

Труды МАИ. 2025. № 141
Trudy MAI. 2025. No. 141. (In Russ.)

Научная статья

УДК 519.876.5

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=184516>

EDN: <https://www.elibrary.ru/ZNYXZQ>

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС МОДЕЛИРОВАНИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ МНОГОСПУТНИКОВОЙ ОРБИТАЛЬНОЙ ГРУППИРОВКИ

**Александр Евгеньевич Привалов¹, Алексей Викторович Калюжный^{2✉}, Файруз
Факхро³**

^{1,2,3}Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,

Санкт-Петербург, Российская Федерация

²vka@mil.ru✉

Аннотация. В статье рассматриваются ключевые аспекты разработки программного комплекса для моделирования функционирования многоспутниковой орбитальной группировки. Современные космические группировки, состоящие из множества спутников на различных орбитах, играют важную роль в обеспечении глобальных и региональных коммуникаций, навигации, мониторинга Земли, а также других прикладных задач. Разработка комплексного программного обеспечения для моделирования многоспутниковой орбитальной группировки позволяет изучать вопросы, связанные с управлением, координацией и обеспечением надежности таких систем.

Основной задачей работы является создание программного комплекса с поддержкой многоагентного подхода, позволяющего моделировать взаимодействие отдельных спутников в составе группировки, анализировать их поведение, а также оценивать эффективность выполнения различных сценариев. Данный подход позволяет

учитывать многоуровневую структуру системных взаимодействий, начиная от модели отдельных спутников как независимых агентов до их комплексного взаимодействия в составе группы.

Архитектура программного комплекса построена на основе объектно-ориентированного подхода, что позволяет структурировать модель на логически разделенные компоненты. Многоагентная модель, определяет логику взаимодействия спутников в составе группировки, которая учитывает их возможные состояния, обмен информацией и различные действия в зависимости от текущих задач.

Программная реализация комплекса использует возможности языка Python и связанных с ним библиотек для создания интерфейсов моделирования и обработки данных. В частности, для визуализации результатов моделирования была использована библиотека PyOpenGL, обеспечивающая поддержку трехмерной графики на языке Python.

Ключевая особенность предлагаемого программного комплекса заключается в возможности детального анализа сценариев на основе динамического моделирования и анализа данных, получаемых от агентов спутниковой системы. Кроме того, комплекс поддерживает интеграцию с другими инструментами и форматами данных, позволяя пользователю импортировать реальные орбитальные параметры и другие внешние данные, необходимые для построения более точных моделей.

Таким образом, разработанный программный комплекс является многофункциональным инструментом, который может использоваться как в научных исследованиях, так и в промышленности. Внедрение объекта и многоагентной модели, поддержка 3D-визуализации и удобного интерфейса для настройки и анализа результатов моделирования делает его мощным инструментом для изучения и оптимизации орбитальных группировок спутников.

Ключевые слова: программный комплекс моделирования, многоагентная модель, многоспутниковая орбитальная группировка, эффективность функционирования

Для цитирования: Привалов А.Е., Калюжный А.В., Факхро Ф. Программный комплекс моделирования функционирования многоспутниковой орбитальной

Original article

A SOFTWARE PACKAGE FOR MODELING THE FUNCTIONING OF A MULTI-SATELLITE ORBITAL CONSTELLATION

Aleksandr E. Privalov¹, Aleksey V. Kalyuzhny^{2✉}, Fayruz Fakhro³

^{1,2,3}Military space Academy named after A.F. Mozhaisky,

Saint Petersburg, Russian Federation

²vka@mil.ru✉

Abstract. The article discusses the key aspects of the development of a software package for modeling the functioning of a multi-satellite orbital constellation. Modern space groupings, consisting of many satellites in various orbits, play an important role in providing global and regional communications, navigation, Earth monitoring, as well as other applied tasks. The development of comprehensive software for modeling a multi-satellite orbital constellation makes it possible to study issues related to the management, coordination and reliability of such systems.

The main task of the work is to create a software package with support for a multi-agent approach that allows you to simulate the interaction of individual satellites in a grouping, analyze their behavior, and evaluate the effectiveness of various scenarios. This approach allows us to take into account the multilevel structure of system interactions, starting from the model of individual satellites as independent agents to their complex interaction as part of a group.

The architecture of the software package is based on an object-oriented approach, which allows you to structure the model into logically separated components. The multi-agent model defines the logic of interaction of satellites in a grouping, which takes into account their possible states, information exchange and various actions depending on current tasks.

The software implementation of the complex uses the capabilities of the Python language and related libraries to create modeling and data processing interfaces. In particular, the PyOpenGL library was used to visualize the simulation results, which provides support for three-dimensional graphics in Python.

The key feature of the proposed software package is the possibility of detailed scenario analysis based on dynamic modeling and analysis of data received from agents of the satellite system. In addition, the complex supports integration with other tools and data formats, allowing the user to import real-world orbital parameters and other external data needed to build more accurate models.

Thus, the developed software package is a multifunctional tool that can be used both in scientific research and in industry. The introduction of an object and a multi-agent model, support for 3D visualization and a user-friendly interface for configuring and analyzing simulation results makes it a powerful tool for studying and optimizing satellite orbital groupings.

Keywords: modeling software package, multi-agent model, multi-satellite orbital grouping, operational efficiency

For citation: Privalov A.E., Kalyuzhny A.V., Fakkhro Fayruz. A software package for modeling the functioning of a multi-satellite orbital constellation. *Trudy MAI*. 2025. No. 141. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=184516>

Введение

В последние годы активно ведутся работы по созданию и запуску МОГ. В большей части они состоят из малых космических аппаратов (МКА). Согласно статистике, за последние 10 лет было запущено более 7000 МКА, что составляет примерно 90% всех запущенных космических аппаратов. При этом МОГ способны предоставлять такие же услуги связи и дистанционного зондирования Земли, при меньшей стоимости по сравнению с большими спутниками. К началу 2024 года лидерами в этой отрасли являются такие компании как Starlink, OneWeb, Planet Labs. На первом месте Starlink, запустившая в общей сложности более 4500 аппаратов, на

втором месте Planet Labs с 529 аппаратами и на третьем месте OneWeb запустившая 509 аппаратов [2,10].

Важными задачами, решаемыми при проектировании таких группировок является оценивание эффективности их функционирования и отработки программ управления, обеспечивающих требуемую эффективность. Для решения первой задачи в настоящее время существуют универсальные программные комплексы, такие, как «Интеграл-Д», разработанный в рамках совместного проекта Фонда перспективных исследований и Московского физико-технического института [3], или система автоматизированного проектирования «Альбатрос» (ИКИ «Северная корона») [7]. Вместе с тем, для решения второй задачи не существует универсальной платформы, позволяющей осуществлять отработку алгоритмов и программ управления МОГ. Разработчиками данных алгоритмов создаются собственные средства моделирования [9,12,17], цифровые двойники [6,8,11,15,18-22] с помощью которых осуществляется их отработка и тестирование.

Таким образом, актуальной является задача разработки открытого инструментария для решения широкого спектра задач моделирования и наземной отработки программ управления МОГ [13,17]. В работе предлагается прототип программного комплекса имитационного моделирования (ПКМ), основанный на принципе открытой архитектуры и предназначенный для исследования и отработки программ управления различных по составу и орбитальной структуре МОГ.

Постановка задачи разработки программного комплекса моделирования функционирования многоспутниковой орбитальной группировки

Для разработки прототипа программного комплекса имитационного моделирования будут использоваться следующие исходные данные: характеристики входного потока задач ДЗЗ, характеристики многоспутниковой орбитальной группировки, характеристики наземных пунктов приема и обработки информации и программа управления МОГ. Выходными данными будет оценка эффективности программы управления МОГ. Математическую постановку задачи можно представить следующим образом:

Дано:

1. Совокупность базисных множеств:

$$\{T, P, S, \Xi, \Sigma\},$$

где T – непрерывное множество моментов времени;

P – непрерывное множество вероятностей;

S – множество систем координат (подробное описание приведено в [14])

Ξ – множество углов поворота осей связанной системы координат относительно абсолютной геоцентрической экваториальной системы координат [1]

$$\xi = \left\{ \xi \mid \xi = (\xi^\Phi, \xi^\Theta, \xi^\Psi) \right\};$$

Q – множество значений показателя качества данных ДЗЗ

Σ – σ -алгебры соответствующих множеств

$$\Sigma = \{\Sigma^T, \Sigma^S, \Sigma^Q\};$$

2. Характеристики входного потока задач ДЗЗ

$$R^U = \{X, G, \lambda^X\},$$

где X – множество объектов зондирования;

G – множество задач ДЗЗ

$$G = \{g \mid g = (x, \tau, \sigma^Q) \in X \times \Sigma^T \times \Sigma^Q\};$$

g – задача наблюдения, включающая в себя объект наблюдения $x \in X$, требуемый интервал наблюдения $\tau \in \Sigma^T$ и требования по качеству данных ДЗЗ $\sigma^Q \in \Sigma^Q$;

λ^X – интенсивность поступления задач мониторинга;

3. Характеристики МОГ ДЗЗ

$$R^{MOG} = \{C, Z, Y, U, V, z_0, f^{C \leftrightarrow C}, f^C\},$$

где C – множество КА;

Z – множество состояний КА ;

z_0 – начальное состояние МОГ ($z_0 \in Z$);

Y – множество выходных воздействий (множество снимков);

U – множество управляющих воздействий;

V – множество параметров бортовой аппаратуры (БА);

$f^{C \leftrightarrow C}$ – модель линии межспутниковой связи, ставящая в соответствие каждому выходному (управляющему) воздействию вероятностную меру, заданную на множестве T (вероятность передачи выхода (управления) за заданное время)

$$f^{C \leftrightarrow C} : \begin{cases} C \times C \times Y \times T \rightarrow P \\ C \times C \times U \times T \rightarrow P \end{cases}$$

f^C – модель функционирования МОГ – отображение, для каждого КА $c \in C$ ставящее в соответствие для состоянию $z \in Z$ в каждый момент времени $t \in T$ при входном воздействии $x \in X$, управляющем воздействии $u \in U$ и параметрах БА $v \in V$ вероятностную меру, заданную на множестве состояний Z (или множестве выходов $y \in Y$)

$$f^C : \begin{cases} C \times X \times Z \times U \times T \times V \times Z \rightarrow P \\ C \times X \times Z \times U \times T \times V \times Y \rightarrow P \end{cases}$$

4. Характеристики наземных пунктов приема и обработки информации (НППОИ)

$$R^{НППОИ} = \{H, Z^H, z_0^H f^{H \leftrightarrow C}\},$$

где H – множество НППОИ;

Z^H – множество состояний НППОИ;

z_0^H – начальное состояние НППОИ ($z_0^H \in Z^H$);

$f^{H \leftrightarrow C}$ – модель линии связи КА с НППОИ ставящая в соответствие каждому выходному (управляющему) воздействию вероятностную меру, заданную на множестве T (вероятность передачи выхода (управления) за заданное время)

$$f^{C \leftrightarrow H} : C \times H \times Y \times T \rightarrow P.$$

5. Программа управления МОГ

$$R^O = \{O, \chi, f^U\}$$

O – множество операций, выполняемых КА;

f^U – модель управления КА – отображение, для каждой операции $o \in O$, выполняемой КА $c \in C$ определяющее зависимость управляющего воздействия $u \in U$, подаваемого на КА, от времени $t \in T$ и текущего состояния $z \in Z$

$$f^U : C \times O \times T \times Z \rightarrow U$$

χ – функция, отражающая топологию программы функционирования

$$\chi = \left\{ \langle o_i, o_j \rangle \mid f^\chi(o_i, o_j) = 1 \right\}, \chi \subseteq O \times O;$$

$$f^\chi(o_i, o_j) = \begin{cases} 1 - \text{если } o_i \text{ является предшественником } o_j; \\ 0 - \text{в противном случае;} \end{cases}$$

6. Функция оценивания качества данных ДЗЗ, ставящая в соответствие объекту наблюдения $x \in X$ и выходному значению $y \in Y$ вероятностную меру, заданную на множестве значений показателя качества Q :

$$f^Q : X \times Y \times Q \rightarrow P.$$

Требуется **разработать** программный комплекс, предназначенный для оценивания эффективности программы управления МОГ и реализующий функцию

$$f^\exists : \exists = f^\exists(R^{MOG}, R^Ц, R^{НППОН}, R^O).$$

Описание объектно-ориентированной модели программного комплекса моделирования

Многоспутниковая орбитальная группировка является сложной динамической системой со множеством перекрестных связей между ее элементами. Оценивание эффективности ее функционирования при помощи аналитических моделей не позволяет учесть всех факторов, влияющих на МОГ. В связи с этим, для решения задачи выбран метод имитационного моделирования. По типу структуры МОГ относится к классу киберфизических распределенных многоагентных систем, что определяет тип архитектуры ПКМ. [4,5] В основе ПКМ лежит объектно-

ориентированная модель, разработанная с использованием языка объектно-ориентированного моделирования UML. В соответствии с исходными данными и выбранной архитектурой были выделены классы, которые были условно разделены на две группы:

1. Базисные классы, определяющие пространство, в котором функционирует модель орбитальной группировки (рис. 1).

2. Классы, описывающие многоагентную модель (рис. 2).

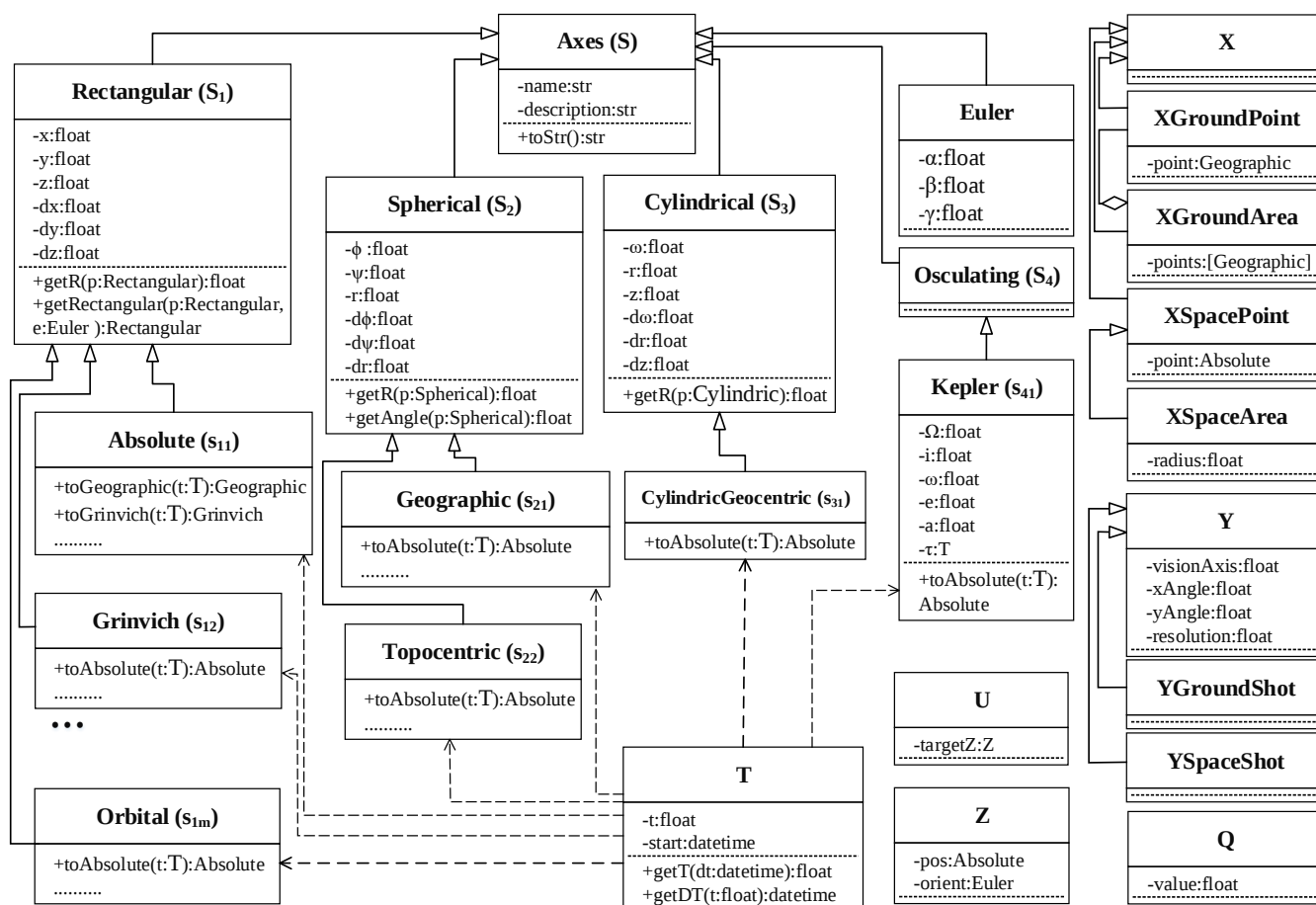


Рис.1. Базисные классы

Вектор времени определен классом T , в который входят атрибуты текущего времени t и времени начала моделирования $start$, привязанного к астрономическому времени. Физическое пространство задается классом $Axes(S)$, подклассами которого являются классы, определяющие системы координат: прямоугольная – $Rectangular(S_1 \subset S)$, сферическая – $Spherical(S_2 \subset S)$, цилиндрическая – $Cylindrical(S_3 \subset S)$. Атрибутами этих классов являются соответствующие им координаты и скорости, методами – процедуры решения различных задач в этой системе координат

(например, нахождение расстояния между двумя точками, преобразование в различные системы координат и т.д.). В отдельный подкласс выделена оскулирующая система координат *Kepler* ($s_4 \in S$), атрибутами которой являются кеплеровские элементы орбиты. Класс *Euler* (Ξ) определяет углы ориентации объекта в пространстве.

Рассмотренные базисные множества позволяют осуществлять моделирование движения объектов в космическом пространстве. Следующая совокупность классов определяет пространство функционирования объекта моделирования. На самом верхнем уровне абстрагирования к ним относятся множества входных (X), выходных (Y) и управляющих (U) сигналов, множество состояний (Z) а также множество показателей качества (Q). В рамках задачи наблюдения объектов на земной поверхности или в околоземном космическом пространстве можно конкретизировать подклассы входных сигналов: объект на поверхности Земли ($XGroundPoint \subset X$), область на поверхности Земли ($XGroundArea \subset X$), объект в космическом пространстве ($XSpacePoint \subset X$), область в космическом пространстве ($XSpaceArea \subset X$). Для класса Y можно выделить подклассы, соответствующие снимку земной поверхности ($YGroundShot \subset Y$) и снимку околоземного космического пространства ($YSpaceShot \subset Y$).

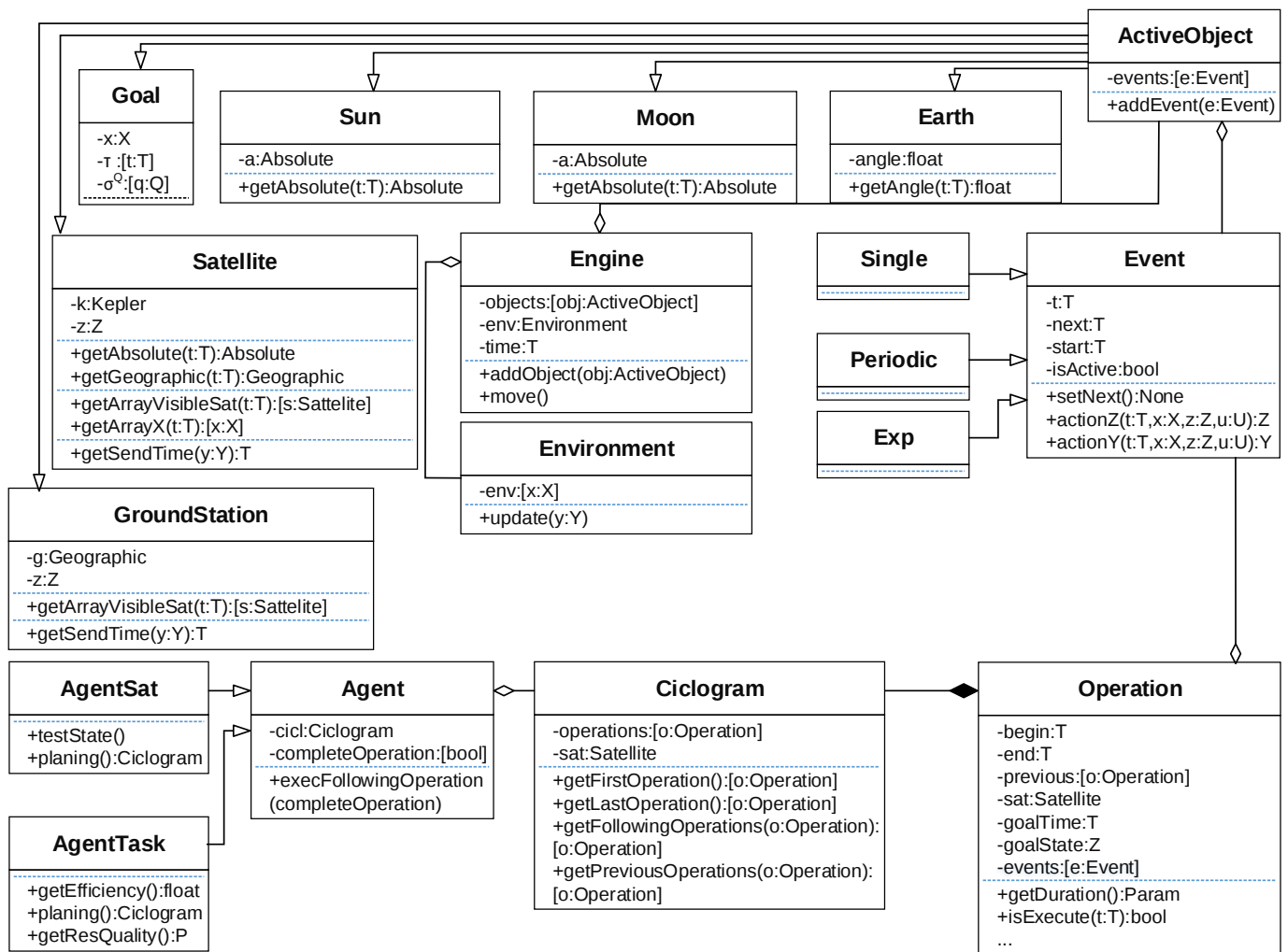


Рис. 2. Классы, описывающие многоагентную модель

Базовым классом для создания многоагентной модели является класс *ActiveObject*. Все моделируемые объекты реальности: Солнце (*Sun*), Луна (*Moon*), Земля (*Earth*), космический аппарат (*Sattelite*), НППОИ (*GroundStation*) являются подклассами класса *ActiveObject*. Атрибутом класса *ActiveObject* является массив событий *events*, общим методом для всех объектов класса – метод добавления событий *addEvent*, который позволяет добавлять события в массив *events* в любой момент работы модели.

В основу работы модели положен принцип событийного моделирования. Движение модельного времени осуществляется от одного события к следующему. Все события являются экземплярами класса *Event*, атрибуты которого – это текущее время *t*, время следующего наступления события *next*, время начала наступления очереди событий *start*, признак активности события *isActive*, который позволяет

«отключать» и «включать» событие в процессе моделирования. Метод *setNext* предназначен для установления следующего момента наступления события по определенному правилу. В зависимости от этого метода можно выделить простые события *Single* (которые наступают один раз), экспоненциальные *Exp* (интервал времени между наступлениями события подчинен экспоненциальному закону распределения), периодические *Periodic* (постоянный интервал времени между наступлениями события). Последний тип событий используется для моделирования непрерывных процессов, например, движения КА. Методы *actionZ* и *actionY* представляют собой шаблоны функции f^C для того объекта, которому принадлежит это событие.

Состояние среды функционирования объектов описывается классом *Environment*, который включает в себя множество входов X всех объектов модели и функцию *update*, которая по сути является оператором сопряжения объектов – каждому выходу Y она ставит в соответствие входной сигнал другого объекта.

Движение модельного времени выполняется объектом класса *Engine*. Он включает в себя список моделируемых объектов *objects*, среду функционирования объектов *env* и переменную *time*, в которой хранится текущее время выполнения модели. Основным методом класса является функция *move*, осуществляющая движение модельного времени. Обобщенный алгоритм ее функционирования представлен на рис. 3. Метод осуществляет поиск ближайшего по времени активного события. Модельное время *time* перемещается на момент времени наступления события. Реализуется функция переходов и функция выходов для объекта, которому принадлежит событие. После этого функцией *update* обновляются параметры среды – новые выходные сигналы подаются на сопряженные с ними входные сигналы.

обеспечивают решение отдельных задач с экземпляром класса – определение длительности (*getDuration*), текущего состояния (*isExecute*) и т.д.

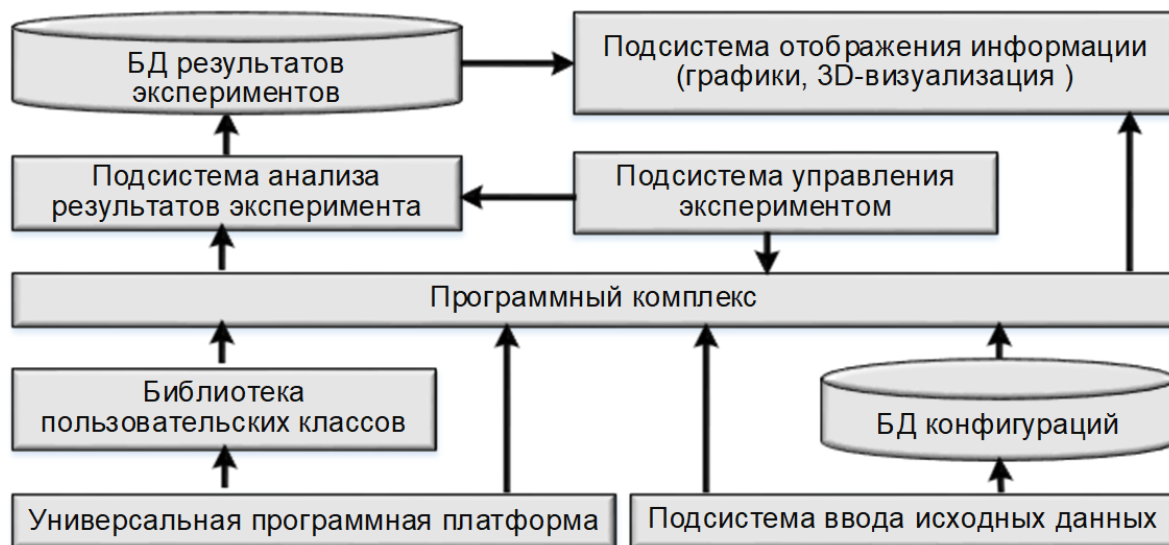


Рис. 4. Структура программного комплекса моделирования

Структура ПКМ представлена на рис. 4. Универсальная программная платформа состоит из совокупности классов, представленных на рис. 1,2. На их базе разработчиком создаются пользовательские классы космических аппаратов, НППОИ, наземных объектов, а также операций, описывающих процесс их функционирования. С использованием классов платформы и пользовательских классов создается непосредственно ПКМ. Подсистема ввода исходных данных реализует обеспечивает ввод и сохранение в базе данных конфигураций объектов (КА, НППОИ), а также настроек работы ПКМ [14].

Реализация программного комплекса моделирования функционирования многоспутниковой орбитальной группировки

ПКМ реализован на языке высокого уровня Python. Окно ввода данных (рис. 5) реализовано с помощью программного пакета PyQt. В верхней части окна имеются вкладки для выбора одного из типов объектов: космический аппарат (КА), объект наблюдения (ОН), наземный комплекс управления (НКУ), наземный пункт приема и обработки информации (НППОИ). При выборе объекта открывается вкладка с его характеристиками, которые при необходимости можно изменить. Как видно из рисунка для КА такими характеристиками являются:

- элементы орбит (большая полуось, эксцентриситет, наклонение орбиты, время прохождения перигея, аргумент широты перигея, прямое восхождение восходящего узла);
- характеристики БВС (количество вычислительных модулей (ВМ), производительность, объем запоминающего устройства (ЗУ), энергопотребление);
- характеристики бортовой аппаратуры (угол полураствора аппаратуры, разрешающая способность, режим съемки);
- загрузка 3D модели (можно изменить внешний вид КА указав файл модели с расширением *.obj и файл содержащий текстуры с расширением *.png).

В нижней части окна имеются кнопки навигации, позволяющие переходить к предыдущей или следующей записи, непосредственно кнопка записи данных, и кнопка очистки форм.

Вводимые данные хранятся базе данных доступ к которой осуществляется через объектно-реляционную систему управления базами данных PostgreSQL.

КА ОН НКУ НПОИ

Активный КА

Элементы орбит

Большая полуось, км

Эксцентриситет орбиты

Наклонение орбиты, рад

Время прохождения перигея, с

Аргумент широты перигея, рад

Прямое восхождение восходящего узла, рад

Загрузка 3D модели

Путь к файлу модели

Путь к файлу текстуры

Характеристики БВС

Количество ВМ, шт

Производительность, MIPS

Объем ЗУ, Гб

Энергопотребление, Вт

Характеристики бортовой аппаратуры

Угол полураствора аппаратуры, градусы

Разрешающая способность

Режим съемки ☒ ПХ ☒ МС

Рис. 5. Окно ввода данных

Визуализация (графическое отображение) функционирования МОГ осуществляется с помощью пакетов PyOpenGL и PyGame.

Для примера орбитального построения взята перспективная группировка МКА «Беркут-О» имеющая следующие характеристики:

- высота орбиты: не более 700 км;
- тип орбиты: круговая;
- 7 орбитальных плоскостей по 8 КА в каждой.

Общий вид 3D модели МОГ представлен на рис. 6.

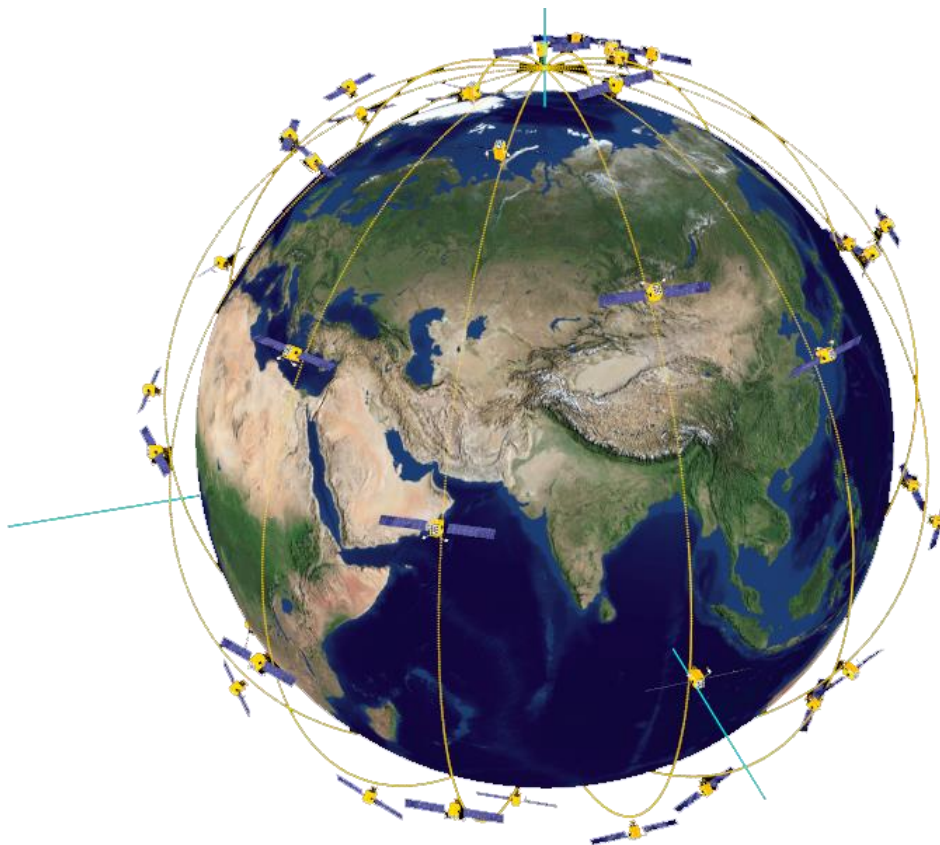


Рис. 6. Пример отображения орбитального построения МОГ «Беркут-О»

Для проверки адекватности при помощи ПКМ был протестирован алгоритм децентрализованного управления многоспутниковой орбитальной группировкой, предложенный в [16]. Результат функционирования МОГ ДЗЗ представлен в форме ленточной диаграммы (рис. 7). На ней голубым цветом выделен случайный интервал времени формирования задачи наблюдения (от начала моделирования). Фиолетовым цветом обозначен интервал времени от момента формирования задачи до ближайшего сеанса связи (в задаче №1 этот интервал отсутствует, что

свидетельствует о нахождении КА в зоне радиовидимости ППИ в момент формирования задачи). Далее задача выполняется ближайшим к району наблюдения КА, который в соответствии с алгоритмом определяется методом голосования (интервал выделен синим цветом).

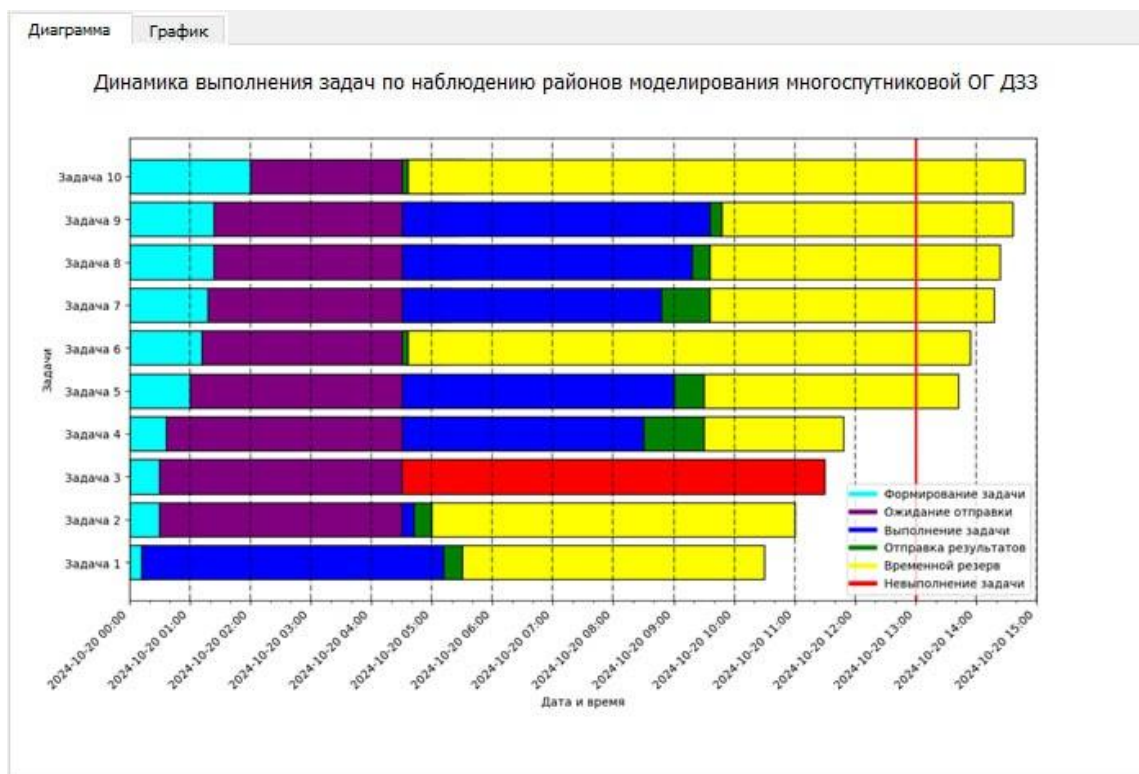


Рис. 7. Диаграмма хода выполнения задач наблюдения

После выполнения задача передается на НППОИ, ближайшим к нему КА (также определяется методом голосования). Желтым цветом на графике показан интервал временного резерва выполнения задачи – временного интервала, в течение которого информация о районе наблюдения является актуальной. Если задача не выполнена в течение временного резерва, она считается не выполненной и выделяется красным цветом (например, задача №3).

На рис. 8 представлен график изменения показателя эффективности Э от времени. В качестве показателя эффективности выбрана вероятность получения актуальной информации, определяемая как отношение количества выполненных задач к общему их количеству.

График изменения вероятности получения актуальной информации

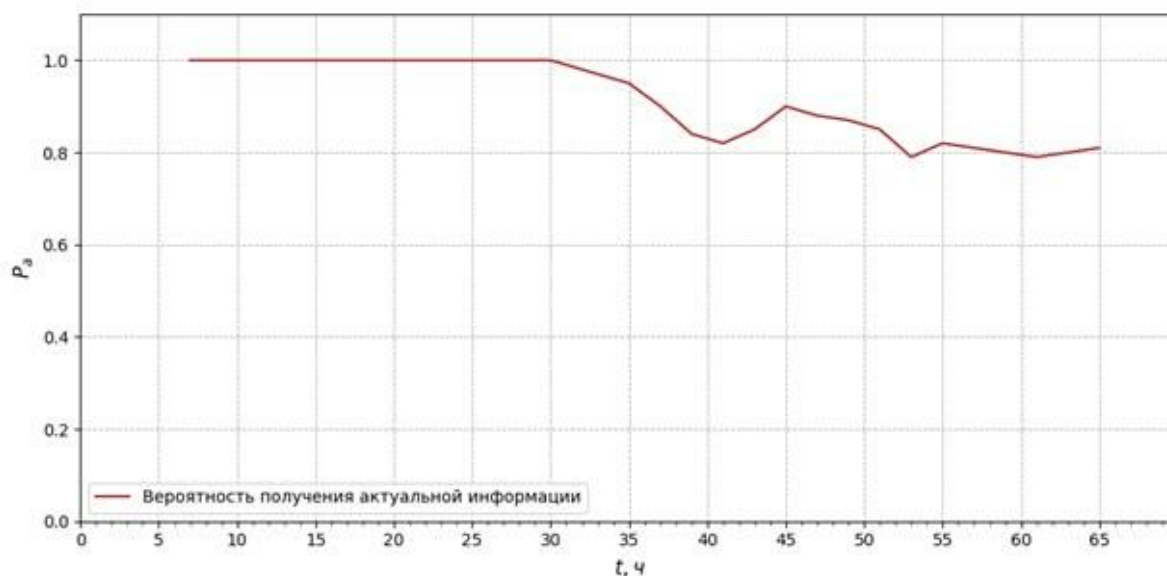


Рис. 8. График зависимости эффективности функционирования МОГ от времени

Заключение

Разработанные в настоящее время ПКМ функционирования МОГ, как правило, ориентированы на решение отдельных задач, не обеспечивают гибкость, масштабируемость и расширение функционала без участия разработчиков. Предлагаемый в статье ПКМ задумывается как программная платформа для решения широкого круга исследовательских задач, к числу которых относится:

- оценивание эффективности функционирования МОГ различного состава и орбитальной структуры;
- отработка алгоритмов управления МОГ и алгоритмов информационного взаимодействия между отдельными КА;
- повышение наглядности процесса функционирования МОГ для исследователей;
- применение ПКМ в образовательном процессе для решения информационно-расчетных задач по управлению МОГ.

Реализация объектно-ориентированного подхода к программированию, открытая архитектура и использование свободно распространяемого программного обеспечения открывает возможности для расширения функционала ПКМ под конкретные исследовательские задачи.

Список источников

1. Васильев В.Н. Системы ориентации космических аппаратов. - М.: НПП ВНИИЭМ, 2009. - 310 с.
2. Волгин Д.А. Перспективы развития малых космических аппаратов // Молодой ученый. 2023. № 40 (487). С. 11-15.
3. Завьялова Н.А., Негодяев С.С., Кузнецов А.А. и др. Программный комплекс «Интеграл» для моделирования космических группировок и космических аппаратов // Космические аппараты и технологии. 2023. Т. 7, № 2 (44). С. 162-170. DOI: [10.26732/j.st.2023.2.09](https://doi.org/10.26732/j.st.2023.2.09)
4. Городецкий В.И., Скобелев П.О. Многоагентные технологии для промышленных приложений: реальность и перспектива // Труды СПИИРАН. 2017. № 6 (55). С. 11-45.
5. Городецкий В.И., Бухвалов О.Л., Скобелев П.О. Современное состояние и перспективы промышленных применений многоагентных систем // Управление большими системами: сборник трудов. 2017. № 66. С. 94-157.
6. ГОСТ Р 57700.37–2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения. - М.: Российский институт стандартизации, 2021. – 16 с.
7. Гриценко А.А. Опыт применения САПР «Альбатрос» в задачах анализа, расчета и моделирования спутниковых систем различного // XI Международная конференция «Satellite Russia & CIS: Цифровые услуги на всех орбитах». 2019. URL: http://www.spacecenter.ru/Resurses/2019/5_andrey_gritsenko_sc_information_space_center_severnaya_corona.pdf
8. Гусев П.Ю. Автоматизация планирования производственных процессов авиастроительного предприятия с использованием цифрового двойника // Труды МАИ. 2018. № 103. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=101190>

9. Карсаев О.В., Соколов Б.В. Имитационное моделирование многоспутниковых орбитальных группировок дистанционного зондирования Земли // 11- Всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика» ИММОД-2023 (Казань, 18–20 октября 2023): сборник трудов. – Казань: Изд-во АН РТ, 2023. С. 357-366.
10. Ключников В.Ю. Мини-спутники собираются в стаи. URL: https://www.ng.ru/science/2020-01-21/9_7773_satellites.html
11. Кузнецова С.В., Семенов А.С. Цифровые двойники в аэрокосмической промышленности: объектно-ориентированный подход // Труды МАИ. 2023. № 131. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=175930>. DOI: [10.34759/trd-2023-131-24](https://doi.org/10.34759/trd-2023-131-24)
12. Потюпкин А.Ю. Моделирование функционирования многоспутниковых орбитальных группировок // VIII Международная конференция и молодежная школа «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ-2022) (23–27 мая 2022). URL: [https://itnt-conf.org/images/docs/2022/plenary/25\(09-30\)Potyupkin.pdf](https://itnt-conf.org/images/docs/2022/plenary/25(09-30)Potyupkin.pdf)
13. Потюпкин А.Ю., Пантелеймонов И.Н., Тимофеев Ю.А., Волков С.А. Управление многоспутниковыми орбитальными группировками // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2020. Т. 7, № 3. С. 61–70. DOI: [10.30894/issn2409-0239.2020.7.3.61.70](https://doi.org/10.30894/issn2409-0239.2020.7.3.61.70)
14. Привалов А.Е. Унифицированная программная платформа для разработки многоагентных моделей орбитальных группировок космических аппаратов // Труды МАИ. 2022. № 123. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=165498>. DOI: [10.34759/trd-2022-123-22](https://doi.org/10.34759/trd-2022-123-22)
15. Привалов А.Е., Смирнов А.В., Токарев М.С. Концепция управления многоспутниковыми системами с применением цифровых двойников // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 11. С. 245-250. DOI: [10.24412/2071-6168-2023-11-245-246](https://doi.org/10.24412/2071-6168-2023-11-245-246).
16. Привалов А.Е., Федяев В.В., Бугайченко П.Ю. Применение многоагентных технологий для построения имитационных моделей многоспутниковых орбитальных группировок дистанционного зондирования Земли // Имитационное моделирование

систем военного назначения, действий войск и процессов их обеспечения «ИМСВН-2020» (Санкт-Петербург, 25 ноября 2020): труды конференции. – Санкт-Петербург: Военная академия материально-технического обеспечения имени генерала армии А.В. Хрулева, 2020. С. 219-228.

17. Скобелев П.О., Скимунт В.К., Симонова Е.В. и др. Планирование целевого применения группировки космических аппаратов дистанционного зондирования Земли с использованием мультиагентных технологий // Известия ЮФУ. Технические науки. 2015. № 10 (171). С. 60-70.

18. Щекочихин О.В. Современные тенденции управления киберфизическими системами на основе цифровых двойников // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования. 2021. № 5 (63). С. 33–37.

19. Cai Y., Starly B., Cohen P., Lee Y-S. Sensor data and information fusion to construct digital-twins virtual machine tools for cyber-physical manufacturing // Procedia Manufacturing. 2017. No 2. P. 1031–1042. DOI: [10.1016/j.promfg.2017.07.094](https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.094)

20. Christofi N., Pucel X. A Novel Methodology to Construct Digital Twin Models for Spacecraft Operations Using Fault and Behaviour Trees // 25th International Conference on Model Driven Engineering Languages and Systems (MODELS '22 Companion), October 23–28, 2022, Montreal, QC, Canada. ACM, New York, NY, USA, 8 p. DOI: [10.1145/3550356.3561550](https://doi.org/10.1145/3550356.3561550)

21. Glaessgen E.H., Stargel D.S. The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles // Paper for the 53rd Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference: Special Session on the Digital Twin. 2012. URL: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20120008178>

22. Tao F., Qi Q., Wang L., Nee A.Y.C. Digital Twins and Cyber–Physical Systems toward Smart Manufacturing and Industry 4.0: Correlation and Comparison // Engineering. 2019. V. 5, Issue 4. P. 653–661.

References

1. Vasil'ev V.N. *Sistemy orientatsii kosmicheskikh apparatov* (Spacecraft Orientation Systems). Moscow: NPP VNIIEP Publ., 2009. 310 p.

2. Volgin D.A. Prospects for the Development of Small Spacecraft. *Molodoi uchenyi*. 2023. No. 40 (487). P. 11-15. (In Russ.)
3. Zav'yalova N.A., Negodyaev S.S., Kuznetsov A.A. et al. Software package "Integral" for modeling space constellations and spacecraft. *Kosmicheskie apparaty i tekhnologii*. 2023. V. 7, No. 2 (44). P. 162-170. (In Russ.). DOI: [10.26732/j.st.2023.2.09](https://doi.org/10.26732/j.st.2023.2.09)
4. Gorodetskii V.I., Skobelev P.O. Multi-agent technologies for industrial applications: reality and prospects. *Trudy SPIIRAN*. 2017. No. 6 (55). P. 11-45. (In Russ.)
5. Gorodetskii V.I., Bukhvalov O.L., Skobelev P.O. Current state and prospects of industrial applications of multi-agent systems. *Upravlenie bol'shimi sistemami: sbornik trudov*. 2017. No. 66. P. 94-157. (In Russ.)
6. GOST R 57700.37–2021. *Komp'yuternye modeli i modelirovanie. Tsifrovye dvoiniki izdelii. Obshchie polozheniya* (GOST R 57700.37–2021. Computer models and modeling. Digital twins of products. General provisions). Moscow: Russian Standardization Institute Publ., 2021. 16 p.
7. Gritsenko A.A. Experience of using the Albatross CAD system in the tasks of analysis, calculation and modeling of various satellite systems. *XI Mezhdunarodnaya konferentsiya «Satellite Russia & CIS: Tsifrovye uslugi na vseh orbitakh»*. 2019. URL: http://www.spacecenter.ru/Resurses/2019/5_andrey_gritsenko_sc_information_space_center_severnaya_corona.pdf
8. Gusev P.Yu. Planning automation of production process at aircraft building enterprise employing a digital replica. *Trudy MAI*. 2018. No. 103. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=101190>
9. Karsaev O.V., Sokolov B.V. Simulation modeling of multi-satellite orbital constellations of Earth remote sensing. *11- Vserossiiskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya po imitatsionnomu modelirovaniyu i ego primeneniyu v nauke i promyshlennosti «Imitatsionnoe modelirovanie. Teoriya i praktika» IMMOD-2023: sbornik trudov*. Kazan': Izd-vo AN RT Publ., 2023. P. 357-366.
10. Klyushnikov V.Yu. *Mini-satellites gather in flocks*. URL: https://www.ng.ru/science/2020-01-21/9_7773_satellites.html

11. Kuznetsova S.V., Semenov A.S. Digital twins in the aerospace industry: an object-oriented approach. *Trudy MAI*. 2023. No. 131. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=175930>. DOI: [10.34759/trd-2023-131-24](https://doi.org/10.34759/trd-2023-131-24)
12. Potyupkin A.Yu. Modeling the functioning of multi-satellite orbital constellations. *VIII Mezhdunarodnaya konferentsiya i molodezhnaya shkola «Informatsionnye tekhnologii i nanotekhnologii» (ITNT-2022)*. (In Russ.). URL: [https://itnt-conf.org/images/docs/2022/plenary/25\(09-30\)Potyupkin.pdf](https://itnt-conf.org/images/docs/2022/plenary/25(09-30)Potyupkin.pdf)
13. Potyupkin A.Yu., Panteleimonov I.N., Timofeev Yu.A., Volkov S.A. Control of multi-satellite orbital constellations. *Raketno-kosmicheskoe priborostroenie i informatsionnye sistemy*. 2020. V. 7, No. 3. P. 61–70. (In Russ.). DOI: [10.30894/issn2409-0239.2020.7.3.61.70](https://doi.org/10.30894/issn2409-0239.2020.7.3.61.70)
14. Privalov A.E. Unified software platform for develop of multi-agent models of orbital spacecrafts constellation. *Trudy MAI*. 2022. No. 123. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=165498>. (In Russ.). DOI: [10.34759/trd-2022-123-22](https://doi.org/10.34759/trd-2022-123-22)
15. Privalov A.E., Smirnov A.V., Tokarev M.S. Concept of multi-satellite systems control using digital twins. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 2023. No. 11. P. 245-250. (In Russ.). DOI: [10.24412/2071-6168-2023-11-245-246](https://doi.org/10.24412/2071-6168-2023-11-245-246).
16. Privalov A.E., Fedyaev V.V., Bugaichenko P.Yu. Application of multi-agent technologies for constructing simulation models of multi-satellite orbital constellations for Earth remote sensing. *Imitatsionnoe modelirovanie sistem voennogo naznacheniya, deistvii voisk i protsessov ikh obespecheniya «IMSVN-2020»: trudy konferentsii*. Saint-Petersburg: Voennaya akademiya material'no-tekhnicheskogo obespecheniya imeni generala armii A.V. Khruleva Publ., 2020. P. 219-228.
17. Skobelev P.O., Skirmunt V.K., Simonova E.V. et al. Planning the Targeted Use of a Constellation of Earth Remote Sensing Spacecraft Using Multi-agent Technologies. *Izvestiya YUFU. Tekhnicheskie nauki*. 2015. No. 10 (171). P. 60-70. (In Russ.)

18. Shchekochikhin O.V. Modern trends in managing cyber-physical systems based on digital twins. *Informatsionno-ekonomicheskie aspekty standartizatsii i tekhnicheskogo regulirovaniya*. 2021. No. 5 (63). P. 33–37. (In Russ.)
19. Cai Y., Starly B., Cohen P., Lee Y-S. Sensor data and information fusion to construct digital-twins virtual machine tools for cyber-physical manufacturing. *Procedia Manufacturing*. 2017. No 2. P. 1031–1042. DOI: [10.1016/j.promfg.2017.07.094](https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.094)
20. Christofi N., Pucel X. A Novel Methodology to Construct Digital Twin Models for Spacecraft Operations Using Fault and Behaviour Trees. *25th International Conference on Model Driven Engineering Languages and Systems (MODELS '22 Companion)*, October 23–28, 2022, Montreal, QC, Canada. ACM, New York, NY, USA, 8 p. DOI: [10.1145/3550356.3561550](https://doi.org/10.1145/3550356.3561550)
21. Glaessgen E.H., Stargel D.S. The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles. *Paper for the 53rd Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference: Special Session on the Digital Twin*. 2012. URL: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20120008178>
22. Tao F., Qi Q., Wang L., Nee A.Y.C. Digital Twins and Cyber–Physical Systems toward Smart Manufacturing and Industry 4.0: Correlation and Comparison. *Engineering*. 2019. V. 5, Issue 4. P. 653–661.

Статья поступила в редакцию 20.01.2025

Одобрена после рецензирования 23.01.2025

Принята к публикации 25.04.2025

The article was submitted on 20.01.2025; approved after reviewing on 23.01.2025; accepted for publication on 25.04.2025