

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ  
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ БЕЛОРУССКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ФАКУЛЬТЕТ РАДИОФИЗИКИ И  
КОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**  
Кафедра физики и аэрокосмических технологий

## **Курсовая работа**

**МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ  
КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ НА БОРТОВЫЕ  
СИСТЕМЫ НИЗКООРБИТАЛЬНЫХ  
СПУТНИКОВ**

Глеба Евгения Михайловича  
студента 3 курса,  
специальность «аэрокосмиче-  
ские радиоэлектронные и ин-  
формационные системы и тех-  
нологии»

Научный руководитель:  
Баранова Василина Сергеевна

Минск, 2024

# Оглавление

1	Введение . . . . .	2
2	SatNOGS: Открытая инфраструктура для мониторинга низкоорбитальных спутников . . . . .	3
2.1	Ключевые элементы инфраструктуры . . . . .	3
2.2	Функционал и Применение . . . . .	4
2.3	Преимущества проекта . . . . .	4
2.4	SatNOGS NetWork . . . . .	4
2.5	База данных SatNOGS: краеугольный камень рас- пределённой сети наблюдений . . . . .	6
2.6	Визуализация данных телеметрии: хранилище дан- ных и Kaitai Struct . . . . .	9
2.7	Текущее состояние сети SatNOGS: от скромных начинаний к глобальной инфраструктуре . . . . .	10
3	Платформа Polaris ML . . . . .	13
4	Алгоритм XGBoost . . . . .	16
5	Polaris ML: Выявление аномалий в данных телеметрии . . . . .	17
5.1	Процесс анализа . . . . .	18
5.2	Расширенный инструментарий . . . . .	19

# 1 Введение

Космическая погода представляет собой комплекс явлений, происходящих в околоземном космическом пространстве, которые могут влиять на работу низкоорбитальных спутников. К ним относятся: солнечные вспышки, выбросы корональной массы, геомагнитные бури. Влияние космической погоды может проявляться в виде аномалий телеметрии, сбоев в работе бортовых систем и даже полной потери спутника [4]. В большинстве случаев, для обнаружения аномалий используются критерии на основе пороговых значений нижних и верхних пределов наиболее критичных параметров телеметрии бортовой электроники наноспутника. Также в последнее время, в область проектирования и эксплуатации наноспутников внедряются автоматизированные системы мониторинга состояния телеметрии, которые используют различные модели машинного обучения[6]. Подобные автоматизированные системы оценивают в целом работоспособность бортовых систем на момент испытаний или в режиме полетной диагностики. Спутник является сложной электрической системой, где события на каждом узле (компоненты бортовых систем) могут привести к последовательности не предугаданных сбоев. Причиной сбоев может послужить как естественные неполадки бортовых компонентов, так и внешние факторы. В данной работе проводится оценка взаимосвязи и влияния солнечной активности на работу бортовой электроники по данным телеметрии космических аппаратов, а также разработка и оптимизация готовых решений с открытым исходным кодом для анализа больших данных.

## 2 SatNOGS: Открытая инфраструктура для мониторинга низкоорбитальных спутников

SatNOGS представляет собой комплексную платформу, обеспечивающую функционирование открытой сети наземных станций для мониторинга спутников. Основной целью проекта является разработка полного стека открытых технологий, основанных на открытых стандартах, и создание полноценной наземной станции в качестве демонстрации возможностей данного стека. Система SatNOGS способна принимать сигналы со спутников, находящихся на низкой околоземной орбите (LEO), в диапазонах UHF и VHF. Она позволяет извлекать сигналы состояния и телеметрии, данные с научных и исследовательских спутников (например, результаты магнитосферных экспериментов), метеорологические данные и другую информацию.

### 2.1 Ключевые элементы инфраструктуры

Проект SatNOGS зародился в 2014 году во время мероприятия NASA SpaceApps Hackathon, проходившего в Афинском хакерспейсе. Он представляет набор технологий, необходимых для создания распределенной сети наземных станций, предназначенных для наблюдения за спутниками на низкой околоземной орбите. Ключевыми компонентами SatNOGS являются:

- **SatNOGS Network:** Веб-приложение, предназначенное для планирования наблюдений по сети наземных станций. Оно способствует координации наблюдений за спутниковыми сигналами и планированию таких наблюдений среди наземных станций, подключенных к сети.
- **База данных SatNOGS:** Ресурс, позволяющий пользователям предоставлять информацию о передатчиках активных спутников. Данные доступны через API или веб-интерфейс.
- **Клиент SatNOGS:** Программное обеспечение, работающее на наземных станциях (обычно на встраиваемых системах). Оно получает регулярные задания на наблюдение из сети, принимает спутниковые передачи и отправляет их обратно в веб-приложение Network.
- **Наземная станция SatNOGS:** Аппаратное обеспечение наземной станции с открытым исходным кодом, включающее ротаторы, антенны и электронику, подключенные к клиенту.

### 2.2 Функционал и Применение

SatNOGS фокусируется на приеме данных со спутников, а не на отправке команд. Спутники обычно передают телеметрические данные практически непрерывно, что позволяет операторам и другим пользователям сети SatNOGS получать, декодировать и ретранслировать эту информацию. Одной из ключевых задач проекта является стимулирование разработчиков спутников (особенно создателей CubeSat) к использованию протоколов с открытым исходным кодом для передачи данных. Это обеспечивает дополнительную возможность декодирования таких протоколов системой SatNOGS и сбор телеметрической информации с множества различных наземных станций.

### 2.3 Преимущества проекта

SatNOGS реализует концепцию массового строительства и развертывания любительских станций слежения по всему миру, основанных на технологиях с открытым исходным кодом и открытых стандартах. Такой подход обеспечивает:

- **Модульность:** Система легко модифицируется и адаптируется к различным задачам.
- **Автономность:** Станции подключаются к интернету и работают полностью автоматически.
- **Доступность:** Открытый исходный код и стандарты способствуют широкому распространению и развитию технологий.

В целом, SatNOGS представляет собой мощный инструмент для мониторинга низкоорбитальных спутников, способствующий развитию открытой космической инфраструктуры.

### 2.4 SatNOGS NetWork

Для всех пользователей и гостей SatNOGS сеть предоставляет веб-интерфейс со всеми доступными наблюдениями и их соответствующие данные, которые представлены ниже.

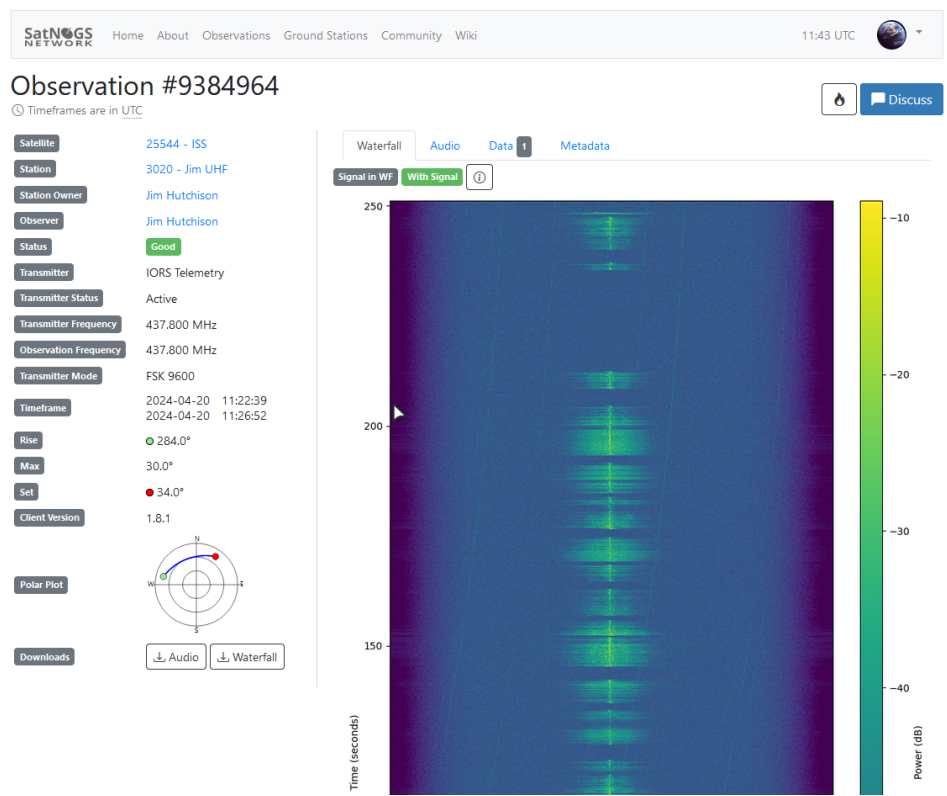


Рис. 1: Информация о наблюдениях и каскад сигнала



Рис. 2: Вкладка демодулированного аудиоплеера из наблюдения #9384964

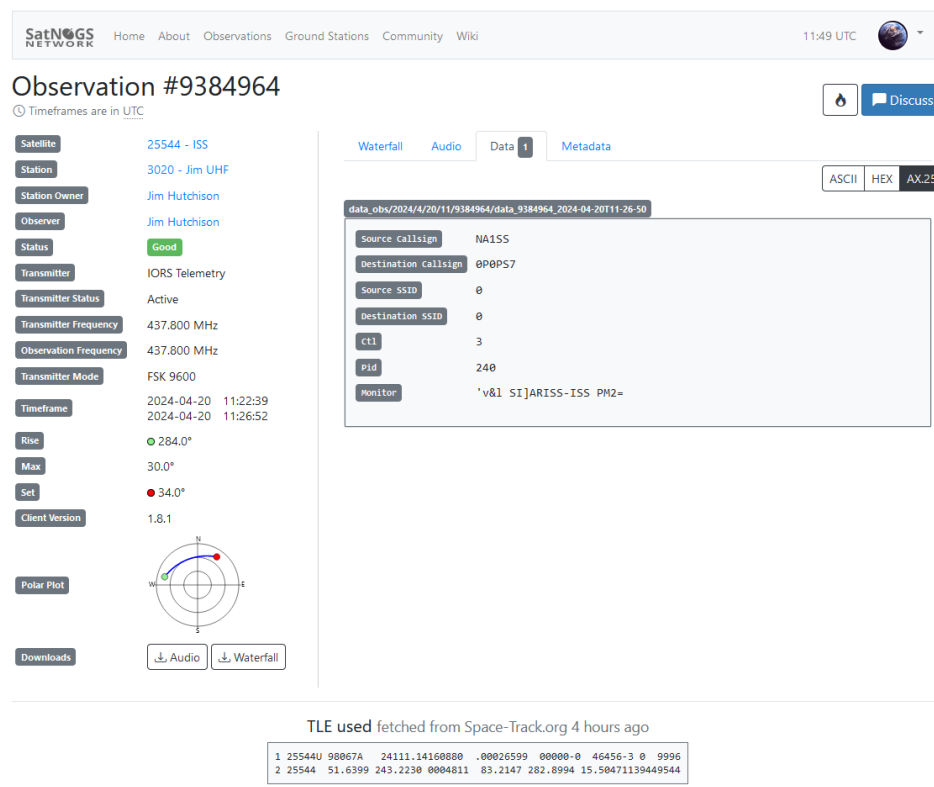


Рис. 3: Декодированные данные телеметрии DUV 25544 - ISS

## 2.5 База данных SatNOGS: краеугольный камень распределённой сети наблюдений

Эффективное функционирование распределённой сети наблюдений за спутниками, как в проекте SatNOGS, требует централизованного и актуального источника информации о космических аппаратах. База данных SatNOGS призвана восполнить пробел в доступности подобной информации, предоставляя открытый и постоянно обновляемый ресурс для всего сообщества.

### Содержание и структура

База данных SatNOGS хранит обширный набор данных о каждом космическом аппарате на орбите Земли, включая:

- **Орбитальные параметры:** База данных содержит кеплеровы элементы орбиты каждого спутника, математические параметры, позволяющие с высокой точностью рассчитать и предсказать положение спутника в любой момент времени.
- **Телекоммуникационные характеристики:** Хранит информацию о частотах, используемых спутником для передачи данных, режи-

мах модуляции сигнала и протоколах передачи данных, необходимых для настройки оборудования наземной станции и корректного приёма информации.

- **Телеметрические данные:** База данных накапливает декодированные кадры телеметрии, полученные с наземных станций сети SatNOGS. Эти данные предоставляют ценную информацию о состоянии бортовых систем спутника, его работе и научных измерениях.

### Краудсорсинг и открытость

Ключевым принципом базы данных SatNOGS является краудсорсинг. Пользователи и операторы наземных станций могут вносить свой вклад, предоставляя информацию о новых спутниках, обновляя существующие данные или делясь телеметрическими кадрами. Все изменения проходят модерацию и становятся доступными для всей сети.

Взаимодействие с базой данных осуществляется через веб-интерфейс и открытый API, что позволяет легко интегрировать её с другими приложениями и системами.

### Идентификация и извлечение данных

Спутники в базе данных идентифицируются по номеру каталога космических объектов NORAD (USSPACECOM) и общепринятому имени. Для каждого объекта хранится набор записей о транспондерах, включая частоты и форматы модуляции. Эта информация используется сетью SatNOGS для расчёта видимости спутников и планирования наблюдений.

### Взаимодействие с клиентом SatNOGS

Клиент SatNOGS, программное обеспечение, управляющее наземной станцией, активно взаимодействует с базой данных:

- **Получение данных о наблюдениях:** Клиент запрашивает у базы данных информацию о видимых в данный момент спутниках и их параметрах передачи данных (частоты, модуляция и т.д.).
- **Отправка телеметрии:** После успешного приёма и демодуляции сигнала со спутника, клиент отправляет декодированные кадры телеметрии в базу данных для хранения и дальнейшего анализа.



- **Отчётность:** Клиент SatNOGS передает в базу данных журналы работы, содержащие информацию о выполненных операциях, и другие отчеты о состоянии наземной станции, включая информацию о работоспособности оборудования и возможных ошибках.

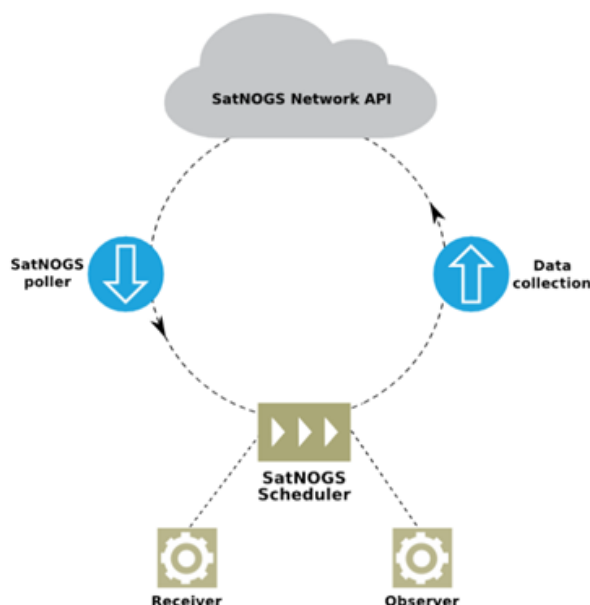


Рис. 4: Клиентские программные компоненты и взаимодействия с базой данных SatNOGS.

### Значение для сети SatNOGS

База данных SatNOGS играет ключевую роль в успешной работе распределенной сети наблюдений:

- **Обеспечение актуальной информацией:** База данных SatNOGS предоставляет наземным станциям актуальную информацию о орбитальных параметрах и телекоммуникационных характеристиках спутников, что позволяет эффективно планировать наблюдения и принимать сигналы.
- **Содействие сотрудничеству:** Открытый характер базы данных и возможность совместного внесения данных способствует сотрудничеству между участниками сообщества SatNOGS, объединяя их усилия для сбора и анализа данных о космических аппаратах.
- **Открытость и доступность:** Свободный доступ к информации о спутниках, хранящейся в базе данных SatNOGS, делает её ценным ресурсом для исследователей, студентов и всех, кто интере-

суется космической тематикой, способствуя развитию научных и образовательных проектов.

База данных SatNOGS является ярким примером того, как открытость, краудсорсинг и современные технологии могут быть использованы для создания мощного инструмента для изучения космоса.

## 2.6 Визуализация данных телеметрии: хранилище данных и Kaitai Struct

Сбор и хранение данных телеметрии со спутников - важная задача, но не менее важно предоставить инструменты для их анализа и интерпретации. Хранилище данных SatNOGS в сочетании с платформой Kaitai Struct предлагает эффективное решение для визуализации и изучения данных телеметрии, делая их доступными и понятными для инженеров и исследователей.

### **Kaitai Struct: декларативное описание двоичных данных**

Kaitai Struct - это мощный инструмент с открытым исходным кодом, предназначенный для описания структуры двоичных данных с помощью декларативного языка. Это позволяет создавать формализованные спецификации форматов данных, независимые от конкретного языка программирования или платформы.

### **Применение Kaitai Struct в SatNOGS**

1. **Описание формата данных:** Для каждого типа спутника или используемого формата телеметрии создаётся файл описания структуры данных с расширением ".ksy" на языке Kaitai Struct. Этот файл содержит формализованное описание того, как байты в потоке данных должны интерпретироваться и преобразовываться в значимые значения (например, числа, строки, структуры данных).
2. **Обработка данных:** Кадры данных телеметрии, извлечённые из базы данных SatNOGS, обрабатываются с использованием соответствующего файла описания Kaitai Struct. Программа-парсер Kaitai Struct использует это описание для разбора двоичных данных и извлечения значений согласно заданной структуре.

3. **Визуализация:** Полученные после обработки данные преобразуются в формат, совместимый с платформой Grafana. Grafana позволяет создавать информативные и наглядные визуализации данных в виде графиков, диаграмм, таблиц и других элементов, что облегчает анализ и интерпретацию телеметрии.

### Преимущества подхода

- **Универсальность:** Kaitai Struct поддерживает генерацию кода для множества языков программирования, таких как Python, Java, C++ и другие. Это обеспечивает лёгкую интеграцию с различными системами и инструментами обработки данных.
- **Читабельность:** Декларативный язык Kaitai Struct позволяет описывать структуру данных в понятной и легко читаемой форме, близкой к естественному языку. Это упрощает понимание формата данных и поддержку файлов описания.
- **Гибкость:** Grafana предоставляет широкий набор инструментов для визуализации данных, включая различные типы графиков, диаграмм, таблиц и интерактивных элементов. Это позволяет адаптировать представление информации под конкретные задачи и потребности пользователей.

### Заключение

Использование Kaitai Struct и Grafana в хранилище данных SatNOGS значительно упрощает анализ и интерпретацию данных телеметрии, предоставляя инженерам и исследователям удобный инструмент для изучения работы спутников и получаемой с них научной информации.

## 2.7 Текущее состояние сети SatNOGS: от скромных начинаний к глобальной инфраструктуре

С момента своего запуска в 2015 году сеть SatNOGS прошла путь от нескольких экспериментальных наземных станций до разветвлённой глобальной инфраструктуры, обслуживающей тысячи наблюдений за спутниками ежедневно.

### Экспоненциальный рост и развитие

- **Увеличение количества наземных станций:** Растущий интерес к малым спутникам CubeSat и открытость платформы SatNOGS

привели к экспоненциальному росту числа зарегистрированных и активных наземных станций в сети.

- **Расширение функциональности:** Постоянное развитие экосистемы SatNOGS, включая внедрение таких функций, как автоматическое декодирование телеметрии и визуальный анализ спектра, значительно повысило ценность проекта и предоставляемых им данных.

### Статистика наблюдений

- **Количество наблюдений:** Сеть SatNOGS в настоящее время проводит около 1200 наблюдений за спутниками в день, что демонстрирует значительный рост по сравнению с несколькими десятками наблюдений в день на ранних этапах проекта в 2015 году.
- **Качество данных:** Примерно 70% проводимых наблюдений содержат полезную информацию и телеметрию. Остальные наблюдения классифицируются как "плохие" (содержащие помехи или неполные данные) или "неудачные" (не удалось загрузить данные из-за технических проблем).
- **Объём телеметрии:** База данных SatNOGS ежедневно пополняется значительным объёмом данных: около 2500 декодированных кадров телеметрии, полученных с различных спутников, добавляются в хранилище.

### Ключевые принципы и цели

- **Открытость и доступность:** Проект SatNOGS придерживается философии открытого программного и аппаратного обеспечения, делая технологии наблюдения за спутниками доступными для всех желающих, независимо от их опыта и ресурсов.
- **Сотрудничество и сообщество:** SatNOGS объединяет сообщество радиолюбителей, инженеров, исследователей и энтузиастов космоса, предоставляя платформу для совместной работы, обмена знаниями и опытом, а также совместного развития проекта.
- **Дальнейшее развитие:** Планы развития SatNOGS включают в себя:

- Автоматизацию системы проверки данных с использованием методов машинного обучения для повышения эффективности и точности анализа.
- Оптимизацию планирования наблюдений для максимального использования ресурсов сети и обеспечения наилучшего качества данных.
- Расширение возможностей анализа данных, включая предоставление необработанных данных с радиоприёмников для использования в радиоастрономических и других научных исследованиях.

### Значение для сообщества

SatNOGS предоставляет широкий спектр инструментов и возможностей для изучения космоса, включая:

- **Получение данных с CubeSat и других спутников:** SatNOGS предоставляет инструменты и инфраструктуру для приёма и декодирования данных с малых спутников формата CubeSat, а также с других низкоорбитальных спутников, открывая возможности для исследований и образовательных проектов.
- **Развитие навыков в области радиотехники и обработки сигналов:** Участие в проекте SatNOGS позволяет развивать практические навыки в области радиотехники, обработки сигналов, работы с радиолюбительским оборудованием и программным обеспечением.
- **Участие в научных и образовательных проектах:** SatNOGS активно поддерживает использование сети для научных исследований и образовательных проектов, предоставляя доступ к данным и инструментам для анализа.
- **Содействие развитию открытых космических технологий:** Проект SatNOGS способствует продвижению и развитию открытых космических технологий, делая исследования космоса более доступными и демократичными.

### 3 Платформа Polaris ML

Платформа Polaris ML. Приложение Polaris ML от LibreSpace использует алгоритм машинного обучения XGBoost для анализа взаимосвязей между параметрами телеметрии бортовых систем спутника. Polaris ML способен рассчитать и визуализировать взаимосвязи между параметрами телеметрии и степень их влияния друг на друга в виде трехмерного графа связностей. В процессе исследования производительность модели искусственного интеллекта Polaris ML была значительно усовершенствована путем переноса core инфраструктуры на C++, а именно выделением прекомпилированных библиотек ввода/вывода и кэширования промежуточных расчетов обучения. Также в приложение Polaris были добавлены декодеры для отслеживания целевых спутников и модуль, собирающий информацию о солнечной активности, работающий в отдельном контейнере Docker. Кроме того, был доработан инструмент для построения графов связностей и веб-интерфейс. Внедрены решения для прямого взаимодействия с панелью управления сервера SatNOGS, что позволяет получать дополнительные данные о состоянии интересующих спутников. На рис. 5 представлена архитектура финальной системы, включающая в себя внесенные доработки и усовершенствования.

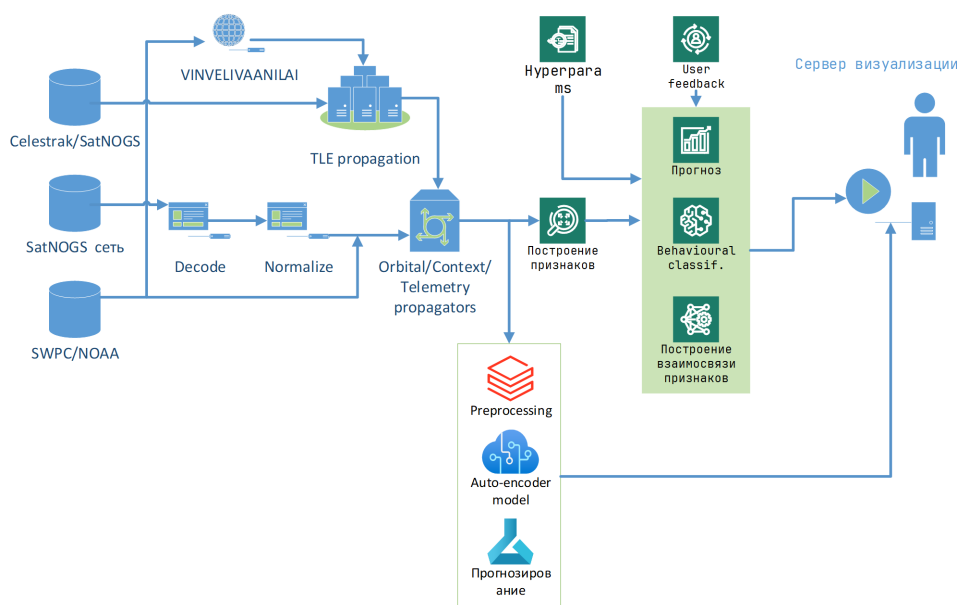


Рис. 5: Архитектура приложения Polaris

Этапы проведения анализа:

1. **Автоматическое извлечение данных:** Данные извлекаются из различных источников, включая телеметрию сети SatNOGS и дан-

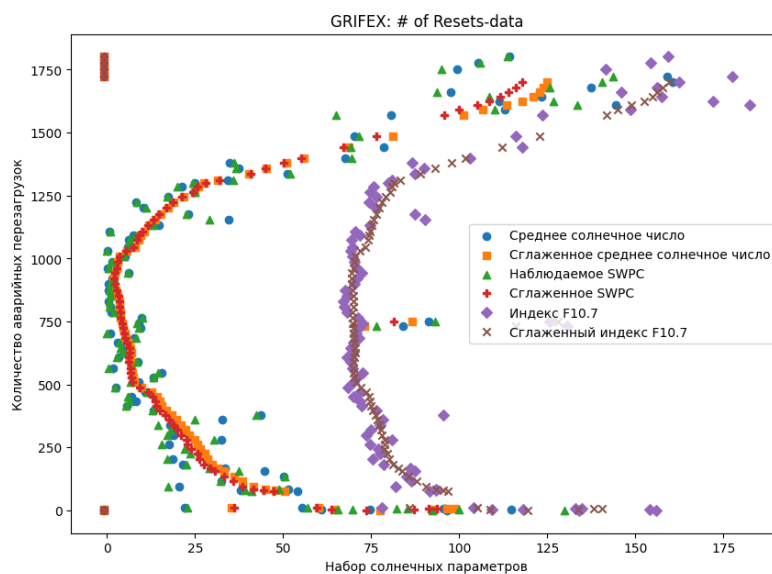
ные о космической погоде от NASA SWPC (NOAA).

2. **Машинное обучение (XGBoost):** С использованием алгоритма XGBoost [1, 3] анализируется взаимосвязь извлеченных данных. Результатом является файл в формате JSON, содержащий описания параметров телеметрии и их значения в кадрах с временными метками.
3. **Визуализация:** Строится граф связности для визуализации взаимозависимостей между параметрами. Также создается сложенный нормализованный вид телеметрии для отображения аномалий.
4. **Экспорт данных:** Выходные данные графиков экспортируются для дальнейшего анализа и интерпретации.

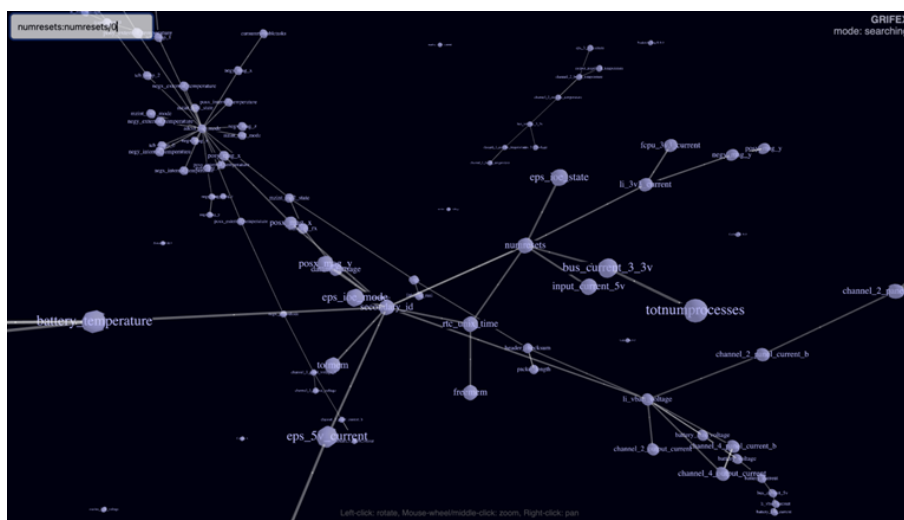
Как упоминалось ранее, был создан дополнительный модуль, который извлекает информацию о космической погоде с серверов NASA SWPC/NOAA. Эти данные сохраняются в базу данных InfluxDB, которая развернута локально в отдельном контейнере Docker Compose. Модуль также оснащен функциями для анализа данных орбитальных параметров в форматах TLE и OMM, а также для прогнозирования движения спутников на основе этих данных [2, 5].

Анализ перезагрузок основного процессора и граф связности. На рис.6а представлена взаимосвязь количества перезагрузок основного процессора наноспутника формата 3U GRIFEX от следующих индексов солнечной активности за период с 2019-03-03 по 2024-02-22: среднемесячные значения пятен S.I.D.C., SWPC/SWO и f10.7 см радиоизлучение. На рис.6б представлен результат использования модели Polaris ML для построения 3D графа связности параметров телеметрии спутника GRIFEX за период 2015–2021 г.

Как видно, количество перезагрузок основного процессора GRIFEX стремительно накапливалось в период 2019–2020 г., когда индексы солнечной активности SWPC/SWO и f10.7 см были относительно постоянны. С 2020 начался новый 5-летний цикл солнечной активности, что соответствует замедлению роста количества перезагрузок. Причина такого поведения объясняется графом связности. Из анализа графа видно, все взаимозависимые параметры телеметрии образуют взаимосвязанные ветки относительно времени (rtc\_unix\_time), а также относительно критических параметров. Общее количество перезагрузок основного процессора (numresets) непосредственно связано с токовым потреблением в бортовой системе питания, в частности, со значением тока на общей шине питания (battery\_bus\_current), с уровнем тока на



(a)



(b)

Рис. 6: (6a) - диаграмма количества принудительных перезагрузок основного процессора с набором параметров активности Солнца для спутника GRIFEX; (6b) - 3D граф связности параметров телеметрии спутника GRIFEX



шине 3.3 В (bus\_current\_3\_3v), с уровнем тока на шине 3.3 В основного процессора (fcpu\_3v3\_current), с уровне тока на шине 3.3 В аккумулятора (li\_3v3\_current). Из графа также видно, что на количество перезагрузок процессора влияет число запущенных процессов (totnumprocesses). Можно предположить, что количество перезагрузок связано с просадкой напряжения на шине питания за счет низкой температуры на аккумуляторах (battery\_temperature). При увеличении солнечной активности увеличился общий световой поток, что привело к повышению температуры, стабилизации напряжения и несвойственному замедлению роста числа перезагрузок процессора.

Таким образом, доработанная и адаптированная модель Polaris ML может быть использована для комплексного анализа взаимосвязей и влияния различных факторов на работу бортовой электроники наноспутников, в частности, солнечной активности. Оценка большего объема данных позволит выявить наиболее уязвимые системы спутника для разработки безопасных режимов работы его бортового оборудования в условиях агрессивной солнечной активности.

## 4 Алгоритм XGBoost

1. **Инициализация модели:** Определяется начальная модель  $F_0(x)$  как константа, минимизирующая функцию потерь на обучающей выборке:

$$F_0(x) = \arg \min_{\gamma} \sum_{i=1}^n L(y_i, \gamma)$$

2. **Итеративное построение ансамбля:** Процесс построения модели происходит итеративно, добавляя по одному дереву за раз:

- i. **Вычисление градиентов и значений функции потерь:** Для каждого объекта в обучающей выборке вычисляются градиент ( $g_i$ ) и значение функции потерь ( $h_i$ ):

$$g_i = \frac{\partial L(y_i, F_{m-1}(x_i))}{\partial F_{m-1}(x_i)}$$
$$h_i = \frac{\partial^2 L(y_i, F_{m-1}(x_i))}{\partial F_{m-1}(x_i)^2}$$

- ii. **Построение дерева решений:** Строится дерево решений  $f_m(x)$ , минимизирующее функцию потерь с учетом регуляризации:

$$\mathcal{L}^{(m)} = \sum_{i=1}^n \left[ g_i f_m(x_i) + \frac{1}{2} h_i f_m^2(x_i) \right] + \Omega(f_m)$$

где  $\Omega(f_m)$  - функция регуляризации, контролирующая сложность дерева.

- iii. **Обновление модели:** Модель обновляется путем добавления нового дерева с весом, определяемым коэффициентом обучения  $\alpha_m$ :

$$F_m(x) = F_{m-1}(x) + \alpha_m f_m(x)$$

3. **Предсказание:** Для нового объекта  $x$  предсказание модели получается суммированием предсказаний всех деревьев:

$$\hat{y} = F_M(x) = \sum_{m=1}^M \alpha_m f_m(x)$$

Особенности XGBoost:

- **Регуляризация:** Предотвращает переобучение и повышает обобщающую способность модели.
- **Метод Ньютона-Рафсона:** Используется для эффективной оптимизации функции потерь.
- **Обработка разреженных данных:** XGBoost эффективно работает с разреженными данными, что важно для многих задач.
- **Параллельное вычисление:** Алгоритм поддерживает параллельное вычисление для ускорения обучения.

## 5 Polaris ML: Выявление аномалий в данных телеметрии

Polaris ML, разработанная Libre Space Foundation, представляет собой мощную платформу для анализа данных телеметрии спутников. В основе платформы лежит алгоритм XGBoost, позволяющий выявлять аномалии и строить графы связности, отражающие взаимозависимости параметров телеметрии.

## 5.1 Процесс анализа

1. **Извлечение фреймов:** Процесс анализа начинается с сегментации временного ряда телеметрии на фреймы. Это может быть выполнено с фиксированным размером окна или на основе определенных событий.
2. **Извлечение признаков:** Из каждого фрейма извлекаются разнообразные статистические характеристики, такие как среднее значение, стандартное отклонение, минимум, максимум и другие, формируя вектор признаков.
3. **Обучение модели XGBoost:** Модель XGBoost обучается на основе векторов признаков, полученных из фреймов. Цель - создать модель, способную предсказывать значения параметров телеметрии в будущих фреймах.
4. **Выявление аномалий:** Аномалии определяются как значительные отклонения от предсказанных моделью XGBoost значений. Для этого Polaris ML предлагает несколько подходов:

- а. **Пороговые значения:** Устанавливаются пределы отклонений от предсказанных значений, например:

$$\|y_i - \hat{y}_i\| > \epsilon$$

где  $y_i$  - реальное значение,  $\hat{y}_i$  — предсказанное значение, а  $\epsilon$  - заданный порог.

- б. **Статистические методы:** Используются z-оценка:

$$z_i = \frac{y_i - \mu}{\sigma}$$

где  $\mu$  - среднее значение,  $\sigma$  — стандартное отклонение, и тест Граббса:

$$G = \frac{\max_i |y_i - \bar{y}|}{s}$$

где  $\bar{y}$  - выборочное среднее,  $s$  - выборочное стандартное отклонение, для выявления выбросов.

5. **Графы связности:** Модель XGBoost также используется для построения графов связности, визуализирующих взаимосвязи между параметрами телеметрии. Это помогает анализировать влия-

ние изменений одних параметров на другие и выявлять потенциальные причины аномалий.

### 5.2 Расширенный инструментарий

Помимо XGBoost, Polaris ML может использовать и другие методы выявления аномалий, включая:

Методы, основанные на расстоянии: Евклидово расстояние, Манхэттенское расстояние, расстояние Махаланобиса. Методы, основанные на плотности: Local Outlier Factor (LOF), Isolation Forest. Методы машинного обучения: One-Class SVM, автоэнкодеры.

Выбор конкретных методов зависит от характеристик данных и целей анализа.

# Литература

- [1] Xgboost: A scalable tree boosting system. <https://xgboost.readthedocs.io/en/latest/>, 2020.
- [2] L. Bottou. Stochastic gradient learning in neural networks. In *Proceedings of Neuro-Nimes*, volume 91, 1991.
- [3] R. Boumghar, J. Silva, I. Angelis, J. Schulster, and A. Donati. *Enhanced awareness in space operations using multipurpose dynamic network analysis*, pages 795–810. Springer International Publishing, 2018.
- [4] J. C. Green, J. Likar, and Y. Shprits. Impact of space weather on the satellite industry. *Advancing Earth and space science*, 15:804–818, 2017.
- [5] R. Killick, P. Fearnhead, and I. A. Eckley. Optimal detection of changepoints with a linear computational cost. *J. Amer. Statist. Assoc.*, 107:1590–1598, 2012.
- [6] L. Schlag, C. O’Meara, and M. Wickler. Numerical analysis of automated anomaly detection algorithms for satellite telemetry. In *SpaceOps Conference*, pages 1–13, 2018.