

ОБЗОР СВОБОДНОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Храмов Д.А.

*Институт технической механики НАН Украины и ГКА Украины
г. Днепр, Украина*

REVIEW OF FREE SOFTWARE FOR SPACECRAFT SIMULATION

Khramov D.

*The Institute of Technical Mechanics of the NAS of Ukraine and the SSA of Ukraine
Dnopr, Ukraine*

АННОТАЦИЯ

Свободное программное обеспечение, распространяемое с открытым исходным кодом, является доступной альтернативой проприетарных пакетов моделирования космических аппаратов. В работе проведен анализ возможностей современного свободного ПО моделирования КА (42, GMAT, Basilisk, Tudat, OreKit и др.) и выработаны рекомендации по его применению. Рассмотрено также свободное ПО для решения специальных задач, связанных с моделированием КА: астрономических расчетов, расчета межпланетных перелетов, оптимизации траектории полета и визуализации орбиты.

ABSTRACT

Free and open source software is an affordable alternative to proprietary spacecraft simulation packages. The paper analyzes the capabilities of modern free software for spacecraft simulation (42, GMAT, Basilisk, Tudat, OreKit, etc.) and provides recommendations for its use. Free software for solving special problems related to spacecraft simulation is also considered: astronomical calculations, interplanetary flights, flight trajectory optimization, and orbit visualization.

Ключевые слова: свободное программное обеспечение, динамика космических аппаратов, космический полет, моделирование.

Keywords: free software, spacecraft dynamics, space flight, simulation.

Разработка программного обеспечения (ПО) планирования космических полетов и моделирования динамики космических аппаратов (КА) является сложной технической задачей. Как правило, разработка такого ПО ведется государственными организациями или крупными частными компаниями, способными поддерживать этот процесс многие годы. Так, история развития пакетов STK, ASTOS и DCAP насчитывает более 30 лет. Готовое ПО, как правило, представляет собой дорогостоящие коммерческие пакеты программ с закрытым исходным кодом или программы, предназначенные для закрытого использования в государственных организациях. Все это затрудняет применение такого ПО академическими исследователями.

Альтернативой является использование свободного ПО, распространяемого с открытым исходным кодом. Доступное по финансовым соображениям свободное ПО лучше соответствует принципу проверяемости научных исследований, когда все части научной работы, в том числе и программный код, доступны для независимой проверки. Актуальной является задача исследования возможностей свободного ПО в области моделирования КА.

Цель работы состоит в анализе возможностей современного свободного ПО моделирования КА и выработке рекомендаций по применению такого ПО при решении практических задач моделирования КА.

Объектом анализа является свободное ПО планирования космических полетов и решения задач

моделирования КА, существующее более трех лет и находящееся в состоянии активной разработки (последние версии не старше 2020 г.).

Моделирование КА, в первую очередь моделирование его динамики, является частью комплексной задачи планирования космического полета. Соответственно, ПО моделирования КА существует в составе программных пакетов планирования космических полетов, а также в виде отдельных пакетов моделирования динамики КА и решения связанных с этим задач (моделирование возмущающих сил и моментов, визуализация движения и т. п.).

Рассмотрим ПО, позволяющее комплексно решать основные задачи моделирования динамики КА и задачи планирования космических полетов.

Моделирование динамики КА планирование космических полетов. Пакет "42" представляет собой универсальный инструмент моделирования орбитального и углового движения КА [1]. Основное назначение пакета: поддержка проектирования и валидации систем управления ориентацией — от выработки концепции и разработки системы управления до интеграции модулей и тестирования. "42" способен моделировать угловое движение КА, состоящего из нескольких тел, как твердых, так и деформируемых, а также режимы орбитального полета, моделируя условия от низкой околоземной орбиты до Солнечной системы в целом.

Основные возможности пакета [2]:

- моделирование динамики систем тел, соединенных шарнирами (вращательного и поступательного движения), с топологической структурой дерева;

- поддержка моделей твердых и деформируемых тел;

- поддержка моделирования нескольких КА (операции сближения, групповой полет);

- описание силовых взаимодействий между КА и между КА и поверхностью планеты (поддержка спускаемых аппаратов, марсоходов и космических кораблей сервисного назначения);

- алгоритмы моделирования орбит двух и трех тел для произвольных объектов Солнечной системы;

- визуализация орбитального и углового движения КА;

- интерфейс межпроцессного взаимодействия с другими приложениями на основе сокетов.

"42" — кроссплатформенный пакет, написанный на языке C.

General Mission Analysis Tool (GMAT) разрабатывается коллективом сотрудников Центра им. Годдарда NASA и группой частных компаний [3]. Он предназначен для моделирования, анализа и оптимизации траекторий КА в различных режимах полета, начиная с низких околоземных орбит и движения вокруг Луны и заканчивая межпланетными траекториями и другими дальними космическими полетами.

Анализ предстоящего полета в GMAT начинается с создания так называемых "ресурсов" (resources), таких как: космический корабль, пропагатор (propagator, то есть метод расчета орбиты), оптимизатор (optimizer, способ оптимизации орбиты) и т. п. Параметры ресурсов задаются в зависимости от задач полета. Так, можно указать типы и количество реактивных двигателей, объем баков с горючим, вид горючего и мн. др. Помимо расчетов GMAT выполняет визуализацию движения КА. Например, он позволяет отобразить траекторию подспутниковой точки на любой планете или другом небесном теле из доступных в программе. GMAT позволяет выводить двумерные графики, создавать анимацию, а также интерактивную трехмерную графику. Графический пользовательский интерфейс GMAT дополняется собственным интерпретируемым языком программирования, сходным по синтаксису с MATLAB, который дает возможность работать с массивами и строками, создавать пользовательские функции и т. п. Поддерживаются интерфейсы прикладного программирования с MATLAB и Python.

Basilisk предназначен для астрономических расчетов, моделирования орбит, расчета орбитальных маневров КА и орбитальных группировок, а также для программно-аппаратного моделирования [4]. Basilisk разрабатывается в виде набора модулей языка Python, ядро которых реализовано на C/C++. Это позволяет упростить настройку и создание сценариев, обеспечивая при этом высокую скорость работы [5]. Basilisk разрабатывается двумя лабораториями Университета Колорадо в Боулдере —

Autonomous Vehicle Systems Laboratory и Laboratory for Atmospheric and Space Physics.

ORbits Extrapolation KIT (Orekit) — библиотека для моделирования динамики КА и разработки бортового ПО. В Orekit КА моделируется как твердое тело, движущееся под действием внешних и внутренних сил и моментов сил. Код Orekit написан на Java, благодаря чему библиотека является кроссплатформенной, и зависит только от наличия Java Standard Edition и математической библиотеки Hipparchus. Разработчики стремились создать набор "строительных блоков", который можно было бы легко использовать в самых разных ситуациях — от простых оценочных расчетов до анализа межпланетных перелетов [6]. Orekit предназначен для создания точных и эффективных низкоуровневых компонентов, используемых в программных расчетах динамики космического полета. Библиотека используется в Национальном центре космических исследований (CNES, Франция), Европейском космическом агентстве и ряде коммерческих компаний. Инструменты визуализации в библиотеке отсутствуют.

Scilab — пакет прикладных программ для научных и инженерных расчетов, представляющий собой общедоступную альтернативу проприетарному пакету MATLAB [7]. В состав пакета входит инструмент для создания блочных моделей Xcos — аналог Simulink из пакета MATLAB. Scilab разработан в INRIA (Франция) и в настоящее время развивается консорциумом Scilab Consortium. Scilab поддерживает несколько десятков пакетов-расширений, которые можно загрузить из репозитория ATOMS (AuTomatic mOdules Management for Scilab). Для расчета орбитального движения КА предназначены расширения CelestLab (разработки CNES) [8] и Aerospace Blockset [9] — набор блоков для Xcos, основанных на CelestLab. Недостатком этих расширений является то, что в них используются лишь простейшие модели плотности атмосферы. Одним из способов решения этой проблемы является использование моделей, имеющихся в библиотеке Orekit.

TU Delft Astrodynamics Toolbox (Tudat) представляет собой набор библиотек C++ для решения задач аэродинамики и космических исследований. Спектр предлагаемых библиотек весьма широк: от моделей гравитационного поля и других сил, действующих на КА, до методов численного интегрирования. Tudat позволяет объединить эти библиотеки в единую программную платформу, которая может использоваться для моделирования орбитального и углового движений КА, изучения динамики входа в атмосферу, расчета орбит спутниковых группировок, межпланетных полетов и т. д. Основные возможности Tudat [10]:

- широкий выбор интеграторов (функций, реализующих численные методы решения дифференциальных уравнений) с фиксированным и переменным шагом, в том числе: Рунге-Кутты 4-го порядка, Рунге-Кутта с переменным шагом (различные порядки), Булирша-Штора и Адамса-Башфорта-Моултона;

- моделирование орбитального и углового движения КА с учетом сил, моментов и других функций, заданных пользователем, с различными вариантами граничных условий, зависящих от переменных и производных от координат;

- предварительное проектирование полета и оптимизация орбит с помощью библиотеки *Pygmo*;

- моделирование условий на планетах солнечной системы и их влияния на движение КА. В частности, моделирование гравитационных полей планет, их атмосферы, орбиты и характеристик вращения, а также радиационной среды (для расчета сил давления солнечного излучения);

- моделирование ускорений: центрального гравитационного поля, различного числа сферических гармоник гравитационного поля, аэродинамического торможения, солнечного давления и тяги;

- создание и подключение пользовательских моделей управляющих сил для движения в атмосфере и вне ее;

- задание параметров КА: массы, аэродинамических коэффициентов, площади мишени сечения, ориентации и др.;

- интерфейс с MATLAB;

- использование без предварительного знания C++, настраивая модель при помощи файлов JSON.

Open Space Toolkit (OSTk) — набор универсальных библиотек для использования в аэрокосмической технике, доступный на языках C++ (язык реализации) и Python (интерфейс к C++-версии, разработанный для удобства интерактивного использования и прототипирования) [11]. Состоит из следующих компонент:

- Core — основные типы данных, контейнеры и утилиты;

- I/O — поддержка сетевых операций, интерфейсы к базам данных;

- Mathematics — аппроксимация кривых, оптимизация;

- Physics — физические единицы измерения, шкалы времени, системы отсчета, модели окружающей космической среды;

- Astrodynamics — орбитальное и относительное движение.

На веб-странице OSTk [11] приведены ссылки на Jupyter-ноутбуки с примерами решений различных практических задач. В частности, показано как можно построить след движения спутника на Земле по его орбите, заданной в формате TLE (Two-Line Elements).

poliastro — библиотека функций Python с открытым исходным кодом, применяемая в расчетах по аэродинамике и орбитальной механике, с упо-

ром на расчеты межпланетных перелетов. Опирается на библиотеку *Astropy*. Среди возможностей *poliastro* [12]:

- аналитическое и численное моделирование орбитального движения;

- преобразование между векторами координат и скорости КА и классическими элементами орбиты;

- преобразования астрономических систем координат;

- расчет гомановских и биэллиптических орбит перехода;

- визуализация траекторий;

- определение орбит (задача Ламберта);

- расчет эфемерид планет (с помощью *SPICE kernels* при посредстве *Astropy*).

В настоящее время параллельно развивается большое число пакетов, позволяющих моделировать динамику КА на языке программирования Julia. Julia — современный язык для научных и инженерных расчетов, ориентированный на проведение высокопроизводительных и параллельных вычислений [13]. Многие элементы синтаксиса Julia позаимствованы у MATLAB, что упрощает освоение языка. В то же время, написанные на Julia программы лишь немногим уступают в производительности программам, написанным на C и C++ [14]. Это позволяет рассматривать Julia в качестве эффективной свободной альтернативы MATLAB в области моделирования динамики КА.

Большинство пакетов объединены в *JuliaSpace* — группу GitHub-репозитория, посвященных приложениям Julia в астрономии и космонавтике [15]. В частности, в эту группу входят пакеты, реализующие Julia-интерфейс к *Orekit* (*Orekit.jl*) и *GMAT* (*GMAT.jl*). Среди пакетов, предназначенных для моделирования динамики КА средствами Julia, следует выделить *SatelliteToolbox.jl* [16]. Он используется в проектах Бразильского национального института космических исследований (*Brazilian National Institute for Space Research*) и является основой программного симулятора движения КА *FOrPlan* [17]. Среди поддерживаемых пакетом моделей внешних воздействий: модели верхней атмосферы Земли (экспоненциальная, *Jacchia-Roberts 1971*, *Jacchia-Bowman 2008*, *NRLMSISE-00*), модели геомагнитного поля Земли (дипольная модель, *IGRF*). Моделирование орбиты опирается на аналитическую модель *SGP4* и ряд простых численных моделей (центральное поле, J_2 , J_4).

Таблица 1 содержит описание возможностей свободного ПО проектирования космических полетов в сравнении с известными проприетарными пакетами. Пробелы в таблице указывают на отсутствие данных.

Таблица 1.

Возможности ПО проектирования космических полетов								
Возможности ПО	STK	FreeFlyer	ASTOS	DARTS	"42"	GMAT	Basilisk	Tudat
Расчет орбит	+	+	+		+	+	+	+
Оптимизация орбит	+	+	+		-	+	+	+
Моделирование запуска/возвращения с орбиты	+	+	+	+		+	+	+
Моделирование орбитальных маневров	+	+	+	+	+	+	+	+
Построение орбитальных группировок	+	+	+	+	+	+	+	+
Расчет видимости	+	+	+		-	+	-	-
Расчет покрытия поверхности	+	+	+		-	+	-	-
Расчет межпланетных перелетов	+	+	+	+	+	+	+	+
Определение орбит	+	+	+		-	+	+	+
Поддержка сценариев	-	+	-		+	+	+	-
Поддержка программно-аппаратного моделирования	+	+	+	+			+	

Рассмотрим свободное ПО, предназначенное для решения специальных задач, связанных с моделированием динамики КА: астрономических расчетов, расчета межпланетных перелетов, оптимизации траектории полета и визуализации орбиты.

Астрономические расчеты. *SOFA (Standards of Fundamental Astronomy)* представляет собой набор библиотек, который разрабатывается под эгидой Международного астрономического союза (МАС), и призван служить единым стандартом реализации алгоритмов для использования в астрономических вычислениях [18]. Разработку ведет международная инициативная группа — Совет SOFA, — назначенный отделом фундаментальной астрономии МАС (Division A). Совет получает последние одобренные МАС модели и теории в области фундаментальной астрономии, реализует их в виде компьютерного кода, и проверяет точность расчетов. SOFA работает в тесном сотрудничестве со всеми комиссиями отдела фундаментальной астрономии МАС и с Международной службой вращения Земли. SOFA существует в виде двух версий библиотек, реализованных на Fortran 77 и на ANSI C соответственно, распространяется свободно и имеет весьма обширную документацию.

Проект *Astropy* [19] призван упростить для пользователей, владеющих языком Python, взаимодействие с традиционными астрономическими пакетами, написанными на других языках (в первую очередь, с SOFA). Базовый пакет *Astropy (Core Astropy)* содержит функции, предназначенные для профессиональных астрономов и астрофизиков. Проект *Astropy* включает большое число дополнительных (т. н. "аффилированных") пакетов, написанных сторонними разработчиками, разделяющими цели *Astropy* и расширяющие возможности базового пакета.

Пакеты для астрономических расчетов языка Julia объединены в две пересекающиеся подборки — *JuliaSpace/AstroDynamics.jl* и *Julia Astro. AstroDynamics.jl* дает возможность подключаться к сторонним программам и библиотекам, таким как популярный пакет планирования межпланетных

полетов *SPICE* [20]. Можно подключать и использовать эфемериды JPL (*JPLEphemis.jl*) или *VSOP87 (VSOP87.jl)*, составленные Французским Бюро Долгот. В отличие от эфемерид JPL серий DE/LE, использующих полиномы Чебышева, эфемериды VSOP представлены в виде рядов Пуассона [21]. В подборке пакетов Julia Astro [22] выделим пакет *ERFA.jl*, реализующий Julia-интерфейс библиотеки *ERFA (Essential Routines for Fundamental Astronomy)* [23]. Она представляет собой C-библиотеку, содержащую ключевые астрономические алгоритмы и основанную на библиотеке SOFA [18]. *ERFA* призвана воспроизвести функциональные возможности SOFA и обеспечить совместимость библиотеки с более широким спектром лицензий с открытым исходным кодом.

Межпланетные полеты. *SPICE (Spacecraft Planet Instrument C-matrix Events)* — это набор программных инструментов и данных для планирования и анализа межпланетных космических полетов [20]. *SPICE* разработан в Центре навигации и вспомогательной информации NASA. В настоящее время является де-факто стандартным ПО для подготовки межпланетных космических полетов и применяется как в НАСА, так и в других космических агентствах.

SPICE организован в виде "ядер" (kernels) — файлов, содержащих информацию о траектории и ориентации космического корабля; эфемериды, размеры и форму целевого тела; размер, форму и ориентацию поля зрения инструмента; спецификации систем отсчета; таблицы коэффициентов преобразования шкал времени и др. [24]. Все компоненты *SPICE* находятся в свободном доступе, в том числе для коммерческих организаций.

SPICE Toolkit существует в официальных версиях для Fortran, C, IDL (Interactive Data Language) и MATLAB. Кроме этого существует масса неофициальных интерфейсов к пакету. Например *SpiceyPy* — "обертка" *SPICE Toolkit* для Python [25]. Все официальные версии пакета можно использовать как библиотеки и как самостоятельное ПО.

Хотя текущая версия SPICE Toolkit N 0066 выпущена 10 апреля 2017 г., ПО включено в обзор, поскольку последнее обновление документации было выполнено в августе 2020 г.

Оптимизация траектории. Пакет *SNOPT* (*Sparse Nonlinear OPTimizer*) предназначен для решения крупномасштабных задач нелинейной оптимизации [26]. SNOPT использует алгоритм разреженного последовательного квадратичного программирования (sequential quadratic programming) с квазиньютоновским приближением с ограниченным объемом памяти [27]. Он особенно эффективен для нелинейных задач, когда оценка функций и их градиентов требует больших вычислительных затрат. Функции должны быть гладкими, но не обязательно выпуклыми. SNOPT используется в нескольких пакетах ПО для оптимизации траектории полета, включая AeroSpace Trajectory Optimization and Software (ASTOS), GMAT и Optimal Trajectories by Implicit Simulation (OTIS). SNOPT написан на Fortran, но доступны интерфейсы к C, C++, Python и MATLAB.

Pagmo — библиотека для массовой параллельной оптимизации, реализованная на C++ [28]. Сочетает в себе современные алгоритмы локальной оптимизации (симплекс-методы, методы последовательного квадратичного программирования, методы внутренних точек и т. д.), эвристические алгоритмы глобальной оптимизации (муравьиные алгоритмы, алгоритмы роя частиц, генетические алгоритмы и др.) и методы их объединения, в том числе — с пользовательскими алгоритмами.

Визуализация. *CesiumJS* — библиотека на языке JavaScript с открытым исходным кодом, позволяющая создавать карты и трехмерные глобусы [29]. Используется разработчиками из самых разных отраслей для создания интерактивных веб-приложений, позволяющих обмениваться динамическими геопространственными данными. В аэрокосмической отрасли применяется для визуализации орбитальных спутниковых группировок (движение, наземное покрытие и т. п.).

Выводы. Все рассмотренные пакеты моделирования динамики КА позволяют моделировать орбитальное движение. Степень подробности модели колеблется в диапазоне от аналитической модели SGP4 до возмущенного кеплерова движения, с учетом всего спектра используемых в настоящее время моделей возмущений. Большинство ПО моделирует КА как твердое тело и только пакет "42" позволяет моделировать КА как систему твердых или деформируемых тел, имеющую структуру дерева.

Подавляющее большинство свободного ПО моделирования динамики КА является кроссплатформенным, в отличие от проприетарного ПО. Недостатком свободного ПО в сравнении с наиболее развитыми проприетарными пакетами STL, FreeFlyer и ASTOS является отсутствие поддержки программно-аппаратного моделирования. В настоящее время ближе всего к реализации такой возможности подошли разработчики Basilisk. Поддержка программно-аппаратного моделирования

позволит использовать один и тот же программный инструмент как при разработке КА, так и в качестве бортового ПО.

Наиболее широким набором возможностей среди рассмотренного свободного ПО обладают пакеты комплексного моделирования КА — GMAT и "42". Обратной стороной богатства возможностей является сложность освоения подобного ПО. Его применение может потребовать привлечения специально обученного персонала, что невозможно для небольших групп исследователей. В результате используются пакеты, обладающие меньшей универсальностью и степенью интегрированности компонент, но большими возможностями по доработке для использования в конкретном проекте. Наиболее перспективными в этом плане выглядят Basilisk, Tudat и Orekit.

Таким образом, при работе над большими проектами с перспективой многолетнего использования результатов (разработка спутниковой платформы, планирование полета), стоит подумать о комплексных инструментах. В этом случае затраты на их освоение себя окупят. Наличие в команде профессиональных программистов, наряду с инженерами, позволит выбрать пакет и оценить перспективы его переработки под потребности задачи. Среди свободного ПО к таким инструментам относятся: GMAT, "42", Basilisk, Tudat и Orekit.

Для решения отдельных научных и инженерных задач, в частности, при разработке концепции КА и ее предварительном анализе, необходим язык программирования, на котором можно быстро написать программу и который поддерживает достаточный набор свободно распространяемых библиотек. С этой целью используют языки Python, и Julia. Последний представляется наиболее перспективным при необходимости обеспечить высокую производительность расчетов. При наличии в команде профессиональных программистов, предлагается использовать языки Fortran, C, C++ и Java.

Литература

1. NASA Goddard Space Flight Center, 42: A comprehensive general-purpose simulation of attitude and trajectory dynamics and control of multiple spacecraft composed of multiple rigid or flexible bodies [Электронный ресурс]. — URL: <https://software.nasa.gov/software/GSC-16720-1> (дата обращения: 17.11.2021).
2. GitHub - ericstoneking_42_ Simulation for Spacecraft Attitude Control System Analysis and Design [Электронный ресурс]. — URL: <https://github.com/ericstoneking/42> (дата обращения: 17.11.2021).
3. GMAT Wiki - General Mission Analysis Tool (GMAT) [Электронный ресурс]. — URL: <https://gmat.atlassian.net/wiki/spaces/GW/overview> (дата обращения: 17.11.2021).
4. Basilisk Astrodynamics Framework [Электронный ресурс]. — URL: <http://hanspeterschaub.info/basilisk/index.html> (дата обращения: 17.11.2021).

5. Kenneally P. Basilisk: A flexible, scalable and modular astrodynamics simulation framework / P. Kenneally, H. Schaub, S. Piggott // 7th International Conference on Astrodynamics Tools and Techniques (ICATT), DLR Oberpfaffenhofen, Germany, November 6–9, 2018. [Электронный ресурс]. – URL: https://indico.esa.int/event/224/papers/3869/files/219-Kenneally_2018_ICATT.pdf (дата обращения: 17.11.2021).
6. Orekit Overview [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.orekit.org/overview.html> (дата обращения: 17.11.2021).
7. Scilab HomePage [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.scilab.org/> (дата обращения: 17.11.2021).
8. CelestLab [Электронный ресурс]. – URL: <https://atoms.scilab.org/toolboxes/celestlab> (дата обращения: 17.11.2021).
9. Aerospace Blockset [Электронный ресурс]. – URL: https://atoms.scilab.org/toolboxes/aerospace_blockset/3.0 (дата обращения: 17.11.2021).
10. TU Delft Astrodynamic Toolbox documentation [Электронный ресурс]. – URL: <http://tudat.tudelft.nl> (дата обращения: 17.11.2021).
11. Open space toolkit [Электронный ресурс]. – URL: <https://open-space-collective.github.io/open-space-toolkit/> (дата обращения: 11.11.2021).
12. Poliastro - astrodynamics in python — poliastro 0.15.dev0 documentation [Электронный ресурс]. – URL: <https://docs.poliastro.space/en/latest/> (дата обращения: 11.11.2021).
13. The Julia programming language [Электронный ресурс]. – URL: <https://julialang.org> (дата обращения: 11.11.2021).
14. Sells R. Julia Programming Language Benchmark using a Flight Simulation / R. Sells // 2020 IEEE Aerospace Conference, 7–14 March 2020. – Big Sky, MT, 2020. DOI: 10.1109/AERO47225.2020.9172277
15. JuliaSpace [Электронный ресурс]. – URL: <https://github.com/JuliaSpace> (дата обращения: 11.11.2021).
16. SatelliteToolbox.jl - Github [Электронный ресурс]. – URL: <https://github.com/JuliaSpace/SatelliteToolbox.jl> (дата обращения: 12.11.2021).
17. Chagas R.A.J. Modeling and design of a multidisciplinary simulator of the concept of operations for space mission pre-phase a studies / R.A.J. Chagas [et al.] // Concurrent Engineering. – 2018. – Vol. 27. – № 1. – P. 28–39.
18. Standards of Fundamental Astronomy - Home [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.iau-sofa.org> (дата обращения: 17.11.2021).
19. The Astropy Project [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.astropy.org> (дата обращения: 11.11.2021).
20. NASA's Navigation and Ancillary Information Facility (NAIF) - SPICE Toolkit [Электронный ресурс]. – URL: <https://naif.jpl.nasa.gov/naif/toolkit.html> (дата обращения: 11.11.2021).
21. VSOP (планеты) - VSOP (planets) - qaz.wiki [Электронный ресурс]. – URL: [https://ru.qwe.wiki/wiki/VSOP_\(planets\)](https://ru.qwe.wiki/wiki/VSOP_(planets)) (дата обращения: 11.11.2021).
22. Julia Astro [Электронный ресурс]. – URL: <https://github.com/JuliaAstro> (дата обращения: 15.11.2021).
23. Liberfa_erfa_essential routines for fundamental astronomy [Электронный ресурс]. – URL: <https://github.com/liberfa/erfa> (дата обращения: 11.11.2021).
24. Spacecraft planet instrument c-matrix events - wikipedia [Электронный ресурс]. – URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Spacecraft_Planet_Instrument_C-matrix_Events (дата обращения: 11.11.2021).
25. Annex A. SpiceyPy: A pythonic wrapper for the SPICE toolkit / A. Annex [et al.] // Journal of Open Source Software. – 2020. – Vol. 5. – SpiceyPy. – № 46. – P. 2050.
26. UCSD Optimization Software [Электронный ресурс]. – URL: <http://ccom.ucsd.edu/~optimizers/> (дата обращения: 17.11.2021).
27. Gill P.E. SNOPT: An SQP algorithm for large-scale constrained optimization / P.E. Gill, W. Murray, M.A. Saunders // SIAM Rev. – 2005. – Vol. 47. – SNOPT. – P. 99–131.
28. Biscani F. A parallel global multiobjective framework for optimization: Pagmo / F. Biscani, D. Izzo // Journal of Open Source Software. – 2020. – Vol. 5. – A parallel global multiobjective framework for optimization. – № 53. – P. 2338.
29. CesiumJS [Электронный ресурс]. – URL: <https://cesium.com/cesiumjs/> (дата обращения: 11.11.2021).