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

## Е.М. Глеба, В.С. Баранова, А.А. Спиридонов, В.Е. Черный, Д.В. Ушаков, В.А. Саечников

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь E-mail: rct.gleba@bsu.by

В работе исследуется метод оценки влияния космической погоды на бортовые системы спутников на основе анализа телеметрии базы данных SatNOGS и выявления аномалий при помощи модели машинного обучения Polaris ML с использованием алгоритма XGBoost, реализующего метод Ньютона-Рафсона.

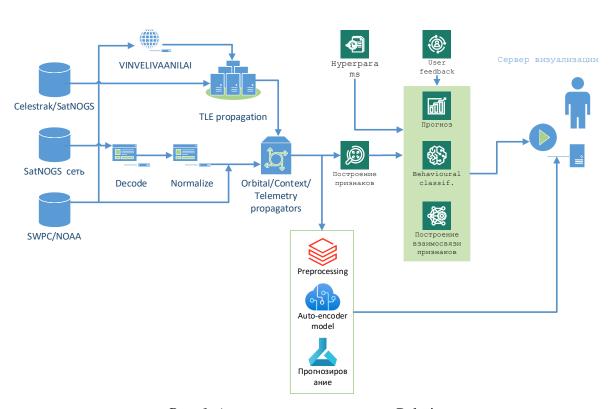
*Ключевые слова:* космическая погода; солнечная активность; аномалии телеметрии; SatNOGS; корреляционный анализ; модели искусственного интеллекта.

Введение. Космическая погода представляет собой комплекс явлений, происходящих в околоземном космическом пространстве, которые могут влиять на работу низкоорбитальных спутников. К ним вспышки, выбросы корональной солнечные 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 эксплуатации наноспутников внедряются И автоматизированные системы мониторинга телеметрии, состояния которые используют различные модели машинного обучения [2]. автоматизированные Подобные системы оценивают В работоспособность бортовых систем на момент испытаний или в режиме полетной диагностики. Спутник является сложной электрической системой, где события на каждом узле (компоненты бортовых систем) могу 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.

**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

графа связностей. В процессе трехмерного исследования производительность модели искусственного интеллекта Polaris ML была значительно усовершенствована путем переноса соге инфраструктуры на С++, 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.



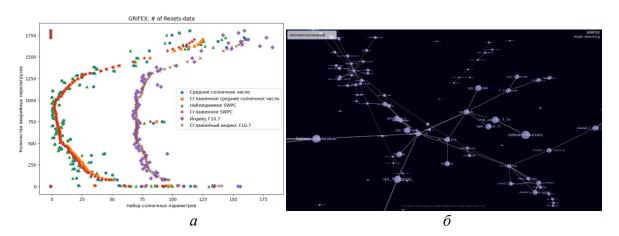
Puc. 1. Архитектура приложения Polaris

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 [4, 5] (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 сложенного нормализованного вида телеметрии, отображающего аномалии параметров; 4) Экспортирование выходных данных 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 процессор и граф связности. На рис. 2 (а) 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. 2 (б) представлен результат использования модели Polaris ML для построения 3D графа связности параметров телеметрии спутника GRIFEX за период 2015–2021 г.



*Puc. 2. а* - диаграмма количества принудительных перезагрузок основного процессора с набором параметров активности Солнца для спутника GRIFEX;  $\delta$  - 3D граф связности параметров телеметрии спутника GRIFEX

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 соответствуют замедлению роста количества перезагрузок. Причина такого поведения объясняется графом связности. Из анализа графа видно, все взаимо-

зависимые параметры телеметрии образуют взаимосвязанные ветки относительно времени (rtc\_unix\_time), а также относительно критичных параметров.

Общее количество перезагрузок основного процессора (numresets) непосредственно связанно 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 связанно 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.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

- 1. Green J. C., Likar J., Shprits Y. Impact of space weather on the satellite industry // Advancing Earth and space science, 2017. № 15. C. 804–818.
- 2. *Schlag L., O'Meara C., Wickler M.* Numerical Analysis of Automated Anomaly Detection Algorithms for Satellite Telemetry // SpaceOps Conference, 2018. C.1-13.
- 3. XGBoost: A Scalable Tree Boosting System [Электронный ресурс]. URL <a href="https://xgboost.readthedocs.io/en/latest/">https://xgboost.readthedocs.io/en/latest/</a> (дата обращения: 07.03.2024).
- 4. Boumghar R., Silva J., Angelis I., Schulster J., Donati A. Enhanced awareness in space operations using multipurpose dynamic network analysis // Space Operations: Inspiring Humankind's Future. Springer International Publishing. 2018. P. 795-810
- 5. *Ray B.K.*, *Tsay R.S.* Bayesian methods for changepoint detection in long-range dependent processes // Journal of Time Series Analysis. 2002. V. 23. P. 687–705.
- 6. *Bottou L.* Stochastic gradient learning in neural networks // Proceedings of Neuro-Nimes. 1991. V. 91.
- 7. *Killick R., Fearnhead P., Eckley I.A.* Optimal detection of changepoints with a linear computational cost // J. Amer. Statist. Assoc. 2012. V. 107. P. 1590–1598.