]

На рисунке 2.4 показана структурная схема контура обратной связи, работа которого реализуется следующим образом:

- 1) Внешнее воздействие поступает на сенсор, сигнал с которого направляется в блок электронной коррекции электроники прямой цепи управляющего контура.
- 2) Выход указанного блока поступает на корректирующую электронику обратной цепи, а также, проходя через фильтры, служит выходным сигналом прибора.
- 3) Сигнал, формируемый электроникой обратной связи, управляет током в катушке, создающей на сенсор воздействие, компенсирующее внешний сигнал.

Фактически, величина требуемого компенсирующего воздействия определяет величину возмущающего сигнала.

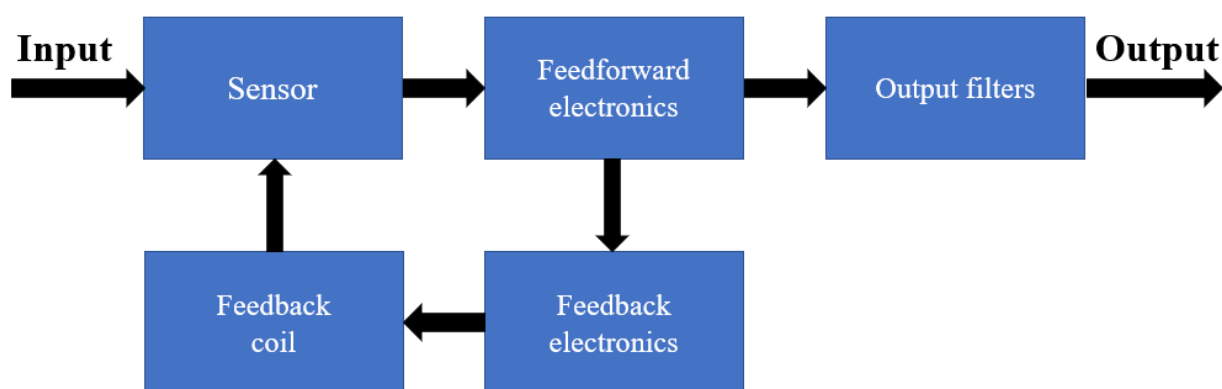


Рисунок 2.4 – Контур обратной связи молекулярно-электронного сейсмического датчика

Передачная характеристика прибора с обратной связью может быть представлена в виде:

$$W_{total} = \frac{W_{sensor}W_{feedforward}W_{outputfilters}}{1+W_{sensor}W_{feedforward}W_{feedback}}, \quad (2.1)$$

где W_{sensor} , $W_{feedforward}$, $W_{feedback}$, $W_{outputfilters}$ соответственно, передаточные характеристики сенсора, корректирующей электроники прямой цепи, электроники обратной цепи, включающей в себя силовую константу катушки обратной связи, т.е. коэффициент связывающий ток через катушку с создаваемой силой и передаточная функция выходных фильтров.

Электроники прямой и обратной цепей проектируются таким образом, чтобы обеспечить устойчивость контура обратной и равномерность частотной характеристики в частотном диапазоне 1–250 Гц.

В процессе разработки по проекту в 2024 году установлено, что задачи устойчивости обратной связи и приемлемой равномерности характеристики для датчика с аналогичной механической системой, в котором роль инерционной массы играет корпус

преобразующего элемента, решаются при использовании в частотной корректирующей электронике двух дифференцирующих каскадов. В данном случае указанные каскады размещаются в прямой цепи контура электронной обратной связи, схемотехнически реализованы как показано на рисунке 2.5.

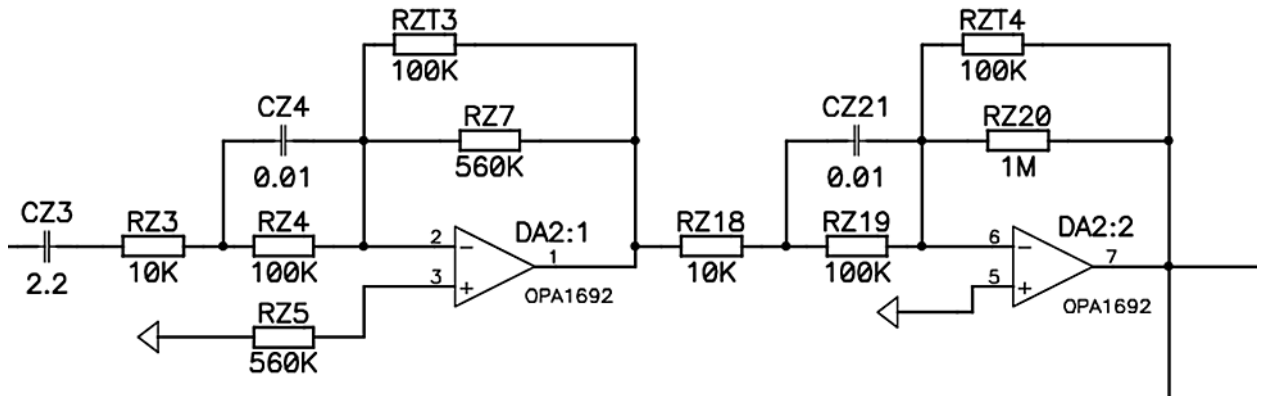


Рисунок 2.5 – Схема корректирующей электроники прямой цепи

Передаточные функции каждого каскада вычисляются как взятое с обратным знаком отношение импедансов на входе и в обратной связи операционного усилителя. Для первого каскада (рис. 2.5) выражение для передаточной функции может быть представлено в следующем виде:

$$w_1 = -z_1/z_2 \quad (2.2)$$

$$z_1 = RT_3 \parallel R_7 \quad (2.3)$$

$$z_2 = X(C_3) + R_3 + (R_4 \parallel X(C_4)) \quad (2.4)$$

Аналогично, для второго каскада:

$$w_2 = -z_3/z_4 \quad (2.5)$$

$$z_3 = RT_4 \parallel R_{20} \quad (2.6)$$

$$z_4 = R_{18} + (R_{19} \parallel X(C_{21})), \quad (2.7)$$

где:

$$X(C) = \frac{1}{i2\pi fC}$$

Электроника обратной связи показана на рисунке 2.6 и представляет собой дифференциатор, объединенный с усилителем – драйвером катушки механизма обратной связи. Использование в обратной ветви контура обратной связи дифференциатора позволяет получить на выходе сигнал, пропорциональный сейсмической скорости. Для драйвера используется достаточно мощный операционный усилитель ОРА-1692 с выходным током до 40 мА, что позволяет использовать в механизме обратной связи катушку сопротивлением 120 Ом при максимальном выходном сигнале усилителя 5 В.

Передаточная характеристика электроники обратной связи дается следующими выражениями:

$$W_{feedback} = \frac{z_5}{z_6} \cdot \frac{1}{z_{coil}} \quad (2.8)$$

$$z_5 = R_{15} \parallel X(C_7) \quad (2.9)$$

$$z_6 = (R_{13} + X(C_{14})) \parallel R_{14} \quad (2.10)$$

$$z_{coil} = R_{coil} + i\omega L_{coil}, \quad (2.11)$$

где z_{coil} – импеданс катушки обратной связи.

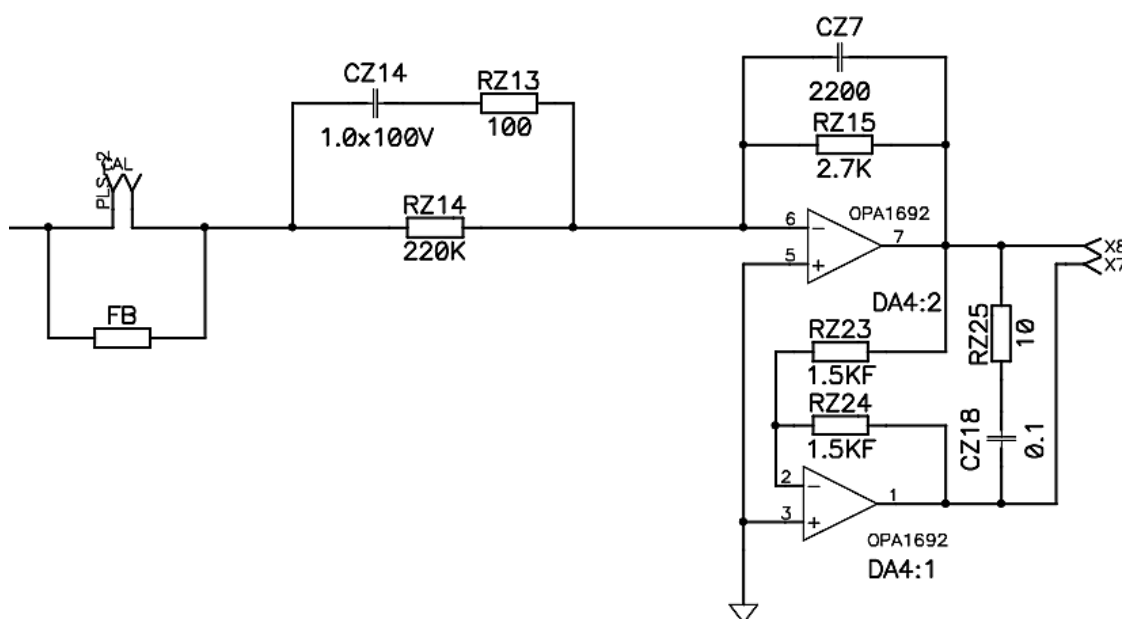


Рисунок 2.6 – Схема корректирующей электроники обратной связи

Экспериментальное исследование АЧХ датчиков, охваченных контуром обратной связи, проводилось измерительно-расчётным способом с использованием катушки обратной связи. При измерениях контур обратной связи разрывался, а на место разрыва подавался тестовый сигнал и проводился съём выходного отклика. В качестве тестового сигнала с помощью ЦАП генерировались синусоидальные сигналы различной частоты. Результатом измерений является передаточная функция петли обратной связи:

$$k\beta = w_{sensor} \cdot w_1 \cdot w_2 \cdot w_{feedback}.$$

Полученная экспериментальная кривая приведена на рисунке 2.7.

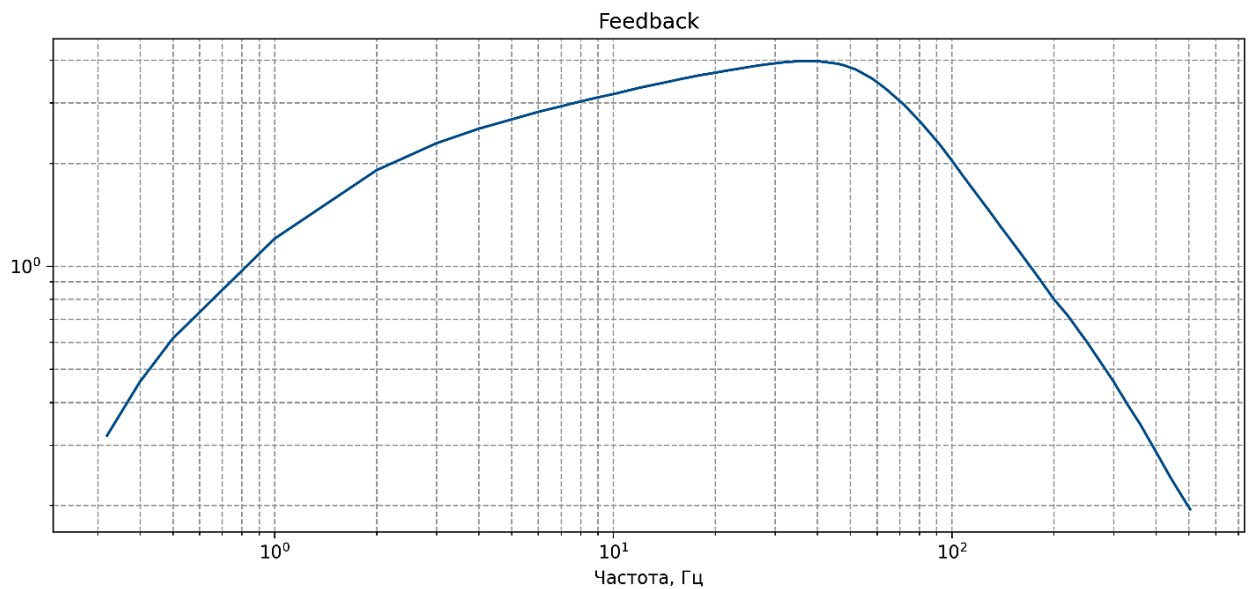


Рисунок 2.7 – Экспериментально измеренная глубина обратной связи $k\beta$ после использования корректирующих звеньев

Из полученных данных, зная значения всех номиналов в электронике с использованием формул (2.2) – (2.11) производилось вычисление передаточных функций прибора с учетом корректирующей электроники в режиме замкнутой обратной связи согласно следующему выражению:

$$W = \frac{w_{sensor} \cdot w_1 \cdot w_2 \cdot K_{coil} \cdot w_{filters}}{1 - w_{sensor} w_1 w_2 w_{feedback}}, \quad (2.12)$$

где $w_{filters}$ – передаточная функция выходных фильтров в качестве которых использовался полосовой фильтр Баттерворта второго порядка с частотами среза 1 и 250 Гц.

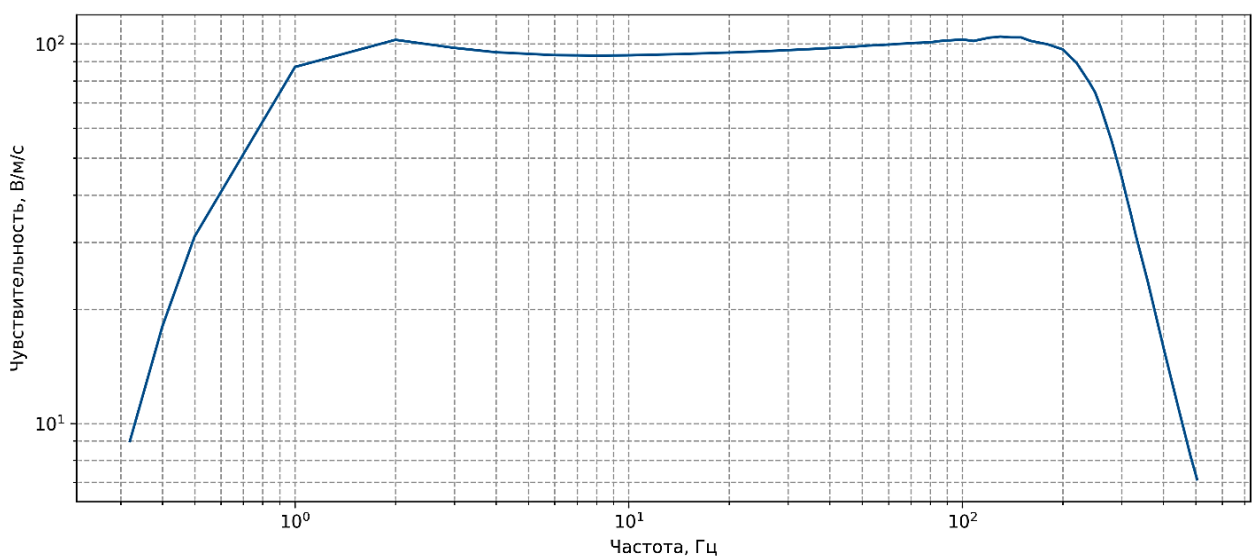


Рисунок 2.8 – АЧХ датчика с отрицательной обратной связью после использования корректирующих звеньев

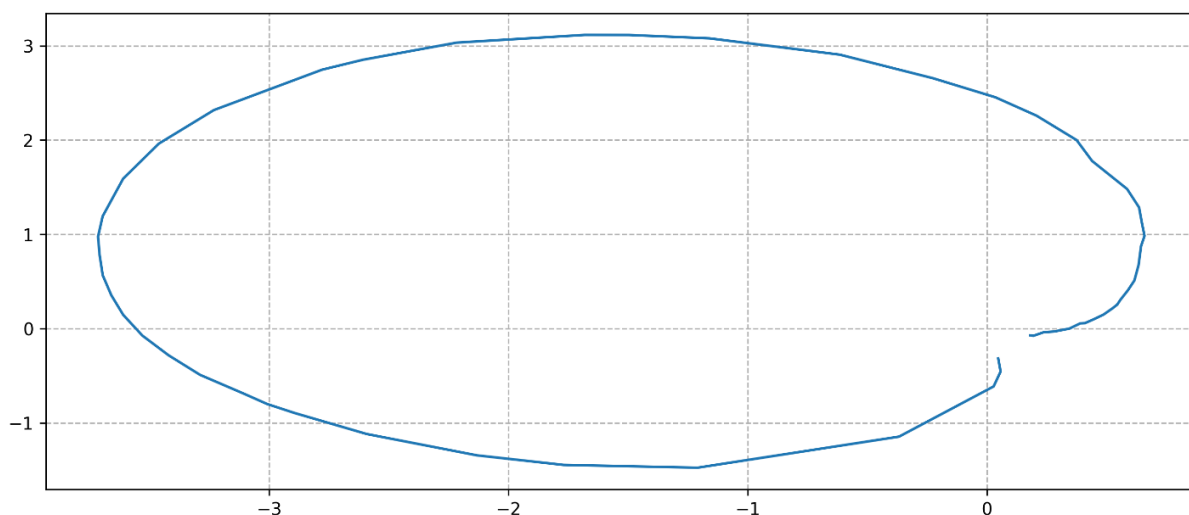


Рисунок 2.9 –Годограф усиления петли обратной связи $k\beta$ для исследованного экспериментального образца

Из представленных на рисунках 2.7-2.9 графиков видно, что глубина обратной связи в основной части исследованного частотного диапазона изменяется от 2 до 4, неравномерность коэффициента преобразования в рабочей полосе частот не превышает 5%, а годограф, согласно критерию Михайлова, соответствует устойчивому поведению контура обратной связи.

Для последующей установки в составе системы сейсмический датчик был размещён в корпусе, как показано на рисунке 2.10.



Рисунок 2.10 – Разработанный сейсмический датчик в корпусе

2.3 Реализация механизма автоматизированного заглубления сейсмического датчика

В процессе разработки устройства для автоматизированного заглубления сейсмического датчика, при расположении под рамой БВС, учитывались эксплуатационные ограничения, которые определяют область применимости метода и напрямую влияют на конструктивные решения. Первым и наиболее жестким ограничением является масса навесного узла: увеличение массы полезной нагрузки ограничивает продолжительность полёта и манёвренность аппарата, а следовательно – радиус и продолжительность проведения сейсмологических исследований. Поэтому конструкция должна оставаться максимально лёгкой, при этом сохраняя необходимую жесткость и прочность для передачи крутящего момента при вкручивании. Особое внимание при проектировании уделялось балансировке механизма относительно центра масс БВС. Несимметричное расположение направляющих, привода или несущих элементов может смещать центр тяжести аппарата, вызывая дисбаланс в нагрузке на ВМГ и нарушая стабильность управления, что критически влияет летные характеристики, точность позиционирования и устойчивость в момент контакта с поверхностью. Для исключения данного эффекта конструкция разрабатывалась с учётом совмещения оси действия усилия вкручивания с вертикальной осью БВС, а также равномерного распределения массы относительно продольных и поперечных осей симметрии корпуса. Такое решение обеспечивает устойчивое положение аппарата как в воздухе, так и в момент соприкосновения с грунтом, снижая нагрузку на систему стабилизации и предотвращая нештатные колебания при посадке. Вторым ограничением является габариты датчика и его части для обеспечения монтажа – диаметр и длина рабочей части датчика задают диаметр и высоту механизма заглубления. В сравнении с манипуляционными захватами, предназначенными для подъема и транспортировки датчиков, механизм заглубления имеет иные целевые ограничения: захватные системы требуют большей точности посадки и более ровной опорной поверхности для безопасного захвата и подъема, в то время как заглубляющий узел ориентирован на стационарную фиксацию датчика в грунте.

Рабочий цикл функционирования системы организован так, чтобы минимизировать время операции и максимально упростить процедуру с точки зрения процесса полета (рис. 2.11). После приближения к заранее определённой точке установки осуществляется выравнивание, стабилизация и посадка БВС в рабочей зоне с использованием высокоточной спутниковой навигации GNSS RTK. Как только БВС зафиксирован в рабочей точке, инициируется механическое заглубление сейсмического датчика на заданную глубину. Процесс заглубления останавливается по срабатыванию механического концевого

выключателя или по истечению времени миссии, после чего осуществляется снятие сейсмических данных. По завершении измерений направление вращения двигателя изменяется, и происходит извлечение датчика, продолжительность которого задается в полётном задании. Таким образом ослабляется сцепления датчика с грунтом, после чего БВС выполняет взлёт и изменение местоположения для следующей точки установки.

На этапе концептуального проектирования было достигнуто оптимальное решение, которое позволяет минимизировать массу и сложность механики, надёжностью и пригодностью для различных условий эксплуатации. Выбранная конструкция даёт ожидаемое соотношение «масса – функциональность», обеспечивает необходимое качество процесса установки датчика в допустимых типах грунтов и упрощает интеграцию с платформами БВС.



Рисунок 2.11 – Блок-схема рабочего цикла функционирования системы установки сейсмического сенсора

На рисунке 2.12 представлена верхняя неподвижная пластина механизма заглабления – элемент конструкции, изготавливаемый из листа капролона толщиной 10 мм. В центре и по периметру пластины были реализованы выборки с целью снижения веса устройства.



Рисунок 2.12 – Неподвижная пластина

Отверстия, расположенные в углах пластины, предназначены для размещения хромированных направляющих (8 мм в диаметре) и их последующего закрепления с двух сторон специальными хомутами как показано на рисунке 2.13.



Рисунок 2.13 – Неподвижная пластина с направляющими

После чего на валы одеваются опорные втулки для возвратных пружин и сами пружины. Вид пластины с валами, опорами и пружинами представлен на рисунке 2.14.

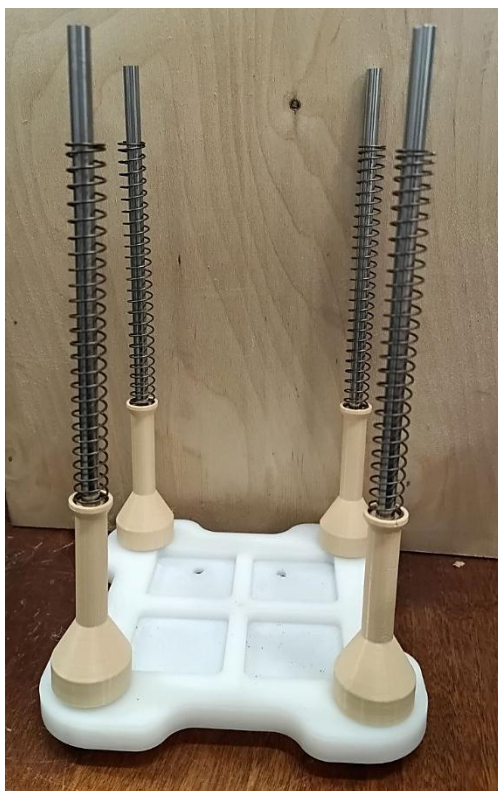


Рисунок 2.14 – Неподвижная пластина с направляющими и возвратными пружинами

Нижняя подвижная пластина, представленная на рисунке 2.15, изготавливается из листа капролона толщиной 10 мм. По периметру пластины реализованы выборки для снижения веса, а в центре сделано отверстие с радиусной фаской, в которое помещается сейсмодатчик до соприкосновения с фаской.

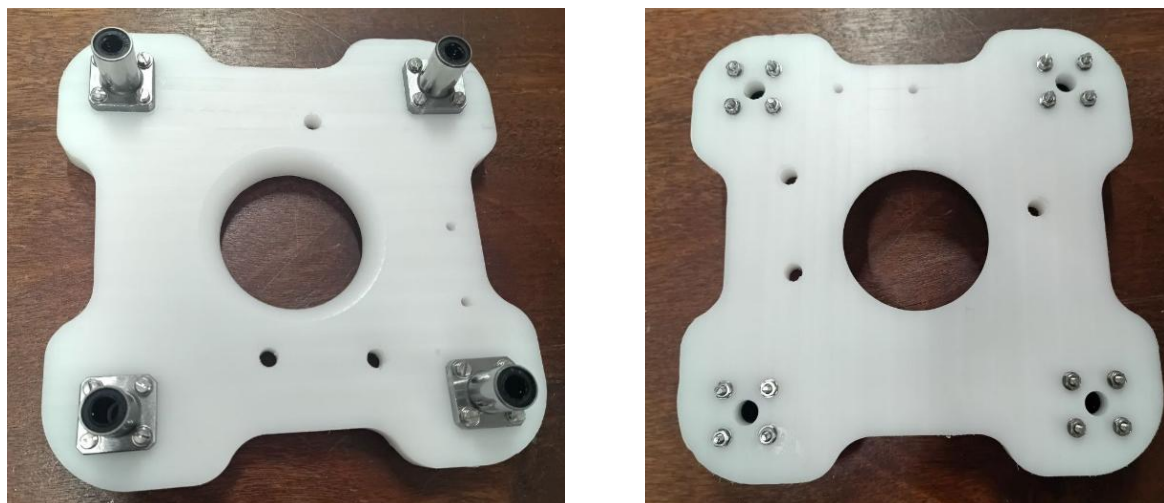


Рисунок 2.15 – Внешний вид нижней подвижной пластины с линейными подшипниками

Радиус фаски в пластине соответствует аналогичному параметру скругления на корпусе сейсмодатчика (рис. 2.16). Учитывая низкий коэффициент трения капролона и

соответствие радиусов скруглений, корпус может вращаться в пластине без существенных потерь на трение.



Рисунок 2.16 – Элемент корпуса сейсмодатчика

По углам подвижной пластины предусмотрены специальные пазы, в которые вставляются линейные подшипники, стягиваемые болтами М3. Для регулировки параллельности допускается подкладка тонких шайб в пазы для подшипников. Следующим шагом в специальные отверстия вставляются болты М6х140 и, предварительно, накручиваются гайки (рис. 2.17).



Рисунок 2.17 – Подвижная пластина

Данные болты крепят к пластине мотор-редуктора, представленной на рисунке 2.18. Сборка мотор-редуктора осуществляется в следующей последовательности: в хвостовик вала мотор-редуктора вкручивается шпилька М5х60 и затягивается контргайкой, на корпус редуктора одевается переходная пластина, к которой крепится «подвижный контакт»; далее на шпильку накручивается гайка М5 с нейлоновым кольцом, шайба М5 (увеличенная) и гайка М5 (удлиненная, 15 мм). После этого производится сборка связки сейсмодатчик-мотор.



Рисунок 2.18 – Мотор-редуктор в сборе

Для передачи крутящего момента на сейсмодатчик используется специальная шестерня (рис. 2.19), которая входит в зацепление с крышкой датчика и притягивается к нему шурупами.

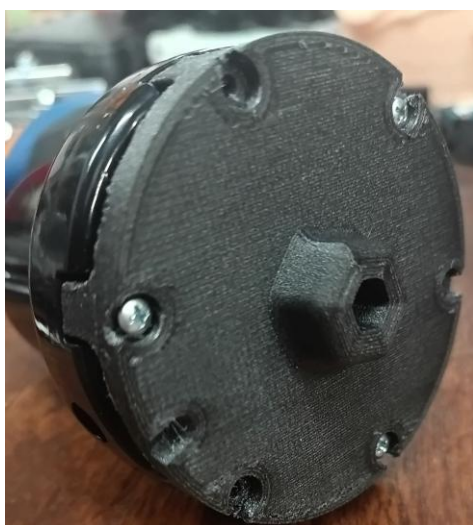


Рисунок 2.19 – Шестерня

Собранный сейсмодатчик с шестерней одевается на вал мотор-редуктора. Связка мотор-датчик прикручивается к пластине болтами, как показано на рисунке 2.20. Кроме того, к пластине монтируется концевой выключатель посредством специального кронштейна.

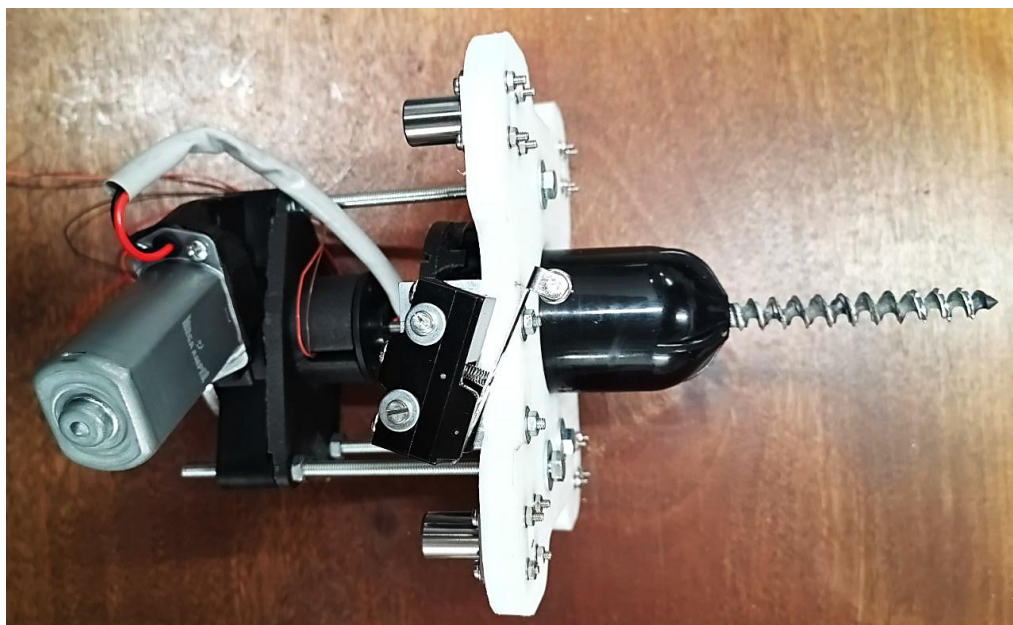


Рисунок 2.20 – Сборка датчик-мотор-пластина

После подготовки всех компонентов осуществляется стыковка нижней и верхней пластин: направляющие одновременно вставляются в линейные подшипники. После установки на направляющие одеваются хомуты и затягиваются на расстоянии 13-15 мм от торца (рис. 2.21).



Рисунок 2.21 – Установка подвижной пластины на направляющие

По завершении сопряжения и затяжки хомутов проверяется плавность хода подвижной пластины по направляющим. Далее на две направляющие устанавливается алюминиевая пластинка для рычага концевого выключателя. На следующем этапе производится регулировка концевого выключателя так, чтобы он срабатывал чуть раньше, чем подвижная пластина упрется в хомуты.

По окончании сборки и регулировки на верхнюю неподвижную пластину устанавливается блок электроники. Блок крепится через специальный кронштейн-уголок (рис. 2.22).



Рисунок 2.22 – Крепление блока электроники

На рисунке 2.23 показан внешний вид собранного сейсмического модуля интегрированной с системой установки (вкручивания датчика в грунт) для повышения качества контакта с грунтом.



Рисунок 2.23 – Сейсмический модуль интегрированный с системой установки

Схемотехническая часть устройства реализована на основе комбинации модулей понижения напряжения и драйвера управления электродвигателем (рис. 2.24). Питание устройства осуществляется от бортовой сети БВС с номинальным напряжением 24 В. Для питания исполнительных элементов предусмотрен понижающий преобразователь на основе микросхемы XL4015, обеспечивающий стабилизацию напряжения до уровня 12 В, что используется как для питания электродвигателя механизма заглубления, так и для питания схемы самого сейсмического датчика. Управление направлением вращения электродвигателя реализовано на модуле полного моста BTS7960, обеспечивающем прямой и реверсивный режимы работы.

От полётного контроллера к модулю управления подведены два управляющих сигнальных канала. Подача сигнала 3.3 В на первый канал инициирует вращение электродвигателя в направлении заглубления, подача сигнала на второй – в направлении извлечения. Для аппаратного ограничения глубины заглубления в цепь сигнального провода, отвечающего за процесс заглубления, включён механический концевой выключатель, размыкающий цепь при достижении нижнего предела хода. Таким образом, процесс остановки осуществляется аппаратно, без участия программного обеспечения полётного контроллера, что повышает надёжность системы в случае возможных сбоев.

Для питания драйвера BTS7960 дополнительно используется низковольтный преобразователь 5 В.

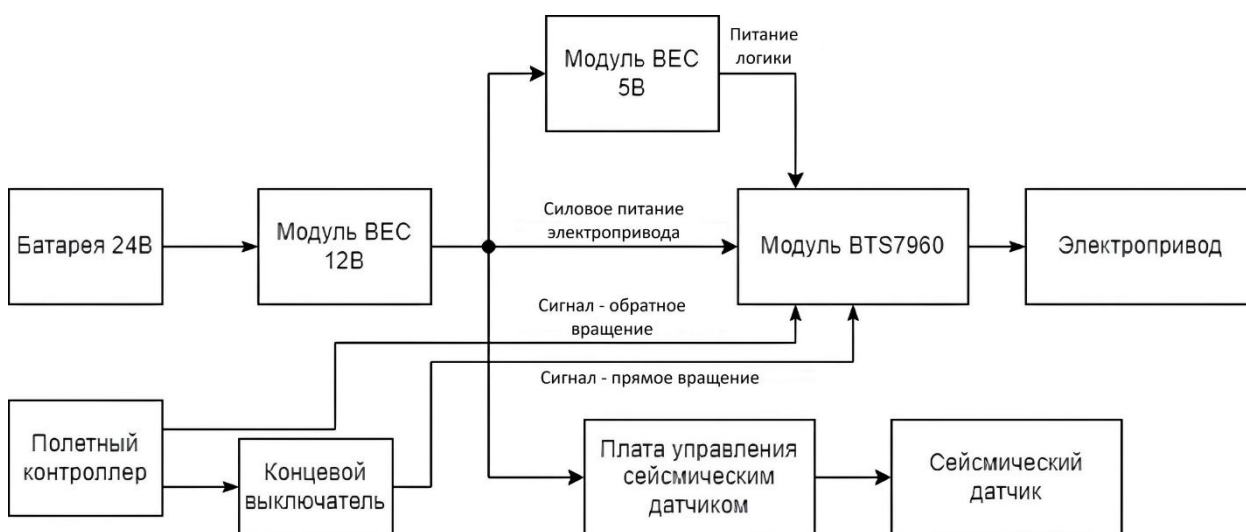


Рисунок 2.24 – Структурная электросхема системы

2.4 Создание программно-аппаратных средств для переноса данных с бвс на рабочее место оператора с целью контроля качества и технического состояния модулей

Для передачи данных с автономного модуля на персональную электронно-вычислительную машину (ПЭВМ) оператора применяется специально разработанное программное обеспечение (ПО) NDAS App. Разработанное ПО поддерживает два режима подключения (рис. 2.25):

- 1) Проводное соединение посредством USB-кабеля;
- 2) Беспроводное подключение через встроенную Wi-Fi сеть прибора.

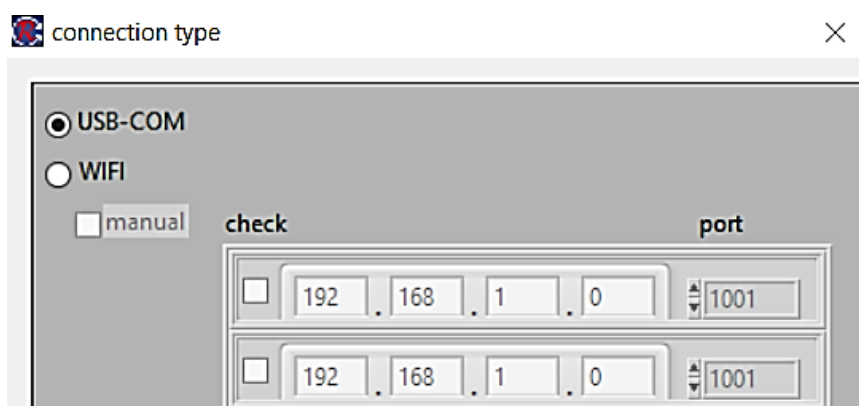


Рисунок 2.25 – Выбор способа подключения в интерфейсе ПО

В основном меню (рис. 2.26) производится выбор устройства, с которым предполагается работа. ПО предусмотрена возможность изменения настроек модуля, которая доступна в разделе «parameters».

Для извлечения и передачи данных с автономного сейсмического модуля требуется деактивировать режим записи на карту памяти (SD writing), если он был ранее включён, и инициировать режим работы устройства в качестве накопителя (Card reader).

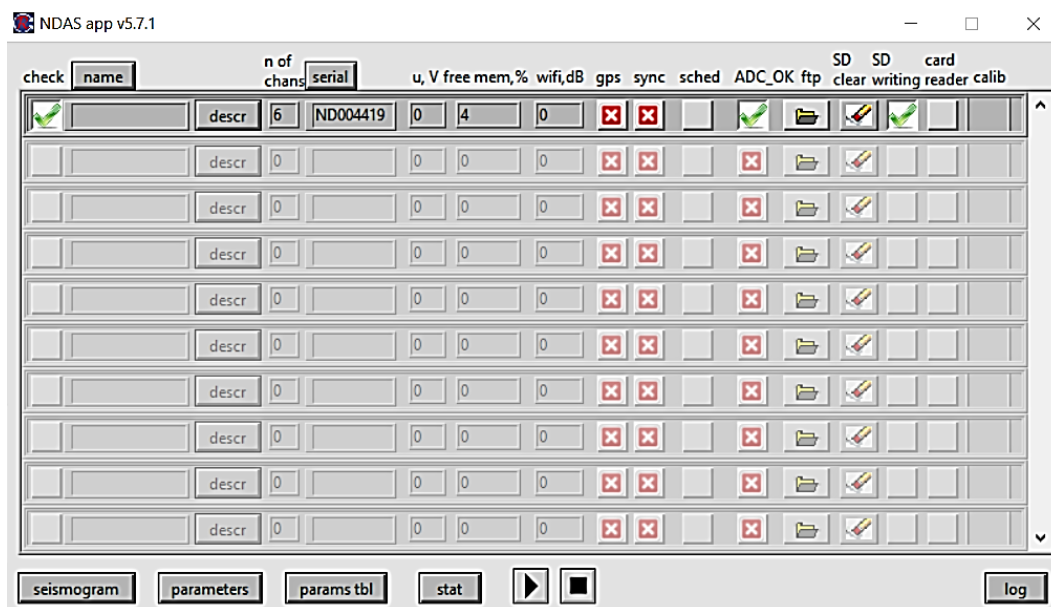


Рисунок 2.26 – Основное меню разработанного ПО

Затем на ПЭВМ оператора ПО осуществляет открытие каталога, который содержит все данные, хранящиеся в памяти автономного сейсмического модуля (рис. 2.27). При наличии сигнала глобальной навигационной спутниковой системы (GPS) записанные данные организуются в подкаталоги, наименования которых соответствуют дате начала записи. В случае отсутствия GPS-сигнала в момент начала записи информация сохраняется в каталогах с именами вида NO_TIME_XXX.

2023-09-27	27.09.2023 8:29	Папка с файлами
2025-11-05	05.11.2025 13:30	Папка с файлами
LOGS	01.01.2017 6:28	Папка с файлами
NO_TIME_024	19.01.2017 23:10	Папка с файлами
NO_TIME_040	01.01.2017 0:00	Папка с файлами

Рисунок 2.27 – Структура папок с данными

С целью оптимизации использования памяти SD-карты автономного модуля данные со всех каналов регистрации сохраняются в единый файл с расширением .siv. Посредством специально разработанного конвертера предусмотрена возможность преобразования файлов в ряд стандартных и широко используемых представлений данных: txt, bin, segy, mseed и sac.

Таким образом, разработанное ПО обеспечивает передачу данных с цифрового модуля, интегрированного в состав БВС, на рабочее место оператора для последующей обработки, включающей контроль качества зарегистрированной информации и диагностику технического состояния функциональных модулей.

Результаты работы предлагаемого программного комплекса, полученные в ходе апробации механизма установки сейсмического модуля посредством реализованного механизма заглубления, представлены в подразделе 2.5.

2.5 Экспериментальные исследования функционирования механизма автоматизированного заглубления сейсмического датчика

Для оценки режимов работы привода при заглублении были проведены стендовые испытания (без установки на БВС). Механизм питался от лабораторного источника питания 12 В с функциями измерения и ограничения тока; вкручивание выполнялось в модельные субстраты разной плотности. Фиксировались средние и пиковые значения тока на протяжении не менее 10 циклов для каждого субстрата. Результаты:

- Стартовый импульс: 5 А.
- Холостой ход (без контакта): 1–1,5 А.
- Заглубление, типовой грунт: 1.5–2.5 А.
- Кратковременные упоры/уплотнения: до 3.5 А (пиковое значение).
- Максимальный ток при полной ручной остановке: 5 А.

Полученные значения входят в расчётные режимы привода с редуктором; наблюдается ожидаемый рост тока с увеличением плотности субстрата.

Для первого эксперимента ООО «Р-сенсорс» использовались два идентичных сейсмодатчика модели МТСС-1002. Технические характеристики датчиков приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Технические характеристики датчика МТСС-1002

Параметр	Значение
Чувствительность	350 В·с/м
Максимальный входной сигнал	± 21 мм/с
Полоса пропускания	1–250 Гц
Максимальный выходной сигнал	±7,5 В
Выходное сопротивление	500 Ом
Интегральный шум в полосе пропускания	20 нм/с
Динамический диапазон	121 дБ
Нелинейность на границе динамического диапазона	менее 1%
Напряжение питания	10,5–16 В
Ток питания	17 мА
Угол установки	любой

Тип кабеля	0,2 м, 4 провода, с открытым концом
Материал корпуса	пластик
Вес	0.26 кг
Размеры (диаметр, высота)	48 x 105 мм

С целью регистрации данных референсных датчиков применялся 24-разрядный цифрователь NDAS-8426N (табл. 2.2).

Таблица 2.2 – Технические характеристики регистратора NDAS-8426N

Параметр	Значение
Платформа	Beaglebone 1GHz ARM® CPU, 512MB RAM, 4GB Flash
Операционная система	Debian 10.3
Программное обеспечение	Сервер SeedLink Веб-интерфейс для конфигурирования
Память	32ГБ
Сетевой интерфейс	Ethernet 100 Base-Tx
Синхронизация часов	Ethernet (NTPv4 RFC 5905, PTP IEEE 1588v2) Спутниковый приемник GPS/GLONASS
Точность синхронизации при наличии сигнала GPS/GLONASS	< 10 μS
Контроль условий работы	Датчик температуры и влажности, напряжение питания основного канала, потребляемая мощность
Индикация	5 светодиодов разного цвета
Интерфейсы для подключения датчиков типа СМЕ-ND	USB 2.0
Интерфейс для подключения дополнительных устройств	USB 2.0 / mini-PCIe
Передача данных	Seedlink; Открытый протокол на основе JSON
Подача питания на внешние устройства	5 ± 0.1 В, 500 мА максимально для каждого порта (USB, RS485); +12 В ± 5%, -12 В ± 10% 200 мА суммарного тока потребления

При апробации датчики ориентировались в вертикальном положении, размещаясь в одинаковых корпусах. Одно из устройств устанавливалось в грунт вручную с помощью металлического штыря – стандартным, принятым в наземной сейсморазведке способом. Второй датчик устанавливался посредством механизма заглубления, описанного ранее (рис. 2.2). На данном этапе вместо БВС использовался массогабаритный макет, к которому закреплялся разработанный модуль.



Рисунок 2.28 – Эксперимент по сравнению контакта с грунтом при стандартной установке датчика и установке с помощью разработанного механизма заглубления

Данные записывались на 24-разрядном АЦП, аналогичном используемому в составе высококомобильного малогабаритного цифрового сейсмического модуля, для синхронизации записей использовался спутниковый сигнал точного времени. Сигнал возбуждался с помощью кувалды на расстояниях от 10 до 40 метров от точки размещения датчиков. Также использовались присутствующие в месте проведения эксперимента фоновые сейсмические сигналы. Полученные данные передавались на ЭВМ оператора с целью последующей обработки посредством разработанного ПО, описание которого было приведено ранее.

Примеры полученных сейсмограмм приведены на рисунках 2.29 и 2.30, красная трасса соответствует датчику, установленному с помощью разработанного устройства.

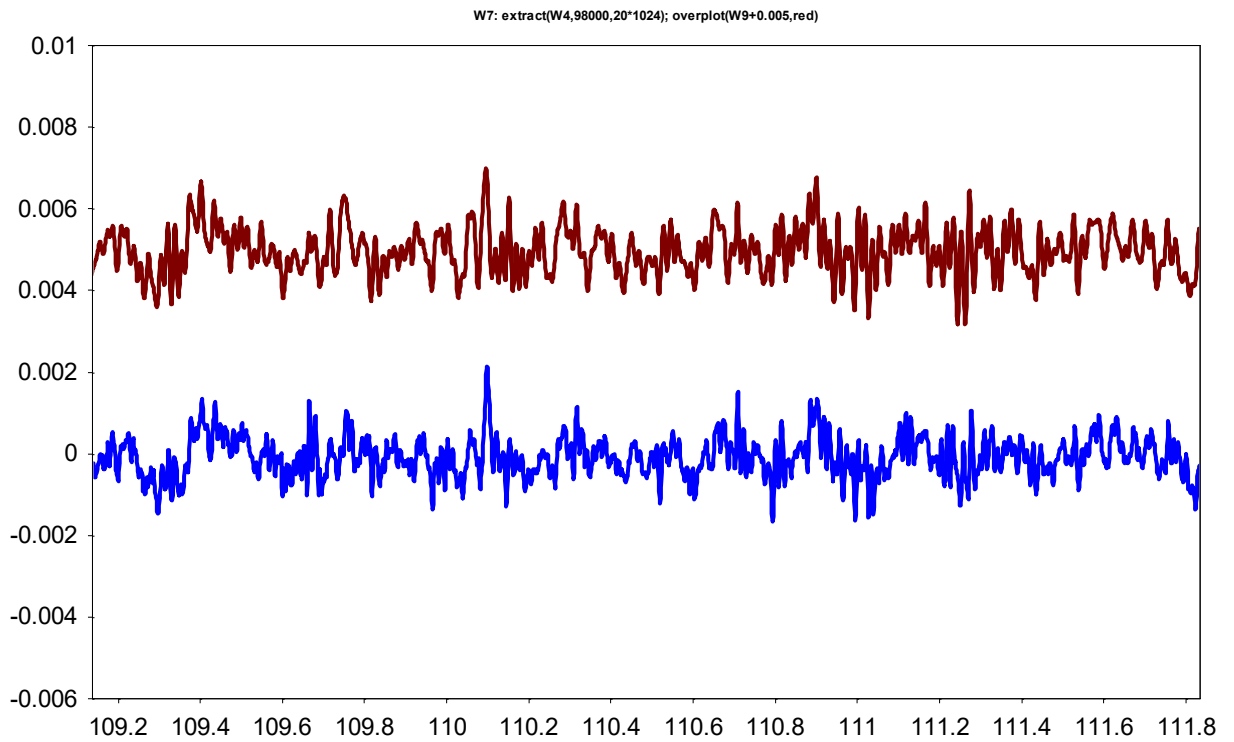


Рисунок 2.29 – Сравнение временных сейсмограмм при регистрации сейсмического фона

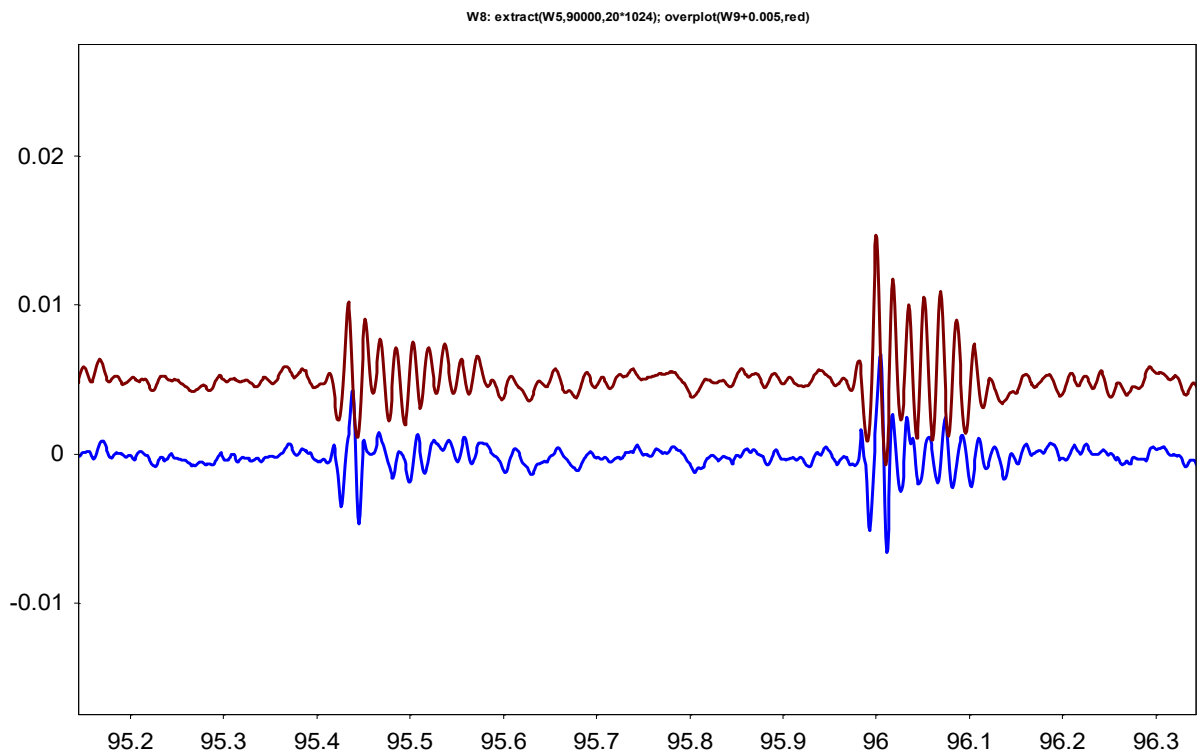


Рисунок 2.30– Сравнение временных сейсмограмм при регистрации сейсмических сигналов, возбуждаемых кувалдой

На рисунке 2.31 представлены соответствующие спектры: синий – датчик установлен с помощью БВС, красный – установлен вручную.

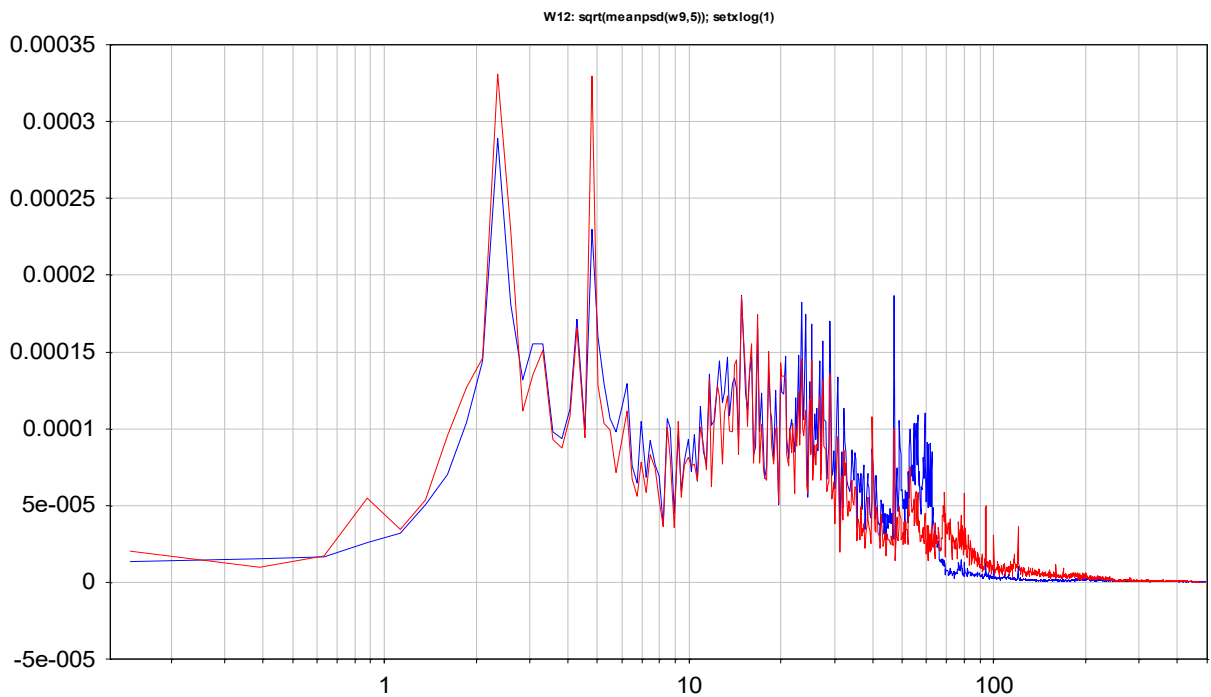


Рисунок 2.31 – Наложение спектров выходных сигналов двух датчиков

Из графиков видно, что полученные данные достаточно хорошо коррелируют между собой, что принципиально отличает результат от полученного ранее, до применения разработанного в 2025 году устройства (рис. 2.32).

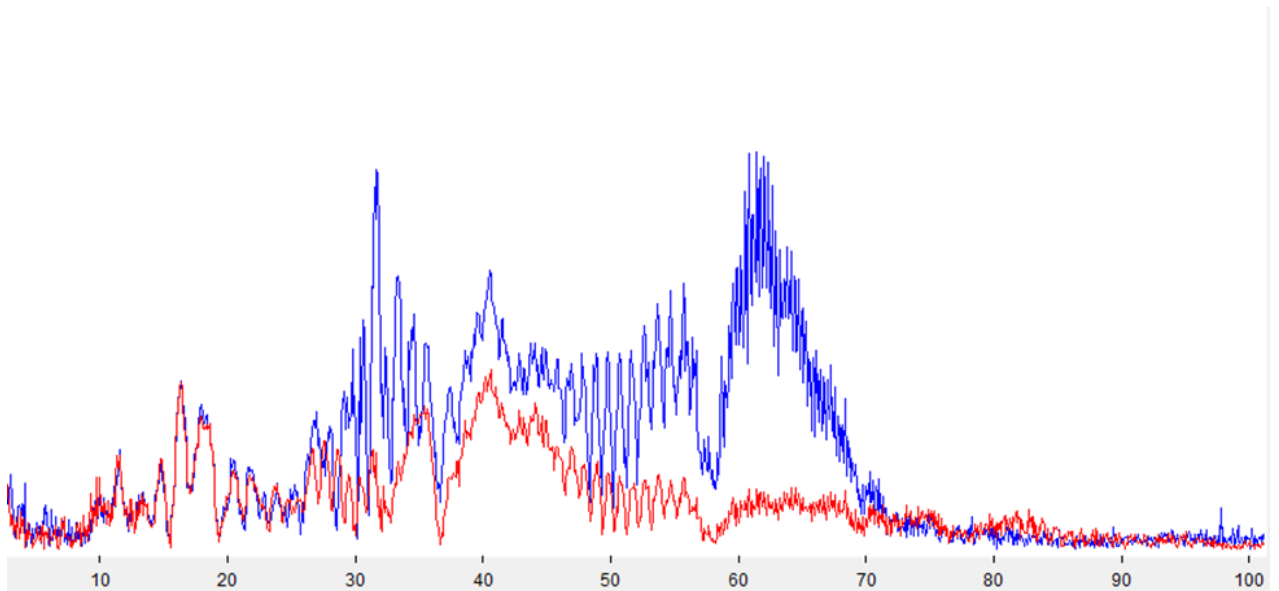


Рисунок 2.32 – Наложение спектров сигналов двух датчиков без использования разработанного устройства для закрепления на грунте.

Таким образом, проведенная первичная апробация показала, что разработанное в рамках реализации проекта устройство решает задачу надежного крепления на грунте сейсмодатчика доставляемого к месту проведения эксперимента посредством БВС.

На основании полученных при данном полевом эксперименте данных подготовлен протокол апробации, представленный в Приложении 1 к отчету.

На втором этапе апробации механизм с датчиком был установлен БВС ФИЦ РАН на БВС (рис. 2.33).



Рисунок 2.33 – Механизм в сборе, установленный на БВС

Для подтверждения работоспособности разработанного решения был проведен эксперимент по автономному заглублению сейсмодатчиков и снятию данных в полевых условиях.

Порядок эксперимента был следующим: БВС взлетал с исходной точки, совершал полет до заданной точки измерения и выполнял точное позиционирование с помощью GNSS RTK. После этого аппарат совершал посадку над выбранной точкой, и включался механизм автоматического вкручивания датчика в грунт (рис. 2.34).



Автор фото: Горелик Глеб Дмитриевич

Рисунок 2.34 – Вкрученный в грунт сейсмический датчик

В процессе заглубления подвижная часть механизма плавно скользила по алюминиевым направляющим, электропривод корректно вращал датчик в обоих направлениях, а концевой выключатель останавливал процесс по достижении заданной глубины. После установки датчика успешно считывались сейсмические данные, подтверждая работоспособность системы.

После завершения измерений датчик автоматически извлекался, и БВС поднимался для перемещения к следующей точке. На каждой последующей точке процесс повторялся: посадка, заглубления датчика, сбор данных и извлечение. В конце миссии аппарат возвращался на исходную точку.

Механизм показал достаточную надежность и точность работы: датчик заглублялся и извлекался без ручного вмешательства, движение подвижной части оставалось плавным, а управление электроприводом через полетный контроллер корректно выполняло все команды. Полученные данные подтвердили возможность автономного и точного заглубления сейсмодатчиков с использованием БВС, что полностью соответствует целям разработанного решения.

3. ДОРАБОТКА ПРОТОТИПА БВС И СИСТЕМЫ УСТАНОВКИ СЕЙСМИЧЕСКОГО МОДУЛЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА КОНТАКТА С ГРУНТОМ

В 2025 году ввиду необходимости обеспечения работы аппарата с интегрированной системой установки сейсмического модуля и выполнения операций переноса и установки модуля с постоянной полезной нагрузкой проведена доработка прототипа представленного ранее БВС. Модернизация направлена на увеличение длительности полёта, повышение тяговых характеристик, улучшение статической устойчивости при посадке и обеспечение компоновочных условий для размещения системы установки в нижнем отсеке БВС.

Экспериментальные исследования, проведенные в рамках предыдущего этапа, показали, что применявшийся прототип аппарата обеспечивал длительность полёта порядка 16 минут при работе с полезной нагрузкой и обладал минимальным запасом тяги относительно собственной взлётной массы. Данное ограничение приводило к эксплуатации винтомоторной группы в режиме, характеризующемся повышенным значением газа, что выходило за пределы штатных эксплуатационных параметров. Конструкция шестимоторной схемы обладала увеличенными габаритами, затруднявшими эксплуатацию БВС в полевых условиях. Сейсмический модуль не являлся частью конструкции аппарата, что исключало необходимость поддержания полёта с постоянной нагрузкой и позволяло выполнять замену аккумуляторной батареи между перемещениями.

Переход к интегрированной схеме переноски и установки сейсмического модуля требует увеличения длительности полёта БВС, а также обеспечения стабильного поведения аппарата при посадке и формирования компоновочных условий для размещения системы установки. Параметры шестимоторной конфигурации не обеспечивают требуемых значений по тяговому запасу, энергетической автономности и статической устойчивости.

3.1 Требования к доработанному прототипу БВС

Для работы БВС с интегрированной системой установки сейсмического модуля должно быть обеспечено выполнение следующих требований:

- 1) Длительность полёта с постоянной полезной нагрузкой должна составлять не менее 25 минут.
- 2) Суммарная статическая тяга винтомоторной группы должна превышать взлётную массу не менее чем в два раза.
- 3) Рабочий диапазон газов при переносе нагрузки и выполнении посадки должен составлять 50–55 процентов.

- 4) Работа винтомоторной группы при газе выше 80 процентов при штатной нагрузке не допускается.
- 5) Энергетическая система должна обеспечивать выполнение перемещений между несколькими рабочими точками без замены аккумуляторной батареи.

При этом положение центра масс БВС должно находиться вблизи вертикальной оси симметрии аппарата и иметь минимально возможную высоту относительно опорной поверхности. Конструкция должна предусматривать размещение аккумуляторной батареи в нижнем отсеке рамы БВС, а размещение полётного контроллера и навигационной электроники организовано в верхней части рамы с применением виброразвязки.

Кроме того, нижний отсек рамы БВС должен обеспечивать размещение системы установки сейсмического модуля в пределах её габаритов и передачу осевых нагрузок без недопустимых деформаций. Силовые элементы рамы обязаны сохранять геометрию узла установки при контакте аппарата с локальными неровностями поверхности. Прокладка силовых и сигнальных линий должна исключать влияние на работу навигационных подсистем.

Необходимо отметить, что опорная часть БВС должна обеспечивать устойчивую посадку на поверхность с локальными неровностями, а геометрические параметры опор – достаточную опорную базу. Высота опор должна обеспечивать условия для размещения системы установки и работы её подвижных элементов.

3.2 Требуемые технические характеристики БВС

Технические параметры модернизированного БВС представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Технические характеристики модернизированного прототипа БВС

Показатель	Требуемое значение
Длительность висения с полезной нагрузкой	не менее 25 мин
Полезная нагрузка	не менее 5 кг
Полная взлётная масса	не более 25 кг
Суммарная статическая тяга	не менее 2× взлётной массы
Рабочий диапазон газа в режиме висения	50–55 %
Предельный газ при штатной нагрузке	не более 80 %

3.3 Исходные параметры доработанного прототипа БВС

Для расчёта винтомоторной группы (ВМГ) и длительности полета доработанного прототипа БВС принимаются исходные параметры, определяемые требованиями к работе с интегрированной системой установки сейсмического модуля.

БВС рассматривается как аппарат с постоянной полезной нагрузкой, масса которой составляет 5 кг, выполняющий несколько последовательных перемещений между

рабочими точками в пределах одного вылета. Для обеспечения указанного профиля работы длительность полёта должна составлять не менее 25 мин.

Расчётная взлётная масса для дальнейших вычислений принимается как не превышающая значение 25 кг, с учетом массы рамы, силовых установок, аккумуляторной батареи, системы установки сейсмического модуля, а также радио- и навигационного оборудования. Точное значение взлётной массы модернизированного БВС подлежит уточнению после изготовления опытного образца.

Тяговый запас определяется условием:

$$k_T = \frac{F_{\Sigma}}{m_T} \geq 2,0,$$

где F_{Σ} — суммарная статическая тяга всех силовых установок в килограммах при 100% уровне газа, m_T — взлётная масса. Рабочий диапазон уровней газа в режиме висения с полезной нагрузкой принимается 50–55 %.

Энергетическая установка включает литий-полимерную аккумуляторную батарею номинальной ёмкостью 50 Ач. В расчётах используется эксплуатационная часть ёмкости, равная 85 % от номинальной, что соответствует допустимой глубине разряда 85 %. Номинальное напряжение батарейной сборки принимается на уровне, обеспечивающем совместимость с применяемыми регуляторами и двигателями.

На основании приведённых исходных данных в последующих подразделах выполняется расчёт тяговых возможностей, токовой нагрузки и расчётной длительности полёта для взлётной массы 25 кг.

3.4 Выбор компоновки прототипа БВС

Переход к интегрированной системе установки сейсмического модуля и увеличенной расчётной взлётной массы до 25 кг требует повышения значений суммарной тяги и длительности полета с сохранением компактности БВС. При масштабировании гексакоптерной схемы до указанных параметров существенно возрастают габариты в части размаха и изгибающие моменты в зоне крепления лучей, что усложняет размещение системы установки в нижнем отсеке и ограничивает возможность формирования низкого центра масс.

По этим причинам для доработанного прототипа принята схема соосного октакоптера с тянущим расположением винтов. Выбранная компоновка обеспечивает совмещение следующих факторов: увеличение суммарной тяги без существенного увеличения габаритов, размещение интегрированной системы установки в нижней части

рамы и формирование низкого центра масс при сохранении конструктивных решений по размещению электроники, отработанных в прототипе предыдущего этапа.

3.5 Подбор и анализ винтомоторной группы БВС

В качестве ВМГ для дальнейших расчётов принята винтомоторная группа на основе электродвигателя MN605S с композитным винтом диаметром 24 дюйма. Для указанной группы имеются экспериментальные данные по тяге и потребляемому току в диапазоне уровней газа, используемых при выполнении операций висения и маневрирования. Характеристики винтомоторной группы MN605S с винтом диаметром 24 дюйма принимаются в качестве исходных данных для расчёта тяговых и энергетических параметров в выбранной компоновке аппарата.

Для определения тяговых и энергетических характеристик винтомоторной группы проведены стендовые испытания винтомоторной группы на базе электродвигателя MN605S с композитным винтом диаметром 24 дюйма и аккумуляторной батареи типа LiHV 6S (номинальное напряжение 25,8 В). Измерения выполнялись в стационарных условиях при ступенчатом изменении уровня газа от 40 до 100 %. Определялись статическая тяга и ток потребления одной винтомоторной группы (табл. 3.2).

Таблица 3.2 – Результаты стендовых испытаний MN605S + 24” (LiHV 6S)

Уровень газа, %	Тяга, кг	Ток, А
40	2,30	7,4
50	3,50	12,5
60	4,80	19,0
70	6,40	26,0
80	8,30	33,0
90	9,90	39,0
100	10,95	42,0

Для учёта аэродинамического взаимодействия винтов в соосной конфигурации используется коэффициент снижения тяги $k_F = 0,92$, принятый по данным экспериментальных исследований аналогичных коаксиальных винтовых групп [Coleman, Colin P.. “A Survey of Theoretical and Experimental Coaxial Rotor Aerodynamic Research.” (1997).] [Berra, Andrea, Miguel Ángel Trujillo Soto, and Guillermo Heredia. 2024. “Aerodynamic Interaction Minimization in Coaxial Multirotors via Optimized Control Allocation” Drones 8, no. 9: 446. <https://doi.org/10.3390/drones8090446>].

Расчёт суммарной статической тяги при 50 % уровня газа

Суммарная статическая тяга винтомоторной группы определяется выражением:

$$F_{\text{sum}}(\tau) = 8 \cdot F_1(\tau) \cdot k_F,$$

где $F_{\text{sum}}(\tau)$ – суммарная тяга восьми силовых установок, $F_1(\tau)$ – тяга одной установки, $k_F = 0,92$ – коэффициент снижения тяги в соосной паре.

При уровне газа 50 % тяга одной установки составляет 3,50 кг, тогда:

$$F_{\text{sum}}(50) = 8 \cdot 3,50 \cdot 0,92 = 25,76 \text{ кг.}$$

Расчёт суммарного тока при 50 % уровня газа

Суммарный ток винтомоторной группы определяется зависимостью:

$$I_{\text{sum}}(\tau) = 8 \cdot I_1(\tau).$$

При токе одной установки $I_1(50) = 12,5$ А:

$$I_{\text{sum}}(50) = 8 \cdot 12,5 = 100 \text{ А.}$$

Расчёт доступной ёмкости аккумулятора

Эффективная ёмкость аккумуляторной батареи при глубине разряда 85 % определяется выражением:

$$Q_{\text{eff}} = 0,85 \cdot Q.$$

При номинальной ёмкости $Q = 50$ Ач:

$$Q_{\text{eff}} = 0,85 \cdot 50 = 42,5 \text{ Ач.}$$

Расчёт длительности полёта

Расчётная длительность полёта в режиме, эквивалентном уровню газа 50 %, определяется зависимостью:

$$T = \frac{Q_{\text{eff}}}{I_{\text{sum}}(50)} \cdot 60.$$

При $Q_{\text{eff}} = 42,5$ Ач и $I_{\text{sum}}(50) = 100$ А:

$$T = \frac{42,5}{100} \cdot 60 = 25,5 \text{ мин.}$$

Расчёт суммарной тяги при 100 % уровня газа

По данным испытаний $F_1(100) = 10,95$ кг. Тогда суммарная статическая тяга винтомоторной группы:

$$F_{\text{sum}}(100) = 8 \cdot 10,95 \cdot 0,92 = 80,54 \text{ кг.}$$

Расчёт коэффициента тяговооружённости при 100 % уровня газа

Коэффициент тяговооружённости определяется соотношением:

$$k_T = \frac{F_{\text{sum}}(100)}{m_T}.$$

При массе аппарата $m_T = 25$ кг:

$$k_T = \frac{80,54}{25} = 3,22.$$

Результаты стендовых испытаний и расчётов показывают, что винтомоторная группа MN605S с винтами диаметром 24 дюйма обеспечивает выполнение всех требований, предъявляемых к доработанному прототипу БВС. Суммарная тяга при уровне газа 50 % превышает расчётную массу аппарата, обеспечивая устойчивый режим висения. Энергетические характеристики позволяют достичь расчётной длительности полёта более 25 мин. Значение тяги при 100 % уровня газа формирует коэффициент тяговооружённости, превышающий необходимое минимальное значение, что обеспечивает достаточный запас по манёвренности и компенсации внешних возмущений.

3.6 Конструкционная часть доработанного прототипа БВС

Конструкция силовой рамы и лучей

Силовая рама БВС выполнена в трёхсекционной компоновке и включает верхний, средний и нижний отсеки, объединённые общими силовыми элементами. Конструкция обеспечивает передачу нагрузок от винтомоторной группы соосного типа и размещение системы установки сейсмического модуля на нижней пластине. Силовая схема аппарата формируется из углепластиковых пластин, алюминиевых силовых рамок и конструктивных узлов крепления лучей.

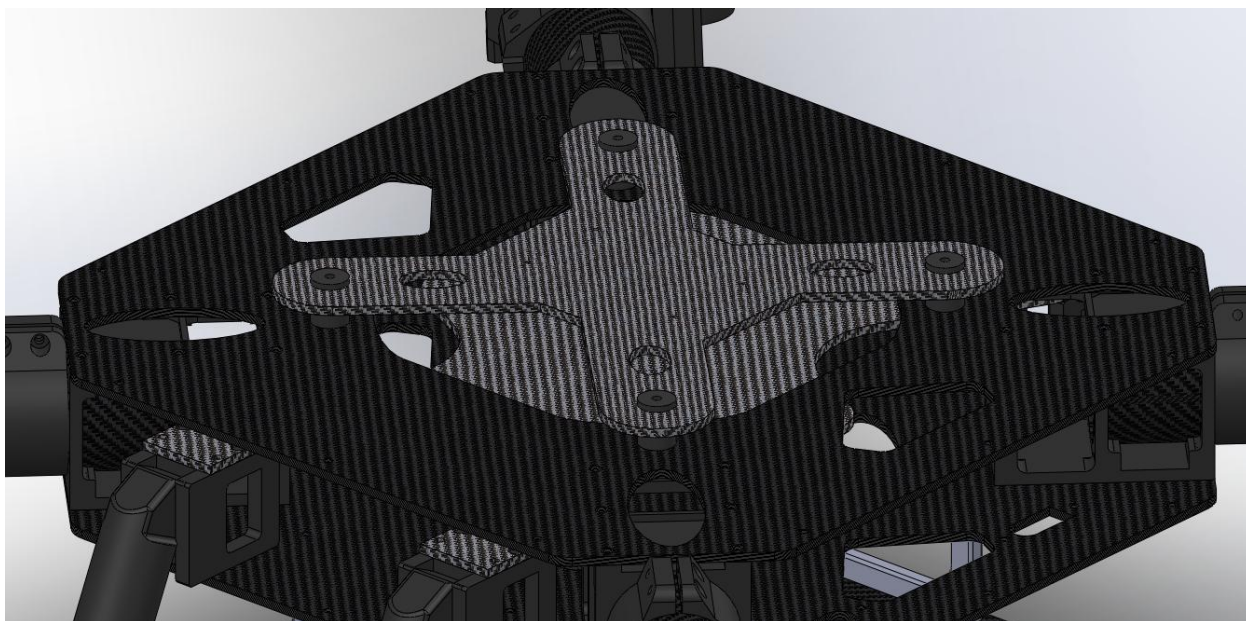


Рисунок 3.1 – Верхний отсек БВС

Верхний отсек (рис. 3.1) предназначен для размещения высокоточной электроники. Полётный контроллер установлен на виброразвязанной крестообразной опорной пластине, соединённой с корпусом через демпфирующие элементы (см рисунок). Отсек закрывается верхней крышкой и боковыми панелями. Доступ выполняется путём демонтажа крышки.

Средний отсек (рис. 3.2) является основным силовым узлом рамы. В его составе находятся конструктивные узлы крепления лучей, плата распределения питания и элементы силовой электроники. Узлы крепления лучей передают нагрузки от винтомоторной группы на силовой каркас аппарата и обеспечивают геометрическое фиксирование лучей относительно рамы. Монтажные точки шасси объединены переходной углепластиковой пластиной, формирующей дополнительную пространственную жёсткость среднего отсека. Средний отсек закрывается боковыми панелями.

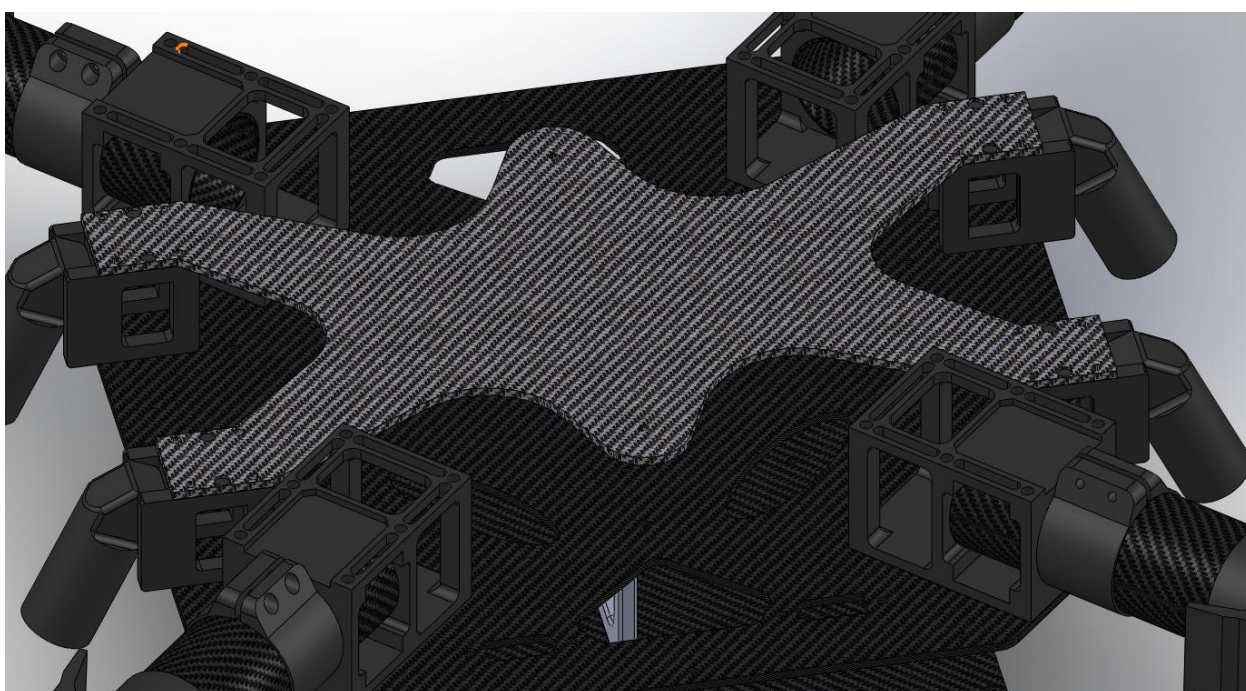


Рисунок 3.2 – Средний отсек БВС

Узел крепления моторов (рис. 3.3) выполнен как отдельный конструктивный узел, размещаемый на конце каждого луча. Узел обеспечивает коаксиальное размещение двух электрических двигателей тянуще-толкающей конфигурации. Конструкция узла включает две независимые плоскости крепления двигателей с осевым совмещением, зазором между посадочными плоскостями и жёстким интерфейсом с углепластиковой трубкой луча. Узел обеспечивает передачу осевых, радиальных и крутящих нагрузок от обоих двигателей на конструкцию луча и далее на силовые элементы среднего отсека.

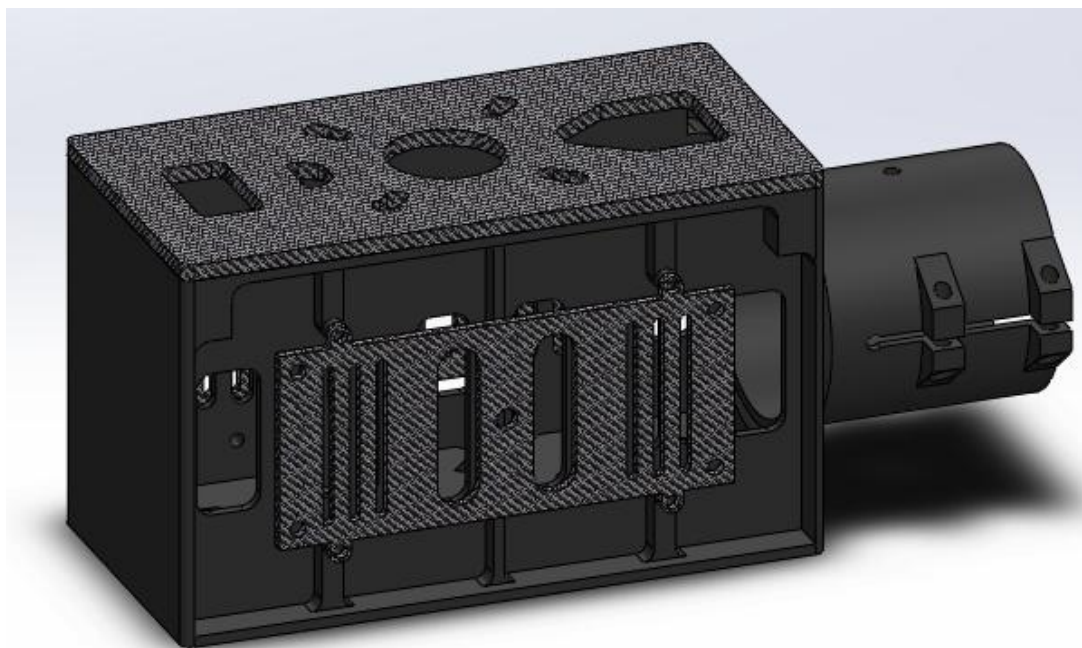


Рисунок 3.3 – Узел крепления мотора БВС

Нижний отсек (рис. 3.4) предназначен для размещения двух аккумуляторных батарей и датчика оптического потока. Конструкция включает три алюминиевые прямоугольные рамки, формирующие силовую связь нижнего и среднего отсеков и разделяющие пространство на два отдельных сегмента под аккумуляторы. Доступ осуществляется через откидывающуюся панель на защёлке. Общий вид конструкции нижнего отсека изображён на рисунке.

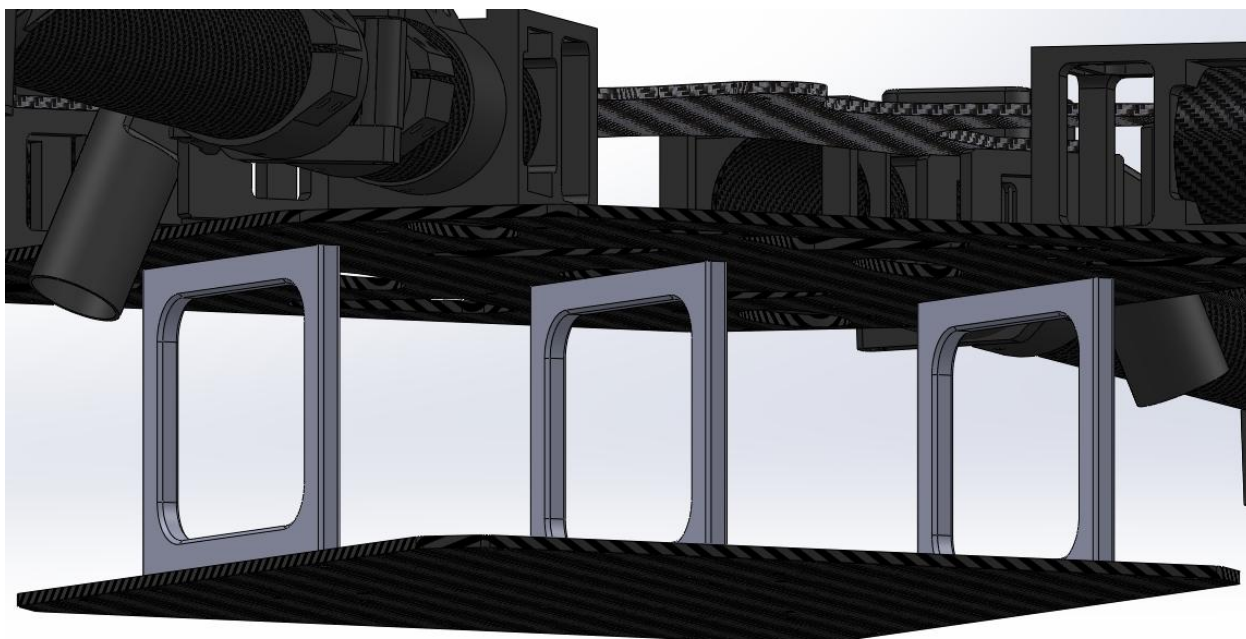


Рисунок 3.4 – Нижний отсек БВС

Силовая рама изготовлена из углепластиковых пластин, полученных методом вакуумной инфузии, а лучи – из углепластиковых трубок, выполненных методом намотки. Алюминиевые элементы применяются в силовых и интерфейсных узлах. Печатные пластиковые элементы используются в конструктивных деталях, не воспринимающих значительные нагрузки.

Лучи имеют складную конструкцию с шарнирным механизмом поворота, который обеспечивает складывание лучей в горизонтальной плоскости и фиксацию в рабочем положении посредством защёлки кинематического замыкания (рис. 3.5). Длинная секция луча несёт узел крепления моторов, короткая секция закреплена на среднем отсеке через конструктивный узел крепления. Узел складывания обеспечивает передачу нагрузки от винтомоторной группы на силовой каркас аппарата.

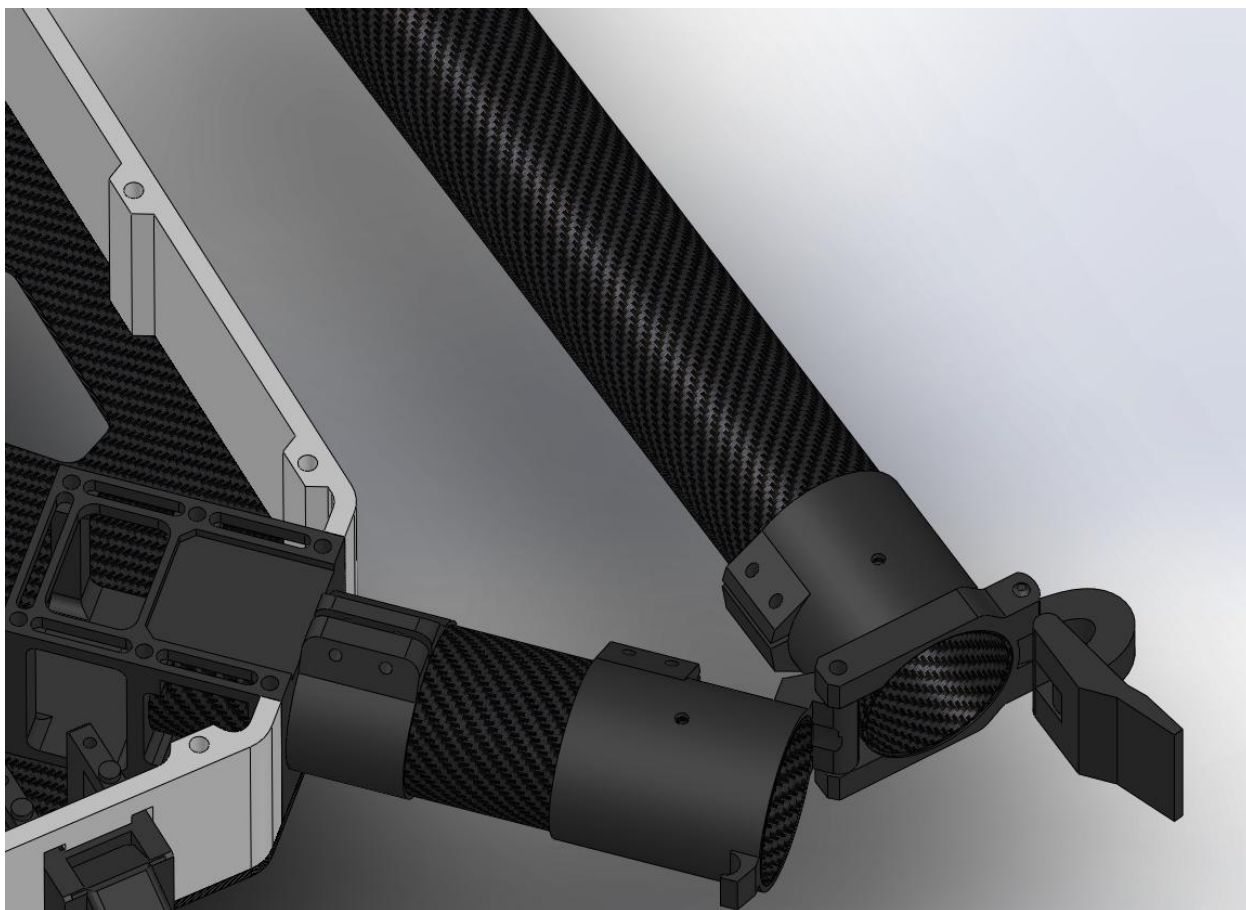


Рисунок 3.5 – Шарнирный механизм складывания лучей БВС

Опорная конструкция (шасси)

Опорная конструкция аппарата выполнена в виде съёмного шасси, состоящего из двух продольных опорных труб и поперечной соединительной перемычки. Шасси БВС крепится к силовой раме через штатные точки среднего отсека. Крепление осуществляется посредством двух составных узлов: внутренняя часть размещена в корпусе, наружная – на

углепластиковых трубках шасси. Узлы соединяются пружинной клипсой, обеспечивающей фиксацию шасси в рабочем положении и возможность быстрого демонтажа.

Основные элементы шасси БВС изготовлены из углепластиковых трубок, обеспечивающих низкую массу и достаточную жёсткость при восприятии нагрузок на посадке. Продольные опорные трубки распределяют вертикальные нагрузки по длине шасси, а поперечная перемычка формирует устойчивую опорную базу, снижая вероятность бокового опрокидывания при посадке на неровную поверхность. Конструкция обеспечивает геометрическую совместимость с системой установки сейсмического модуля, включая угол разнесения и необходимую высоту для размещения узла.

Крепления шасси интегрированы в силовую структуру среднего отсека и объединены переходной углепластиковой пластиной, обеспечивающей пространственную жёсткость в зоне восприятия БВС посадочных нагрузок.

Полная сборка силовой рамы с установленными лучами, узлами крепления моторов и винтомоторной группой приведена на итоговом виде модели аппарата (рис. 3.6).



Рисунок 3.6 – Сборка прототипа БВС

Интеграция системы установки сейсмического модуля

Интеграция системы установки сейсмического модуля в состав БВС выполнена с учётом требований к осевому совмещению, жёсткости крепления, монтажному объёму и обеспечению условий работы узла. Требования определяются конструкцией системы, включающей три направляющие, подвижную платформу и приводной модуль (рис. 3.7), а также необходимостью передачи осевых нагрузок при вкручивании датчика.

Размещение узла выполнено по центральной вертикальной оси аппарата. Геометрия нижней части рамы обеспечивает совмещение осей системы установки сейсмического модуля и корпуса без смещения вдоль продольной и поперечной осей. Доступный

монтажный объём соответствует требованиям по высоте и диаметру узла и не пересекается с размещением аккумуляторных батарей.

Крепление узла осуществляется на нижней силовой пластине, входящей в силовую схему рамы аппарата и обеспечивающей требуемую жёсткость при передаче осевых и крутящих нагрузок на силовые элементы корпуса. Конструктивные интерфейсные элементы рамы обеспечивают фиксированное расположение системы установки сейсмического модуля и предотвращают смещение узла под нагрузкой.

Высота опорной конструкции БВС обеспечивает необходимый зазор между поверхностью грунта и нижней плоскостью корпуса для работы узла. При этом шасси формирует требуемую опорную базу и гарантирует вертикальный просвет, достаточный для размещения и работы приводного модуля.

Электрические соединения узла размещены в зоне среднего отсека БВС, где расположены элементы силовой электроники и распределительные узлы. Управляющие цепи не пересекаются с областями размещения высокоточных датчиков верхнего отсека. Кроме того, конфигурация проводки согласована с требованиями системы установки сейсмического модуля по питанию и управлению.

Компоновка аппарата удовлетворяет требованиям системы установки сейсмического модуля по соосности, жёсткости крепления, габаритной совместимости и обеспечению условий работы узла. Интегрированное расположение узла и его взаимодействие с конструкцией аппарата представлены на итоговой модели БВС (рис. 3.7).

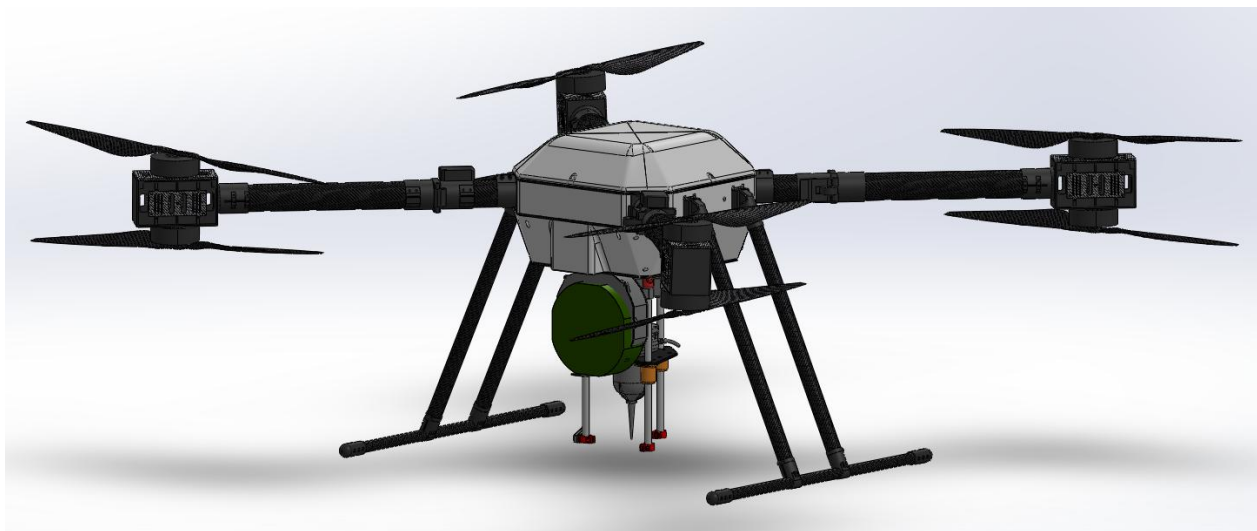


Рисунок 3.7 – Сборка прототипа БВС с закрепленной системой установки сейсмического модуля и сейсмическим модулем

3.7 Экспериментальная оценка доработанного прототипа БВС

Целью испытаний является проверка выполнения требований, предъявленных к доработанному прототипу БВС, включая:

- 1) Способность силовой рамы и опорной конструкции выдерживать эксплуатационные и квазистатические нагрузки;
- 2) Подтверждение необходимого уровня газа в режиме висения при полной взлётной массе;
- 3) Подтверждение длительности полёта в режиме висения;
- 4) Сопоставление экспериментальных величин с расчётными значениями, приведёнными в разделе анализа винтомоторной группы.

Испытания направлены на установление соответствия фактических параметров аппарата требованиям, сформированным в разделе требований к доработанному БВС, и подтверждение работоспособности конструкции при штатных нагрузках.

Испытания силовой рамы на статические нагрузки

Статические испытания выполнены с целью подтверждения способности силовой рамы аппарата воспринимать эксплуатационные нагрузки с нормативным коэффициентом запаса. Методика испытаний основана на подходе, применённом в предыдущем отчётном периоде, с использованием коэффициента запаса по статической нагрузке 2 относительно расчётной взлётной массы аппарата.

Силовая рама фиксировалась на испытательном стенде через штатные точки крепления двигателей. К нижней части рамы подвешивался груз, формирующий расчётную статическую нагрузку, определяемую как:

- Коэффициент запаса по статической нагрузке: 2;
- Расчётная взлётная масса аппарата: 25 кг;
- Итоговая статическая нагрузка: 50 кг.

Нагрузка прикладывалась ступенчато, с последовательным увеличением массы, до достижения полного значения. После достижения заданной нагрузки рама выдерживалась под нагрузкой в течение 30 минут. В процессе выдержки выполнялся визуальный контроль состояния силовых элементов, соединительных рамок, узлов крепления лучей и шасси. После снятия нагрузки выполнялась повторная проверка геометрии и состояния элементов конструкции.

Контролируемые параметры включали:

- Прогиб центральной части силовой рамы;
- Состояние углепластиковых пластин;
- Состояние алюминиевых рамок нижнего отсека;
- Состояние узлов крепления лучей;
- Состояние узлов крепления шасси;
- Наличие или отсутствие остаточной деформации после снятия нагрузки;

- Состояние крепёжных соединений.

При приложении нагрузки 50 кг зафиксирован максимальный прогиб силовой рамы величиной 3–3,5 мм в центральной части. Прогиб носил упругий характер: после снятия нагрузки геометрия конструкции полностью восстановилась, остаточная деформация не выявлена.

Разрушений углепластиковых элементов, расслоений, трещин или локальных дефектов в результате испытаний обнаружено не было. Алюминиевые рамки нижнего отсека БВС сохранили первоначальную форму; признаков пластической деформации не выявлено. При этом узлы крепления шасси не имеют повреждений, посадочные места не деформированы, а узлы крепления лучей сохранили жёсткость, смещений или изменений зазоров не зафиксировано. Резьбовые соединения и крепёжные элементы БВС после испытаний находились в затянутом состоянии, признаков ослабления не наблюдалось.

Сравнение измеренной геометрии рамы БВС до и после испытаний показало совпадение в пределах инструментальной погрешности.

Силовая рама аппарата выдерживает статическую нагрузку величиной 50 кг, соответствующую коэффициенту запаса 2 относительно расчётной взлётной массы. Остаточная деформация и повреждения конструктивных элементов отсутствуют. Испытания подтверждают достаточную жёсткость конструкции и соответствие требованиям прочности.

Исследование лётных характеристик разработанного БВС

Лётные испытания модернизированного БВС выполнены на полностью собранном прототипе с установленной системой установки сейсмического модуля, полезной нагрузкой 5 кг и аккумуляторной батареей 6S LiHV ёмкостью 50000 мАч. По результатам контрольного взвешивания взлётная масса аппарата составила 22 кг.

Испытания проводились в трёх режимах для определения:

- 1) Газа висения и тока: аппарат был приведён в режим устойчивого висения на высоте 3–4 м. Параметры тяги и тока фиксировались средствами автопилота, а результаты показали уровень газа висения: 54–55 % и суммарный ток винтомоторной группы 105–115 А.
- 2) Длительности полёта: испытания выполнены в режиме висения на высоте 3–4 м при полной штатной конфигурации аппарата. Кроме того полёт выполнялся до достижения минимально допустимого напряжения аккумуляторной батареи. Полученное значение длительности полёта составляет 27 мин 15 сек;
- 3) Параметров полёта в штатном режиме для проверки предельного газа: проведены лётные испытания в режиме штатной эксплуатации. Полёт

выполнялся с линейной скоростью не более 10 м/с, с разворотами, умеренными кренами и участками набора и снижения высоты. Логи автопилота использовались для анализа значений газа по каждому двигателю. Зафиксированы следующие параметры: кратковременные пики газа при наборе высоты составляют 74–77 %; шаз в установившемся горизонтальном полёте показывает уровень 52–58 %. Значения газа по каждому двигателю не превышали 80 % на всём протяжении полёта.

Необходимо отметить, что при первой апробации значения газа находятся в требуемом диапазоне 50–55 %, что соответствует расчётам винтомоторной группы, выполненным в предыдущих разделах. Фактическая масса 22 кг приводит к снижению необходимой тяги и размещает аппарат в нижней части допустимого диапазона газа.

Результаты лётных испытаний, представленные в таблице 3.3, продемонстрировали соответствие прототипа установленным требованиям.

Таблиц 3.3 – Результаты испытаний разработанного БВС

Показатель	Требуемое значение	Фактическое значение
Полная взлётная масса	не более 25 кг	22 кг
Полезная нагрузка	не менее 5 кг	5 кг
Длительность висения с полезной нагрузкой	не менее 25 мин	27 мин 15 сек
Суммарная статическая тяга	не менее 2× взлётной массы	обеспечена по расчёту
Рабочий диапазон газа в режиме висения	50–55 %	54–55 %
Предельный газ при штатной нагрузке	не более 80 %	77 %

Проведённая доработка конструкции прототипа БВС, включающая формирование силовой рамы трёхсекционной компоновки, разработку складных лучей, узлов крепления двигателей и опорной конструкции, обеспечила получение устойчивой и жёсткой платформы, совместимой с системой установки сейсмического модуля. Конструктивные решения рамы обеспечивают требуемую пространственную жёсткость, допускают установку сенсорного узла без изменения силовой схемы и обеспечивают передачу эксплуатационных нагрузок без возникновения остаточных деформаций.

Результаты статических испытаний подтвердили способность силовой схемы выдерживать нагрузку, эквивалентную двум значениям расчётной взлётной массы аппарата. Прогиб силовой рамы при нагрузке 50 кг не превышал допустимого значения, остаточные деформации отсутствовали, разрушений и дефектов конструктивных элементов не выявлено. Узлы крепления лучей, шасси и силовые элементы нижнего отсека сохранили

геометрию после снятия нагрузки, что свидетельствует о достаточной прочности применённых материалов и корректности выбранной схемы силового набора.

Лётные испытания подтвердили энергетическую и тяговую состоятельность аппарата при установленной системе установки сейсмического модуля. Газ висения составил 52–54 %, что соответствует установленному требованию 50–55 %. Длительность полёта в режиме висения составила 27–28 минут при взлётной массе 22 кг, что превышает требуемое значение не менее 25 минут. Испытания предельного газа в штатной эксплуатации показали, что максимальные значения газа не превышали 80 %, включая участки наборов высоты и горизонтального полёта на скоростях до 10 м/с. Полученные данные подтверждают соответствие фактических характеристик расчётным значениям, приведённым в разделе анализа винтомоторной группы.

Интеграция системы установки сейсмического модуля выполнена без нарушения силовой схемы, при этом обеспечены требования по центровке, жёсткости крепления и доступности монтажного объёма. Конструкция нижнего отсека обеспечивает размещение узла и передачу эксплуатационных нагрузок на силовые элементы рамы. Электрические соединения размещены в соответствии с требованиями системы установки модуля, без пересечения с зонами высокоточных датчиков и силовой проводки.

В совокупности выполненные конструкционные и экспериментальные работы подтверждают, что доработанный прототип БВС удовлетворяет предъявленным требованиям по массе, тягово-энергетическим параметрам, прочности силовой рамы и совместимости с системой установки сейсмического модуля. Оснований для корректировки выбранных технических решений на текущем этапе не выявлено.

4. РАЗРАБОТКА ПРОТОТИПА БВС, ОБЕСПЕЧИВАЮЩЕГО РЕТРАНСЛЯЦИЮ СИГНАЛОВ В ПРОЦЕССЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ГРУППЫ БВС И СЧИТЫВАНИЕ ДАННЫХ С СЕЙСМИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ

В 2025 году проведены работы по созданию беспилотного воздушного судна, выполняющего функции ретранслятора сигналов в составе группы БВС. Целью разработки является обеспечение устойчивой передачи данных и команд управления между БВС и наземной станцией, где канал связи между наземной станцией и задействованными аппаратами становится недостаточным для выполнения целевых задач. Для этого была разработана и внедрена архитектура коммуникационного взаимодействия, реализующая расширение зоны устойчивого обмена данными при совместном функционировании группы БВС.

4.1 Исходная архитектура и её системные ограничения

В исходной конфигурации, которая применялась в ходе испытаний предыдущего этапа, была реализована архитектура прямой связи между наземной станцией и отдельным БВС. Такая схема демонстрирует удовлетворительную работоспособность на малых дистанциях и в зоне прямой видимости, однако существенно ограничена по дальности устойчивого взаимодействия БВС. При удалении аппарата на расстояние свыше 2 км экспериментальные данные свидетельствуют о значительном снижении качества связи, а на дистанциях, превышающих 2,5 км, канал становится нестабильным и не обеспечивает выполнение поставленных целевых задач. В условиях реального применения данное ограничение затрудняет корректную работу системы обмена данными на больших расстояниях.

Кроме того, прямая схема связи не позволяет организовать полноценное взаимодействие нескольких БВС в составе группы. Существующий канал не рассчитан для функционирования в условиях распределённого взаимодействия, не поддерживает межаппаратный обмен данными и не обладает свойством масштабируемости при увеличении количества задействованных БВС. Наличие данных ограничений исключает применение базовой схемы для реализации сценариев группового управления и обуславливает необходимость разработки расширенного решения, основанного на принципах ретрансляции сигнала в мультиагентной среде.

4.2 Постановка задачи

Для получения целевых характеристик требуется проведение оценки стандартных режимов связи, применяемых в исходном оборудовании, и выполнить их сравнительный анализ. При недостаточной эффективности существующих стандартных решений необходимо разработать собственную архитектуру канала связи, обеспечить её реализацию на борту БВС и подтвердить работоспособность как лабораторных, так и в полевых условиях.

4.3 Разработка архитектуры канала связи

Испытания выполняются на комплекте радиомодулей RFDesign RFD900, выбранном в качестве базового средства обмена данными в составе группы беспилотных воздушных судов. Данные радиомодули обеспечивают одиночный и групповой обмен, а также поддерживают режим, заявленный производителем как обмен с включением промежуточного узла - ретранслятора. Наличие данных режимов является основанием для выбора текущего оборудования с целью разработки канала связи в мультиагентной среде.

На уровне данных ретрансляция осуществляется средствами программного обеспечения полетного контроллера, которое поддерживает пересылку служебных сообщений между подключёнными радиомодулями. В многоканальной конфигурации входящие данные могут быть направлены на другие радиомодули, что обеспечивает программируемую ретрансляцию данных. Такой принцип работает в рамках выбранного режима радиоканала и использует те же особенности доступа к общему коммуникационному ресурсу, что и в одноканальной конфигурации.

В рамках лабораторных и полевых испытаний использовался единый показатель *качества передачи данных*, рассчитываемый по отношению доставленных пакетов к суммарному числу отправленных. Показатель определяется выражением:

$$Q = \frac{N_{\text{recv}}}{N_{\text{recv}} + N_{\text{lost}}} \times 100\%,$$

где N_{recv} — число успешно принятых пакетов; N_{lost} — число потерянных или повреждённых пакетов.

В рамках сравнительного анализа проводятся испытания четырех схем взаимодействия, доступных в штатном функционале рассматриваемого оборудования:

- 4) Обмен один к одному (базовые параметры): содержит один ведущий модуль и одно ведомое устройство, при этом обмен данными выполняется по прямому каналу (рис. 4.1).

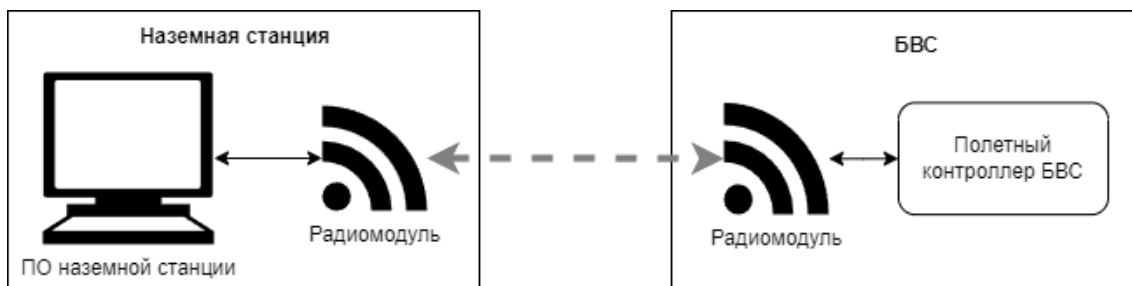


Рисунок 4.1 – Схема связи с один к одному

- 5) Обмен один к одному при повышенной скорости: включает один ведущий модуль и одно ведомое устройство, а параметры скорости увеличиваются для оценки поведения канала при повышенной нагрузке.
- 6) Групповой режим: обладает одним ведущим модулем и двумя (или более) ведомыми устройствами, использующими общий радиоканал (рис. 4.2).

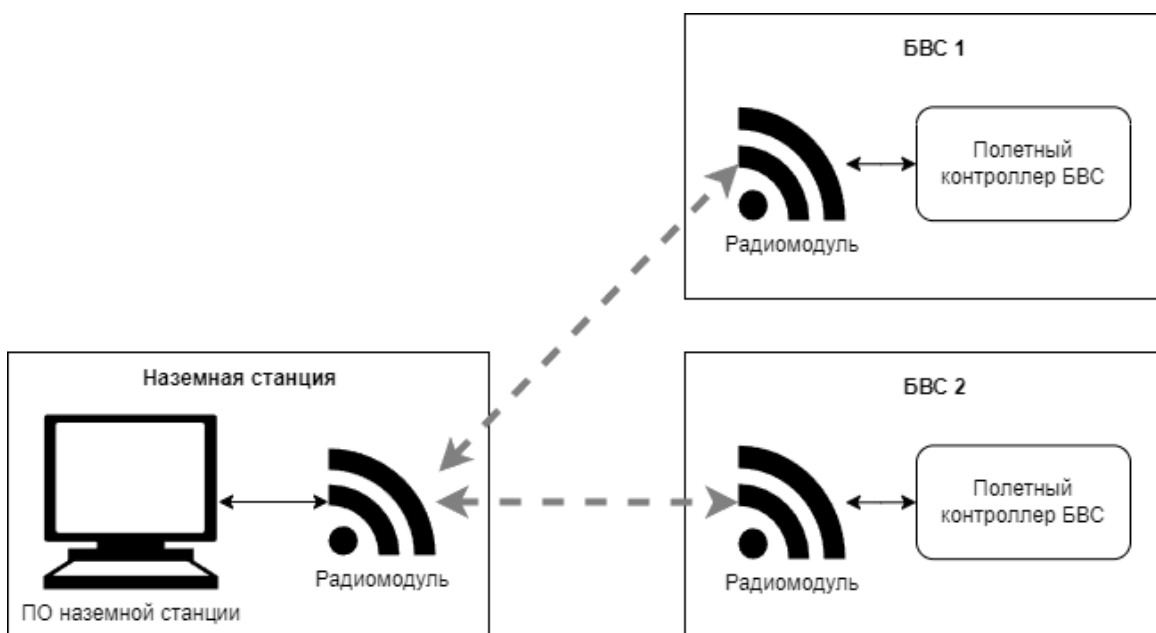


Рисунок 4.2 – Схема связи с групповым обменом

- 7) Групповой режим с промежуточным узлом-ретранслятором: содержит один ведущий модуль, один модуль-ретранслятор и два ведомых устройства; режим соответствует реализации ретрансляции в составе стандартного функционала оборудования (рис. 4.3).

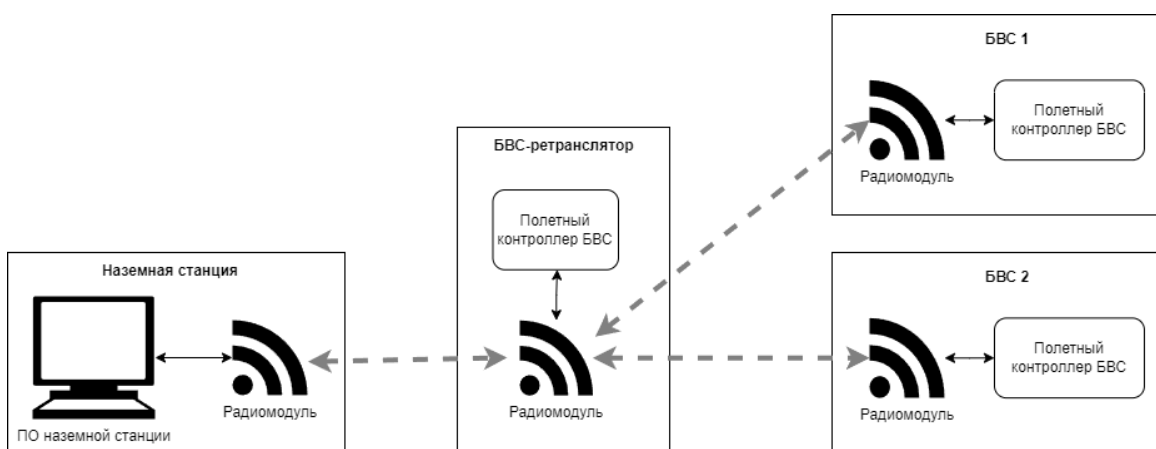


Рисунок 4.3 – Схема связи в групповом режиме с узлом-ретранслятором

В рамках сравнительного анализа выполнены лабораторные испытания рассмотренных выше схем в условиях контролируемой внутренней среды при следующих фиксированных параметрах:

- 1) Расстояние между устройствами: 3 м;
- 2) Высота расположения антенн расположены: 1,2 м;
- 3) Обзор между антеннами: прямой;
- 4) Закрепление устройств: стационарное;

5) Наличие внешних источников радиопомех: отсутствуют.

При проводимых экспериментах для каждой схемы выполнялись формирование требуемой конфигурации, запуск непрерывного обмена служебной информацией и регистрация следующих показателей: объём принятых данных; объём переданных данных; количество доставленных пакетов; количество потерянных пакетов; максимальный интервал между пакетами; скорость обмена; показатель качества канала. Результаты лабораторных испытаний представлены в таблице 4.1.

Результаты экспериментальных исследований показывают, что одиночный режим обмена данными обеспечивает устойчивую связь только при базовых параметрах сеанса. При повышении скорости передачи данных наблюдается существенный рост количества потерянных пакетов и значительное увеличение временных интервалов между последовательными передачами. Штатный групповой режим с использованием промежуточного узла-ретранслятора демонстрирует крайне низкую эффективность – значение показателя качества снижается до уровня порядка 14 %, сопровождаясь выраженной фрагментацией потока данных, что исключает возможность использования данной схемы для задач группового обмена.

Детальный анализ функционирования указанного режима с промежуточным узлом показывает, что все устройства функционируют в едином радиоканале, при этом промежуточный узел и ведомый аппарат конкурируют за доступ к общему каналу. Реализация ретрансляции выполнена как последовательная передача без механизма арбитражи или приоритезации трафика, что приводит к возникновению коллизий и блокировкам. Промежуточное устройство не обладает приоритетом на передачу ранее принятых данных, вследствие чего служебные сообщения не могут быть своевременно переданы. В результате временные интервалы между пакетами увеличиваются более чем в 6 раз относительно одиночного канала и достигают величин порядка 600 мс, что приводит к выраженной фрагментации потока данных и падению качества канала до указанного ранее уровня.

Таблица 4.1 – Результаты лабораторных испытаний в условиях контролируемой внутренней среды

Показатель	Одиночный обмен	Одиночный обмен (повышенная скорость)	Групповой режим	Групповой режим с промежуточным узлом
Объём принятых данных, байт	1 060 000	220 520	835 380	2 080 000
Скорость приёма, байт/с	1 860	843	1 260	1 470
Доставленные пакеты, шт.	34 145	7 490	10 577	68 722
Потерянные пакеты, шт.	145	322	539	432 390
Скорость приёма, пакетов/с	58	28	39	48
Макс. интервал между пакетами, мс	286	587	610	88
Показатель качества канала Q , %	99,6	95,9	95,2	13,7

Таким образом, существующие стандартные коммуникационные схемы не обеспечивают требуемых уровня устойчивости и надёжности передачи данных, не могут быть применены для построения канала связи в группе БВС для оперативного развертывания на дистанциях, достигающих 5 километров.

Сравнительный анализ стандартных схем показал, что одиночный режим обеспечивает устойчивость исключительно при ограниченной нагрузке, а групповой режим и режим с промежуточным узлом не достигают требуемой стабильности потока данных. Для построения канала связи группы БВС требуется архитектура, обеспечивающая распределение потоков передачи данных по изолированным коммуникационным каналам и исключающая конкуренцию нескольких устройств за общий радиоресурс.

Архитектура разрабатываемого решения формируется на основе следующих требований:

- 1) Исключение конкуренции нескольких агентов за один канал;
- 2) Разделение потоков обмена между наземной станцией, промежуточным узлом и функционирующими аппаратами;
- 3) Обеспечение устойчивой передачи данных в составе группы БВС;
- 4) Организация работы с промежуточным узлом без снижения качества канала;
- 5) Сохранение совместимости с используемыми в проекте аппаратными решениями.

Для выполнения требований была использована схема, в которой обмен данными между наземной станцией и промежуточным узлом выполняется по отдельному каналу, а взаимодействие между промежуточным узлом и рабочим аппаратом — по каналу группового обмена. Этот принцип позволяет разделить трафик, снять конкуренцию узлов и исключить блокировку сообщений в рамках общего радиоканала.

Предлагаемая архитектура включает два логически независимых канала:

- 1) Канал «наземная станция – промежуточный узел» обеспечивает передачу данных между наземной станцией и ретранслятором. В данном случае трафик канала включает: служебные данные управления, параметры обмена и сообщения автопилота.
- 2) Канал «промежуточный узел – рабочие БВС» обеспечивает обмен данными внутри группы БВС и позволяет подключать несколько аппаратов без ухудшения качества.

Промежуточный узел осуществляет функцию межканального шлюза, обеспечивая ретрансляцию служебных сообщений между независимыми коммуникационными каналами. Потоки данных, поступающие от рабочего БВС, перенаправляются в канал связи

с наземной станцией, а управляющие сигналы и сообщения телеметрии от наземной станции — в обратном направлении, к аппарату (рис. 4.4).



Рисунок 4.4 – Схема организации групповой передачи данных

Предложенная архитектура основана на функциональном и физическом разделении коммуникационных каналов: промежуточный узел оснащается двумя независимыми радиомодулями, каждый из которых функционирует в собственном режиме обмена, при этом каналы не разделяют общий эфир и полностью изолированы друг от друга. Маршрутизация служебных сообщений осуществляется программным обеспечением полетного контроллера промежуточного узла, который пересылает входящих данных между интерфейсами без изменения формата данных и объединения потоков. Канал связи между наземной станцией и промежуточным узлом работает в режиме одиночного обмена, тогда как канал между промежуточным узлом и рабочими БВС реализован в режиме группового взаимодействия; параметры скорости в обоих каналах подбираются с учётом нагрузки и адаптивности к трафику для достижения устойчивости обмена данными. Такая архитектура обеспечивает повышенную надёжность за счёт полного исключения конкуренции за радиоресурс, характерной для стандартных схем с единым каналом, позволяя потокам данных передаваться последовательно через промежуточный узел без взаимных помех и коллизий. Промежуточный узел выполняет симметричные функции приёма и передачи: он принимает данные телеметрии от рабочего БВС и ретранслирует её в канал наземной станции, а также получает управляющие команды от наземной станции и пересылает их целевому аппарату, обеспечивая тем самым двунаправленную, изолированную и устойчивую коммуникацию между участниками группы.

Лабораторные испытания выполнялись в условиях и по методике, полностью совпадающими с проведёнными ранее испытаниями стандартных схем связи, что

обеспечивает сопоставимость результатов и исключает влияние дополнительных факторов на оценку решения.

Промежуточный узел функционирует в двухканальной конфигурации, предусматривающей отдельный канал связи с наземной станцией и независимый канал связи с рабочим БВС. Обмен данными между участниками осуществляется последовательно через промежуточный узел без совместного использования общего радиоресурса. Полученные при экспериментальных исследованиях показатели представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Результаты лабораторных испытаний разработанной архитектуры

Показатель	Значение
Объём принятых данных, байт	257 950
Скорость приёма, байт/с	531
Доставленные пакеты, шт.	6 304
Потерянные пакеты, шт.	489
Скорость приёма, пакетов/с	18
Макс. интервал между пакетами, мс	495
Показатель качества канала Q , %	92,8

Двухканальная архитектура обеспечивает устойчивый обмен служебной информации в рамках которого отсутствует конкуренция устройств за общий радиоканал, а поток данных сохраняет свою равномерность. Экспериментальные результаты свидетельствуют о минимальном количестве потерянных пакетов, а временные интервалы между последовательными передачами находятся на уровне, характерном для одиночного канала связи. Итоговое значение показателя качества канала составляет 92,8%, что согласуется с результатами, полученными в режиме прямого одиночного обмена, и подтверждает высокую устойчивость и эффективность предложенной архитектуры.

Сводные данные по показателю качества исследованных архитектур представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Сводные результаты показателя качества в проведенных экспериментах

Показатель	Значение
Объём принятых данных, байт	257 950
Скорость приёма, байт/с	531
Доставленные пакеты, шт.	6 304
Потерянные пакеты, шт.	489
Скорость приёма, пакетов/с	18
Макс. интервал между пакетами, мс	495
Показатель качества канала Q , %	92,8

Предложенная архитектура подтверждает работоспособность в условиях лабораторных испытаний и удовлетворяет ранее определенным требованиям к устойчивости канала связи.

4.4 Прототип БВС-ретранслятора

Прототип беспилотного воздушного судна, выполняющего функцию промежуточного узла канала связи, формируется на базе типовой мультироторной платформы. Конструкция и состав бортового оборудования обеспечивают работу двух независимых каналов обмена служебной информацией и выполнение режима ежика межканальной ретрансляции данных.

Бортовая система связи оснащена двумя радиомодулями, каждый из которых подключён к отдельному интерфейсу полетного контроллера БВС и работает в независимом режиме обмена данными: первый модуль обеспечивает связь с наземной станцией, а второй – взаимодействие с рабочими беспилотными аппаратами группы.

Радиомодули размещаются по принципу исключения взаимного экранирование и минимизации влияния конструктивных элементов. Антенны устанавливаются на разнесённых точках корпуса БВС. Прототип оснащается автономным питанием радиомодулей и средствами контроля телеметрии, что обеспечивает устойчивое функционирование системы связи при выполнении полётных задач.

Промежуточный узел реализует функцию передачи служебной информации между каналами, а именно:

- 1) Приём данных с канала взаимодействия с рабочим БВС;
- 2) Передача этих данных в канал взаимодействия с наземной станцией;
- 3) Приём данных с канала наземной станции;
- 4) Передача данных в канал рабочего БВС.

Двухканальная конфигурация снимает ограничение стандартных схем, в которых несколько узлов конкурируют за общий радиоканал, при этом промежуточный узел обеспечивает отдельную работу двух потоков данных и формирует устойчивый канал связи в составе группы БВС.



Рисунок 4.5 – Прототип БВС-ретранслятора

Прототип БВС предусматривает интеграцию одноплатного вычислителя с модулем Wi-Fi, предназначенных для автоматизированного считывания данных после установки модуля.

Одноплатный вычислитель подключается к бортовой сети судна и функционирует независимо от системы управления полётом. Подсистема осуществляет автоматизированное сканирование доступных беспроводных сетей в зоне посадки, с последующей идентификацией и выделением сетей, принадлежащих сейсмическим модулям, на основании заранее определённых характеристик — таких как идентификатор сети и тип криптографической защиты. После выбора целевой точки доступа выполняется установление соединения и верификация доступности каталога с данными измерений. Затем инициируется сессия передачи файлов по протоколу FTP, осуществляется считывание файлов с измерительной информацией и их сохранение во внутреннем буфере бортовой системы для последующей ретрансляции или обработки.

Считывание данных выполняется при нахождении БВС в непосредственной близости от сейсмического модуля на высоте не более 10 метров, после завершения операции его установки. Объём и состав считываемых файлов определяется конфигурацией сейсмического модуля. Передача полученных данных на наземную станцию может выполняться по основному каналу связи после завершения полёта или при возврате БВС в зону стабильной радиосвязи.

Стоит отметить, что интеграция одноплатного вычислителя и модуля I-Fi не влияет на качество работы канала ретрансляции и резервного канала управления, так как подсистема считывания использует отдельный радиointерфейс и выполняет локальное хранение данных.

4.5 Полевые испытания прототипа БВС-ретранслятора

Полевые испытания проводились на открытом полигоне с целью подтверждения работоспособности разработанной архитектуры ретрансляции служебной информации в составе группы БВС и оценки устойчивости канала связи на оперативно значимых дистанциях, достигающих 5 км.

Основными задачами эксперимента являются подтверждение надёжного функционирования канала связи при выполнении рабочим БВС посадки в удалённых точках маршрута, проверка эффективности использования специализированного беспилотного средства в роли ретранслятора для расширения зоны устойчивого обмена данными, а также оценка стабильности и воспроизводимости разработанной архитектуры в условиях реальной эксплуатационной среды.

Рабочий БВС выполняет перелёты и посадки на последовательных точках маршрута, шаг между которым составляет 500 м, на дистанциях до 5 км.

В каждой точке последовательно выполняются следующие шаги:

- 1) Посадка БВС на поверхность;
- 2) Нахождение на поверхности в течение 10 с;
- 3) Регистрация показателя качества связи;
- 4) Переход к следующей точке.

Рабочий БВС оснащается резервным каналом дистанционного управления, который работает на малой дальности и предназначен для обеспечения управления аппаратом в зоне взлёта и посадки, а также для выполнения аварийного перевода в ручной режим при выполнении работ. Дальность устойчивого функционирования резервного канала ограничена радиусом порядка 500 м и не влияет на оценку надёжности основного канала связи, организованного посредством радиомодулей. Основной канал системы связи работает независимо от резервного и обеспечивает передачу служебной информации при выполнении задач ретрансляции. Оператор перемещается между точками маршрута и осуществляет контроль посадки рабочего БВС с использованием пульта дистанционного управления.

Испытания проводились в двух сериях: первая проводилась без задействования ретранслятора, вторая – с применением БВС-ретранслятора, удерживаемого на высоте до 145 м.

Посадочные точки расположены на участке с неоднородным рельефом без ярко выраженных препятствий. В момент посадки рабочий БВС находится на минимальной высоте, однако прямая видимость между наземной станцией и ретранслятором сохраняется за счёт высоты удержания промежуточного узла (до 145 м), что исключает влияние экранирования рельефа на оценку качества связи.

В процессе эксперимента показатель качества связи между рабочим БВС и наземной станцией фиксируется в каждой точке полетного задания.

В таблице 4.4 представлены результаты проведенных испытаний БВС-ретранслятора в составе мультиагентной группы.

Таблица 4.4 – Результаты испытаний БВС-ретранслятора

Показатель	Значение
Объём принятых данных, байт	257 950
Скорость приёма, байт/с	531
Доставленные пакеты, шт.	6 304
Потерянные пакеты, шт.	489
Скорость приёма, пакетов/с	18
Макс. интервал между пакетами, мс	495
Показатель качества канала Q , %	92,8

Полученные значения показателя качества в конфигурации с ретранслятором ($Q = 92\text{--}83\%$ на дистанциях 0,5–5,0 км согласуются с лабораторным результатом $Q = 92,8\%$ и демонстрируют ожидаемое снижение количественного показателя с увеличением дальности.

В ходе испытаний по прямой схеме связи зафиксировано устойчивое функционирование канала на ближних точках маршрута, однако при удалении аппарата на расстояние около 2 км наблюдается резкое снижение качества связи. При дальнейшем увеличении дистанции происходит полная потеря соединения с наземной станцией, что затрудняет выполнение посадок на удалённых точках маршрута.

При использовании БВС-ретранслятора, удерживаемого на высоте до 145 м, обеспечивается стабильная работа канала связи на всём диапазоне до 5 км, отсутствуют длительные разрывы соединения, а на максимальных дистанциях фиксируется лишь постепенное снижение показателя качества до уровня 83 %, что остаётся в пределах порога устойчивого обмена и не препятствует корректному выполнению полётного задания. При

этом сохраняется надёжное соединение даже после посадки рабочего аппарата в удалённых точках.

4.6 Обсуждение результатов и выводы

Проведённые лабораторные и полевые испытания демонстрируют, что стандартные режимы обмена радиомодулей обеспечивают устойчивость канала связи только при ограниченных нагрузках и малом числе узлов. В условиях увеличения количества устройств или необходимости работы на дальних дистанциях формируются конфликты доступа к каналу, снижается показатель качества связи, а в режиме с промежуточным узлом возникает фрагментация потока данных. По результатам лабораторного анализа стандартные схемы коммуникации не обеспечивают требуемой устойчивости для работы БВС в групповом режиме.

Разработанная двухканальная архитектура связи, включающая разделение потоков между наземной станцией, промежуточным узлом и рабочими аппаратами, устраняет выявленные ограничения. Разделение каналов исключает конкуренцию устройств за общий радиоканал и обеспечивает равномерный поток служебной информации. Экспериментальные исследования демонстрируют показатель качества $Q = 92,8\%$, характеризующий стабильную передачу служебной информации в двухканальной конфигурации.

Полевые испытания показывают, что в базовой конфигурации без ретрансляции стабильная работа канала сохраняется только на дистанциях до 2,0–2,5 км. При дальнейшем увеличении дальности канал связи теряется, что делает невозможным выполнение посадок рабочего БВС на удалённых точках маршрута. В конфигурации с БВС-ретранслятором устойчивый обмен данными фиксируется на всём диапазоне до 5 км, что соответствует максимально доступной длине полигона. Кратковременные провалы связи, наблюдаемые на максимальных дистанциях, не влияют на выполнение полётного задания и не приводят к потере управления аппаратом.

На основании полученных данных сделан вывод, что разработанный прототип БВС-ретранслятора и двухканальная архитектура связи обеспечивают устойчивую работу группы БВС на дистанциях до 5 км. Предложенная архитектура подтверждает работоспособность в лабораторных и полевых условиях и соответствует требованиям по обеспечению связи для задач группового взаимодействия и выполнения полётных заданий на удалённых участках в условиях неоднородного рельефа местности.

5. ПРОВЕДЕНИЕ СОВМЕСТНОЙ АПРОБАЦИИ РЕШЕНИЙ НА ОСНОВЕ РАЗРАБОТАННЫХ ЦИКЛОГРАММ, ПО И СЕЙСМИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ.

Профиль наблюдения составил Настоящий раздел содержит описание проведения СПб ФИЦ РАН и ООО «Р-сенсорс» совместной полевой апробации разработанных в рамках проекта технических и программных решений. Апробация включала выполнение двух экспериментальных комплексов (Эксперимент А и Эксперимент Б), направленных на подтверждение работоспособности реализованных циклограмм, программных подсистем и аппаратных модулей в условиях испытательного полигона. В ходе апробации использовались следующие программно-аппаратные компоненты комплекса: ПО наземной станции управления, ПО обработки данных предварительной разведки, ПО определения точек установки сейсмически сенсоров, ПО построения миссий БВС по циклограммам, ПО мониторинга функционирования группы БВС, ПО съёма сейсмических данных с использованием БВС, выполняющего функции ретранслятора, разведчика и извлекающего данные с сейсмических сенсоров, четырех БВС-носителей, оснащённых сейсмическими датчиками. Апробация проводилась на основе разработанных циклограмм предварительной разведки, определения точек установки, групповой доставки и перестановки, возврата и циклограммы съёма данных (рис. 1.1–1.3), представленных в отчете ранее. Настоящий раздел содержит описание условий проведения, методик выполнения и результатов Экспериментов № 1 и № 2.

5.1. Условия проведения экспериментов и состав комплекса

Апробация проводилась на испытательном полигоне в п. Сосново Ленинградской области на участке размером 500×500 м. Рельеф участка характеризуется наличием выраженной лесопосадки, участков хвойного подроста, локальных подъёмов и понижений, а также перепада высот порядка 20 м, что приводит к нарушению прямой радиовидимости между БВС и наземной станцией на отдельных участках. Грунт на территории испытательного полигона представлен супесью с включениями мелкофракционного щебнистого материала, обеспечивающей достаточную несущую способность для выполнения цикла установки сейсмического модуля без разрушения его резьбовой части и необходимости предварительного рыхления подстилающей поверхности. Апробация выполнялась в ноябре 2025 года, в условиях наличия устойчивого снежного покрова толщиной до 5 см. Стоит отметить, что верхний слой грунта сохранял пластичность, а признаки промерзания не наблюдались. Метеорологические условия соответствовали

эксплуатационным требованиям комплекса: атмосферные осадки отсутствовали, а скорость ветра не превышала 12 м/с для используемых типов БВС.

В состав программно-аппаратного комплекса, задействованного в ходе апробации, входили следующие компоненты:

- 1) Программное обеспечение наземной станции, включающее модуль обработки данных предварительной разведки, подсистему определения точек установки сейсмических сенсоров, программный компонент формирования полетных заданий по циклограммам, а также средства мониторинга группы БВС;
- 2) БВС, выполняющий функции ретранслятора, разведчика и извлечения данных, оснащённый штатными средствами передачи информации и программным обеспечением для выполнения миссий;
- 3) Четыре БВС-носителя, оснащённые системой установки сейсмического модуля и штатными средствами выполнения миссий в соответствии с разработанными циклограммами;
- 4) Цифровые сейсмические модули, интегрированные в состав БВС-носителей, которые предназначены для записи сейсмических данных и передачи фрагментов данных по беспроводному каналу связи для анализа корректности снимаемой информации.

5.2. Эксперимент № 1. Полевая апробация разработанных циклограмм, алгоритмов группового взаимодействия БВС и системы установки сейсмического модуля

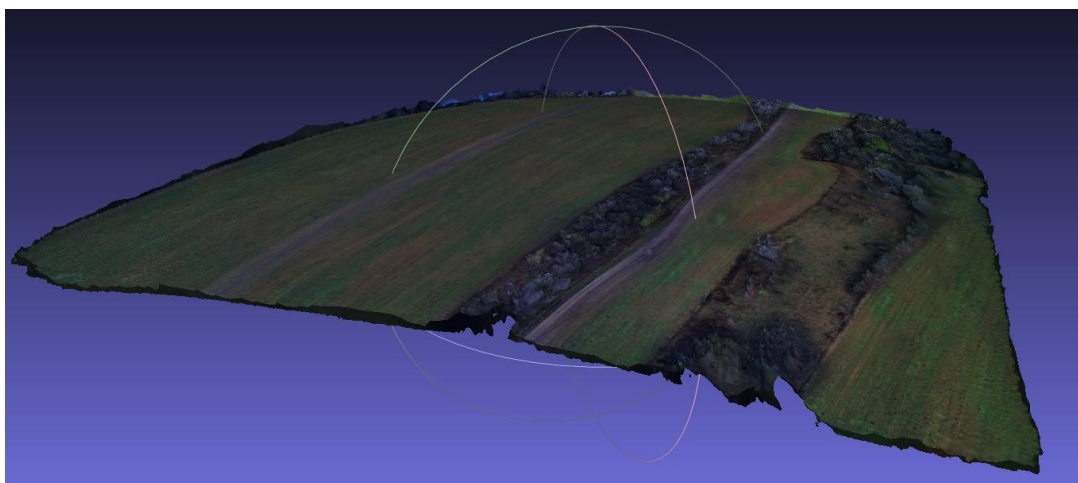
Первый из проведённых в рамках испытаний экспериментов направлен на апробацию технологической последовательности работы программно-аппаратного комплекса на испытательном полигоне и включает полный цикл операций: выполнение предварительной разведки, определение точек установки сейсмических модулей, групповую доставку посредством БВС-носителей, их последующую перестановку и возврат на позицию для съёма всех записанных данных. В ходе испытаний отрабатывалось согласованное взаимодействие всех подсистем комплекса при выполнении миссий в условиях ограниченной радиовидимости и неоднородного рельефа. Полевая апробация включает четыре этапа, соответствующие разработанным циклограммам:

- 1) Предварительная разведка и выбор точек установки сейсмодатчиков;
- 2) Расстановка БВС-носителей на четыре позиции;
- 3) Перестановка на оставшиеся точки маршрута;

4) Возвращение группы БВС в зону базирования.

Этап 1.1. Предварительная разведка и формирование точек установки

Методика выполнения этапа предусматривает использование БВС-разведчика с целью получения информации о рельефе, препятствиях и характеристиках участка, которые необходимы для определения точек установки сейсмических модулей. В соответствии с циклограммой предварительной разведки была построена миссия, включающая обход полигона по заданной траектории с обеспечением перекрытия зон съёмки.



а)



б)

Рисунок 5.1 – Территория проведения полевых апробаций: а) 3D-модель местности; б) ортофотоплан местности

Маршрут состоял из последовательности прямолинейных участков и разворотов, что обеспечивало требуемую плотность фотографического и лидарного покрытия указанной территории (рис. 5.1).

Ход выполнения этапа включал последовательную реализацию всех операций, заложенных в соответствующую циклограмму. Программное обеспечение наземной станции инициировало подключение к БВС-разведчику, осуществляло загрузку построенной миссии и запускало её автономное выполнение. В процессе полета аппарат двигался по заданному маршруту, обеспечивая непрерывную фотофиксацию местности и сбор данных с лидара. Одновременно ПО наземной станции отображало параметры полёта и телеметрические данные, фиксировало текущее положение аппарата на маршруте, контролировало корректное завершение каждого сегмента траектории и осуществляло запись данных для последующей обработки и анализа.

Работоспособность циклограммы и программного обеспечения была подтверждена набором метрик:

- 1) Корректность установления связи между ПО наземной станции и БВС;
- 2) Корректность передачи параметров миссии и подтверждение их получения на БВС;
- 3) Корректность загрузки и активации построенной миссии в автономном режиме;
- 4) Движение БВС по заданной траектории без отклонений, нарушающих геометрию маршрута;
- 5) Непрерывность передачи данных телеметрии, в том числе координат, высоты, параметров полёта и состояния каналов связи;
- 6) Полнота и целостность полученных визуальных и лидарных данных на всех участках маршрута;
- 7) Корректное завершение миссии в соответствии с циклограммой;
- 8) Точность последующей обработки данных в программной среде наземной станции ;
- 9) Корректность функционирования подсистемы определения точек установки сейсмических модулей, включая: исключение из рассмотрения участков лесопосадок, зон с крутыми уклонами и выраженными неровностями рельефа, выделение локаций, удовлетворяющих техническим требованиям к работе системы установки, а также формирование точек размещения исключительно в пределах открытых или частично открытых зон, обеспечивающих физическую доступность и надёжность монтажа.

Результаты проведенных испытаний заключались в успешном выполнении полного цикла миссии предварительной разведки и формировании достоверного набора исходных данных, которые необходимы для последующих этапов апробации (рис. 5.2).

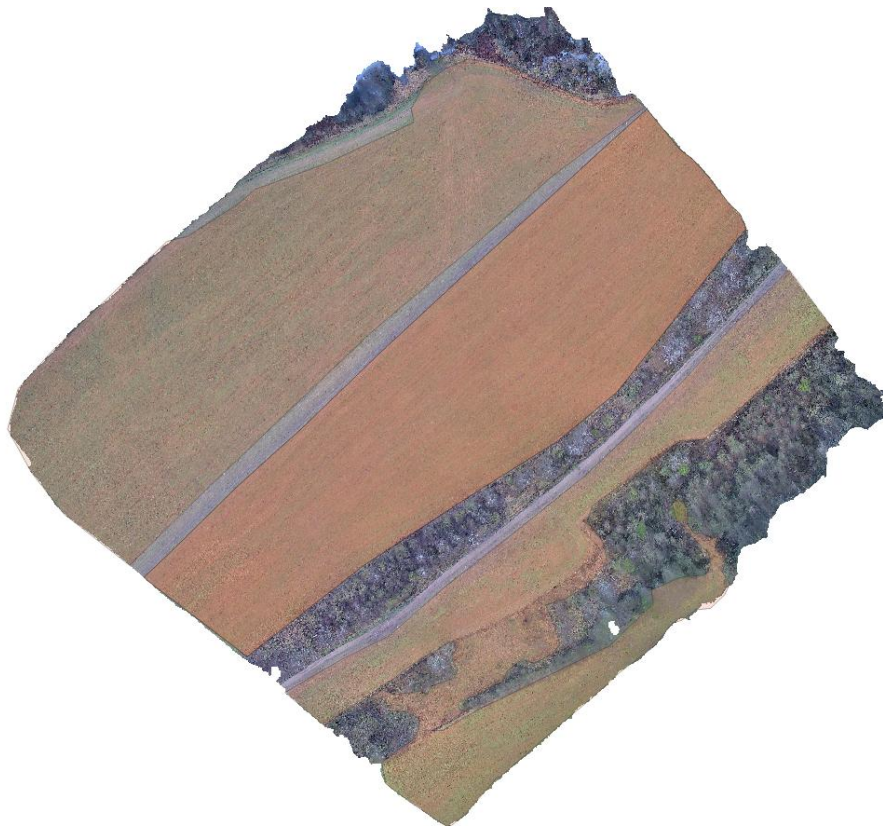


Рисунок 5.2 – Детектированные области, пригодные для посадки БВС с сейсмодатчиком

На основе комплексной обработки фотограмметрической и лидарной информации (рис. 5.3) было сформировано восемь точек установки сейсмических модулей, которые приведены с порядковыми номерами для экспериментов в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Точки для посадки БВС

№ точки в экспериментальном исследовании	Соответствующая точка для посадки БВС на рисунке 5.3
1	21
2	15
3	29
4	33
5	7
6	25
7	1
8	4

Все точки размещены в пределах областей, удовлетворяющих требованиям циклограммы: точки не попадают на участки лесопосадки, исключены зоны с выраженными препятствиями, обеспечено соответствие уклона грунта требованиям работы системы установки. Две из сформированных точек расположены в области отсутствия

прямой радиовидимости, что объективно обусловлено особенностями рельефа и заранее учтено в архитектуре планирования последующих этапов.

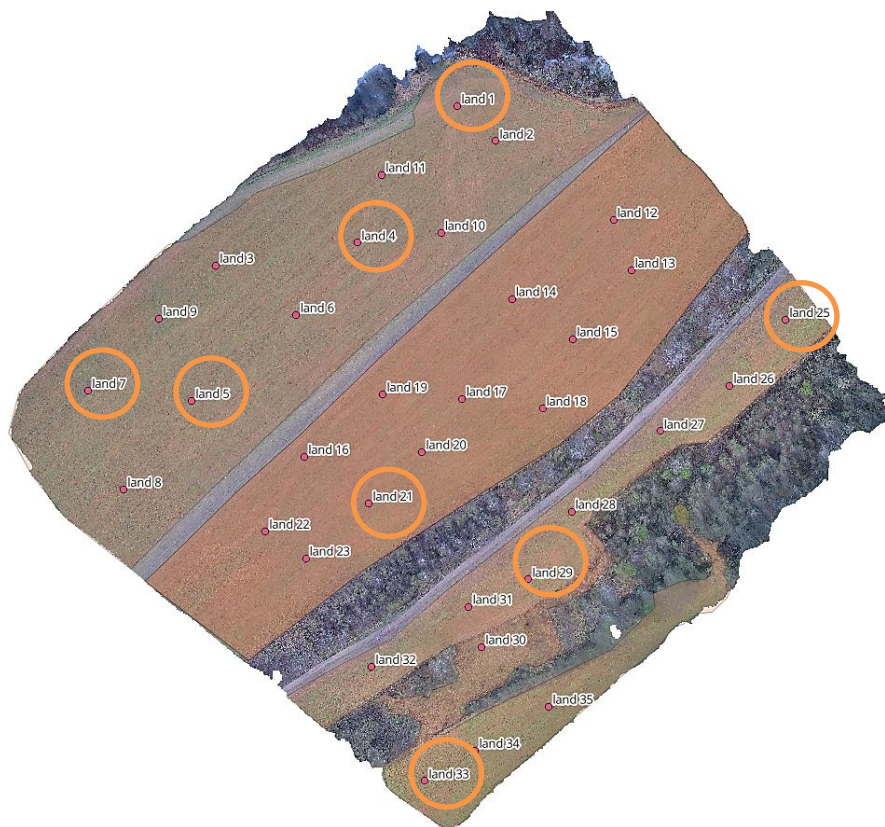


Рисунок 5.3 – Точки для посадки БВС на пригодных для установки областях

Этап 1.2. Расстановка БВС-носителей на точки 1–4

Этап 1.2 выполнялся после выбора восьми точек установки по результатам предварительной разведки, причисленных ранее. Для совместной апробации выбирались точки 1–4, расположенные в пределах полигона 500×500 м. Тем не менее, точка 3 оказалась расположена в зоне частично нарушенной прямой радиовидимости, обусловленной наличием лесополосы и рельефным перепадом высоты, достигающем порядка 20 м.

Порядок проведения этапа:

- 1) Оператор в ПО наземной станции осуществляет выбор точек 1–4 и формирует групповое полётное задание доставки сейсмических модулей:
 - Каждому из четырёх БВС-носителей назначена одна целевая точка установки.
 - БВС-ретранслятору задается фиксированная точка зависания над полигоном на высоте, обеспечивающей устойчивый приём и передачу данных для всех четырёх направлений полёта.

- ПО построения траекторий формирует для каждого БВС-носителя бесколлизийные маршруты с требуемым горизонтальным и вертикальным разнесением, без учёта рельефа, так как высота полёта существенно превышает перепады высот на полигоне.



Рисунок 5.4 – Полевые испытания в рамках этапа 1.2. Схема расстановки БВС

- 2) Сформированное групповое полётное задание последовательно загружается на БВС-ретранслятор и на каждый из четырёх БВС-носителей. Загрузка выполняется по циклограмме «Загрузка миссии на БВС»: инициализация загрузки, передача количества действий, последовательная передача действий с подтверждением со стороны борта.
- 3) После подтверждения загрузки миссий оператор с наземной станции подает команду одновременного запуска миссий:
 - БВС-ретранслятор выполняет взлёт, перемещение в точку висения и переход в режим удержания позиции;
 - Каждый БВС-носитель выполняет взлёт из стартовой точки, перемещение по заданной траектории, посадку в соответствующей точке 1–4, выключение двигателей, выполнение цикла работы системы установки сейсмического модуля и переход в режим ожидания.
- 4) Для каждой из четырёх точек посадки формируется запись о параметрах выполнения этапа, которая включает следующие показатели:

- Успешность посадки. Факт выполнения посадки в пределах рассчитанной площадки без повторного захода, без срабатывания аварийных режимов автопилота и без вмешательства оператора.
 - Успешность работы системы установки сейсмического модуля. Отмечается: запуск цикла заглубления после посадки; завершение цикла по сигналу концевого выключателя; отсутствие аварийных остановок привода и перегрузок по току. При наличии любого сбоя цикл помечался как неуспешный.
 - Заглубление до фаски корпуса. После завершения цикла установки проводится визуальный контроль положения корпуса сейсмического модуля относительно поверхности грунта с учётом наличия снежного покрова толщиной около 5 см. Показатель представлен в виде бинарной классификации: «да», если нижняя часть корпуса была заглублена до фаски и модуль контактировал с грунтом через винтовую часть, «нет» – в противном случае.
 - Показатель качества радиоканала (Q). Для каждого БВС-носителя после завершения посадки и стабилизации режима стоянки регистрируется короткий фрагмент телеметрии продолжительностью 10 с. По журналу обмена определяется: число успешно принятых пакетов N_{recv} и число потерянных или повреждённых пакетов N_{lost} . Показатель качества канала вычислялся по выражению $Q = \frac{N_{\text{recv}}}{N_{\text{recv}} + N_{\text{lost}}} \cdot 100$.
 - Наличие инцидентов. Отдельно отмечаются любые события, требующие вмешательства оператора или выхода за пределы штатных сценариев циклограмм: срабатывание аварийных режимов автопилота; отказ системы установки сейсмического модуля; потеря канала связи, требующая задействования резервного канала управления.
- 5) Полученный массив данных телеметрии и записей операций, сформированный по четырём БВС-носителям, был использован для формирования сводной таблицы результатов этапа 1.2 и последующего анализа степени выполнения каждой из заданных метрик.



Рисунок 5.5 – Полевые испытания в рамках этапа 1.2

По итогам выполнения этапа 1.2 БВС-ретранслятор на протяжении всего цикла испытаний стабильно удерживал заданную точку зависания и обеспечивал надежный двусторонний обмен информацией между наземной станцией и четырьмя БВС-носителями, включая фазы полёта и посадки в точке, частично экранированной лесополосой.

Все четыре БВС-носителя выполнили посадку в заданных точках 1–4 с первого захода. Автоматические режимы полёта и посадки отработали штатно, при этом не возникло необходимости в активации аварийных протоколов автопилота или переходе на резервный канал управления.

Система установки сейсмического модуля во всех случаях завершила цикл заглубления по сигналу концевого выключателя. Признаков перегрузки приводного механизма или принудительных остановов операции не зафиксировано. Визуальный контроль показал, что корпуса всех четырёх модулей были заглублены до контрольной фаски, несмотря на наличие снежного покрова и пространственную неоднородность плотности грунта на участке.

Измеренные значения показателя качества связи (Q) для БВС-носителей в точках 1–4 находились в диапазоне от 85 до 89 %. Более высокие значения зафиксированы для точек с прямой радиовидимостью между ретранслятором и носителем. Полученные значения сопоставимы с результатами ранее проведенных полевых испытаний одиночного канала с

ретранслятором на аналогичных дистанциях (90–92 %), а их незначительное снижение обусловлено одновременной работой четырёх аппаратов в группе.

В ходе этапа 1.2 не зафиксировано ни одного инцидента, потребовавшего вмешательства оператора. Все БВС после завершения цикла установки сохраняли устойчивое соединение с наземной станцией через БВС-ретранслятор, находясь в режиме стоянки в целевых точках.

Сводные результаты по всем верифицируемым метрикам для каждого из четырёх БВС-носителей приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Результаты этапа 1.2

№ БВС	№ точки	Успешность посадки	Успешность установки	Заглубление до фаски	Q, %	Инциденты
1	1	Успешно	Успешно	Да	89	Нет
2	2	Успешно	Успешно	Да	87	Нет
3	3	Успешно	Успешно	Да	87	Нет
4	4	Успешно	Успешно	Да	85	Нет

Интерпретация результатов этапа 1.2 свидетельствует о высокой надёжности и корректности реализованной групповой миссии: все четыре БВС-носителя успешно выполнили перемещение и посадку в соответствующие точки без единого отказа, что подтверждает корректность разработанных решений и бесколлизонность траекторий при одновременном функционировании группы. Система установки сейсмического модуля во всех случаях завершила операцию заглубления в штатном режиме, достигнув требуемого уровня до контрольной фаски корпуса, что подтверждает корректность конструктивных и силовых характеристик механизма условиям реального грунта, включая наличие снежного покрова. Показатель качества связи (Q) для всех БВС-носителей сохранялся на уровне, обеспечивающем устойчивый обмен служебной информацией и корректное выполнение полётного задания, в том числе в точке с частично нарушенной прямой радиовидимостью между БВС-носителем и наземной станцией, что обусловлено применением промежуточного ретранслятора. В ходе этапа не зафиксировано ни одного инцидента, связанного с нарушением требований безопасности или отклонением от сценариев, заложенных в циклограмму.

На основании полученных данных сделаны следующие выводы. Доставка четырёх сейсмических модулей группой БВС на точки 1–4, осуществленная с использованием БВС-ретранслятора и циклограммы «Установка, перестановка и возврат сенсоров», реализуется полностью автономно, без технических отказов и с минимальным участием оператора, ограничивающимся только инициацией и мониторингом миссии. Система установки сейсмического модуля демонстрирует высокую повторяемость результата, обеспечивая требуемое заглубление до фаски корпуса во всех точках первого цикла расстановки,

несмотря на неоднородность грунтовых условий и наличие снежного покрова на полигоне. Двухканальная архитектура связи с применением промежуточного БВС-ретранслятора сохраняет показатель качества связи (Q) на уровне, сопоставимом с одиночным режимом, даже при одновременной работе четырёх аппаратов-носителей, что подтверждает её пригодность для решения задач группового выполнения задач на заданных дистанциях.

Этап 1.3. Перестановка БВС-носителей на точки 5–8

Методика этапа 1.3 предусматривает выполнение второй итерации циклограммы групповой доставки и установки сейсмических модулей. Четыре БВС-носителя, ранее установившие модули в точках 1–4, получали новое полётное задание, направленное на перемещение и установку оборудования в точках 5–8. Данные точки расположены в других частях полигона, включая участки, которые прилегают к лесополосе и частично экранированы рельефом местности.



Автор фото: Горелик Глеб Дмитриевич

Рисунок 5.6 – Полевые испытания в рамках этапа 1.3

Порядок выполнения этапа строго соответствовал утвержденной циклограмме. По наземной станции сформировало групповое задание для точек 5–8 и осуществило индивидуальную загрузку миссии на каждый БВС-носитель. БВС-ретранслятор в течение всего этапа поддерживал заданную высоту над рабочей зоной, обеспечивая устойчивость коммуникационного канала. После начала миссии все аппараты выполняли операции параллельно и автономно: произвели демонтаж ранее установленного сейсмического

модуля путём извлечения установочной системы, осуществили взлёт с исходной позиции (точки 1–4), перемещение к новой целевой точке, посадку и повторную установку модуля посредством заглубления. После завершения цикла установки аппараты перешли в режим ожидания, сохраняя соединение с наземной станцией через ретранслятор.

В ходе этапа регистрируемые показатели соответствовали перечню, ранее утверждённому для этапа 1.2, и включали успешность выполнения посадки, корректность цикла установки, факт заглубления корпуса до контрольной фаски, значение показателя качества радиоканала (Q), а также отсутствие инцидентов, требующих вмешательства оператора или нарушающих безопасность полёта.

В рамках этапа дополнительно реализована верификационная процедура, направленная на оценку устойчивости коммуникационной архитектуры: после успешной посадки всех БВС-носителей в точках 5–8 был осуществлён временный вывод из эфира БВС-ретранслятора посредством его принудительной посадки. При этом линия прямой радиовидимости между БВС-ретранслятором и точкой 6 пересекала плотную лесополосу и препятствия на рельефе местности, формирующие экранирование сигнала. Зафиксированное в результате посадки БВС-ретранслятора резкое снижение показателя качества связи у аппарата, установленного в точке 6, полностью соответствовало прогнозируемому поведению канала и подтвердило корректность предложенной двухканальной архитектуры с активным ретранслятором.

Результаты этапа 1.3 (табл. 5.3) показали полное соответствие выполненных операций заданной циклограмме: все четыре БВС-носителя успешно выполнили перемещение и посадку на точки 5–8 без отклонений от расчётных траекторий. Циклы установки сейсмических модулей были завершены в штатном режиме с достижением требуемого уровня заглубления до фаски корпуса. Значение показателя качества связи (Q) варьировалось в диапазоне от 84 до 88 %, что свидетельствует о сохранении устойчивости коммуникационного взаимодействия даже в условиях частичного экранирования. Инцидентов, связанных с нарушением безопасности или требующих вмешательства оператора, в ходе этапа зафиксировано не было.

Таблица 5.3 – Результаты этапа 1.3

№ БВС	№ точки	Успешность посадки	Успешность установки	Заглубление до фаски	Q, %	Инциденты
1	5	Успешно	Успешно	Да	88	Нет
2	6	Успешно	Успешно	Да	85	Нет
3	7	Успешно	Успешно	Да	84	Нет
4	8	Успешно	Успешно	Да	86	Нет

Выводы по этапу 1.3 подтверждают высокую степень автономности и надёжности реализованного сценария группового взаимодействия. Перестановка БВС-носителей из исходных точек 1–4 в целевые позиции 5–8 выполнена в полном соответствии с циклограммой без необходимости вмешательства оператора. Система установки сейсмического модуля во всех случаях завершила цикл штатно, обеспечив достижение проектного заглубления до контрольной фаски корпуса, что подтверждает её работоспособность в условиях изменяющейся геометрии рельефа и наличия растительного покрова. Показатель качества связи (Q) сохранялся в диапазоне, достаточном для устойчивого выполнения миссий, при этом зафиксированное снижение значения в точке 6 соответствовало ожидаемому эффекту экранирования и не привело к нарушению функциональности системы. В ходе эксперимента не зафиксировано инцидентов, влияющих на безопасность или корректность выполнения этапа. Ключевым результатом стало экспериментальное подтверждение гипотезы, сформулированной в 2024 году: кратковременное снижение высоты ретранслятора и последующее снижение качества связи с точкой 6, обусловленное экранированием канала лесополосой и рельефом местности, с последующим восстановлением после возврата ретранслятора на первичную высоту, демонстрирует необходимость поддержания воздушного ретранслятора на высоте, превышающей уровень препятствий, для обеспечения устойчивости взаимодействия в условиях сложного рельефа местности.

Этап 1.4. Возврат группы БВС-носителей

Методика этапа 1.4 предусматривает выполнение заключительной части циклограммы групповой доставки, заключающейся в возвращении четырёх БВС-носителей и БВС-ретранслятора на стартовую площадку. Для выполнения данного этапа посредством ПО наземной станции формировалась групповая миссия возврата, включающая последовательное исполнение ряда автономных действий:

- 1) Подача команды демонтажа сейсмического модуля путём извлечения установочной системы для каждого аппарата-носителя;
- 2) Взлёт из соответствующих точек 5–8;
- 3) Перемещение по бесколлизийным маршрутам возврата, сформированных с учётом как вертикального, так и горизонтального пространственного разнесения траекторий с целью обеспечения безопасного и координированного перемещения группы аппаратов к зоне базирования.



Рисунок 5.7 – Полевые испытания в рамках этапа 1.3

После формирования миссий оператор инициировал их одновременное выполнение:

- 1) Четыре БВС-носителя выполняли взлёт, набор высоты и последующее движение по маршрутам возврата к стартовой площадке;
- 2) БВС-ретранслятор в течение всего этапа удерживал заданную точку висения, обеспечивая непрерывность и устойчивость канала связи между наземной станцией и группой носителей;
- 3) После завершения посадки всех БВС-носителей выполнялось снижение и посадка ретранслятора.

Оценка результатов этапа 1.4 проводилась по следующим метрикам: факт завершения миссии каждым БВС-носителем, наличие или отсутствие разрывов канала связи на траекториях возврата, а также фиксация инцидентов, повлиявших на ход выполнения операций.

Эксперимент показал, что все четыре БВС-носителя успешно завершили возврат и осуществили посадку на стартовой площадке в полном соответствии с утверждённой циклограммой. Данные телеметрии сохранялись на всём протяжении этапа без прерываний. Активация аварийных режимов автопилота, переходы на резервные каналы управления и критические отклонения от рассчитанных маршрутов зафиксированы не были. БВС-ретранслятор выполнил снижение и посадку после подтверждения возврата всех аппаратов-носителей, завершив тем самым полный цикл групповой миссии.

Результаты проведенной апробации представлены в таблице 5.4.

Таблица 5.4 – Результаты этапа 1.4

БВС	Завершение миссии	Потери канала связи	Инциденты
1	Да	Нет	Нет
2	Да	Нет	Нет
3	Да	Нет	Нет
4	Да	Нет	Нет
Ретранслятор	Да	Нет	Нет

По итогам данного этапа апробации была подтверждена полная автономность и надёжность завершающей фазы групповой миссии. Возврат четырёх БВС-носителей и БВС-ретранслятора был выполнен в строгом соответствии с циклограммой без необходимости вмешательства оператора. Сформированные маршруты возврата обеспечили корректное пространственное разнесение траекторий как по вертикали, так и по горизонтали, что исключило возникновение коллизий и взаимного пересечения путей следования аппаратов. В ходе выполнения этапа не зафиксировано ни одного инцидента, способного повлиять на безопасность полётов или нарушить корректность реализации операционной последовательности, что свидетельствует о высокой степени отработанности логики координированного группового взаимодействия в рамках полного цикла миссии.

Проведенный эксперимент подтвердил работоспособность и полную функциональную совместимость групповой конфигурации, состоящей из пяти беспилотных воздушных средств – четырёх БВС-носителей и одного многофункционального БВС, выполняющего совмещённые задачи ретрансляции, разведки и сбора данных.

Функционирование группы в параллельном режиме показало устойчивость всех процессов, связанных с построением и загрузкой миссий, синхронным запуском полётных заданий, движением по бесколлизийным маршрутам, а также выполнением циклов посадки и работы системы установки на восьми точках испытательного полигона. Все этапы группового взаимодействия были реализованы без вмешательства оператора, что свидетельствует о высокой степени автономности и надёжности созданной архитектуры управления.

БВС-ретранслятор обеспечивал стабильную передачу служебной информации между наземной станцией и БВС-носителями на всём протяжении эксперимента. Специально выполненный тест с принудительным снижением БВС-ретранслятора до уровня лесополосы привёл к прогнозируемому ухудшению качества связи в точке б, что подтверждает необходимость применения воздушного ретранслятора при работе группы в условиях неоднородного рельефа и экранирующих препятствий.

Система установки сейсмического модуля стабильно отработала все восемь циклов на двух последовательных итерациях групповой доставки, обеспечив достижение проектного заглубления до контрольной фаски корпуса в каждой точке, несмотря на неоднородность грунтовых условий и наличие снежного покрова.

Все соответствующие части утвержденных циклограмм — подготовка, передача и запуск миссий, выполнение групповых траекторий, параллельные посадки, операции заглубления и извлечения, а также групповой возврат БВС — подтверждены в условиях натуральных полевых испытаний. Эксперимент № 1 демонстрирует, что совокупность разработанных циклограмм функционирует согласованно в составе группы БВС и обеспечивает выполнение полного технологического цикла установки восьми сейсмических модулей на испытательном полигоне в строгом соответствии с заданными требованиями.



Рисунок 5.8 – Полевые испытания в рамках Эксперимента № 1

5.3 Эксперимент № 2. Полевая апробация процесса съема данных и функционирования цифровых сейсмических модулей

Данные натурные испытания проводились после завершения работ по предыдущему эксперименту и направлены на апробацию работы сейсмических модулей для заглубления в грунт, предварительную проверку функционирования каналов передачи коротких

фрагментов данных и запись полного массива данных при воздействии вибраций. В данном эксперименте функции БВС-съёмщика выполняет тот же аппарат, который в рамках реализованной ранее апробации использовался БВС, выполняющий совмещённые задачи ретрансляции и разведки. Смена функциональной роли осуществляется программно в соответствии с утверждённой циклограммой сбора данных. Эксперимент № 2 включал линейное размещение четырёх БВС-носителей, выполнение циклограммы съёма данных, запуск контролируемого вибрационного воздействия на поверхность грунта с последующей регистрацией сейсмических данных и завершающим этапом возврата аппаратов с извлечением записанной информации для последующего анализа.

Этап 2.1. Расстановка четырёх БВС-носителей

Методика этапа предусматривала размещение четырёх БВС-носителей на выделенном участке полигона в линейной конфигурации с межаппаратным интервалом, составляющим от 20 до 30 м. Каждый аппарат выполнял автономную посадку на заданную позицию и инициировал цикл функционирования системы установки сейсмического модуля в строгом соответствии с утверждённой циклограммой. После завершения цикла установки сейсмический модуль автоматически переходил в режим непрерывной записи данных, осуществляя запись на встроенную SD-карту. Все этапы операций, включая управление полётами, инициализацию циклов установки и контроль состояния аппаратов, осуществлялись оператором посредством программно-аппаратного комплекса наземной станции.

В ходе первого этапа апробации регистрировались следующие ключевые параметры: фактическая геометрия линейного размещения БВС-носителей на площадке, факт штатного завершения цикла установки сейсмического модуля каждым аппаратом, достижение проектного заглубления корпуса модуля до контрольной фаски и успешная активация режима непрерывной записи данных на всех сейсмических модулях.

Результаты этапа подтвердили корректность выполнения операций – все четыре БВС-носителя были размещены на площадке в строгом соответствии с требуемой линейной конфигурацией с соблюдением заданного межаппаратного интервала. Циклы установки сейсмических модулей завершились штатно во всех случаях, обеспечив достижение необходимого уровня заглубления до фаски корпуса. На каждом из сейсмических датчиков был успешно инициирован режим непрерывной регистрации данных. Инцидентов, потребовавших вмешательства оператора или нарушивших последовательность выполнения операций, зафиксировано не было.

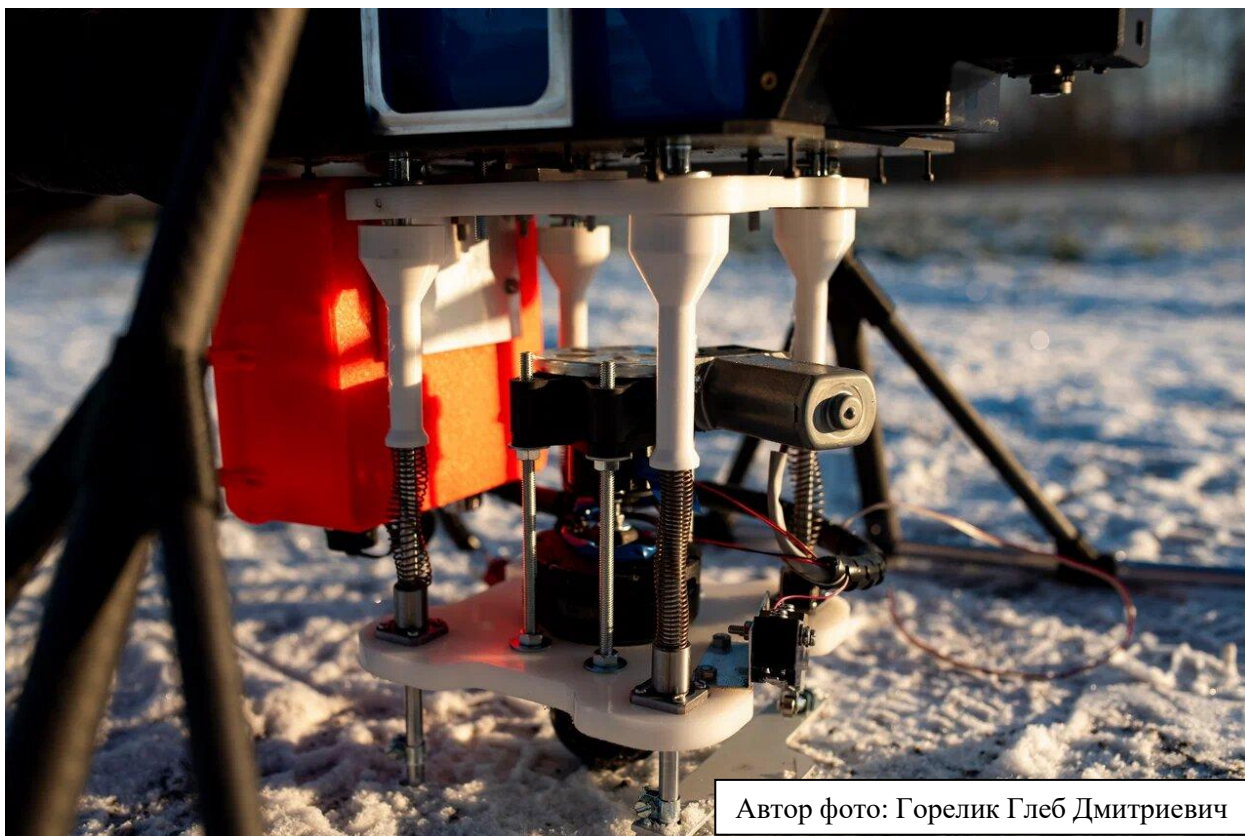


Рисунок 5.9 – Полевые испытания в рамках этапа 2.1. Заглубление сейсмодатчика посредством разработанного механизма

Этап 2.2. Предварительный съём коротких фрагментов данных с установленных сейсмических модулей

Методика второго этапа предусматривала выполнение циклограммы сбора данных посредством одного БВС-съёмщика. По завершению установки четырёх сейсмических модулей на предыдущем этапе оператор в соответствии с циклограммой на наземной станции формировал полетное задание БВС-съёмщика. Миссия включала последовательный обход всех точек размещения четырёх БВС-носителей, установление соединения по беспроводной связи с файловой системой каждого сейсмического модуля и копирование короткого участка файла непрерывной записи в формате .siv.

Последовательность выполнения этапа предусматривала формирование задания БВС-съёмщика в программном обеспечении наземной станции, которое содержало четыре точки зависания рядом с установленными модулями, а также команду на установление беспроводного соединения с их файловыми системами. Сформированное задание загружалось на борт аппарата-съёмщика, после чего подтверждался приём и корректность интерпретации всех команд. Далее БВС выполнял взлёт и переход в район расположения первого сейсмического модуля, где осуществлял стабилизацию в режиме зависания и инициировал установление защищённого беспроводного соединения с файловой системой

модуля. По завершении подключения производилось копирование короткого фрагмента файла непрерывной записи длительностью 10 секунд, который сохранялся во внутреннюю память БВС-съёмщика. Необходимо отметить, что передача данных в реальном времени на ПО наземной станции не предусматривалась. Затем аппарат последовательно переходил к следующим точкам, повторяя аналогичную процедуру для каждого из четырёх сейсмодатчиков. По завершении цикла сбора данных БВС возвращался на стартовую площадку, где оператор извлекал все сохранённые фрагменты и выполнял их анализ с целью подтверждения работоспособности каждого сейсмического модуля и целостности записанной информации.



Рисунок 5.10 – Полевые испытания в рамках этапа 2.2.

Для этапа фиксировались значения следующих параметров:

- 1) Факт установления соединения;
- 2) Время установления соединения;
- 3) Успешность копирования короткого фрагмента;
- 4) Длительность фрагмента;
- 5) Объём фрагмента;
- 6) Количество попыток подключения;
- 7) Результат последующей проверки фрагмента на наземной станции.

Результаты рассматриваемого этапа апробации показали, что соединение с каждым из четырёх сейсмических модулей устанавливалось с первой попытки. При этом фрагменты длительностью 10 секунд были успешно скопированы для всех четырёх модулей, а после возврата БВС-съёмщика – извлечены и проанализированы оператором. На всех фрагментах присутствовали ожидаемые сигналы, которые соответствовали корректному функционированию сейсмических модулей. В ходе исследования не были выявлены признаки отказов, а инциденты, связанные с некорректным установлением соединения или чтения файла, отсутствовали.

Сводные результаты по этапу 2.2 приведены в таблице 5.5.

Таблица 5.5 – Результаты этапа 2.2

Сейсмический модуль	Время установления соединения, с	Длительность фрагмента, с	Объём фрагмента, кБ	Сигнал присутствует
1	2,3	10	134	Да
2	2,7	10	128	Да
3	3,1	10	139	Да
4	2,5	10	131	Да

Выводы по этапу 2.2 подтверждают полную работоспособность разработанной методики сбора данных и корректность функционирования аппаратно-программного взаимодействия между сейсмическими модулями и БВС-съёмщиком в условиях реального полигона. Все четыре сейсмических модуля обеспечили стабильный и корректный доступ к файловой системе по беспроводному каналу при первом же сеансе подключения БВС-съёмщика. Извлечение коротких фрагментов записей данных выполнено без ошибок, с сохранением заданной длительности в 10 секунд и стабильным объёмом информации, соответствующим ожидаемым характеристикам сигнала. Анализ полученных фрагментов после возвращения БВС-съёмщика подтвердил наличие корректно записанных сейсмических сигналов на всех модулях и не выявил признаков сбоев в работе каналов записи или повреждения данных. Таким образом, этап 2.2 подтвердил работоспособность циклограммы съёма данных и корректность функционирования канала «сейсмический модуль – БВС-съёмщик» в полевых условиях.

Этап 2.3. Проведение вибрационного воздействия и получение полного массива данных

Рассматриваемый этап предусматривал выполнение вибрационного воздействия вблизи установленных сейсмических модулей и последующее получение полного массива данных, записанного в режиме непрерывной записи. После завершения предыдущего этапа четыре БВС-носителя оставались в точках установки, а сейсмические модули продолжали

функционировать в режиме непрерывной регистрации, обеспечивая запись данных внешнего возбуждения.

Для реализации вибрационного воздействия были выбраны четыре точки, расположенные параллельно линии размещения БВС-носителей на расстоянии около 10 м от каждого сейсмического модуля. Исполнитель последовательно обходил указанные точки и наносил удары по поверхности грунта в соответствии с утверждённым регламентом полевого испытания. Параметры количества и характера ударных импульсов в рамках данного раздела не детализируются, поскольку их анализ предусмотрен в разделе обработки и интерпретации данных.

По завершении воздействия оператор инициировал возврат БВС-носителей. Каждый из них выполнил взлёт, набор высоты и возврат на стартовую площадку в соответствии с утвержденной циклограммой. После посадки оператор последовательно подключался к файловой системе сейсмического, интегрированного в борт каждого БВС-носителя, и извлекал полный файл непрерывной записи, содержащий зарегистрированные данные за весь период эксперимента, включая моменты ударного возбуждения.

В рамках этапа в качестве ключевого результативного показателя фиксировалось наличие корректно сформированного и полного файла непрерывной записи на каждом сейсмодатчике.

Результаты этапа подтвердили, что вибрационное воздействие было успешно выполнено во всех четырёх зафиксированных точках, возврат БВС-носителей выполнен без отклонений, а на всех сейсмических модулях присутствовали корректно сформированные файлы непрерывной записи. Случаев отсутствия, повреждения или фрагментации записей не зафиксировано.

Сводные результаты по этапу 2.3 приведены в таблице 5.6.

Таблица 5.6 – Результаты этапа 2.3

Сейсмический модуль	Наличие полного файла записи
1	Да
2	Да
3	Да
4	Да

Выводы по этапу 2.3 подтверждают полную работоспособность комплекса функций, связанных с эксплуатацией сейсмических модулей в полевых условиях: на всех четырёх сейсмических модулях были сформированы полные файлы непрерывной записи, охватывающие весь период эксперимента, включая моменты вибрационного воздействия. Режим непрерывной записи данных сохранялся до момента возврата БВС-носителей на стартовую площадку. Тем самым этап 2.3 подтверждает работоспособность режимов

установки, непрерывной записи и получения данных сейсмических модулей в полевых условиях на основе реализованных циклограмм.



Рисунок 5.11 – Полевые испытания в рамках этапа 2.3

Эксперимент № 2 подтвердил работоспособность разработанной системы в условиях реальных полевых испытаний: четыре БВС-носителя, оснащенные сейсмическими модулями, обеспечили устойчивую работу в режиме непрерывной записи данных при установке на грунт в условиях снежного покрова. Во всех точках цикл установки был завершен штатно, с достижением заглубления корпуса до контрольной фаски и последующей инициацией непрерывной записи без необходимости вмешательства оператора.

Реализация циклограммы съёма данных с использованием специализированного БВС-съёмщика обеспечило корректный процесс доступа к файловой системе всех сейсмических модулей по беспроводному каналу, извлечение коротких фрагментов фиксированной длительности и их последующую проверку на наземной станции. Отказов при установлении соединения, чтении или передаче данных зафиксировано не было, что свидетельствует о высокой корректной работе канала «сейсмический модуль – БВС-съёмщик» в условиях полигона.

Проведение контролируемого вибрационного воздействия в непосредственной близости от установленных модулей с последующим возвратом БВС-носителей позволило успешно получить полные файлы непрерывной записи со всех четырёх сейсмодатчиков. Наличие корректно сформированных, неповрежденных файлов на каждом носителе подтвердило стабильность как режимов непрерывной записи, так и процедуры постэкспериментального извлечения данных.

В целом Эксперимент № 2 показал, что предложенная архитектура комплекса обеспечивает выполнение полного цикла полевых исследований без технических отказов и полностью соответствует заложенным проектным принципам функционирования.

5.4 Выводы по результатам совместной полевой апробации разработанных циклограмм, группового взаимодействия БВС и функционирования сейсмических модулей

Проведённая совместная апробация показала, что разработанный программно-аппаратный комплекс обеспечивает выполнение полного технологического цикла полевых работ на испытательном полигоне – от этапа предварительной разведки и автоматического выбора точек установки до групповой доставки, перестановки сейсмодатчиков и получения полного массива зарегистрированных сейсмических данных.



Рисунок 5.12 – Полевые испытания разработанного программно-аппаратного комплекса

Эксперимент № 1 подтвердил согласованную работу пяти беспилотных воздушных судов в составе группы, включая БВС-ретранслятор и четырех БВС-носителей. Циклограммы предварительной разведки, определения точек, групповой доставки, перестановки и возврата реализованы в полевых условиях без отказов и без необходимости вмешательства оператора. Применение воздушного ретранслятора обеспечило устойчивое качество канала служебной связи даже в зонах с частично нарушенной прямой радиовидимостью, что экспериментально подтвердило обоснованность предложенной двухканальной архитектуры связи и ранее сформулированный вывод о необходимости использования ретранслятора, удерживаемого на высоте выше препятствий, при работе в условиях пересечённого рельефа.

Система установки сейсмического модуля продемонстрировала устойчивую работу на восьми точках установки, несмотря на неоднородность грунта и наличие снежного покрова толщиной до 5 см . Во всех случаях было достигнуто требуемое заглубление до контрольной фаски корпуса, что подтверждает работоспособность механической части и корректность принятых конструкторских решений для данного типа грунта и условий эксплуатации.

Эксперимент № 2 расширил полученные результаты, подтвердив работоспособность сейсмических модулей как средства длительной непрерывной записи, а также позволили

апробировать функционирование циклограммы съёма данных. Процедуры извлечения как коротких контрольных фрагментов, так и полных массивов информации были выполнены без сбоев. Возможность оперативной проверки работоспособности всех каналов регистрации посредством коротких фрагментов перед проведением ударного воздействия обеспечила уверенность в целостности последующих измерений, а успешное получение полных файлов после завершения эксперимента сформировало надёжную основу для последующей обработки и интерпретации сейсмических данных.

В совокупности результаты проведенной серии экспериментов подтверждают, что разработанные циклограммы, ПО, БВС и сейсмодатчики функционируют как единый комплекс, обеспечивая автономное выполнение полевых задач в условиях испытательного полигона со сложным рельефом и ограниченной радиовидимостью.

6. ОБРАБОТКА ДАННЫХ ПОЛЕВОЙ АПРОБАЦИИ МЕТОДАМИ ВОЛНОВОЙ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ НА РАССЕЯННЫХ ВОЛНАХ

Векторная сейсморазведка на рассеянных волнах является методом нового поколения, основанным на обращении волнового поля во времени и сейсмологографической интерферометрии, который обеспечивает пересчет исходных сейсмических данных МОГТ в векторные данные «общей точки изображения» с сохранением высокоточной информации об амплитудах, фазах и частотах кругового вращения двух взаимосвязанных векторов: вектора падающей волны и вектора обращенной во времени «обратной» волны. В разделе подробно рассмотрены этапы обработки полученных в результате выполнения полевых апробаций данных с сейсмических модулей.

6.1. Предварительная обработка сейсмических данных 2D/3D

Полевые данные для обработки методом векторной сейсморазведки на рассеянных волнах требуют предварительной подготовки с использованием ряда стандартных подходов.

Предварительная обработка сейсморазведочных данных выполняется для очищения данных от помех, которые могут дать нежелательные артефакты на атрибутах векторной сейсморазведки. Кроме того, требуется выравнивание амплитуд в поверхностно-согласованном ключе – анализ скоростей суммирования, на основе которых в дальнейшем строится начальная глубинно-скоростная модель и расчет высокочастотной статики.

Стандартный для векторной сейсморазведки граф обработки содержит следующие этапы:

1. Ввод и анализ данных
2. Расчет априорной суммы (brute stack) с грубыми скоростями, со статикой за рельеф, с примененным АРУ и жёсткой полосовой фильтрацией.
3. При необходимости расчет статики по первым вступлениям
4. Итеративный анализ скоростей/остаточной статики
5. Ввод поправки за сферическое расхождение
6. Поверхностно-согласованное выравнивание амплитуд
7. Удаление высокоамплитудных помех и поверхностной волны с помощью медианной пороговой фильтрации в частотно-временной области и наклонной FX-фильтрации в сортировке ОПВ
8. Поверхностно-согласованная деконволюция
9. Остаточное шумоподавление в разных сортировках при необходимости
10. Сборка контрольной суммы
11. Преобразование координат и передача данных на расчет данных
12. При необходимости контрольная временная/глубинная миграция Кирхгофа

Необходимо отметить, что в зависимости от передаваемых данных граф может видоизменяться.

Предварительная обработка данных подразделяется на 2 основных этапа – кинематическую и сигнальную.

Кинематическая обработка, при которой происходит абстрагирование от динамических элементов сигнала (частотный состав, форма импульса, распределение амплитуд) и основное внимание уделяется кинематике отражений:

1) Априорная статика: рассчитывается из значений превышений на заданный плоский уровень (в стандартном варианте) или из отметок первых вступлений прямой и головных волн, по которым строится модель ВЧР (в варианте со сложным приповерхностным строением участка).

2) Скорости суммирования: анализируются по так называем «вертикальным спектрам» или семблансам, которые представляют собой карту распределения энергии по гиперболам, соответствующим разным скоростям. Отметки скоростей ставятся по максимумам сембланса, при этом производится проверка применения НМО-поправки на сейсмограмме: годографы отражений должны спрямляться.

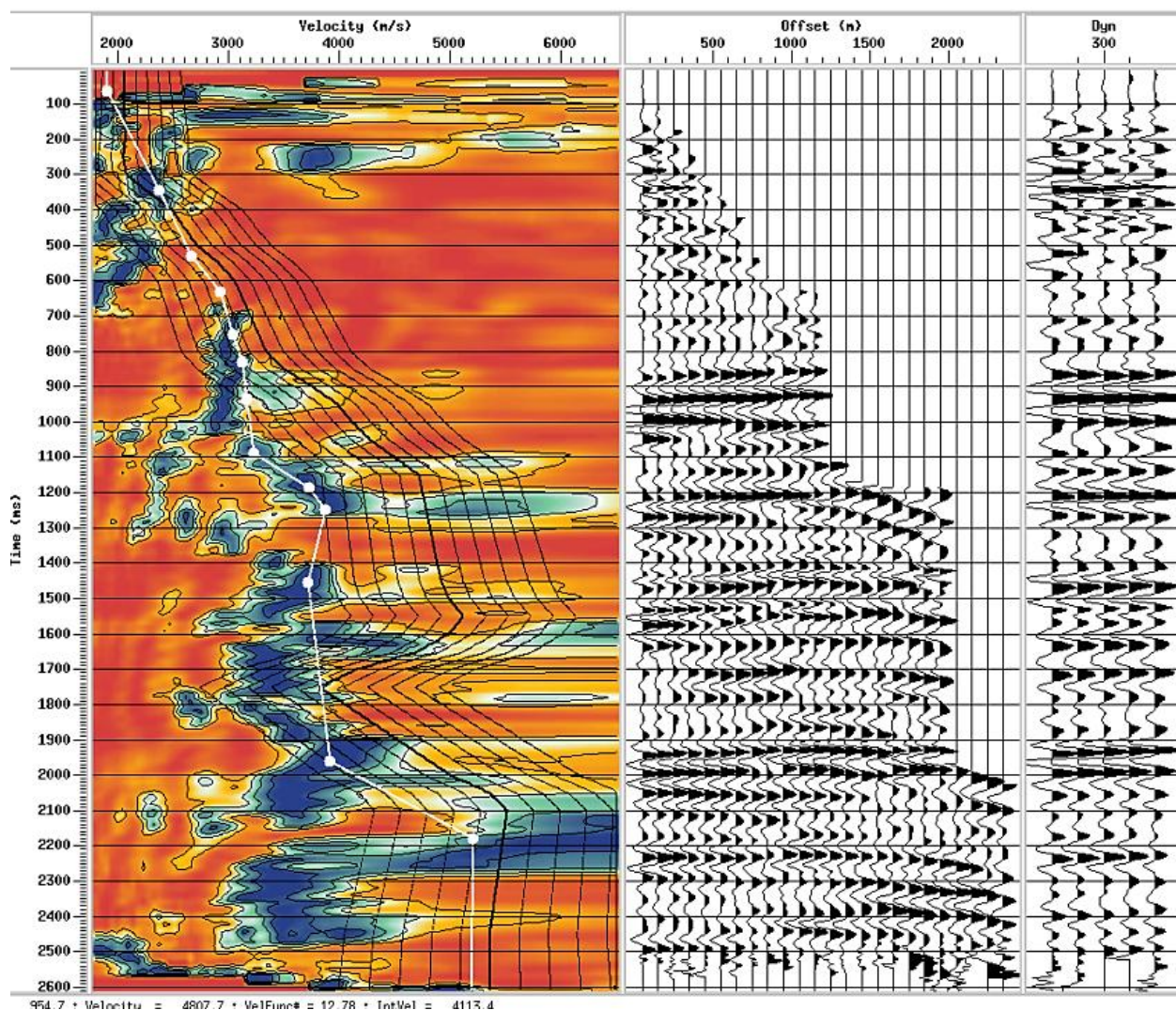
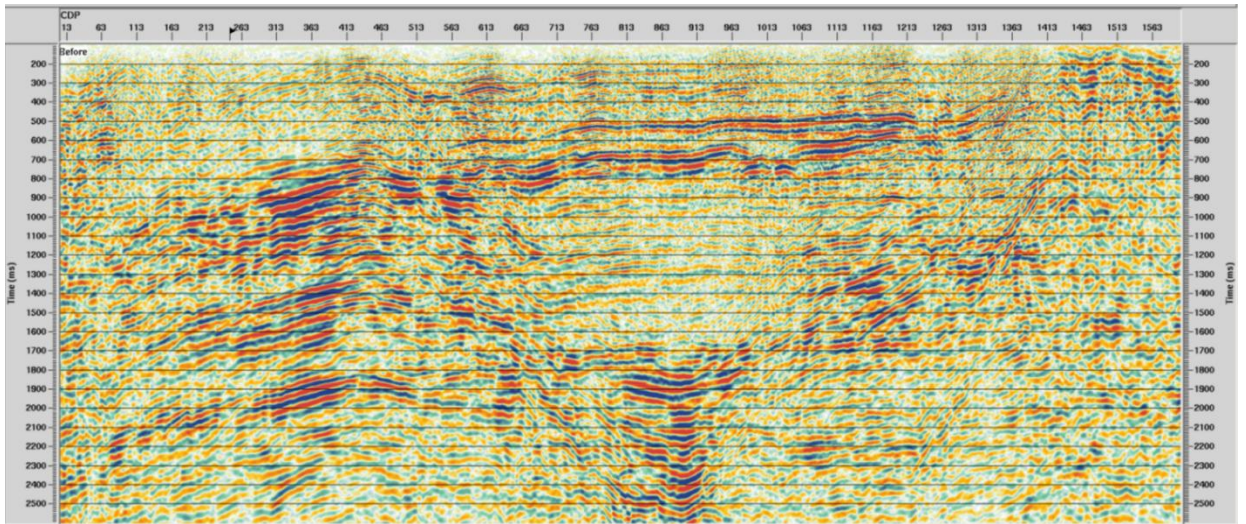


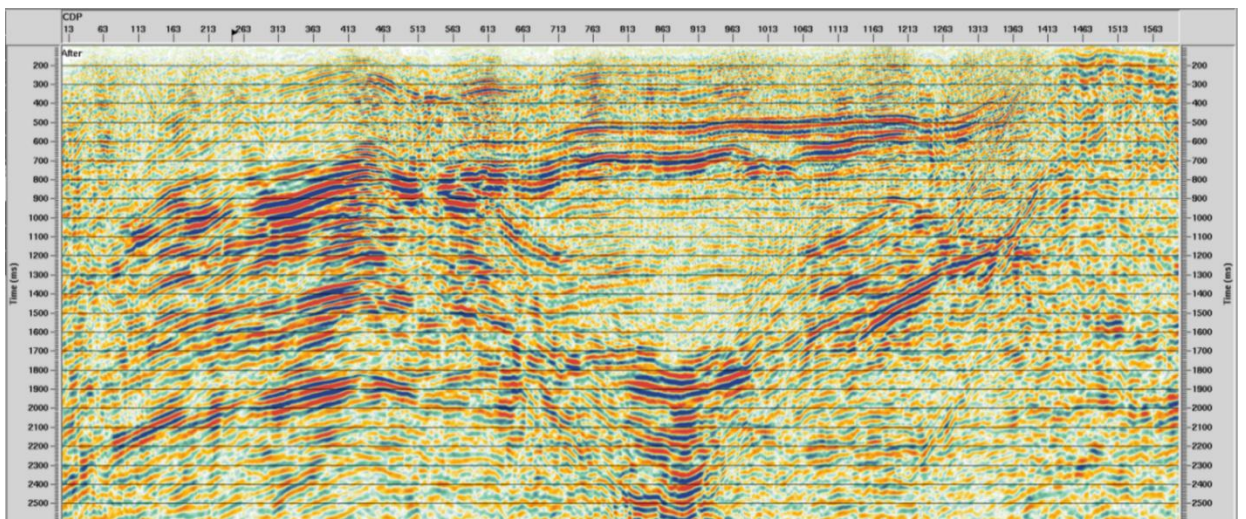
Рисунок 6.1 – Пример окна анализа вертикальных спектров скоростей

На рисунке 6.1 слева показано окно семблансов, в центре представлена сейсмограмма с примененной NMO, справа – участок суммарного разреза с данным скоростным законом.

3) Коррекция статических поправок (остаточная статика): на данном этапе применяется свойство фазовой устойчивости суммарных сигналов к разбросу фаз исходных каналов. Отдельно суммируются сигналы по сейсмограммам ОПВ и ОПП, и по отклонениям фазы для каждой трассы находят корректирующие поправки по ОПП и ОПВ.



а)



б)

Рисунок 6.2 – Разрез: а) до уточнения скоростей и статики; б) после уточнения скоростей и статики

Сигнальная обработка, при которой работа идёт с частотной составляющей сигнала, очищение от помех, корректирование формы импульса, распределение амплитуд и т.д., имеет в своем составе следующий ряд выполняемых процессов:

- 1) Медианная пороговая фильтрация в частотно-временной области:

Для заданной сейсмограммы, по каждой трассе выполняется оконное преобразование Фурье (STFT), задается апертура в трассах и переменный по времени порог, в соответствии с которыми амплитуды спектра, превышающие

порог, умноженный на медиану на заданной апертуре, заменяются значением этой медианы. Таким образом подавляются аномальные амплитуды на этой частоте.

2) FX-фильтрация для подавления поверхностной волны:

Для каждой трассы в заданной сейсмограмме рассчитывается одномерное преобразование Фурье, получается так называемое FX-представление сейсмограммы. Задается частота среза и скорость поверхностной волны. Для каждой частоты ниже частоты среза вычисляется сколько соседних трасс нужно просуммировать:

$$mix = velocity / frequency \times trace_spacing.$$

При таком смешивании сигнал поверхностной волны, как плавно меняющийся от трассы к трассе, подавляется (рис. 6.3).

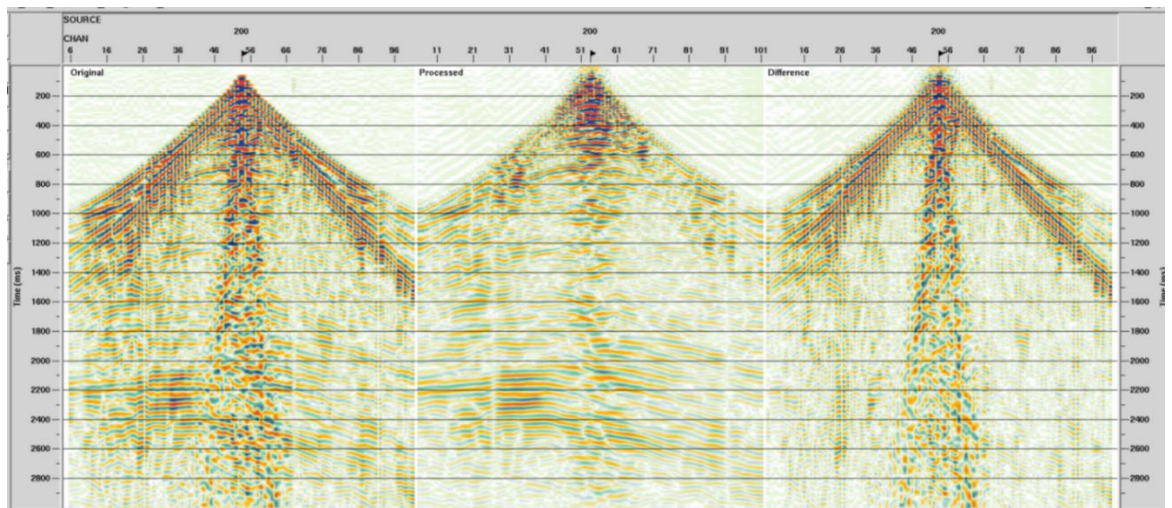


Рисунок 6.3 – Результат работы медианной пороговой фильтрации в частотной области + FX-фильтрации поверхностной волны

3) Деконволюция сигнала:

На полевых данных записанный сигнал является результатом свёртки импульса источника с отражательной способностью подземных слоев. Цель деконволюции состоит в том, чтобы сейсмические данные как можно больше приблизить к единичным импульсам, соответствующим данной отражательной способности. При известном импульсе источника достаточно построения фильтра предсказания (Prediction Error Filter) на основе импульса источника, который будет подавлять предсказываемую часть сигнала, а в остатке получатся искомая отражательная способность и шум.

На практике импульс практически всегда не известен, более того, он не стационарен и изменяется со временем. Поэтому для настройки оператора

деконволюции производится расчёт автокорреляции в нескольких окнах с осреднением трасс в поверхностно-согласованном ключе. В результате получаются не единичные импульсы, а лишь некоторое сжатие по времени и расширение спектра, что, в целом, является удовлетворительным результатом (рис. 6.4).

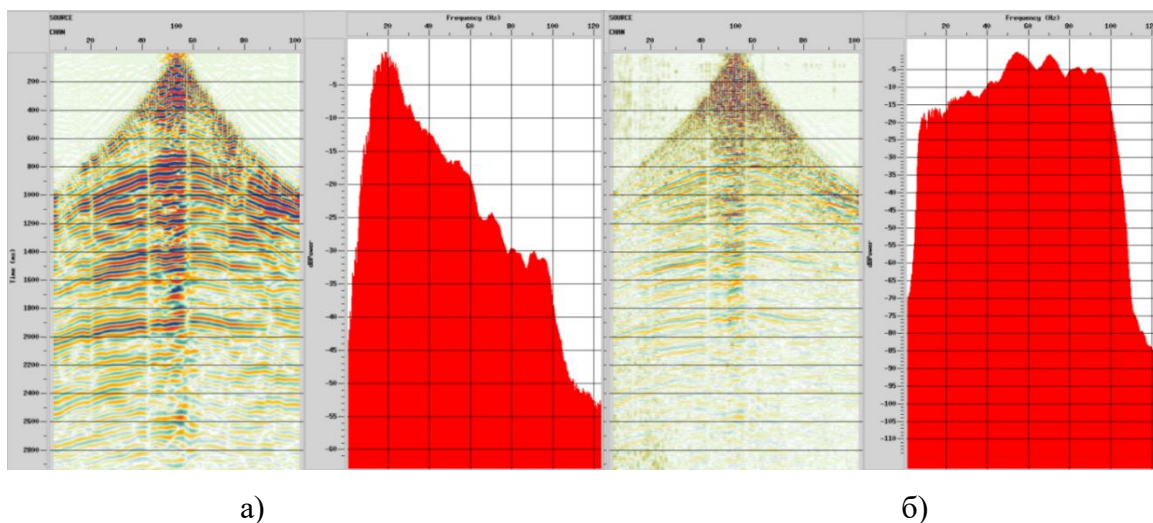


Рисунок 6.4 – Сейсмограмма и её спектр в dB масштабе: а) до деконволюции; б) после деконволюции

На рисунке 6.4б наблюдаются более тонкие отражения за счёт сжатия импульса и более широкий спектр.

4) Поверхностно-согласованное выравнивание амплитуд:

Распределение средней энергии сейсмических трасс по площади зависит от ряда негеологических факторов: поверхностных условий, величины и глубины заряда (в случае использования взрывных источников), характеристик источников и приемников, а также других технологических особенностей регистрации. Эти факторы не отражают истинные геологические свойства разреза и должны быть компенсированы на этапе обработки данных.

Для устранения указанного влияния применяется поверхностно-согласованное выравнивание амплитуд. В рамках этого метода по всей площади в заданном временном (или глубинном) окне вычисляется статистика амплитуд – например, средние абсолютные амплитуды, среднеквадратичное значение (RMS), суммарная энергия и т.п. Затем трассы группируются по поверхностно-согласованным доменам: источникам, приемникам (чаще всего ограничиваются именно этими двумя), а также, при необходимости, по общим точкам отражения (ОГТ), каналам или оффсетам.

Для каждого элемента группировки (например, для отдельного источника или приемника) рассчитывается корректирующий множитель, приводящий среднюю

амплитуду в данном домене к общему эталонному уровню. Применение этих множителей позволяет выровнять амплитудную характеристику данных и минимизировать влияние негеологических факторов, тем самым улучшая качество последующей интерпретации (рис. 6.5).

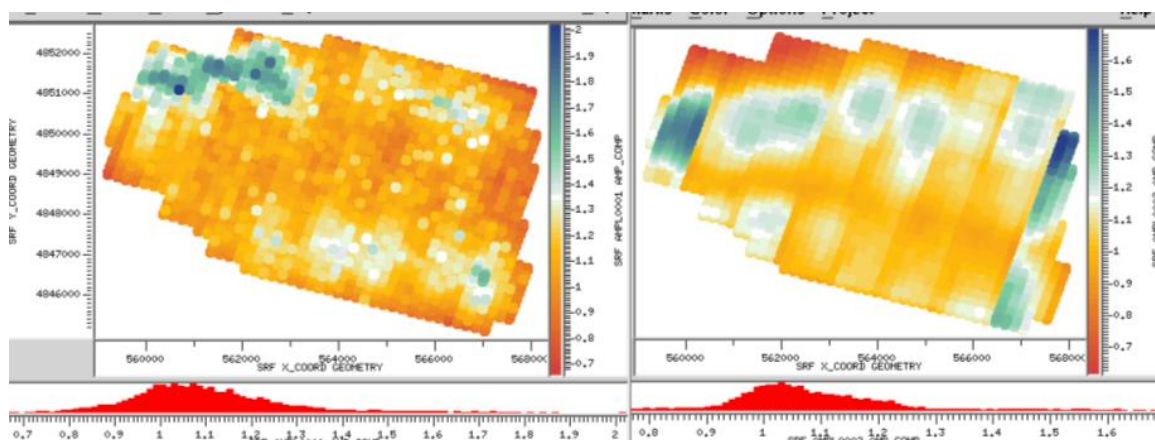


Рисунок 6.5 – Результат поверхностно-согласованной коррекции амплитуд по параметру абсолютной средней амплитуды в домене приемников

6.2. Специализированная обработка сейсмических данных

В результате предварительной обработки данных полевых наблюдений формируется файл в формате SGY. По итогам проведённых ранее исследований было выявлено, что метод векторной сейсморазведки не чувствителен к регулярности расположения на местности приёмников/источников, более того, нерегулярность даже улучшает результаты обработки. Необходимо отметить, что выполнение расчетов осуществляется итерационным способом по шкале времени, при этом расчетный шаг по времени должен быть достаточными для прохождения фронта волны между расчетными пространственными узлами. Существует прямая зависимость между размером пространственной сетки и размером расчетного временного шага. Для расчетов с размером сетки 25x5 м итерационный шаг времени должен быть не менее 0,4 мс, а для высокоскоростной среды не менее 0,2 мс. При этом шаг дискретизации полевых наблюдений составляет 1–2 мс. В рамках экспериментов были рассмотрены два подхода повышения временного шага дискретизации исходного сейсмического сигнала:

- 1) Расчет на необходимом итерационном временном разрешении с пониженной «подстановкой» полевых данных: производится расчет с заданным шагом, а вставка полевого сигнала в узлы расположения приемников выполняется с частотой полевой регистрации, т.е. не при каждой итерации.
- 2) Интерполяция исходного полевого сигнала на расчетную частоту: рассматриваются различные варианты интерполяции исходных данных, но

классическая математическая полиномиальная интерполяция и интерполяция сплайнами дают неудовлетворительные результаты. В результате экспериментов была выбрана интерполяция через прямое и обратное разложение Фурье с повышением разрешения по времени.

В ходе проведенных численных экспериментов было выявлено, что оба описанных способа дают удовлетворительные результаты и могут применяться на практике. Таким образом, фактическая расчётная «воксельная» сетка может быть реализована при любом пространственном разрешении, если рассматривать с точки зрения вычислительной схемы. Реальным ограничением является лишь технологический уровень вычислительного оборудования.

Решение вычислительной задачи «обратной» волны требует многократного итерационного пересчета двумерного/трёхмерного массива достаточно большой размерности. Реализация на графических процессорах позволила существенно сократить время обработки (до 400 раз), в сравнении с вычислениями на CPU. Это связано с тем, что в GPU возможна обработка до 15–18 тыс. параллельных вычислительных потоков, а на современных CPU лишь порядка 100 вычислительных потоков. Необходимо отметить, что при обработке на GPU возникает необходимость копирования данных между оперативной памятью видеокарты и основной оперативной памятью, однако временные затраты на копирование существенно меньше, чем экономия времени на обработку. Безусловно, наилучшие результаты ускорения расчётов за счёт использования GPU достигаются при расчётах 3D сейсмических данных. Использование GPU позволяет выполнять расчёт «обратной» волны 2D данных за допустимое время (порядка 1–2 часов для пространственного разрешения 25x5 м) на одном узле. Расчёт 3D сейсмических данных возможен лишь на кластерной системе с несколькими узлами GPU и массивом хранения данных объёмом до 100 Тб.

6.3. Построение сейсмических атрибутов

Подробное описание принципов и способов построения сейсмических атрибутов для векторного подхода в сейсморазведке описано в расширенном отчете по проекту за 2022 год. В векторной сейсморазведке на рассеянных волнах данный подход осуществляется на основе сейсмических данных принадлежащих расширенным пространствам G путем их отображения в пространство атрибутов для каждой точки исследуемой среды. Формально этот этап представляет собой отображение данных G в сейсмические атрибуты V неким оператором C :

$$C : G \Rightarrow B \quad (6.1)$$

$$B(I, x) \in R^4, \quad (6.2)$$

где $I \in R^1, x \in R^3$.

Величина I характеризует некоторую интегральную характеристику сейсмического атрибута в заданной точке пространства. В методе RTM оператор C , носит название «Условие Изображения» (Imaging Condition) и имеет вид:

$$I(x) = \sum_s \int_0^T p^f(x, t; x_s) p^b(x, t; x_s) dt \quad (6.3)$$

В настоящем подходе сейсмические атрибуты оцениваются более детально, чем в RTM с учетом векторной природы волнового поля рассеяния. Первым оценивается скоростной атрибут. После оценки скорости, при синтезе других сейсмических атрибутов в векторном подходе, в отличие от RTM, имеется дополнительная возможность построения, как стандартных атрибутов типа глубинной RTM миграции, так и новых, ранее не встречавшихся:

$$B(I_1, I_2, \dots, I_n, x) \subset R^{n+3}, \quad (6.4)$$

где $I_k \in R^1, x \in R^3, k = 1, \dots, n, n \geq 12$.

В качестве формальных условий визуализации реализующих действие оператора $C : G \Rightarrow B$ (6.1)-(6.2), (6.4) используются методы статистического оценки параметров многомерного случайного распределения, размерностью равной 12. С учетом возможности разбиения на подмножества и фильтрации на практике их строится значительно больше – нескольких десятков.

Сейсмические атрибуты, полученные в результате обработки полевых наблюдений, были проинтерпретированы с использованием априорной скважинной информации и общих представлений о геологическом строении среды исследуемого региона. На основе полученной информации сделаны выводы о целесообразности проведения подобных исследований.

6.4. Результаты обработки данных методом двумерной векторной сейсморазведки

Выполненные в рамках настоящих исследований расчеты позволили получить пять атрибутов с пространственным разрешением ячейки 25x25x5 метров: RTM imaging, Velocity, Relative Impedance, Opening Angle, Diffraction Reflection Ratio. Разрезы профилей МОГТ 2D указанных атрибутов, изображенные в глубинной области, представлены ниже.

Атрибут RTM imaging используется в геологии для структурных построений и разработки тектонической модели. В стандартной сейсморазведке полевые данные получают во временной области. Одной из важнейших задач в сейсморазведке является трансформация полученных данных в реальные глубины. Метод векторной сейсморазведки получает все атрибуты сразу в глубинной области, что позволяет выполнять структурные построения путем корреляции выбранных горизонтов непосредственно по полученным атрибутам – первый этап геологических исследований на площади. Участок исследований МОГТ 2D расположен в сложных сейсмогеологических условиях, что отражено на рисунке 6.6.

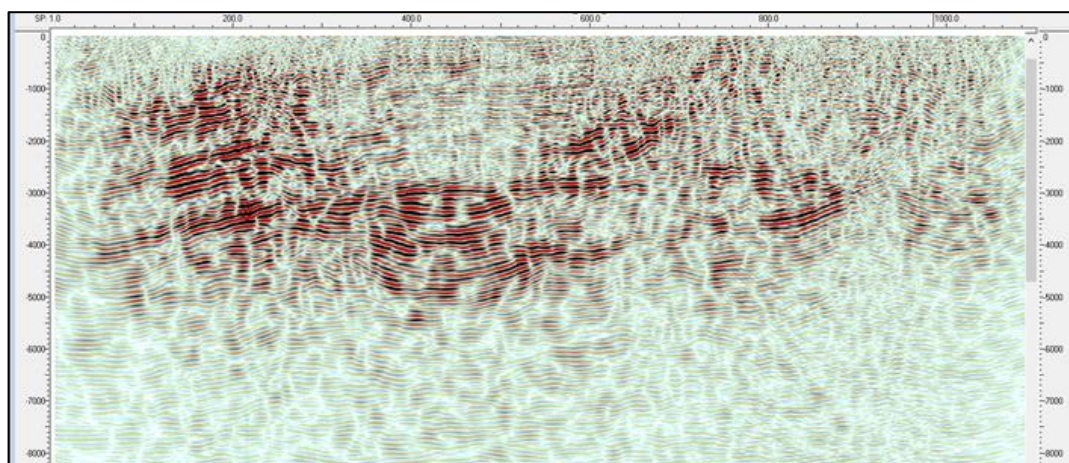


Рисунок 6.6 – Атрибут RTM imaging

Атрибут Velocity позволяет выделить скоростные аномалии, связанные с геологическим строением разреза. На рисунке 6.7 аномально высокие скорости отражены красным и зеленым цветом. В сейсморазведке определение скорости является фундаментальным процессом, от которого зависит успех всей интерпретации. Значение определения скорости заключается в том, что это краеугольный камень всей количественной сейсмической интерпретации. Без точной скоростной модели данные представляются исключительно во временном масштабе. Для преобразования данных в глубинный разрез, построения структурных карт и определения положения залежей, требуется модель скорости. Скорость напрямую зависит от литологии, пористости, флюидонасыщения, давления и трещиноватости пород, ввиду чего является прокси-параметром для прогнозирования коллекторских свойств. Скоростная модель «управляет» алгоритмом миграции, указывая, куда именно нужно переместить (мигрировать) каждое отражение, чтобы оно оказалось на своем истинном месте в пространстве. Современный подход состоит в использовании миграции в глубинной области (Pre-SDM) и сложных методов инверсии, таких как томография и Full Waveform Inversion (FWI), которые

автоматически итерационно подстраивают сложную 3D модель под все сейсмическое волновое поле.

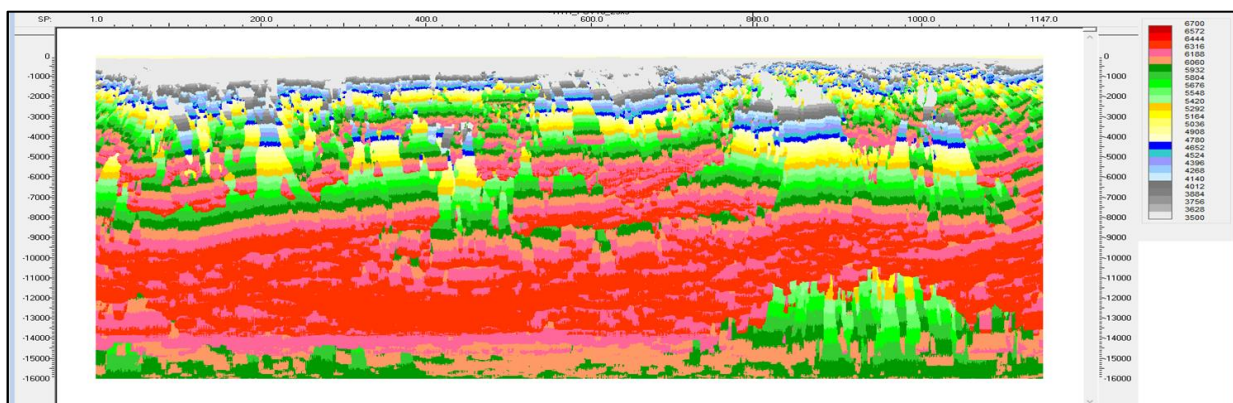


Рисунок 6.7 – Атрибут Velocity (скорость)

В отличие от указанных сложных и дорогостоящих методов инверсии метод построения скорости в данном подходе векторной сейсморазведки основан на оценке первых вступлений двух волн прямой и обратной и применении уравнения эйконала для перевода временных задержек в скорости. Рассматриваемый подход гораздо экономичнее в вычислительном плане и позволяет оценить скорости в каждой ячейке из которой состоит среда. Тем самым достигается высокое пространственное разрешение, недоступное обычным методам.

Атрибут Relative Impedance отражает когерентность разреза (рис. 6.8).

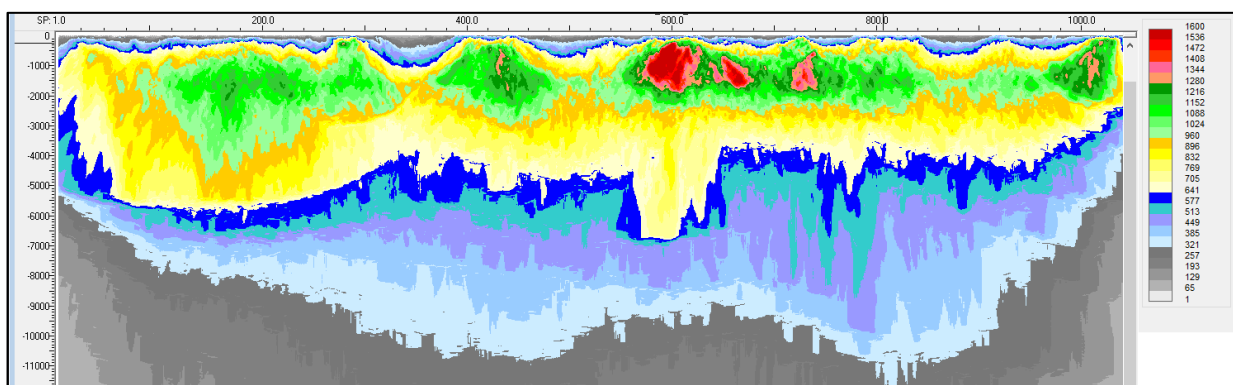


Рисунок 6.8 – Атрибут Relative Impedance

Атрибут Opening Angle, показанный на рисунке 6.9, отражает угловую анизотропию вектора рассеяния в градусах. В данном случае можно говорить о низком влиянии угловой анизотропии на распространение упругих волн.

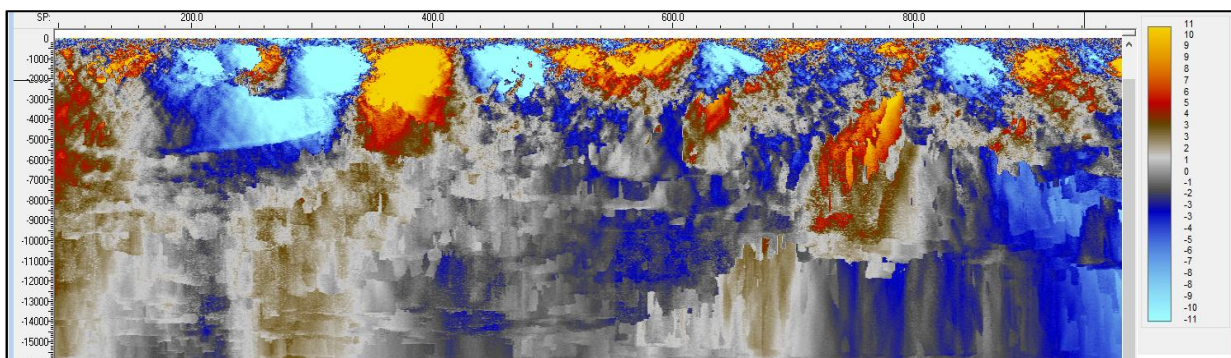


Рисунок 6.9 – Атрибут Opening Angle

Атрибут Diffraction Reflection Ratio (рис. 6.10) характеризует трещиноватость среды и позволяет выбрать наиболее перспективные объекты для бурения, где трещиноватость увеличивает объем коллектора. Атрибут основывается на приближении Борна теории рассеяния и нашел широкое распространение в последние 20 лет в мире. Кроме того, он эффективно используется для поиска трещиноватых нефтяных зон в карбонатах.

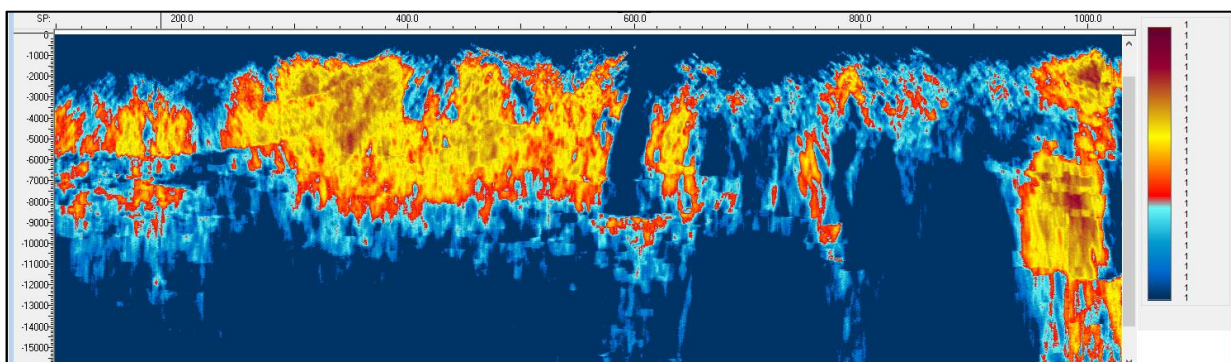


Рисунок 6.10 – Атрибут Diffraction Reflection Ratio

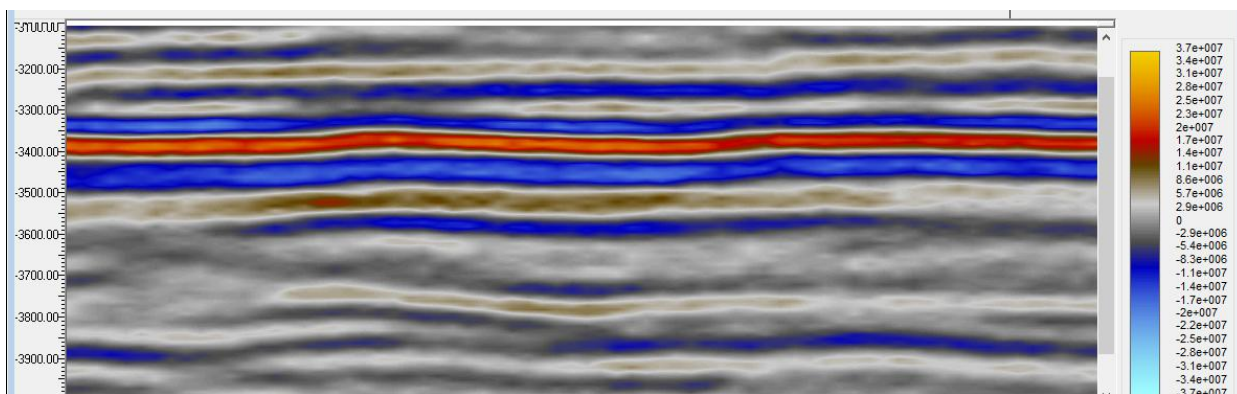
Полученная информация позволяет более детально изучить геологическое строение района исследований, выделить перспективные объекты и наметить дальнейшее направление работ.

6.5. Результаты обработки данных методом трехмерной векторной сейсморазведки

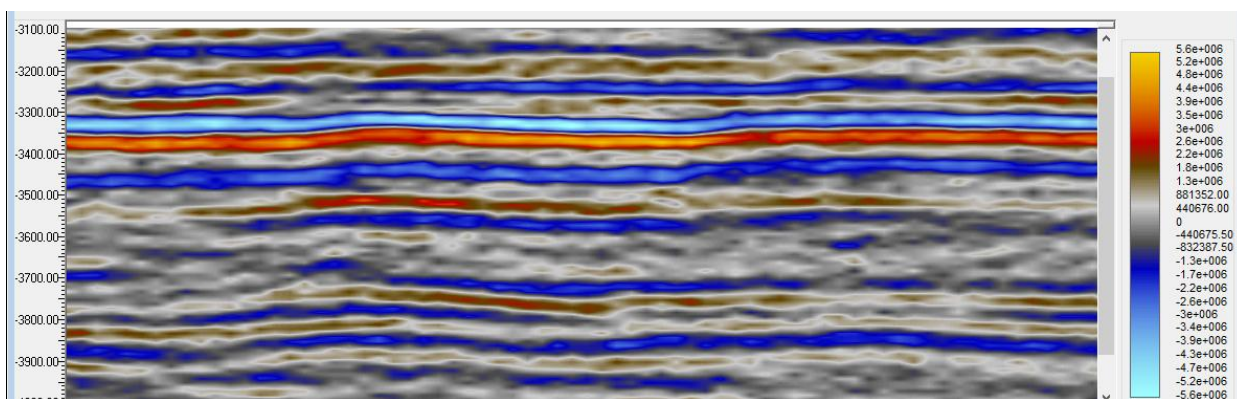
В эксперименте также рассматривались площадные исследования МОГТ 3D, которые были обработаны методом трехмерной векторной сейсморазведки на рассеянных волнах. Аналогично обработке данных методом 2D, были получены пять атрибутов с пространственным разрешением ячейки 25x25x5 м: RTM Imaging, Velocity, Relative Impedance, Opening Angle, Diffraction Reflection Ratio.

На рисунках 6.11–6.16, для которых был выбран перспективный интервал геологического разреза, изображены вертикальные срезы кубов указанных атрибутов в глубинной области.

Атрибут RTM Imaging представлен в двух вариантах: расчеты выполнены с ячейкой 50x50x10 и 25x25x5. Необходимо отметить, что на рисунке 6.11 (б) дано более детальное представление процессов. Следовательно, при повышении разрешения разреза можно решать более сложные геологические задачи. На рисунке 6.11 показаны два варианта структурных построений, выполненные по кубам разного пространственного разрешения. При этом указанный ранее вариант (б) является наиболее предпочтительным – разрез стал более высокочастотным, появились дополнительные оси синфазности, динамика которых меняется по латерали. Такое изображение предоставляет возможность выявления и прослеживания дополнительных отражений, которые связаны с более тонкими пропластками геологического разреза. Амплитудно-частотные характеристики разреза отражают реальные свойства среды: зачастую локально выраженные высокие значения параметра (амплитуда) являются прямым фактором наличия углеводородов, в данном случае таких аномалий не выявлено.

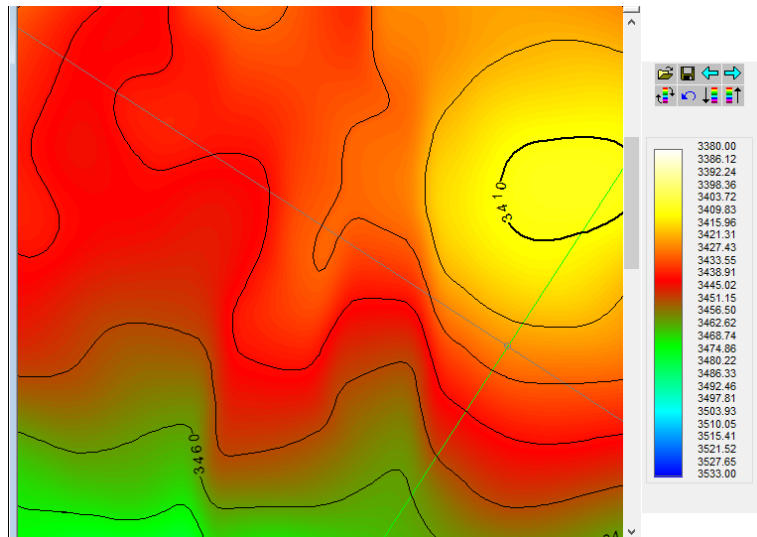


а)

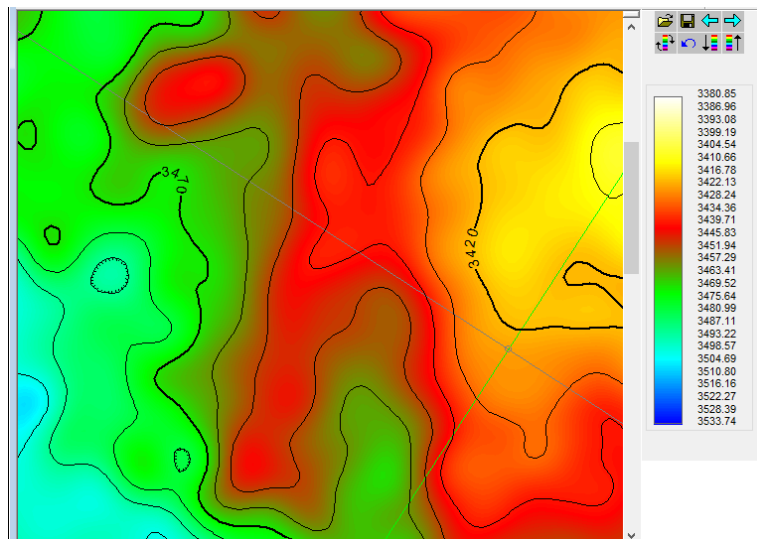


б)

Рисунок 6.11 – Атрибут RTM Imaging при пространственном разрешении: а) 50x50x10 м; б) 25x25x5 м



а)



б)

Рисунок 6.12 – Структурные карты по ОГ I при пространственном разрешении:
а) 50x50x10 м; б) 25x25x5 м

Атрибут Velocity (рис. 6.13) характеризует изменение скорости продольных волн в пространстве.

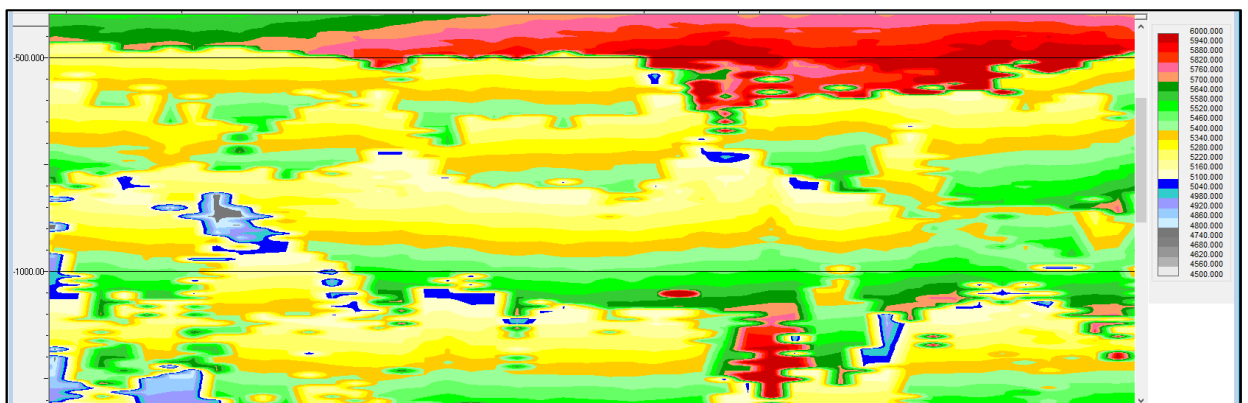


Рисунок 6.13 – Атрибут Velocity

В свою очередь когерентность разреза отражает атрибут Relative Impedance (рис. 6.14).

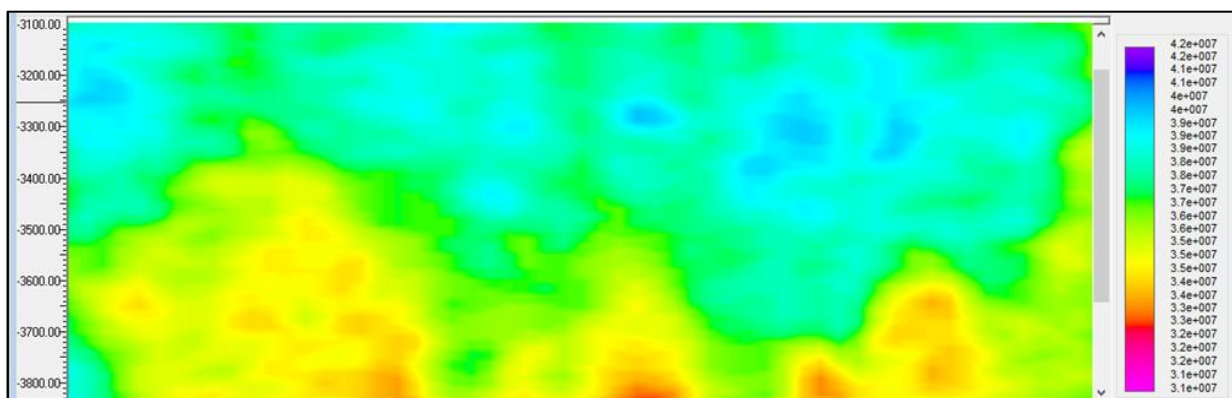


Рисунок 6.14 – Атрибут Relative Impedance

Атрибут Opening Angle (рис. 6.15) характеризует угловую анизотропию вектора рассеяния в градусах. Фиксируем факт наличия угловой анизотропии.

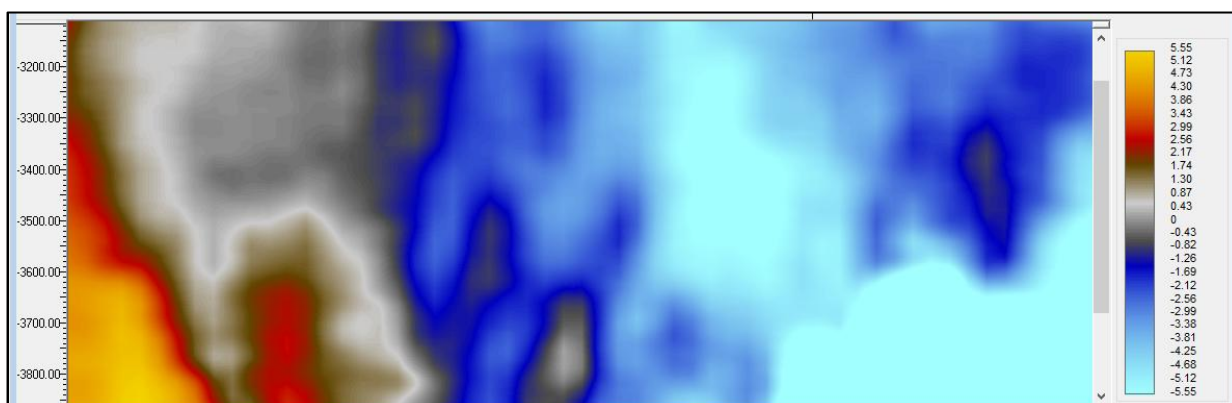
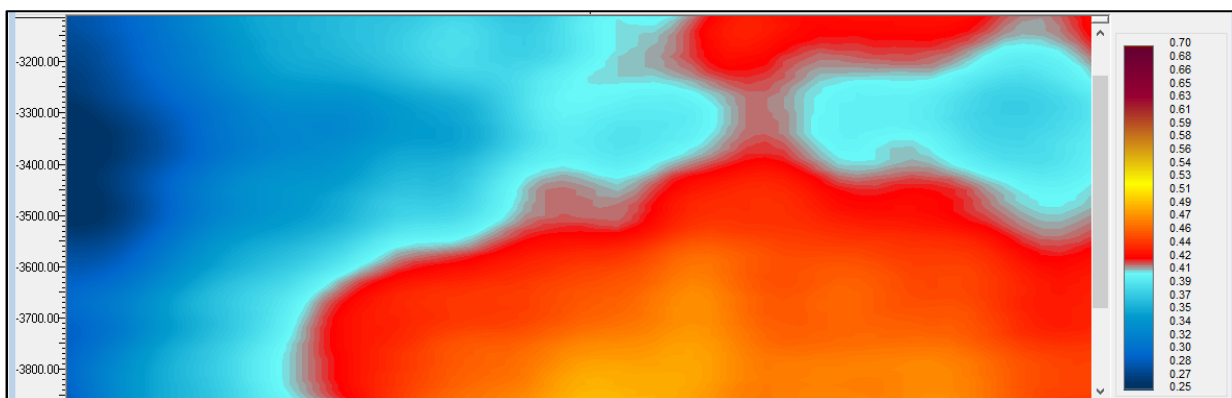
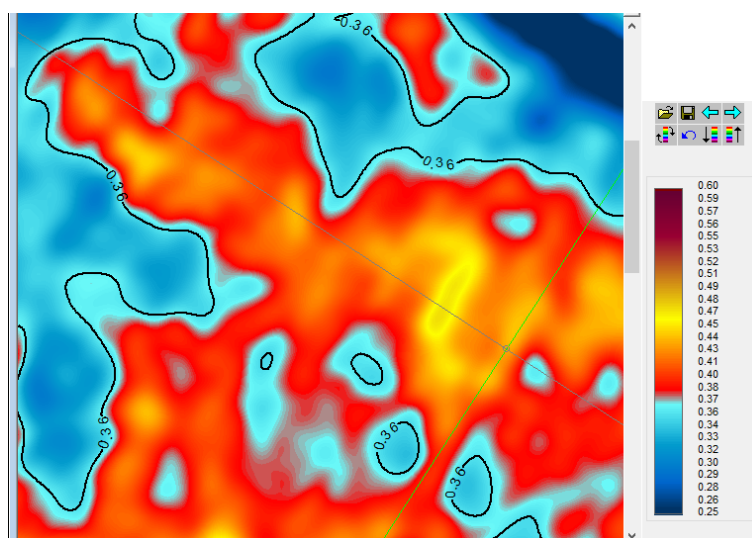


Рисунок 6.15 – Атрибут Opening Angle

Дифракционный атрибут указывает на наличие трещиноватости в исследуемом интервале геологического разреза (рис. 6.16 (а)). Рисунок 6.16 (б) иллюстрирует характер распространения зон трещиноватости в плане.



а)



б)

Рисунок 6.16 – Атрибут Diffraction Reflection Ratio

Полученные в результате исследований атрибуты векторной сейсморазведки являются необходимыми данными, которые можно использовать в современных условиях на этапах детализации геологоразведочных работ и разработки месторождений.

В результате проведенных исследований выполнен расчет пяти сейсмических атрибутов с пространственным разрешением ячейки 25x25x5 м: RTM Imaging, Velocity (скорость), Relative Impedance, Opening Angle, Diffraction Reflection Ratio методом двумерной и трехмерной векторной сейсморазведки на рассеянных волнах с использованием разработанных подходов к миграции в обратном времени и угловой декомпозиции волн.

Эффективность и уникальность работы состоит в самом факте достижения высокой пространственной разрешенности атрибутов в глубинных области (25x25x5 м) и представленном уникальном наборе атрибутов в рамках одного подхода.

Кроме того, проведена апробация разработанных методов векторной сейсморазведки на реальных полевых данных 2D/3D. Выполненные численные эксперименты на них демонстрируют высокую устойчивость предложенного подхода и позволяют строить высокоточные структурные карты и карты сейсмических атрибутов для 2D и 3D реальных сейсмических данных для различных пространственных расположений и геологических условий.

Утверждаю

Ген. Директор ООО «Р-сенсорс»

Агафонов В. М.



Протокол №1 полевой апробации доработанных сейсмических модулей

30.10.2025

Комиссия, созданная в ООО «Р-сенсорс» приказом НР-2025-1 от 28.10.2025г.
в составе:

Председатель комиссии:

Агафонов В. М., к.ф.м.н.,

Члены комиссии:

Шабалина А.С., к.ф.м.н.,

Шаров Д. А.,

Горчаков И. В.

в период 29-30.10.2025 провела полевую апробацию доработанных сейсмических модулей, оснащенных устройством для установки сейсмического датчика (УУСД) с целью получения следующих данных:

- 1) Проверка установки сейсмического датчика в грунт и извлечения из грунта с помощью УУСД;
- 2) Сравнение временных сейсмограмм и спектров, полученных с помощью сейсмического датчика установленного в грунт с помощью УУСД и датчика, установленного вручную.

Методы апробации:

- 1) Проверка установки сейсмического датчика в грунт определяется визуально по факту заглубления датчика до касания его дном грунта;
- 2) Сопоставление сейсмограмм и спектров проводится методом наложения кривых, полученных датчиками, установленными вручную и с помощью УУСД;

Комиссия установила следующее:

При подаче управляющего сигнала, УУСД приводит сейсмический датчик во вращение по часовой стрелке. При вращении происходит заглубление сейсмодатчика, которое прекращается при срабатывании концевого выключателя. Визуально наблюдает проникновение нижней части корпуса датчика в грунт на глубину около 20 мм. При подаче сигнала на извлечение сейсмодатчика, УУСД приводит сейсмодатчик во вращение против

часовой стрелки. Визуально наблюдается выход датчика из грунта и подъем нижней части его корпуса на высоту около 20 мм от поверхности грунта после чего дальнейшее перемещение датчика прекращается. В конечной точке датчик извлекается из грунта без дополнительных усилий.

Временные развертки и спектры выходных сигналов датчика, установленного на грунт с помощью УУСД, и референсного датчика, установленного на грунт вручную, качественно согласуются между собой.

Предложения и рекомендации комиссии:

Считать доработанные сейсмические модули, оснащенные УУСД пригодными для установки на БПЛА и проведения дальнейших испытаний.

Рекомендовать использовать БПЛА с жестким шасси, оснащенном острыми наконечниками для уменьшения возможности корпуса БПЛА смещаться относительно грунта при воздействии сейсмического сигнала.

Председатель комиссии:

Агафонов В. М.

Члены комиссии:

Шабалина А.С.

Шаров Д.А.

Горчаков И.В.