

EDUSat: образовательная платформа для изучения систем ориентации спутников



Астрономическое
образование

2026, № 2

А. Н. Ефимкин^{*1}, В. О. Глазунов², М. А. Качай³, П. В. Петров⁴

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова

²Школа № 179, г. Москва

³Школа «ЛЕТОВО», г. Москва

⁴Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана

Аннотация

Представлена образовательная платформа EDUSat в форм-факторе CubeSat 2U, предназначенная для изучения устройства космического аппарата и алгоритмов управления его ориентацией. Описаны конструкция корпуса и маховиков, электронная подсистема на основе микроконтроллеров ESP32 и RP2040, математическое обеспечение с использованием кватернионов, а также испытательные стенды. Рассмотрены результаты испытаний прототипа с одной степенью свободы и опыт применения платформы на мастер-классах и летней практике для школьников. Предложена примерная программа занятий, объединяющая 3D-моделирование, программирование и анализ работы системы ориентации. Платформа позволяет переходить от моделирования к экспериментам с реальными датчиками и исполнительными механизмами и может служить основой для школьных и студенческих проектов. Отмечены типичные затруднения при переносе алгоритмов с модели на прототип.

Учебно-исследовательская деятельность

Ключевые слова:

CubeSat, инженерное образование, проектная деятельность, управление ориентацией космического аппарата, кватернионы, натурный эксперимент

Сокращения:

ФКИ — факультет космических исследований; МГУ — Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова; ПИД — пропорционально-интегрально-дифференцирующий (регулятор)

*s24d_Efimkin@179.ru

1. Введение

Исследование космоса — важное направление современной науки, объединяющее многие дисциплины: астрономию, математику, физику, программирование и другие. Во многих вузах и школах даётся хорошая теоретическая база, однако космические исследования требуют междисциплинарного подхода, тогда как в образовательных учреждениях названные дисциплины изучаются отдельно, а астрономия может отсутствовать вовсе.

Для решения этой проблемы был разработан образовательный набор, который позволяет построить учебную программу сразу по нескольким направлениям. Особенность реализации заключается в том, что в процессе создания набора участники проекта осваивали те же темы, которые в дальнейшем предстоит изучать школьникам. Студенты также получают ценный опыт: не все они занимаются созданием спутников, но многие участвуют в разработке полезной нагрузки, для чего необходимо понимать устройство космического аппарата и принципы его работы.

2. Описание проекта

Актуальность. Идея создания образовательных наборов не нова. Существует ряд аналогов, ориентированных на космическую тематику, — наиболее известные из них: «Орбикрафт 3D», Juni, XOrbiX, «Интросат» и другие. Они различаются по уровню сложности, однако предназначены преимущественно для обучения инженерии. Существующие наборы позволяют реализовывать различные алгоритмы и осваивать инженерные навыки, однако получение наглядного результата часто затруднено.

Поступило в редакцию	24.02.2026
После доработки	14.06.2026
В печать	04.07.2026
Опубликовано	12.08.2026

ISSN 3033-7917
journal.astroedu.ru

Проект EDUSat изначально создаётся с ориентацией на визуализацию сложных явлений. Другая важная особенность — доступность. EDUSat задуман как доступная платформа для проведения экспериментов и разработки проектов, в том числе индивидуальных.

Концепция. В первой версии реализуется система ориентации и стабилизации с возможностью подключения различной полезной нагрузки. Эта подсистема выбрана в первую очередь потому, что позволяет использовать значительный объём материала по математике, физике и астрономии. Параллельно создаются минимальные версии систем электропитания и радиосвязи, которые пока остаются упрощёнными, но также могут служить основой для учебных задач.

В качестве форм-фактора выбран CubeSat 2U с габаритами (по направляющим) $100 \times 100 \times 227$ мм [1]. Это позволяет разместить внутри аккумуляторные батареи, базовую плату и блок системы ориентации, оставляя место для дополнительной полезной нагрузки. Такой размер также совместим с большинством современных 3D-принтеров, что упрощает изготовление корпусных деталей. В дальнейшем планируется создание комплекта испытательных стендов.

Основные характеристики EDUSat и упомянутых аналогов сопоставлены в табл. 1.

3. Спутник

Разработка спутника включает четыре основных направления:

- корпус и маховики;
- электроника;
- математическое обеспечение;
- испытательные стенды.

3.1. Корпус и маховики

Маховики — один из основных типов исполнительных механизмов системы управления ориентацией спутника. Конструктивно каждый из них состоит из электродвигателя с закреплённым грузом. В проекте используются бесщёточные двигатели с высоким крутящим моментом, что позволяет получать значительные угловые ускорения при относительно низком энергопотреблении. Принята схема с тремя маховиками, расположенными ортогонально друг другу; их оси вращения проходят через геометрический центр аппарата (в соответствии со спецификацией там же должен находиться центр масс).

В первой версии маховики выполнены из пластика; для увеличения момента инерции при ограниченном пространстве выбрана коническая форма. Для разных стендов можно использовать различные варианты исполнения маховиков. При испытаниях аппарата на нитевом подвесе достаточно 3D-печатных маховиков с полным заполнением. Для более тяжёлых версий разрабатывается вариант изготовления маховиков на станках с числовым программным управлением из алюминия или более плотных металлов. Для уменьшения вибраций и шума пластиковые маховики требуют балансировки (в следующей версии планируется использовать металлические заготовки), однако для простых испытаний, не требующих высокой точности, оказалось достаточно пластиковых маховиков без балансировки.

Корпус первой версии изготавливается методом 3D-печати с соблюдением спецификации CubeSat [1]. Особое внимание уделено удобству сборки: рама удерживается восемью винтами диаметром 4 мм; благодаря конструктивным особенностям обеспечиваются высокая жёсткость и устойчивость к нагрузкам, включая падения. Применение 3D-печати позволяет оперативно модифицировать отдельные узлы без необходимости полной замены конструкции. Маховики крепятся на отдельной детали, которая затем устанавливается на раму, дополнительно усиливая её.

На рис. 1 показан корпус спутника.

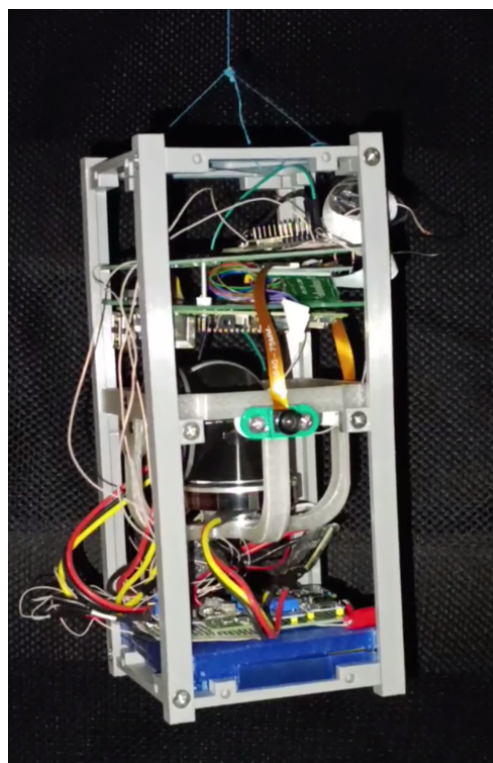


Рис. 1. Внешний вид корпуса EDUSat с расположением маховиков

Таблица 1. Сравнение образовательных платформ CubeSat

Платформа	Технические параметры	Образовательные возможности	Стоимость
Орбикрафт 3D	Готовые модули, Arduino, ограниченный набор датчиков	Базовое программирование, сборка	Высокая
Juni	Симулятор без физического аппарата	Только программное моделирование	Средняя (подписка)
XOrbiX	Набор на базе STM32, магнитометры, гироскопы	Управление ориентацией, радиосвязь	Высокая
Интросат	CubeSat 1U, фотодиоды в качестве солнечных датчиков	Простые алгоритмы ориентации	Средняя
EDUSat	CubeSat 2U, ESP32 и RP2040, камеры OV2640, гироскоп, акселерометр, магнитометр, приёмник спутниковой навигации, Bluetooth, корпус, изготовленный методом 3D-печати	Различные алгоритмы ориентации, визуализация вращения, подключение к симулятору	Низкая

3.2. Электроника

Основой электронной части является печатная плата размером 90×90 мм, на которой размещены все ключевые компоненты, необходимые для отработки функций спутника формата CubeSat (рис. 2). Вычислительная подсистема построена на двух популярных микроконтроллерах для встраиваемых систем: ESP32 поддерживает Wi-Fi и Bluetooth, а RP2040 имеет два вычислительных ядра.

ESP32 отвечает за получение и обработку данных с камеры OV2640, в том числе для определения направления на Солнце [2; 3]. Это решение является простым и недорогим, однако для расширения возможностей ориентации предусмотрена установка второй камеры, подключаемой параллельно. Каждая камера имеет отдельный сигнал включения, что позволяет опрашивать их поочерёдно и получать изображения с разных сторон аппарата. Использование камер вместо простых фотодиодов увеличивает вычислительную нагрузку и требует тщательной калибровки, что, однако, создаёт дополнительную учебную задачу и знакомит школьников с методами компьютерного зрения.

Микроконтроллер RP2040 [4] реализует основную логику управления. К нему подключены различные датчики (гироскоп, акселерометр, магнитометр), драйверы трёх бесколлекторных двигателей с датчиками тока, приёмник глобальной навигационной спутниковой системы и модуль беспроводной связи Bluetooth. Такой набор датчиков и исполнительных устройств позволяет обрабатывать широкий круг задач по ориентации и стабилизации.

Микроконтроллеры связаны между собой интерфейсами, обеспечивающими возможность перепрошивки одного контроллера с другого и обмена данными в процессе экспериментов. Спутник устанавливается на испытательный стенд, который допускает вращение по всем трём осям без ограничений. Пользователь

может загружать алгоритмы для проверки методов определения положения Солнца, стабилизации, удержания ориентации, передачи данных по радиоканалу с различными протоколами, а также для определения абсолютной ориентации в пространстве.

В качестве солнечных датчиков используются две широкоугольные камеры с частично перекрывающимися полями зрения. В каждый момент активна только одна камера, что позволяет снизить вычислительную нагрузку и избежать конфликтов на шине. Использование камер открывает возможность применения более сложных алгоритмов обработки изображений и определения направлений не только на Солнце, но и на другие небесные объекты. Переключение камер реализовано аппаратно с использованием отдельного вывода включения (вывод 6 модуля OV2640) [2], что позволяет программно управлять их состоянием.

В перспективе планируется разработка дополнительной платы расширения, выполняющей функции аппаратно-программного симулятора. Она позволит воспроизводить условия, приближенные к реальному космическому полёту, при сохранении работы с физической моделью спутника и реальными исполнительными механизмами. Основное назначение этой платы — формирование учебных и экспериментальных сценариев, в рамках которых пользователь может отрабатывать

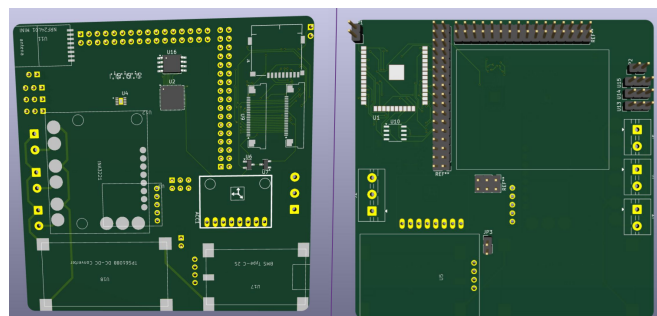


Рис. 2. Печатная плата EDUSat с микроконтроллерами ESP32 и RP2040, датчиками и разъёмами

алгоритмы управления в условиях, близких к реальной эксплуатации. Плата будет генерировать данные, имитирующие орбитальное движение, вращение и внешние воздействия; при этом часть данных может поступать от реальных датчиков, а часть — формироваться программно. Это позволит объединить симуляционную среду MIDE (Missions Integrated Development Environment), разработанную Баллистическим центром ФКИ МГУ, с натурным экспериментом [5].

3.3. Математическое обеспечение

Для разработки автономного алгоритма управления ориентацией были решены следующие задачи: выбор математического аппарата описания вращения, анализ условий функционирования (тип орбиты, применимость датчиков), реализация и тестирование алгоритма.

3.3.1. Характеристика задачи и математического аппарата

Вращение спутника описывается с помощью кватернионов [6]. Это позволяет избежать вырождения углов Эйлера, известного как «складывание рамок» (gimbal lock).

Нормированный кватернион задаёт поворот на угол α вокруг единичного вектора $\mathbf{u}$:

$$q = \cos \frac{\alpha}{2} + \mathbf{u} \sin \frac{\alpha}{2}. \quad (1)$$

На борт загружается конечное число точек (часто небольшое, так как пропускная способность радиоканала невелика), поэтому для восстановления непрерывной траектории используется SQUAD-интерполяция (Spherical and Quadrangle Interpolation) [6]. Она основана на сферической линейной интерполяции (SLERP), но дополнительно обеспечивает непрерывность угловой скорости, что важно для реалистичного моделирования движения.

Проект ориентирован на высокоэллиптические орбиты. На таких орбитах:

- магнитное поле Земли слишком слабо для эффективного использования магнитометров;
- время нахождения в тени невелико, что позволяет применять оптические датчики для ориентации по Солнцу, Земле и Луне;
- инерциальные датчики (гироскопы, акселерометры) сохраняют работоспособность и используются в дополнение к оптическим.

3.3.2. Реализация алгоритма

Алгоритм¹ написан на языке Python с использованием библиотек `roam` (кватернионные вычисления) [7] и `NumPy` [8].

Входные данные — массив пар «момент времени — ориентация». Последовательность шагов:

1. вычисление кватернионов для каждого момента;
2. построение SLERP-интерполяции;
3. определение управляющих (сглаживающих) кватернионов;
4. вычисление SQUAD-интерполяции и визуализация траектории.

Полученная непрерывная траектория подаётся на вход ПИД-регулятора, который формирует управляющий сигнал для маховиков.

3.3.3. Тестирование

Моделирование. Алгоритм точно воспроизвёл прохождение через контрольные точки. Траектория оказалась плавной и монотонной, что подтверждает корректность SQUAD-интерполяции и работы ПИД-регулятора в идеальных условиях.

Эксперимент на прототипе.

Цель эксперимента — проверить работоспособность алгоритма определения ориентации по изображению с камеры и управления маховиками на прототипе с одной степенью свободы.

Схема установки. Спутник CubeSat 2U подвешивался на лёгкой нити, что обеспечивало вращение только вокруг вертикальной оси. Две широкоугольные камеры были установлены на гранях $X+$ и $Y+$. Неподвижный источник света располагался на расстоянии 1 м от спутника в плоскости XY .

В связанной системе координат спутника грань $X+$ соответствует стороне с первой камерой, грань $Y+$ — стороне со второй камерой, ось Z направлена вертикально вверх (к верхней крышке CubeSat). Камеры поочерёдно определяли положение источника света. Бортовой алгоритм выбирал активную камеру в зависимости от того, на какую грань падает больше света. Полученные данные обрабатывались описанным алгоритмом SQUAD, и ПИД-регулятор выдавал команды маховикам для поворота спутника к источнику.

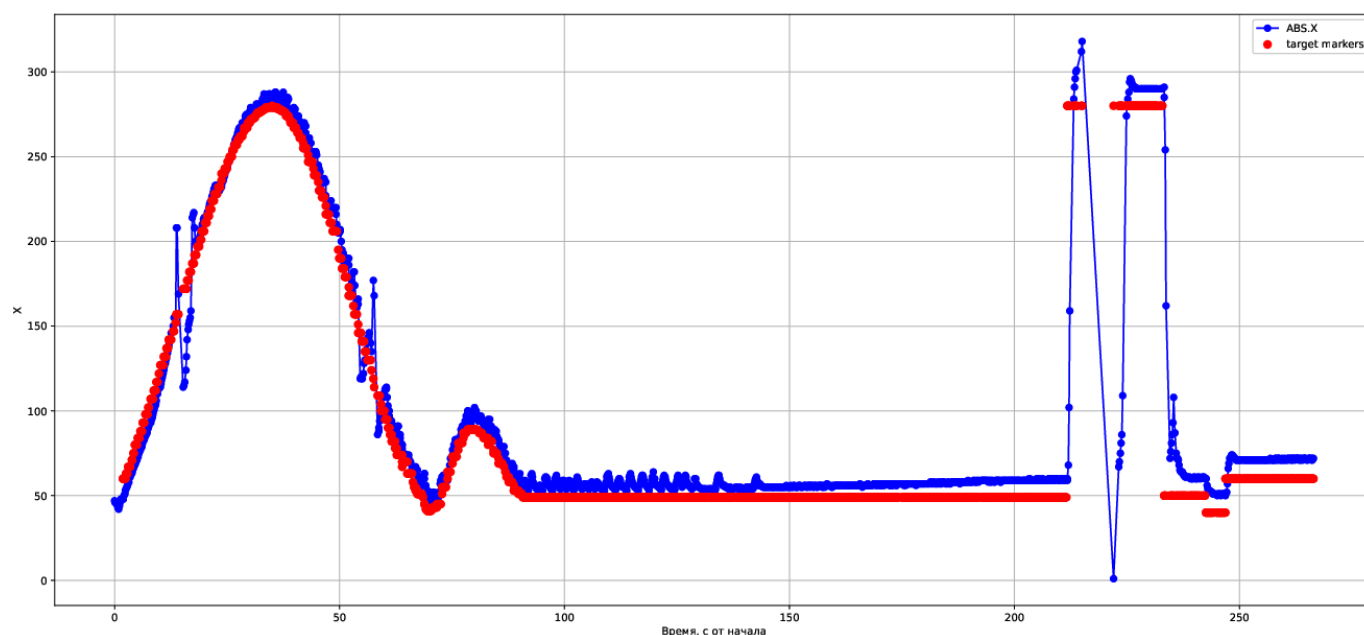


Рис. 3. Сравнение расчётной и измеренной траекторий вращения спутника при работе алгоритма ориентации. Красные маркеры — расчётная траектория, синяя линия — значения, измеренные оптическим датчиком. По оси абсцисс отложено время, с; по оси ординат — угол поворота, градусы

На рис. 3 сопоставлены расчётные и измеренные значения. В моменты переключения камер (через каждые 5 с) наблюдались кратковременные колебания амплитудой до 5° из-за неточной калибровки. В остальном измеренная траектория хорошо совпадала с расчётной; среднеквадратичное отклонение составило 1.2° .

3.3.4. Перспективы

В настоящее время завершён этап тестирования алгоритма с оптическими датчиками. Планируется продолжить эксперименты с добавлением инерциальных датчиков, а также провести отладку на полноценном трёхосном стенде без ограничений по углам поворота.

Баллистическим центром ФКИ МГУ разработана программа MIDE для моделирования космических полётов, включая задачи ориентации [5]. Ведётся работа по интеграции этой программы с испытательным стендом и спутником для проведения гибридных экспериментов, в которых часть данных поступает от реальных датчиков, а часть — от симулятора.

Параллельно разрабатывается трёхосный стенд, позволяющий отрабатывать систему ориентации без ограничений по углам поворота (в отличие от стендов на воздушных подшипниках). Создаётся новая версия стенда с повышенной точностью позиционирования. К спутнику также могут подключаться виртуальные датчики, эмулирующие показания на основе расчётов MIDE. Упрощённая одноосная версия стенда проста в использовании и достаточно мобильна.

4. Образовательное применение платформы

Платформа EDUSat позволяет проводить различные образовательные мероприятия: мастер-классы, проектные занятия, курсы дополнительного образования. Школьники и студенты могут использовать платформу как основу собственных проектов.

4.1. Апробация платформы

Первый прототип платформы EDUSat был испытан в рамках мастер-класса для участников Всероссийского чемпионата Воздушно-инженерной школы. Учащиеся настраивали параметры регуляторов, управляли маховиками и анализировали потребляемые токи, что позволило им получить практический опыт работы с системой ориентации.

Кроме того, на прототипе испытывалась математическая модель вращения. Проект «Математические способы описания вращения спутника» (М. А. Качай) занял III место на Всероссийской конференции школьных научных проектов «Вместе в науку» в 2025 году.

На начальном этапе возникали трудности, связанные с шумами датчиков, задержками передачи данных и ограничениями по моменту маховиков. Алгоритмы, успешно работавшие в симуляции, не всегда обеспечивали устойчивую стабилизацию реального прототипа. Были сделаны выводы о необходимости фильтрации данных, правильного выбора коэффициентов регулятора и учёта физических ограничений системы.

4.2. Школьные и студенческие мероприятия

Программу занятий удобнее всего подбирать под конкретный тип мероприятия.

Вполне универсальным можно назвать формат летней школьной практики. Это мероприятие, в рамках которого класс или профильная группа посещает предприятие или вуз, где занятия включают общие лекции и проектную работу с последующей защитой мини-проектов. Формат допускает значительную вариативность продолжительности: от короткого мастер-класса (несколько часов) до курса дополнительного образования (несколько месяцев).

Так, в рамках летней практики на ФКИ и в Научно-исследовательском институте ядерной физики МГУ была апробирована программа обучения учащихся физико-математического класса основам 3D-моделирования и программирования микроконтроллеров. До этого у обучающихся почти не было опыта в этих сферах.

На начальном этапе достаточно коротко продемонстрировать предстоящую работу. Например, при обучении 3D-моделированию можно дать готовую модель и показать, какие детали и для чего нужно смоделировать самостоятельно. После этого детали изготавливаются на 3D-принтере или других станках. С первой попытки, скорее всего, получить пригодную деталь не удастся — это необходимо учитывать при планировании работы. При обучении программированию микроконтроллеров следует показать, как загружать программу, и дать несколько простых примеров.

Деление программы на занятия продолжительностью по 2 академических часа позволяет проводить комбинированные занятия, включающие значительный практический компонент.

В табл. 2 приведена примерная программа практики, рассчитанная на 14 академических часов.

4.3. Реализация собственных проектов

На платформе EDUSat могут быть реализованы собственные проекты, например, система ориентации нового типа. Платформа может быть адаптирована к разным форматам работы. Например, платформа может использоваться студентами при подготовке курсовых и выпускных квалификационных работ.

Предусмотрены замена пластикового корпуса алюминевым и оснащение солнечными панелями, что позволит запускать аппарат в стратосферу. Для орбитальных полётов потребуются дополнительные доработки, но электроника следующего поколения EDUSat



Рис. 4. Мастер-класс с использованием прототипа EDUSat

Таблица 2. Примерная программа занятий с использованием EDUSat (летняя практика)

№	Содержание
1	Введение: - Рассказ о спутниках формата CubeSat и их задачах (например, о съёмке звёзд малым космическим телескопом). - Знакомство с платформой EDUSat. - Формирование групп по направлениям: математика, программирование, 3D-моделирование. При малом числе участников направления можно реализовывать последовательно.
2	3D-моделирование: демонстрация работы в КОМПАС-3D, работа с реальными деталями, постановка задачи на разработку узла (например, крепления камеры). Математика: постановка задачи, объяснение устройства камеры.
3	Программирование: постановка задачи для разработки алгоритма, загрузка на борт тестовых программ. 3D-моделирование: моделирование креплений. Математика, программирование: векторы, кватернионы, SLERP, SQUAD, алгоритм управления, демонстрация работы в среде MIDE.
4	3D-моделирование: при наличии доступа к 3D-принтерам — изготовление деталей, анализ ошибок проектирования. Математика: построение преобразования координат пикселей в векторы для камеры телескопа в системе координат спутника. Программирование: реализация подключения MIDE к физическому борту, тестирование системы управления.
5	Все группы: тестирование алгоритма вращения на одном из стендов, сбор данных.
6	Анализ полученных данных, сопоставление показаний оптических датчиков, камеры и гироскопа, оценка точности работы системы ориентации.
7	Внесение улучшений в конструкцию и код (например, подбор новых коэффициентов регулятора), подготовка к защите проектов.

создаётся на тех же компонентах, что и приборы для будущих космических экспериментов. Это позволяет работать с комплектующими, предназначенными для космических аппаратов.

Важным преимуществом этой платформы как базы для собственных проектов является то, что её разрабатывают школьники и студенты, а значит, другим пользователям будет проще разобраться в её устройстве.

5. Заключение

Платформа EDUSat не только демонстрирует реальные задачи космических исследований, но и позволяет перейти от моделирования к работе с реальными устройствами, а также реализовывать индивидуальные или групповые проекты.

После завершения отладки всех частей проекта планируется разработать базовые инструкции для проведения мастер-классов и демонстраций. В дальнейшем они могут стать основой методических пособий, ориентированных на включение профильного содержания в школьную практику.

Примечания

1 Демонстрационная реализация алгоритма приведена в репозитории [9].

Список литературы

- [1] *The CubeSat Program, Cal Poly San Luis Obispo*. CubeSat Design Specification (1U–12U). Revision 14.1. 2022. URL: https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2018/01/cubesatdesignspecificationrev14_12022-02-09.pdf.
- [2] *OmniVision Technologies*. OV2640 Color CMOS UXGA (2.0 MegaPixel) CAMERACHIP with OmniPixel2 Technology. Version 1.6. 2006. URL: <https://static.chipdip.ru/lib2/a/354/DOC066354995.pdf>.
- [3] *Espressif Systems*. ESP32 Series Datasheet. Version 4.7. 2024. URL: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf.
- [4] *Raspberry Pi Ltd*. RP2040 Datasheet. 20.02.2025. URL: <https://datasheets.raspberrypi.com/rp2040/rp2040-datasheet.pdf>.
- [5] *Лаборатория «Астродинамика» ФКИ МГУ имени М.В. Ломоносова*. MIDE — Missions Integrated Development Environment : Кроссплатформенная среда моделирования аэрокосмических систем. 2025. URL: <https://www.astrodynlab.space/mide>.
- [6] *Shoemake K*. Animating Rotation with Quaternion Curves // ACM SIGGRAPH Computer Graphics. 1985. Т. 19, № 3. С. 245–254. DOI: 10.1145/325165.325242.
- [7] *The Regents of the University of Michigan*. rowan: a Python package for working with quaternions. Реп. 1.3.2. URL: <https://rowan.readthedocs.io/en/v1.3.2/>.
- [8] *Array Programming with NumPy / C. R. Harris, K. J. Millman, S. J. van der Walt [и др.]* // Nature. 2020. Т. 585. С. 357–362. DOI: 10.1038/s41586-020-2649-2.
- [9] *Качай М. А.* CubeSat-attitude-control : Репозиторий GitHub. URL: <https://github.com/physly/CubeSat-attitude-control>.

Астрономическое образование, 2026. Материал предоставлен на условиях лицензии Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 (С указанием авторства — С сохранением условий). Разрешено свободно делиться (обмениваться) — копировать и распространять материал на любом носителе и в любом формате в любых целях, включая коммерческие; адаптировать (создавать производные материалы) — делать ремиксы, видоизменять и создавать новое, опираясь на этот материал в любых целях, включая коммерческие; при условии обеспечения соответствующего указания авторства, предоставления ссылки на лицензию и обозначения изменений, если таковые были сделаны. Производные материалы должны распространяться на таких же условиях.