

**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 Михайло-  
вича  
студента 3 курса,  
специальность «аэрокос-  
мические  
радиоэлектронные и ин-  
формационные  
системы и технологии»

Научный руководитель:  
Баранова Василина Сер-  
геевна

Минск, 2024

## Содержание

<b>1 Введение</b>	<b>1</b>
<b>2 SatNOGS: Открытая инфраструктура для мониторинга низкоорбитальных спутников</b>	<b>2</b>
2.1 Истоки и Технологии . . . . .	2
2.2 Функционал и Применение . . . . .	2
2.3 Преимущества Открытости . . . . .	3
<b>3 Платформа Polaris ML</b>	<b>4</b>

## 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 [1]. 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 [2]. 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 Истоки и Технологии

Проект SatNOGS зародился в 2014 году во время мероприятия NASA SpaceApps Hackathon, проходившего в Афинском хакерспейсе. Он предоставляет 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 Открытости

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.

### 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. 1 представлена архитектура финальной системы, включающая в себя внесенные доработки и усовершенствования.

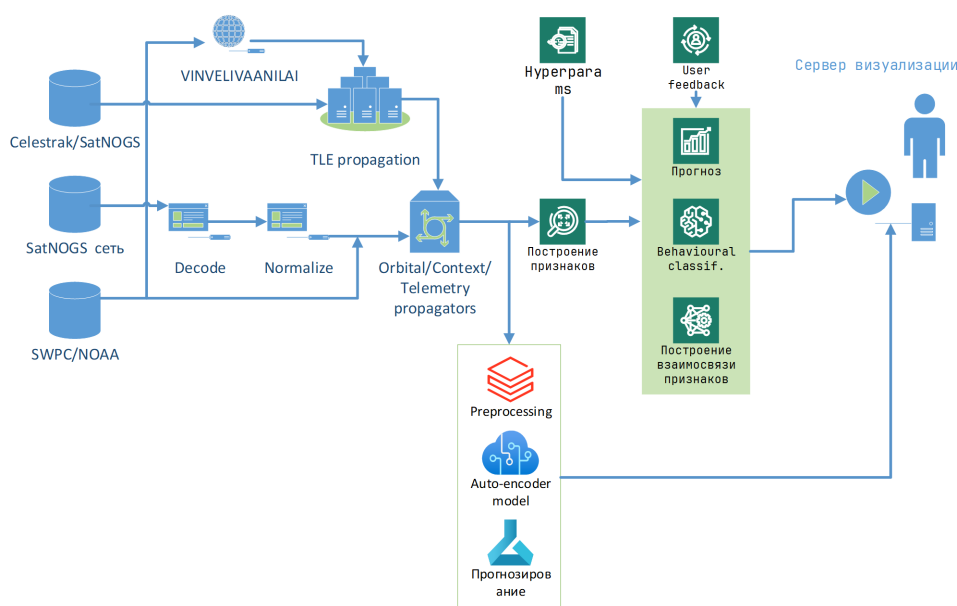


Рис. 1: Архитектура приложения Polaris

Этапы проведения анализа: 1) Автоматическое извлечение данных из различных источников. Включая данные телеметрии из сети SatNOGS и космической погоды NASA SWPC (NOAA); 2) Этап машинного обучения [3][4] (XGBoost), на котором анализируется взаимосвязь всех извлеченных данных и формируется файл графика JSON в качестве выходных данных. Файл содержит описания параметров телеметрии и их значения в кадрах с временными метками; 3) Визуализация построением графа связности, а также сложного нормализованного вида телеметрии, отображающего аномалии параметров; 4) Экспортирование выходных дан-

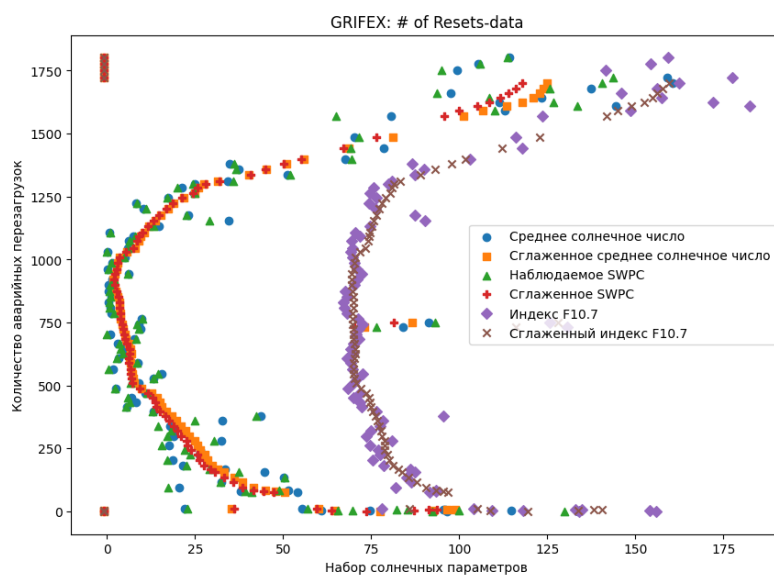
ных графиков для дальнейшего анализа.

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 [6][7].

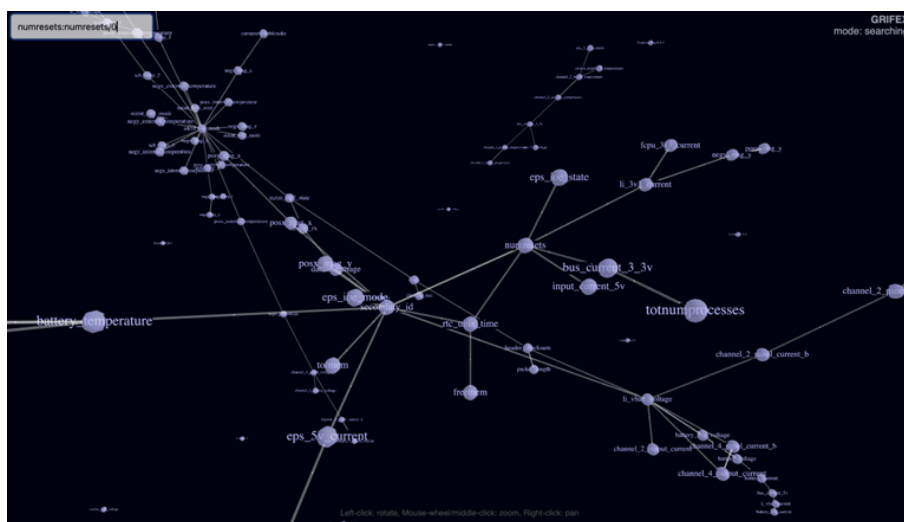
Анализ перезагрузок основного процессора и граф связности. На рис.2а представлена взаимосвязь количества перезагрузок основного процессора наноспутника формата 3U GRIFEX от следующих индексов солнечной активности за период с 2019-03-03 по 2024-02-22: среднемесячные значения пятен S.I.D.C., SWPC/SW0 и f10.7 см радиоизлучение. На рис.2b 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/SW0 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 критичных параметров. Общее количество перезагрузок основного процессора (numresets) непосредственно связано с токовым потреблением в бортовой системе питания, в частности, с значением тока на общей шине питания (battery\_bus\_current), с уровнем тока на 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 несвоевременному 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.



(a)



(b)

Рис. 2: (2а) - диаграмма количества принудительных перезагрузок основного процессора с набором параметров активности Солнца для спутника GRIFEX; (2б) - 3D граф связности параметров телеметрии спутника GRIFEX

## Список литературы

- [1] Green, J. C., Likar, J., & Shprits, Y. (2017). Impact of space weather on the satellite industry. *Advancing Earth and space science*, 15, 804–818.
- [2] Schlag, L., O'Meara, C., & Wickler, M. (2018). Numerical Analysis of Automated Anomaly Detection Algorithms for Satellite Telemetry. In *SpaceOps Conference* (pp. 1-13).
- [3] XGBoost: A Scalable Tree Boosting System [Электронный ресурс]. Retrieved March 7, 2024, from <https://xgboost.readthedocs.io/en/latest/>
- [4] Boumghar, R., Silva, J., Angelis, I., Schulster, J., & Donati, A. (2018). Enhanced awareness in space operations using multipurpose dynamic network analysis. In *Space Operations: Inspiring Humankind's Future* (pp. 795-810). Springer International Publishing.
- [5] Ray, B. K., & Tsay, R. S. (2002). Bayesian methods for changepoint detection in long-range dependent processes. *Journal of Time Series Analysis*, 23, 687–705.
- [6] Bottou, L. (1991). Stochastic gradient learning in neural networks. In *Proceedings of Neuro-Nimes* (Vol. 91).
- [7] Killick, R., Fearnhead, P., & Eckley, I. A. (2012). Optimal detection of changepoints with a linear computational cost. *J. Amer. Statist. Assoc.*, 107, 1590–1598.