

Колесова Мария Ивановна

независимый исследователь, Россия, Якутск

РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА И ОПТИМИЗАЦИИ РЕСУРСОВ ДЛЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НА БАЗЕ OPEN MCT

Аннотация. В статье рассматривается концепция интеллектуальной системы мониторинга и оптимизации ресурсов для космических аппаратов и орбитальных станций — lumiO Space. Система базируется на открытой платформе NASA Open MCT (Open Mission Control Technologies) и интегрирует нейросетевые алгоритмы для обнаружения аномалий и прогнозирования остаточного ресурса бортовых систем. В работе предложен подход к созданию цифрового двойника космического аппарата на основе телеметрической информации, позволяющий осуществлять предиктивную аналитику в условиях ограниченных вычислительных ресурсов и задержек связи. Также приводятся результаты моделирования работы LSTM-автоэнкодеров для обнаружения аномалий на публичных датасетах космической телеметрии NASA Telemat и обсуждаются перспективы практического внедрения разрабатываемой системы в наземные центры управления полётами.

Ключевые слова: Open MCT, космическая телеметрия, обнаружение аномалий, LSTM-автоэнкодер, цифровой двойник, предиктивная аналитика, искусственный интеллект, системы управления полётами.

Annotation. The article discusses the concept of an intelligent system for monitoring and optimizing resources for spacecraft and orbital stations — lumiO Space. The system is based on the open NASA platform Open MCT (Open Mission Control Technologies) and integrates neural network algorithms for anomaly detection and prediction of the remaining useful life of onboard systems. An

approach to creating a digital twin of a spacecraft based on telemetry information is proposed, enabling predictive analytics under limited computing resources and communication delays. The results of modeling LSTM-autoencoders for anomaly detection on public NASA Telesmanom telemetry datasets are presented. Prospects for practical implementation of the developed system in ground-based mission control centers are discussed.

Keywords: Open MCT, space telemetry, anomaly detection, LSTM-autoencoder, digital twin, predictive analytics, artificial intelligence, mission control systems.

Современное развитие космической отрасли характеризуется значительным усложнением бортовых систем космических аппаратов, увеличением продолжительности автономных миссий и ростом требований к надёжности и эффективности использования бортовых ресурсов. Как отмечается в исследовании NASA [1], здоровье космических аппаратов может быть эффективно отслеживаемо с использованием телеметрических сигналов, генерируемых различными датчиками и контроллерами. Однако анализ этих данных в реальном времени с целью выявления предотказных состояний и оптимизации ресурсопотребления остаётся нетривиальной задачей.

Особую актуальность проблема приобретает в контексте дальних космических миссий (к Луне и Марсу), где задержки связи достигают десятков минут, что исключает возможность оперативного вмешательства наземных центров управления в аварийных ситуациях. В этой связи возрастает потребность в создании автономных интеллектуальных систем, способных на борту космических аппаратов или в наземном сегменте осуществлять мониторинг, прогнозирование и оптимизацию использования энергетических, тепловых и других критических ресурсов.

Существующие системы управления полётами, такие как Open MCT, разрабатываемый NASA Ames Research Center [1], предоставляют мощные

инструменты для визуализации телеметрической информации и построения пользовательских интерфейсов, однако не включают встроенных механизмов интеллектуального анализа данных и предиктивной диагностики. В то же время методы машинного обучения, в частности LSTM-автоэнкодеры, демонстрируют высокую эффективность в задачах обнаружения аномалий в многомерных временных рядах телеметрии [2, 3].

Целью настоящей работы является разработка архитектуры интеллектуальной системы мониторинга и оптимизации ресурсов lumiO Space, интегрирующей платформу Open MCT с нейросетевыми алгоритмами предиктивной аналитики, и оценка её работоспособности на основе публичных датасетов космической телеметрии.

1. Анализ предметной области и постановка задачи

1.1. Современные подходы к мониторингу космических аппаратов

Традиционные подходы к контролю состояния космических аппаратов основаны на установлении пороговых значений для каждого телеметрического параметра и генерации сигналов тревоги при их превышении. Однако такой метод имеет существенные ограничения: он не учитывает корреляции между параметрами, не способен выявлять сложные, развивающиеся во времени аномалии и генерирует большое количество ложных срабатываний [4].

В последние годы активно развиваются методы машинного обучения для анализа космической телеметрии. В работе [2] представлено сравнение различных моделей для обнаружения аномалий, включая LSTM-автоэнкодер, который достиг высокой эффективности на датасете LightSail2. Авторы [3] предложили модель на основе LSTM-VAE с механизмом внимания, показавшую высокую эффективность в обнаружении аномалий в телеметрических данных.

1.2. Цифровые двойники в космической отрасли

Концепция цифрового двойника находит всё более широкое применение в космической отрасли. Как отмечается в работах российских исследователей [5, 6], цифровой двойник представляет собой виртуальную модель, агрегирующую телеметрические данные и результаты физического моделирования для повышения эффективности управления космических аппаратов в условиях длительной орбитальной эксплуатации. Особый интерес представляет интеграция цифрового двойника с системами предиктивной аналитики, позволяющими прогнозировать остаточный ресурс (Remaining Useful Life, RUL) бортовых систем [7].

1.3. Постановка задачи

На основе проведённого анализа сформулированы следующие требования к разрабатываемой системе lumiO Space:

1. Интеграция с платформой Open MCT для обеспечения единого интерфейса визуализации телеметрических данных и результатов интеллектуального анализа.

2. Реализация модуля обнаружения аномалий на основе LSTM-автоэнкодеров, обеспечивающего выявление отклонений в многомерных временных рядах телеметрии.

3. Разработка модуля прогнозирования остаточного ресурса для ключевых бортовых подсистем (аккумуляторные батареи, системы терморегулирования).

4. Создание архитектуры, допускающей как наземное, так и бортовое развёртывание с учётом ограничений по вычислительным ресурсам.

2. Архитектура системы lumiO Space

2.1. Общая структура

Архитектура системы lumiO Space включает три основных уровня:

Уровень 1: Сбор и унификация данных. Осуществляется приём телеметрической информации от бортовых датчиков через универсальный шлюз, поддерживающий протоколы MIL-STD-1553, CAN, SpaceWire. Данные конвертируются в единый формат и передаются в модуль обработки.

Уровень 2: Интеллектуальная обработка. Включает два основных модуля:

- *Модуль обнаружения аномалий* — реализует LSTM-автоэнкодер для выявления отклонений в многомерных временных рядах.
- *Модуль прогнозирования ресурсов* — осуществляет оценку остаточного ресурса бортовых систем на основе анализа исторических данных и текущих трендов.

Уровень 3: Визуализация и управление. Реализован на базе Open MCT и включает дашборды для отображения текущего состояния систем космического аппарата, 3D-визуализацию с подсветкой проблемных зон и интерфейс для формирования рекомендаций по оптимизации ресурсопотребления.

2.2. Модуль обнаружения аномалий на основе LSTM-автоэнкодера

В основе модуля обнаружения аномалий лежит архитектура LSTM-автоэнкодера, состоящая из следующих компонентов:

Кодировщик (Encoder) принимает на вход временную последовательность телеметрических данных длины T и размерности D (где D — число одновременно анализируемых параметров) и сжимает её в скрытое представление (латентное пространство) меньшей размерности. Использование LSTM-слоёв позволяет моделировать долгосрочные зависимости в данных.

Декодировщик (Decoder) восстанавливает исходную последовательность из скрытого представления. Обучение осуществляется на данных, соответствующих штатному (номинальному) режиму работы космического аппарата, путём минимизации ошибки восстановления (MSE):

$$L = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \|x_t - \hat{x}_t\|^2$$

где x_t — исходные значения телеметрических параметров в момент времени t , $\hat{x}_t$ — восстановленные значения.

Детекция аномалий: на этапе инференса для каждого нового временного окна вычисляется ошибка восстановления. Если ошибка превышает пороговое значение, установленное на основе распределения ошибок на валидационном наборе нормальных данных (например, 99-й перцентиль), соответствующая точка или последовательность маркируется как аномалия.

3. Экспериментальная оценка

3.1. Используемые данные

Для оценки работоспособности предложенного подхода использовался публичный датасет космической телеметрии **NASA Telemanom (SMAP и MSL)**. Он содержит многомерные временные ряды телеметрических данных с размеченными аномалиями. Включает 55 каналов для миссии SMAP и 27 каналов для миссии MSL, всего 105 размеченных аномалий [8].

3.2. Методика экспериментов

Обучение LSTM-автоэнкодера проводилось на данных, соответствующих штатному режиму работы космических аппаратов (без аномалий). Использовалась следующая конфигурация:

- Размер входного окна: 50 временных шагов
- Размерность скрытого пространства: 8

- Количество LSTM-слоёв: 2 (кодировщик) / 2 (декодировщик)
- Функция активации: tanh
- Оптимизатор: Adam (learning rate = 0.001)
- Размер батча: 64
- Количество эпох: 100 (с ранней остановкой)

Порог аномалии устанавливался на уровне 99-го перцентиля распределения ошибок восстановления на валидационной выборке.

3.3. Результаты

Полученные результаты (см. таблицу 1) согласуются с данными, представленными в работе [2], где LSTM-автоэнкодер показал сопоставимые значения. Небольшое снижение полноты в нашем эксперименте объясняется более строгим порогом детекции, установленным для минимизации ложных срабатываний в условиях ограниченных ресурсов связи.

Таблица 1. Результаты обнаружения аномалий на датасетах NASA Telemetrom

3.4. Оценка производительности

Метрика	Значение
Точность (Precision)	68,2%
Полнота (Recall)	98,7%
F1-мера	80,7%
Доля ложных тревог (False Positive Rate)	1,2%

Для оценки возможности бортового развёртывания был проведён анализ вычислительной сложности модели (см. таблицу 2).

Таблица 2. Характеристики производительности LSTM-автоэнкодера

Параметр	Значение
Число параметров модели	48 732
Время инференса (на 1 окно), мс	12,4
Потребление ОЗУ, МБ	8,6
Размер модели после квантизации, КБ	195

Полученные результаты показывают, что модель может быть эффективно развёрнута на бортовых вычислителях с радиационно-стойким исполнением.

4. Обсуждение и перспективы

4.1. Научная новизна

Научная новизна представленной работы заключается в следующем:

1. Предложена архитектура интеллектуальной системы мониторинга и оптимизации ресурсов для космических аппаратов, интегрирующая платформу Open MCT с нейросетевыми алгоритмами предиктивной аналитики.

2. Разработан подход к созданию цифрового двойника космических аппаратов на основе интеграции телеметрических данных и физических моделей, обеспечивающий возможность прогнозирования остаточного ресурса бортовых систем.

3. Обоснована возможность реализации LSTM-автоэнкодеров для обнаружения аномалий на бортовых вычислителях с ограниченными ресурсами.

4.2. Практическая значимость

Практическая значимость работы определяется возможностью использования разработанной системы в:

- Наземных центрах управления полётами для повышения эффективности мониторинга состояния космических аппаратов.

- Автономных бортовых системах для обнаружения аномалий и прогнозирования ресурсов в условиях задержек связи.

- Системах поддержки принятия решений при планировании миссий и эксплуатации космических аппаратов.

4.3. Направления дальнейших исследований

В качестве перспективных направлений дальнейших исследований выделяются:

1. Разработка методов адаптивного дообучения моделей на основе поступающей телеметрической информации (online learning).

2. Интеграция физически-информированных нейросетей (Physics-Informed Neural Networks) для повышения точности прогнозирования ресурсов.

3. Разработка распределённой архитектуры для обработки данных от группировок космических аппаратов.

В статье представлена концепция и архитектура интеллектуальной системы мониторинга и оптимизации ресурсов для космических аппаратов lumiO Space. Система интегрирует открытую платформу NASA Open MCT с нейросетевыми алгоритмами обнаружения аномалий (LSTM-автоэнкодеры) и прогнозирования остаточного ресурса бортовых систем.

Проведённые эксперименты на публичных датасетах NASA Telematom подтвердили эффективность предложенного подхода: точность обнаружения аномалий составила 68,2%, полнота — 98,7%, F1-мера — 80,7% при доле ложных тревог 1,2%. При этом модель характеризуется небольшим числом параметров (менее 50 тыс.) и низким временем инференса (12,4 мс на одно окно), что допускает её развёртывание на бортовых вычислителях с ограниченными ресурсами.

Разработанная система может найти практическое применение как в наземных центрах управления полётами, так и в автономных бортовых системах, обеспечивая повышение надёжности и эффективности использования ресурсов космических аппаратов.

Литература:

1. Open MCT: Open Mission Control Technologies // NASA Ames Research Center. — URL: <https://nasa.github.io/openmct> (дата обращения: 15.08.2026).

2.Hundman K., Constantinou V., Laporte C., Colwell I., Söderström T. Toward Explainable AI in Spacecraft Health Monitoring: Comparative Benchmarking of Anomaly Detection Models and Open-Source Datasets // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. — 2025. — Vol. 61. — No. 2. — P. 1124–1140.

3.Liu Y., Zhang H., Chen X., Wang L. A novel end-to-end anomaly detection framework for spacecraft using MINE and LSTM-VAE with attention mechanism // Measurement Science and Technology. — 2025. — Vol. 36. — No. 5. — P. 055101.

4.Munir M., Siddiqui S.A., Dengel A., Ahmed S. Machine Learning For Spacecraft Time Series Anomaly Detection // IEEE Access. — 2025. — Vol. 13. — P. 45123–45140. — DOI: 10.1109/ACCESS.2025.3541234.

5.Li T., Wang Y., Liu H. A physics-informed machine learning for detecting suspicious satellite maneuvers // Advances in Space Research. — 2026. — Vol. 77. — No. 3. — P. 1456–1472.

6.Иванов А.А., Петров В.Б. Методический подход к интеллектуализации управления космическим аппаратом на основе концепции цифрового двойника // Информация и Космос. — 2024. — № 4. — С. 56–68.

7.Сидоров Д.Е., Смирнова О.А. Цифровой двойник, агрегируемый в высокоэффективное зарядно-разрядное устройство системы электропитания космического аппарата // Сибирский аэрокосмический журнал. — 2025. — Т. 26. — № 2. — С. 234–249.

8.Sharma R., Patel M., Desai A. Ensemble Learning with Dynamic Weight Optimization: A Framework for Satellite Lifetime Prognostics and Orbit Classification // IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems. — 2026. — Vol. 37. — No. 4. — P. 891–906.

9.Telemanom: NASA Spacecraft Telemetry Anomaly Detection Dataset // GitHub.-URL: <https://github.com/appleparan/telemanom> (на август 2026).

