

СТАТЬИ

УДК 004.942

DOI 10.17513/snt.40642

**ВИРТУАЛЬНЫЙ ПРИБОР ПОСТРОЕНИЯ ОРБИТЫ
ИСКУССТВЕННОГО СПУТНИКА ЗЕМЛИ
С УЧЕТОМ АТМОСФЕРЫ И НЕСФЕРИЧНОСТИ ЗЕМЛИ****Алдохина В.Н., Королев В.О.**

*Федеральное государственное бюджетное военное образовательное учреждение
высшего образования «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского»
Министерства обороны Российской Федерации, Санкт-Петербург,
Российская Федерация, e-mail: vadimaj1970@yandex.ru*

Имитационное обучение позволяет анализировать, тестировать и оптимизировать системы в виртуальной среде без необходимости проведения реальных экспериментов. В работе приведен краткий обзор популярных программ, позволяющих осуществлять имитационное моделирование движения искусственных спутников Земли. Цель исследования – разработать трехмерную модель движения искусственных спутников вокруг Земли, принимая во внимание форму планеты и атмосферные воздействия, и оценить эффективность ее применения в образовательном процессе. Модель реализована в виде виртуального прибора с использованием графического языка программирования. Моделируется орбита возмущенного движения спутника с учетом несферичности Земли и влияния атмосферы. Описаны рабочая область и интерфейс программы. Для улучшения наглядности реализована функция искусственного, искаженного усиления влияния возмущающих факторов на движение спутника. Приведен пример реализации программы. Виртуальный прибор решает вопрос наглядности обучения при изучении теоретических основ движения спутников в околоземном космическом пространстве. Позволяет моделировать траекторию невозмущенного и возмущенного движения искусственного спутника вокруг Земли, анализировать зависимости размеров, формы и ориентации орбиты от значений ее элементов и параметров спутника, учитывать влияния несферичности и атмосферы Земли на движение спутника. Программа предназначена для использования обучающимися и преподавателями в очном и дистанционном режимах обучения.

Ключевые слова: искусственный спутник Земли, орбита, возмущенное движение, элементы орбиты

**A VIRTUAL DEVICE FOR CONSTRUCTING THE ORBIT
OF AN ARTIFICIAL EARTH SATELLITE, TAKING INTO ACCOUNT
THE ATMOSPHERE AND THE NON-SPHERICITY OF THE EARTH****Aldokhina V.N., Korolev V.O.**

*Federal State Budgetary Military Educational Institution of Higher Education
“Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky” of the Ministry of Defense
of the Russian Federation, Saint Petersburg, Russian Federation,
e-mail: vadimaj1970@yandex.ru*

Simulation learning allows you to analyze, test, and optimize systems in a virtual environment without the need for real experiments. The paper provides a brief overview of popular programs that allow for the simulation of the movement of artificial Earth satellites. The aim of the study is to develop a three-dimensional model of the motion of artificial satellites around the Earth, taking into account the shape of the planet and atmospheric effects, and to evaluate the effectiveness of its application in the educational process. The model is implemented as a virtual instrument using a graphical programming language. The orbit of the disturbed motion of the satellite is modeled taking into account the non-sphericity of the Earth and the influence of the atmosphere. The program's workspace and interface are described. To improve clarity, an artificial, distorted amplification function for the influence of disturbing factors is implemented. An example of program implementation is provided. The virtual instrument solves the problem of visualization of training when studying the theoretical foundations of the movement of satellites in near-Earth space. It allows one to simulate the trajectory of the undisturbed and disturbed motion of an artificial satellite around the Earth, to analyze the dependence of the size, shape and orientation of the orbit on the values of its elements and the parameters of the satellite, and to take into account the influence of the non-sphericity and the Earth's atmosphere on the motion of the satellite. The program is intended for use by students and teachers in both in-person and distance learning modes.

Keywords: artificial Earth satellite, orbit, disturbed motion, orbital elements

Введение

Применение имитационных компьютерных моделей в образовательном процессе представляет собой значимое направление для улучшения качества современного обучения в различных сферах [1–3]. Имитационные модели позволяют обучающимся

экспериментировать с различными сценариями в виртуальной среде, что способствует более глубокому пониманию теоретических концепций. Учащиеся могут работать в собственном темпе, повторять сложные ситуации и получать обратную связь. Имитационные модели требуют анализа ситуа-

ции, принятия решений и оценки последствий, тем самым развивая аналитические и когнитивные навыки. Использование таких моделей способствует внедрению инновационных методов обучения, повышая мотивацию и интерес обучающихся.

Для моделирования и визуализации траектории движения искусственных спутников Земли (ИСЗ) в околоземном космическом пространстве (ОКП) существует множество программных средств, включая бесплатные. Эти программы широко используются в образовательных, научных и профессиональных целях для анализа орбит, планирования запусков и обучения. Приведем некоторые примеры популярных бесплатных программ для моделирования движения ИСЗ.

Orbitron предназначен для визуализации орбит спутников в реальном времени. Позволяет отслеживать известные спутники и космические аппараты. Подходит для образовательных целей и любительских наблюдений.

Stellarium является виртуальным планетарием. С его помощью можно моделировать орбиты спутников и наблюдать их движение на небесной сфере.

Celestia – 3D-симулятор космоса. Позволяет исследовать космос, включая орбиты спутников, планет и звездных систем.

GMAT (General Mission Analysis Tool) – профессиональный инструмент для анализа и планирования космических миссий. Мощная платформа с открытым исходным кодом предназначена для моделирования орбит, траекторий и миссий.

Orekit является библиотекой для моделирования орбит, навигации и космических миссий. Программная библиотека на Java подходит для разработки собственных приложений и учебных проектов.

NASA WorldWind – виртуальный глобус для визуализации спутниковых данных и орбит. Имеется интеграция с различными данными NASA, возможность отображения орбит и траекторий.

Эти и другие похожие по назначению программы позволяют визуализировать движение спутников, понять принципы орбитальной механики, помогают планировать и моделировать космические миссии, развивают навыки работы с космическими системами и программным обеспечением. Однако все вышеперечисленные программные продукты требуют определенной квалификации и базовых знаний в области космической механики, программирования и работы с специализированным программным обеспечением. Также в условиях санкций и ограничений доступ к некоторым

коммерческим или закрытым решениям может быть затруднен или невозможен.

Альтернативным подходом является разработка собственных учебных моделей [4; 5]. Для образовательных целей и в условиях ограничений важно выбирать инструменты, которые просты в использовании, не требуют глубоких технических знаний, доступны без ограничений по лицензиям или санкциям. Модель невозмущенного движения разработана авторами в [6; 7].

Цель исследования – разработать трехмерную модель движения искусственных спутников вокруг Земли, принимая во внимание форму планеты и атмосферные воздействия, и оценить эффективность ее применения в образовательном процессе.

Материалы и методы исследования

Математические методы, используемые для построения модели, изложены, например, в [8, с. 62–66; 9, с. 18–27]. Идеальное (невозмущенное) движение спутника в геоцентрической инерциальной системе координат описывается уравнением

$$\frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} = -\mu \cdot \frac{\vec{r}}{r^3},$$

где $\vec{r} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$ – радиус-вектор спутника

относительно центра Земли;

$\mu = GM$ – гравитационная постоянная G умноженная на массу Земли M ,

$$\mu \approx 39,89 \cdot 10^4 \text{ км}^3/\text{с}^2$$

Моделирование движения спутника в случае невозмущенного движения сводится к вычислению набора $(x_j, y_j, z_j)^T$ точек эллиптической орбиты, $j = 0..N$, и вычислению моментов времени t_j прохождения ИСЗ через каждую точку.

В невозмущенном движении предполагается, что спутник движется под действием только силы всемирного тяготения Земли, а сама Земля – идеальная сферическая и однородная. Уравнения движения сводятся к классическим законам Кеплера и позволяют точно описывать орбиту в течение короткого времени, когда возмущения не успевают существенно изменить орбиту, или на больших высотах с высотой полета более 36 тыс. км.

Для длительного моделирования движения спутников необходимо учитывать несферичность Земли, атмосферное сопротивление, а также гравитационные возмущения от Луны и Солнца и другие геофизические факторы.

Для учета возмущений в уравнение движения спутника вводится дополнительный вектор \vec{F}_a возмущающей силы

$$\frac{d^2\vec{r}}{dt^2} = -\mu \cdot \frac{\vec{r}}{r^3} + \vec{F}_a.$$

В данной работе для учета возмущений при движении искусственного спутника используется метод вариационных элементов [10, с. 340–348], основанный на предположении, что элементы орбиты являются функциями времени и изменяются под воздействием возмущающих сил.

Другими словами, вместо того, чтобы считать орбиту постоянной, этот метод предполагает, что параметры орбиты (размер, форма и ориентация) меняются со временем под действием различных воздействий, таких как гравитационные возмущения других тел или неидеальности в модели. То есть параметры орбиты – это не фиксированные числа, а функции времени.

Скорости векового изменения обусловленные наличием атмосферы являются наибольшими для большой полуоси a и эксцентриситета e . Их изменение можно описать дифференциальными уравнениями

$$\begin{aligned} \frac{da}{dE} &= -2b\rho a^2 \sqrt{\frac{(1+e\cos E)^3}{1-e\cos E}} \left(1 - d \frac{1-e\cos E}{1+e\cos E}\right)^2, \\ \frac{de}{dE} &= -2ba(1-e^2) \sqrt{\frac{1+e\cos E}{1-e\cos E}} \left(1 - d \frac{1-e\cos E}{1+e\cos E}\right) \cdot \left(\cos E - \frac{d(1-e\cos E)(2\cos E - e - e\cos^2 E)}{2(1-e^2)}\right), \end{aligned}$$

где

$$b = \frac{C_D A}{2m}, \quad d = \left(\frac{\omega_z}{n}\right) \sqrt{1-e^2} \cos i,$$

ρ – плотность атмосферы, E – эксцентрическая аномалия, ω_z – угловая скорость вращения Земли, m – масса спутника, A – мидель (площадь наибольшего поперечного сечения) спутника, определяющая коэффициент C_D , $n = 2\pi / T$ – средняя угловая скорость спутника.

Плотность атмосферы ρ является функцией высоты полета [11; 12], но, с другой стороны, высота полета зависит от значения эксцентрической аномалии, так что можно считать, что $\rho = \rho(E)$.

Положим, что известна опорная орбита. Эта опорная орбита определяется как Кеплерова (идеальная) орбита. Разделим орбиту, начиная от перигея, на N интервалов по эксцентрической аномалии. В каждом интервале можно определить

$$\left(\frac{da}{dE}\right)_j, \left(\frac{de}{dE}\right)_j, j = 0..N.$$

Приращения за оборот будут равны

$$\Delta a = \int_0^{2\pi} \sum_{j=0}^N \left(\frac{da}{dE}\right)_j dE,$$

$$\Delta e = \int_0^{2\pi} \sum_{j=0}^N \left(\frac{de}{dE}\right)_j dE.$$

Наибольшее влияние на долгосрочные изменения орбитальных элементов оказывает несферическая форма планеты, особенно по отношению к вековой (долгосрочной) прецессии двух ключевых параметров: долготы восходящего узла Ω и аргумента перигея ω . Чтобы определить, как изменятся эти параметры за время t , можно использовать следующие приближенные формулы:

$$\Delta\Omega = -J \left(\frac{R_3}{a}\right)^2 \frac{2\pi t \cos i}{T(1-e^2)^2},$$

$$\Delta\omega = 0.5J \left(\frac{R_3}{a}\right)^2 \frac{2\pi t (5\cos^2 i - 1)}{T(1-e^2)^2},$$

где $J = 0,001624$, T – период обращения спутника вокруг Земли.

Тогда за один оборот изменение элементов составит

$$\Delta\Omega_T = -J \left(\frac{R_3}{a}\right)^2 \frac{2\pi \cos i}{(1-e^2)^2},$$

$$\Delta\omega_T = 0.5J \left(\frac{R_3}{a}\right)^2 \frac{2\pi (5\cos^2 i - 1)}{(1-e^2)^2}.$$

Возмущения, обусловленные сопротивлением атмосферы, для низкоорбитальных спутников также являются преобладающими.

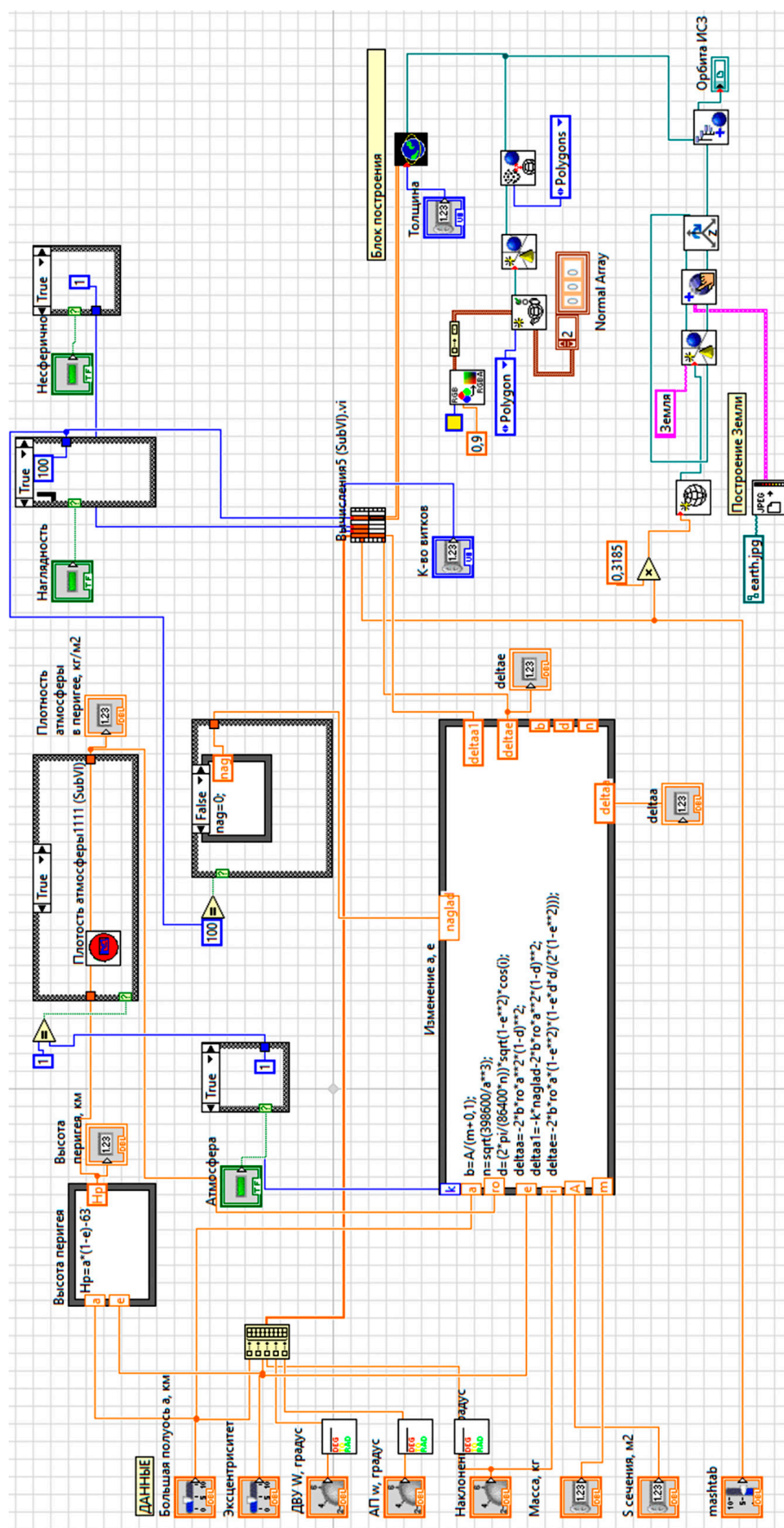


Рис. 1. Рабочая область ВП

Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Итак, для моделирования возмущенного движения спутника необходимо уточнять полные вековые изменения значений элементов орбиты на каждом обороте движения спутника.

Результаты исследования и их обсуждение

Модель реализована в виде виртуального прибора (ВП) с использованием графического языка программирования G, входящего в состав среды разработки LabVIEW. Среда программирования LabVIEW находит свое применение при программировании различных технических и технологических процессов [13–15].

На рис. 1 представлена рабочая область ВП, которая организована в виде набора взаимосвязанных кластеров. Левая часть схемы отведена под входные данные – элементы орбиты, параметры моделирования и настройки среды. Центральный блок прибора содержит алгоритмы построения орбиты, вычислений и визуализации, а также модули вывода данных в реальном времени. Для передачи данных между блоками используются проводники (wire), обеспечивающие синхронизацию и правильный порядок обработки информации.

Такое структурное разделение улучшает читаемость и модульность кода, облегчает отладку и дальнейшее расширение функциональности программы. Кроме того, визуальный подход в LabVIEW дает возможность наглядно проследить поток данных и логику работы модели, что особенно важно при обучении и демонстрации сложных орбитальных процессов.

Интерфейс разработанного ВП представлен на рис. 2. Параметры опорной орбиты задаются с помощью управляемых элементов – ползунков и ручек – в левой части экрана. Характеристики космического объекта определяют его масса и мидель (наибольшая площадь сечения). В нижней части экрана выводятся результаты: высоты перигея, плотности атмосферы в перигее, изменения большой полуоси, эксцентриситета за виток.

Построению траектории полета ИСЗ отведена центральная часть. Справа от области визуализации расположен ползунок, позволяющий изменять масштаб изображения.

На рис. 2 приведен пример моделирования трех витков возмущенного движения под комплексным влиянием обоих факторов: несферичности и атмосферы Земли.

Для улучшения наглядности реализована функция *искусственного, искаженного усиления* влияния возмущающих факторов (кнопки ON/OFF в правом верхнем углу интерфейса). Данная функциональность реализована для визуализации эволюции орбитальных параметров во времени и позволяет наглядно проследить изменения формы и ориентации орбиты под воздействием возмущающих факторов.

Интуитивно понятный интерфейс ВП обеспечивает простоту управления без необходимости длительного обучения или разработки подробной инструкции. Виртуальный прибор поддерживает непрерывный режим работы: любые изменения параметров в реальном времени отражаются на визуализации и расчетных результатах.

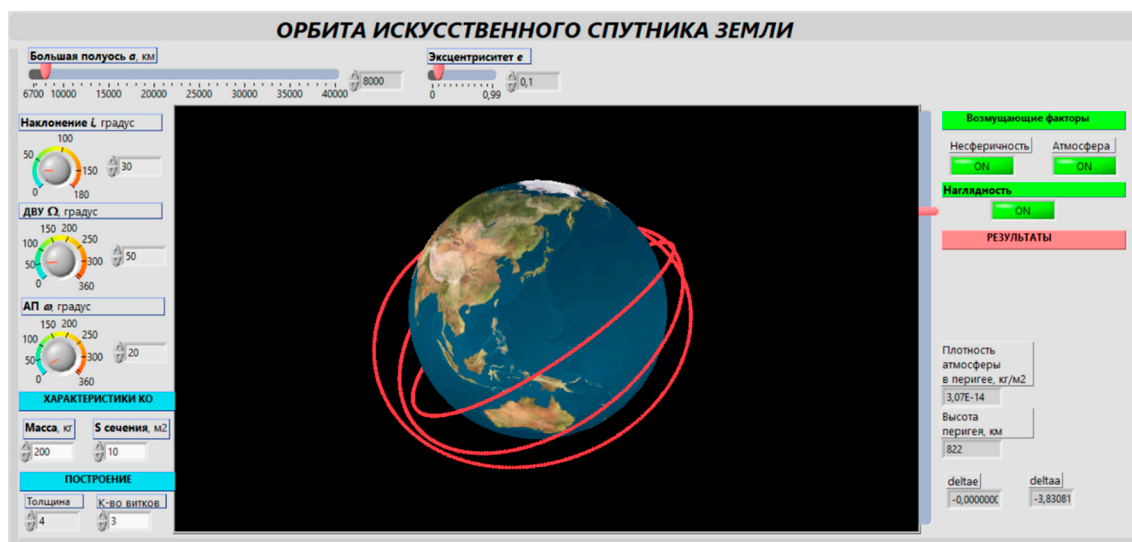


Рис. 2. Интерфейс программы

Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Такая возможность существенно расширяет наглядность и эффективность изучения основных закономерностей движения искусственного спутника Земли в околоземном космическом пространстве.

Использование виртуального прибора «Орбита ИСЗ с учетом атмосферы и несферичности Земли» на занятиях позволило достичь следующих целей: повысить наглядность учебного материала и устранить сложности, связанные с пространственным воображением; качественно разъяснить основные определения элементов орбиты, а также их влияние на параметры движения спутника; доступно продемонстрировать влияние несферичности Земли на траекторию движения искусственных спутников в околоземном пространстве; наглядно продемонстрировать влияние атмосферы Земли на изменение орбитальных параметров.

На практических занятиях обучающиеся могут закрепить теоретические знания, провести исследования изменений орбиты под воздействием вариаций ее элементов и временных параметров, а также изучить различия между невозмущенной и возмущенной орбитами. Разработанная модель существенно расширяет возможности интерактивного обучения и способствует более глубокому пониманию основ орбитальной динамики.

Заключение

Разработанный виртуальный прибор служит эффективным инструментом визуализации для изучения спутниковой динамики. Он обеспечивает моделирование как невозмущенного, так и возмущенного движения спутника с учетом ключевых факторов: несферичности Земли и сопротивления атмосферы. Прибор позволяет наглядно исследовать связь между параметрами орбиты и характеристиками спутника. Апробация в учебном процессе подтвердила, что его использование повышает качество и наглядность обучения.

Список литературы

1. Егорычева Е.В., Тюрина С.Ю., Сидоров А.А., Орлова Е.В. Инновационные образовательные технологии в техническом вузе // Современные наукоемкие технологии. 2021. № 6 (ч. 2). С. 312–316. URL: <https://top-technologies.ru/article/view?id=38740> (дата обращения: 03.01.2026). DOI: 10.17513/snt.38740.
2. Коваленко Е.И. Инновационные технологии в области профессионального образования // Современные проблемы науки и образования. 2025. № 1. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=33906> (дата обращения: 03.01.2026). DOI: 10.17513/spno.33906.
3. Вайгенд М. Математическое моделирование и программирование в естественнонаучном образовании // Компьютерные инструменты в образовании. 2019. № 2. С. 55–64. URL: <http://cte.eltech.ru/ojs/index.php/kio/article/view/1599> (дата обращения: 03.01.2025). DOI: 10.32603/2071-2340-2019-2-55-64.
4. Алдохина В.Н., Куликов С.В., Королев В.О. Модель прогнозирования движения искусственного спутника Земли в околоземном космическом пространстве // Современные наукоемкие технологии. 2021. № 1. С. 7–11. URL: <https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=38463> (дата обращения: 03.01.2026). DOI: 10.17513/snt.38463.
5. Алдохина В.Н., Гудаев Р.А., Смирнов М.С., Шаймухаметов Ш.И. Модель системы мониторинга и контроля воздушно-космического пространства // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2019. № 668. С. 8–19. URL: <https://vka.mil.ru/Nauka/Nauchnye-trudy> (дата обращения: 03.11.2025).
6. Алдохина В.Н., Королев В.О. Программная реализация построения орбиты искусственного спутника Земли // Компьютерные инструменты в образовании. 2024. № 2. С. 48–57. URL: <http://cte.eltech.ru/ojs/index.php/kio/article/view/1829> (дата обращения: 03.01.2026). DOI: 10.32603/2071-2340-2024-2-48-57.
7. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2020615106. Орбита ИСЗ: № 2020614119; заявлено 13.04.2020; опубл. 15.05.2020 / Алдохина В.Н., Королев В.О., Куликов С.В., Федоренко Д.С. URL: <https://www.fips.ru/publication-web/publications/document?type=doc&tab=PrEVM&id=4D6D76D4-1EA2-41C0-8B5C-7795218E6830> (дата обращения: 03.11.2025).
8. Мирер С.А. Механика космического полета. Орбитальное движение. М.: Резолит, 2007. 267 с. ISBN 5-86567-090-5.
9. Эльясберг П. Введение в теорию полета искусственных спутников Земли. М.: Ленанд, 2024. 544 с. ISBN 978-5-9710-7887-6.
10. Эскобал П. Методы определения орбит. М.: Мир, 1970. 472 с.
11. ГОСТ Р 53460-2009. Глобальная справочная атмосфера для высот от 0 до 120 км для аэрокосмической практики. Параметры. М.: Стандартинформ, 2011. 182 с.
12. ГОСТ 4401-81. Атмосфера стандартная. Параметры. М.: ИПК Издательство стандартов, 2004. 180 с.
13. Самарский А.П. Динамическое моделирование непрерывных технологических процессов в среде LabVIEW // Российский химический журнал. 2022. Т. LXVI. № 2. С. 8–15. URL: <https://rcj.isuct.ru/article/view/4561> (дата обращения: 03.01.2026). DOI: 10.6060/rcj.2022662.2.
14. Ключилов А.В., Кудрявцев В.О. Виртуальный прибор для изучения операционных усилителей на платформе NI ELVIS // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19. № 4. С. 767–770. URL: <https://ntv.ifmo.ru/article/18795> (дата обращения: 03.01.2026). DOI: 10.17586/2226-1494-2019-19-4-767-770.
15. Сухорученков К.В., Марасева Е.В., Александрова О.А. Виртуальный прибор для расчета параметров эпитаксиальных слоев при выращивании гетероструктур // Компьютерные инструменты в образовании. 2023. № 1. С. 96–105. URL: <http://cte.eltech.ru/ojs/index.php/kio/article/view/1765> (дата обращения: 03.11.2025). DOI: 10.32603/10.32603/2071-2340-2023-1-96-105.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.