

## ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ СПЕЦИАЛЬНОГО МОДУЛЯ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ ВЕНЕРЫ С ПОМОЩЬЮ ДВУХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

В.А. Зубко<sup>1,2</sup>

zubkova@student.bmstu.ru

SPIN-код: 1967-6719

А.А. Беляев<sup>1,2</sup>

don.beliae2012@yandex.ru

SPIN-код: 1941-4981

<sup>1</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

<sup>2</sup>Институт космических исследований РАН

---

### Аннотация

Представлена реализация специального модуля, предназначенного для расчета интервалов просвечивания атмосферы Венеры и определения окон связи между двумя КА. Исследована целесообразность применения навигационно-вспомогательного программно-вычислительного комплекса SPICE NAIF. Рассмотрены технические аспекты программной реализации модуля на языке программирования Python. Проведено сравнение программной реализации модуля с помощью применения навигационно-вспомогательного программно-вычислительного комплекса SPICE NAIF и без его использования. Выполнен сравнительный анализ программного обеспечения, реализующего расчет интервалов просвечивания атмосферы Венеры. Доказана эффективность применения навигационно-вспомогательного программно-вычислительного комплекса SPICE NAIF при решении прикладных задач баллистики, требующих использования вычислительной техники.

### Ключевые слова

SPICE NAIF, навигационно-баллистическое обеспечение, программирование, исследование атмосферы Венеры, радиовидимость, зоны просвечивания, Венера, Python, объектно-ориентированное программирование

Поступила в редакцию 15.11.2019

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019

---

**Введение.** В последнее время сложность решения прикладных баллистических задач, связанных с динамикой космического полета, существенно возрастает. За последние 50 лет проведено много исследований [1–10], направленных на развитие средств решения таких задач, а также накоплена база, состоящая из уже решенных задач. Объединяя поистине гигантский потенциал развития средств вычисления и обогащая инструментарий за счет уже накопленной базы решенных задач, можно формализовать или структурировать многие задачи космической динамики. Таким образом можно обозначить целое направление развития в баллистике, в котором уже имеющиеся данные обобщаются и находят применение при решении других задач с помощью специальных средств, таких как навигационно-баллистические базы данных и динамические библиотеки языков

программирования. Другими словами, обобщая вышесказанное, отметим, что рассмотрение некоего направления, условно обозначаемого как космическая информатика, можно выделить как общий вектор дальнейшего развития баллистики космоса.

Для упрощения, структуризации и формализации прикладных задач космической динамики разрабатываются различные интеллектуальные и экспертные системы призванные заменить рутинный человеческий труд, в тех областях, где это возможно [1–8].

Одним из элементов создания интеллектуальной системы [5–8] является повсеместное использование навигационно-баллистического обеспечения, а именно навигационно-баллистических баз данных и специальных программных библиотек [3–8], реализованных для разных языков программирования, содержащих эфемериды, системы координат и прочее. В частности, лабораторией Jet Propulsion Laboratory (California Institute of Technology) был разработан и внедрен в использование навигационно-вспомогательный программно-вычислительный комплекс (НВПВК) SPICENAIF.

**Краткое описание модуля.** SPICE NAIF — это система хранения навигационных и вспомогательных данных, необходимых для планирования наблюдений и обработки результатов экспериментов, проводимых научными приборами в космических проектах [9]. В состав самой системы входит ее реализация в виде программных библиотек для языков программирования C++, Fortran, MATLAB и частичная реализация для языка программирования Python. Помимо этого в состав системы входит набор открытых результатов различных космических миссий, а также набор инструментов, позволяющих обеспечить применимость системы на различных платформах.

Данная система используется при решении большого спектра задач динамики космического полета. Типовой задачей, решаемой с помощью данной системы, является задача определения вектора состояния космического аппарата (КА) в инерциальной или относительной системе координат, с привязкой к определенной эпохе (J2000). Также система позволяет решать ряд задач, связанных с определением параметров орбиты КА, освещенности КА, зон радиовидимости, времени жизни КА на орбите.

**Решаемая задача.** В качестве примера использования SPICE NAIF рассмотрим определение интервалов видимости между двумя космическими аппаратами (КА) при условии прохождения радиосигнала от одного КА к другому, через атмосферу планеты. Исходными данными служит сценарий проекта миссии по исследованию Венеры [10]. При этом один из КА — орбитальный модуль (ОМ) — находится на высокоэллиптической орбите вокруг Венеры с периодом обращения 1 сутки, а другой КА располагается на ограниченной орбите в окрестности коллинеарной точки либрации системы Солнце — Венера [10–12].

Решение данной задачи было выполнено двумя методами, один из которых предполагал использование простейших геометрических соотношений и про-

граммной реализации преобразования векторов состояний КА из одной системы в другую. Краткий алгоритм предусматривает следующие пункты (рис. 1):

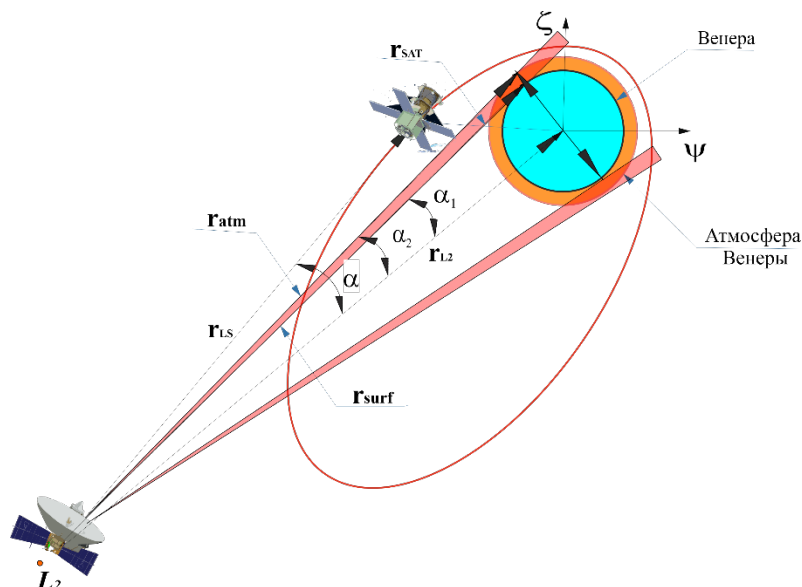


Рис. 1. Схема для определения периодов (интервалов) просвечивания атмосферы Венеры в плоскости орбиты ОМ

- 1) находят положение аппаратов в экваториальной системе координат с помощью использования преобразований систем координат;
- 2) определяют радиус-векторы  $\mathbf{r}_{L2}$ ,  $\mathbf{r}_{atm}$ ,  $\mathbf{r}_{surf}$ :

$$\mathbf{r}_{L2} = \mathbf{r}_{L2} - \mathbf{r}_{sat};$$

$$\mathbf{r}_{atm} = \mathbf{r}_{L2} - \mathbf{r}_a;$$

$$\mathbf{r}_{surf} = \mathbf{r}_{L2} - \mathbf{r}_V,$$

где  $\mathbf{r}_{L2}$  — радиус-вектор, соединяющий центры масс КА в Венерианской экваториальной системе координат;  $\mathbf{r}_{L2}$  — радиус-вектор КА, находящегося на ограниченной орбите в венерианской экваториальной системе координат;  $\mathbf{r}_{sat}$  — радиус-вектор ОМ в венерианской экваториальной системе координат;  $\mathbf{r}_{atm}$  — радиус-вектор, определяющий расстояние от центра масс КА на ограниченной орбите до границы атмосферы Венеры в венерианской экваториальной системе координат;  $\mathbf{r}_a$  — радиус-вектор, определяющий высоту атмосферы Венеры в венерианской экваториальной системе координат;  $\mathbf{r}_{surf}$  — радиус-вектор, определяющий расстояние от центра масс КА на ограниченной орбите до границы поверхности Венеры в венерианской экваториальной системе координат;  $\mathbf{r}_V$  — радиус-вектор, определяющий радиус Венеры в венерианской экваториальной системе координат;

3) вычисляют углы:

$$\cos \alpha_1 = \frac{x_a x_1 + y_a y_1 + z_a z_1}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2 + z_1^2} \sqrt{x_a^2 + y_a^2 + z_a^2}};$$

$$\cos \alpha_2 = \frac{x_{surf} x_1 + y_{surf} y_1 + z_{surf} z_1}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2 + z_1^2} \sqrt{x_{surf}^2 + y_{surf}^2 + z_{surf}^2}};$$

$$\cos \alpha = \frac{x_2 x_1 + y_2 y_1 + z_2 z_1}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2 + z_1^2} \sqrt{x_2^2 + y_2^2 + z_2^2}},$$

где  $\cos \alpha_1$  — косинус угла между направлением  $\mathbf{r}_{L2}$  и  $\mathbf{r}_a$ ;  $\cos \alpha_2$  — косинус угла между направлением  $\mathbf{r}_{L2}$  и  $\mathbf{r}_{surf}$ ;  $\cos \alpha$  — косинус угла между направлениями  $\mathbf{r}_{L2}$  и  $\mathbf{r}_{12}$ ;

4) проверяют выполнение условия

$$\alpha_2 \leq \alpha \leq \alpha_1.$$

Другой метод заключался в замене формальных действий, таких как преобразования систем координат и определение длительности зон просвечивания атмосферы, возможностями программных библиотек НВПВК SPICENAIF [16]. Краткий алгоритм этого метода предусматривает следующие пункты:

- 1) находят положение аппаратов в экваториальной системе координат с помощью возможностей функций программных библиотек НВПВК SPICENAIF;
- 2) определяют периоды  $T_1$  затенения ОМ Венерой без учета ее атмосферы относительно КА, находящегося на ограниченной орбите;
- 3) находят периоды  $T_2$  затенения ОМ Венерой с учетом ее атмосферы относительно КА, находящегося на ограниченной орбите;
- 4) накладывают периоды  $T_1$  и  $T_2$  и их пересечение не учитывают.

**Технические аспекты программной реализации алгоритма основанного на простейших геометрических соотношениях.** При решении задачи определения зон радиовидимости при наличии особых условий использовали язык программирования Python. Среда, в которой реализовывался программный модуль, — JupyterLab.

При реализации описанного выше алгоритма применяли гибридный подход, при котором часть создаваемых объектов являлась классами, другая часть реализовывалась в виде программных функций. Основу составляли использованные в процессе проектирования классы встроенных программных библиотек. При этом часть встроенных библиотек, таких как numpy, torch, pandas, использовали для создания основного ядра программы. Для визуализации полу-

ченных данных, а именно для создания графиков и гистограмм, использовали классы и функции библиотек: `matplotlib`, `matplotlib`, `pyplot`.

Отметим, что в целях упрощения написания программного кода поверхность Венеры аппроксимировали сферой радиусом 6051,4 км. Из диапазона распространения радиоволн выделяли линии равного сигнала, распространение которых учитывается в работе программного модуля. Задержка радиолуча в атмосфере Венеры не учитывалась.

Все операции проверки выполнения необходимого условия просвечивания выполняли в тензорной форме, т. е. создавали объект `torch.Tensor`, имеющий тип `float32`, затем в этот объект добавляли граничные условия по интервалам и далее осуществляли одну программную операцию для вычисления границ интервалов просвечивания. Результаты сведены в таблицу. По данным таблицы построено графическое представление данных интервалов.

**Сравнение реализации алгоритма в программной среде.** Для решения задачи просвечивания атмосферы Венеры написан программный модуль, реализующий описанный алгоритм, основанный на простейших геометрических соотношениях на языке программирования Python 3.7.

Для реализации алгоритма построена расчетная сетка с шагом  $\Delta h = 60$  с. Таким образом, зоны просвечивания длительностью менее 60 с не учитывались в процессе расчета. Время работы программы составляло  $t \approx 10,6$  с.

Также написан программный модуль, использующий возможности программной библиотеки SPICENAIF. В нем использованы следующие функции:

`spiceypy.spkezr(...)` – использована для определения положения КА в венерианской экваториальной системе координат;  
`spiceypy.reclat(...)` – предназначена для определения положения КА в сферической системе координат;  
`spiceypy.furnsh(...)` – позволяет загружать необходимые эфемериды для дальнейшего расчета;  
`spiceypy.scs2e(...)` – позволяет определять время текущее звездное время КА;  
`spiceypy.str2et(...)` – использована для перевода времени заданного в формате UTC Gregorian в секунды относительно эпохи J2000;  
`spiceypy.gfposc(...)` – предназначена для определения времени видимости ОМ и КА, находящегося на ограниченной орбите;  
`spiceypy.oscslt(...)` – используется для определения оскулирующих элементов орбиты КА;  
`spiceypy.gfoclt(...)` – позволяет определять время нахождения ОМ в тени Венеры относительно радиолуча из КА, находящегося на ограниченной орбите.

**Реализация алгоритма определения интервалов просвечивания с использованием НВПВК SPICE NAIF.** Для определения интервалов просвечивания был использован описанный выше алгоритм, основанный на применении НВПВК SPICE NAIF. Псевдокод, реализующий данный алгоритм, показан на рис. 2.

**Algorithm 1** *findTI(SC1, SC2, Planetid, Atmid, Date, Date<sub>EMT</sub>)* Определение интервалов просвечивания атмосферы Венеры двумя КА с помощью НВПВК SPICE NAIF

**Исходные параметры:** Эфемериды небесных тел и КА, параметры систем координат, длительность миссии и параметры орбит КА

**Входные данные:** Дата и время начала расчёта в формате *UTC Gregorian (YYYY-MM-DD)*

**Выходные данные:** Временные интервалы просвечивания атмосферы Венеры

- 1: Date in (2026:2031) ▷ дата начала расчета
- 2: X, Y = findTLS([SC1id, SC2id], Planetid, Date) ▷ поиск текущих векторов состояния КА
- 3: STime = spiceypy.str2et(Date) ▷ время начала расчета в секундах, эпоха J2000
- 4: ETime = spiceypy.str2et(Date<sub>EMT</sub>) ▷ время окончания расчета в секундах, эпоха J2000
- 5: T1 = spiceypy.gfoct(X, Y, Planetid, STime, ETime) ▷ определение периода затенения ОМ Венерой
- 6: T2 = spiceypy.gfoct(X, Y, Atmid, STime, ETime) ▷ определение затенения орбитального модуля Венерой с учетом её атмосферы
- 7: T = (T1 + T2) - T1 ∩ T2 ▷ пересечение интервалов просвечивания - не учитывается

**Рис. 2.** Псевдокод реализуемого алгоритма определения интервалов просвечивания с использованием библиотек НВПВК SPICE NAIF

Псевдокод, реализующий определение вектора состояния КА в венерианской экваториальной системе координат, приведен на рис. 3.

**Algorithm 2** *findTLS(SCid, Planetid, Date)* Определение вектора состояния КА в экваториальной системе координат с помощью НВПВК SPICE NAIF

**Исходные параметры:** Эфемериды небесных тел и КА, параметры систем координат

**Входные данные:** Дата и время, на которое необходимо произвести определение вектора состояния КА в экваториальной системе координат в формате *UTC Gregorian (YYYY-MM-DD)*

**Выходные данные:** Вектор состояния КА в экваториальной системе координат

- 1: Загрузка файла содержащего сведения о эфемеридах небесных тел и КА:
- 2: mkfile = filename ▷ задается имя файла содержащего сведения об эфемеридах
- 3: spiceypy.furnsh(mkfile) ▷ Загрузка файла
- 4: Задются системы координат и эпохи (J2000) для которой производится определение;
- 5: Определяются параметры вектора состояния КА:

**Рис. 3.** Псевдокод реализуемого алгоритма определения вектора состояния КА с использованием библиотек НВПВК SPICE NAIF

**Результат работы программного модуля, реализованного с помощью использования НБДД SPICE NAIF.** Для начала расчета на вход программному модулю (рис. 4), необходимо задать следующие параметры:

- номера КА и ОМ, присвоенные им в системе SPICE NAIFid;
- даты начала и окончания выполнения целевой задачи в формате *UTC Gregorian*;

- системы координат, используемые для расчета;
- абберацию светового луча.

Кроме заданных параметров необходимо осуществить загрузку бинарных файлов, содержащих эфемериды движения космического аппарата и небесных тел на текущую эпоху (*J2000*).

В результате работы ПМ формируется текстовый файл, содержащий в себе сведения о начале и конце зоны просвечивания (рис. 5), суммарной продолжительности зоны просвечивания, а также о суммарной месячной продолжительности зоны.

```
# Local Parameters
#
#METAKR = 'visibl.tm'
SCLKID = -958
TDBFMT = 'YYYY MON DD HR:MN:SC.### TDB ::TDB'
MAXIVL = 20000
MAXNIN = 2 * MAXIVL

srfpt = '-958'
obsfrm = 'J2000'#'J2000'
target = '-10005001'
abcorr = 'NONE'#'CN+S'
start = '2026 DEC 17 TDB'
stop = '2027 JUL 10 TDB'
elvlm = 0
```

Рис. 4. Окно задания начальных параметров расчета

```
Inputs for target visibility search:
Target = -10005001
Observation surface location = -958
Observer's reference frame = J2000
Blocking body = VENUS
Blocker's reference frame = IAU_VENUS
Elevation limit (degrees) = 0.000000
Aberration correction = NONE
Step size (seconds) = 60.000000
Start time = 2026 DEC 17 00:00:00.000 TDB
Stop time = 2027 MAR 10 00:00:00.000 TDB

Searching using ellipsoid target shape model...
Done.
Visibility start and stop times of -10005001 as seen from -958
using both ellipsoidaltarget shape models:

Ell: 2026-12-17T00:14:2 : 2026-12-17T00:14:5 UTC
Ell: 2026-12-17T23:51:1 : 2026-12-17T23:51:5 UTC
Ell: 2026-12-18T00:14:4 : 2026-12-18T00:15:1 UTC
Ell: 2026-12-18T23:51:3 : 2026-12-18T23:52:1 UTC
Ell: 2026-12-19T00:15:0 : 2026-12-19T00:15:3 UTC
```

Рис. 5. Численный результат работы ПМ

После проведения процедуры графической обработки полученных результатов расчета, получаются диаграммы отображающие периоды просвечивания атмосферы Венеры (рис. 6).

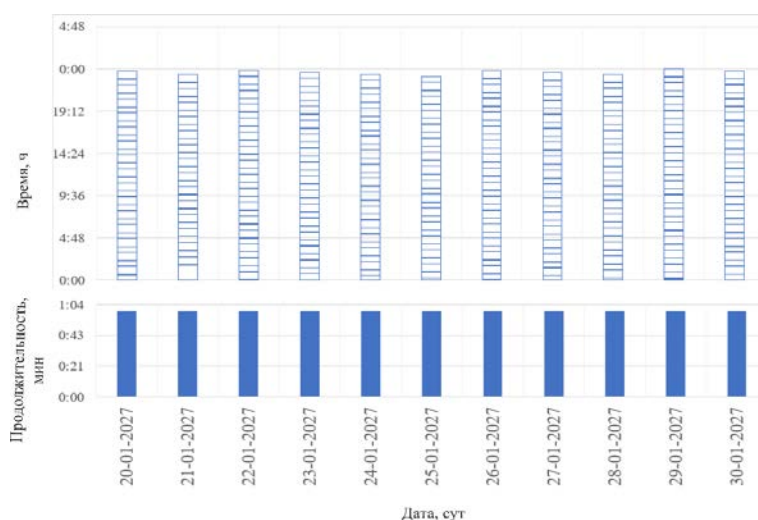


Рис. 6. Графическая обработка результатов работы ПМ, отображающая интервалы просвечивания атмосферы Венеры на период с 21.01.2027 по 30.01.2027, для случая эллиптической орбиты с периодом  $T = 2$  сут

На рис.5 приведен график, отображающий результат работы программного модуля, для случая орбиты ОМ периодом 2 сут [10, 11].

**Сравнение времени работы программного модуля.** Для оценки эффективности проводились серии испытаний на трех вычислительных машинах (ЭВМ) на базе различных процессоров. Результаты приведены в таблице.

**Результаты сравнительного анализа времени работы программ, с**

| Тип процессора   | Intel(R) Core (TM)<br>i5-3230M | Intel(R) Core<br>(TM) i5-5200U | Intel(R) Core<br>(TM) i5-7500 |
|--|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| Метод, основанный на использовании простейших геометрических соотношений | 10,6 ± 0,2                     | 9,7 ± 0,1                      | 8,9 ± 0,1                     |
| Метод, основанный на применении SPICENAIF                                | 0,0049 ± 0,1                   | 0,0035 ± 0,01                  | 0,002 ± 0,01                  |

Из полученных результатов сравнения видно, что применение ЭВМ на базе новых процессоров позволяет уменьшить время работы программы. Также отметим, что применение программных библиотек SPICE NAIF существенно ускоряет работу программы, о чем свидетельствуют данные таблицы. Отсюда можно сделать вывод, что вместо использования устаревших подходов к проектированию космических миссий следует активно внедрять использование НВПВК [1–9, 13–15], одним из примеров которых является SPICE NAIF.

#### **Выводы.**

1. Использование программных библиотек НББД SPICE NAIF позволяет существенно сократить время, затрачиваемое на создание программных комплексов, за счет формализации алгоритмов ранее использовавшихся при решении задач динамики космического полета.

2. Время работы программного модуля, реализованного на функциях, предоставляемых системой навигационно-баллистического обеспечения НББД SPICE NAIF существенно меньше, нежели время работы аналогичного программного модуля, реализованного на основе простейших геометрических соотношений и без применения баллистических баз данных. Соответствующее время работы в среднем составило  $t = 4,86 \cdot 10^{-3}$  с для программного модуля с применением возможностей НББД SPICENAIF и  $t = 10,6$  с — для модуля без применения НВПВК SPICE NAIF.

Отметим, что применение систем НВПВК требует наличия специальных знаний, касающихся непосредственного назначения каждого элемента входящего в ту или иную систему НВПВК и применяющуюся уже непосредственно при управлении движением космического аппарата, орбитальной станции или любого другого объекта требующего особого подхода к управлению [13–15].



## Литература

- [1] Бетанов В.В., Корянов В.В. Концепция обобщения структурных свойств измерительных задач при навигационно-баллистическом обеспечении космического аппарата. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2018, № 7(700), с. 92–99. DOI: 10.18698/0536-1044-2018-7-92-99 URL: <http://izvuzmash.ru/catalog/avroc/insp/1566.html>
- [2] Бетанов В.В., Янчик А.Г. Навигационно-баллистическое обеспечение испытаний и применения космических аппаратов. М., ВА РВСН, 1993.
- [3] Анфимов И.А., Иванов Н.М. и др. Особенности баллистико-навигационного обеспечения управления орбитальным комплексом «Мир» на этапе завершения его полета. *Космонавтика и ракетостроение*, 2001, т. 25, с. 11–32.
- [4] Тюлин А.Е., Бетанов В.В., Юрасов В.С. и др. Навигационно-баллистическое обеспечение полета ракетно-космических средств. Кн.1.М., Радиотехника, 2018.
- [5] Тюлин А.Е., Бетанов В.В., Кобзарь А.А. Навигационно-баллистическое обеспечение полета ракетно-космических средств. Кн. 1. М., Радиотехника., 2018.
- [6] Бетанов В.В., Корянов В.В. Обобщение структурных свойств наблюдаемости и идентификации в задачах навигационно-баллистического обеспечения управления космическими аппаратами. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2019, № 4. DOI: 10.18698/2308-6033-2019-4-1872 URL: <http://engjournal.ru/catalog/arise/adb/1872.html>
- [7] Лысенко Л.Н. Внешняя баллистика. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018.
- [8] Иванов Н.М., Лысенко Л.Н. Баллистика и навигация космических аппаратов. М., Дрофа, 2004.
- [9] Ледков А.А., Аббакумов А.С., Назаров В.Н. Программный комплекс визуализации для системы SPICE. *Фундаментальные и прикладные космические исследования. Тез. докл.* М., 2011 ИКИ РАН, 2011, с. 50.
- [10] Эйсмонт Н.А., Засова Л.В., Симонов А.В., и др. Сценарий и траектория миссии «ВЕНЕРА-Д». *Вестник НПО им. С.А. Лавочкина*, 2018, № 4, с. 11–18.
- [11] Корянов В.В., Казаковцев В.П. Основы теории космического полета. Ч. 2. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014.
- [12] Зубко В.А., Беляев А.А. Исследование точек либрации в системе Солнце–Венера с целью формирования орбитальной системы для изучения атмосферы Венеры. *Политехнический молодежный журнал*, 2019, №8. DOI: 10.18698/2541-8009-2019-8-508 URL: <http://ptsj.ru/catalog/arise/adbmc/508.html>
- [13] Бетанов В.В., Ларин В.К. Использование системного подхода к решению проблемных вопросов функционирования автоматизированного комплекса программ баллистико-навигационного обеспечения полетов КА ГНСС. *Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы*, 2016, т. 3, № 1, с. 3–10.
- [14] Бетанов В.В., Ларин В.К. Концепция построения базовой технологической модели разработки баллистической структуры автоматических КА. *Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы*, 2016, т. 3, № 4, с. 65–73.
- [15] Тюлин А.Е., Бетанов В.В. Летные испытания космических объектов. Определение и анализ движения по экспериментальным данным. М., Радиотехника, 2016.
- [16] The SPICE toolkit. *naif.jpl.nasa.gov: веб-сайт*. URL: <https://naif.jpl.nasa.gov/naif/toolkit.html> (дата обращения: 15.08.2019).

**Зубко Владислав Александрович** — студент кафедры «Динамика и управление полетом ракет и космических аппаратов», МГТУ им. Н.Э. Баумана, сотрудник отдела космической динамики и математической обработки информации, Институт космических исследований РАН, Москва, Российская Федерация.

**Беляев Андрей Алексеевич** — студент кафедры «Динамика и управление полетом ракет и космических аппаратов», МГТУ им. Н.Э. Баумана, сотрудник отдела космической динамики и математической обработки информации, Институт космических исследований РАН, Москва, Российская Федерация.

**Научный руководитель** — Корянов Всеволод Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Динамика и управление полетом ракет и космических аппаратов», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

**Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:**

Зубко В.А., Беляев А.А. Программная реализация специального модуля для обеспечения исследования атмосферы вены с помощью двух космических аппаратов. *Политехнический молодежный журнал*, 2019, № 12(41). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2019-12-555>

## SOFTWARE IMPLEMENTATION OF A SPECIAL MODULE FOR THE STUDY OF VENUS ATMOSPHERE USING TWO SPACECRAFT

V.A. Zubko<sup>1,2</sup>

zubkova@student.bmstu.ru

SPIN-code: 1967-6719

A.A. Beliaev<sup>1,2</sup>

don.beliae2012@yandex.ru

SPIN-code: 1941-4981

<sup>1</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

<sup>2</sup>Space Research Institute RAS

---

### Abstract

The article presents the implementation of a special module for calculating the intervals of translucence of Venus atmosphere and determining the communication windows between two spacecraft. The expediency is investigated of using the navigation-auxiliary software and computer complex SPICE NAIF. Technical aspects of the software module implementation in the Python programming language are considered. The software implementation module is compared using the navigation-auxiliary software and computer complex SPICE NAIF and without using it. A comparative analysis is made of the software that implements the calculation of intervals of translucence of Venus atmosphere. The effectiveness has been proved of the use of the navigation and auxiliary software and computer complex SPICE NAIF in solving applied ballistics tasks requiring the use of computer technology.

### Keywords

SPICE NAIF, ballistic navigation software, programming, study of Venus atmosphere, radio visibility, translucence zones, Venus, Python, object-oriented programming

Received 15.11.2019

© Bauman Moscow State Technical University, 2019

---

### References

- [1] Betanov V.V., Koryanov V.V. The concept of generalization of structural properties of measuring tasks when providing navigation and ballistic support for spacecraft. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building], 2018, no. 7(700), pp. 92–99. DOI: 10.18698/0536-1044-2018-7-92-99 URL: <http://izvuzmash.ru/catalog/avroc/insp/1566.html> (in Russ.).
- [2] Betanov V.V., Yanchik A.G. Navigatsionno-ballisticheskoe obespechenie ispytaniy i primeneniya kosmicheskikh apparatov [Navigation and ballistic support of spacecraft tests and application]. Moscow, VA RVS Publ., 1993 (in Russ.).
- [3] Anfimov I.A., Ivanov N.M., et al. Special aspects of navigation and ballistic support of control on “Mir” station at the stage of its flight finish. *Kosmonavtika i raketostroenie*, 2001, vol. 25, pp. 11–32 (in Russ.).
- [4] Tyulin A.E., Betanov V.V., Yurasov V.S., et al. Navigatsionno-ballisticheskoe obespechenie poleta raketno-kosmicheskikh sredstv. Kn. 2. [Navigation and ballistic support of spacecraft. Vol. 2. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2018 (in Russ.).

- 
- [5] Tyulin A.E., Betanov V.V., Kobzar' A.A. Navigatsionno-ballisticheskoe obespechenie poleta raketno-kosmicheskikh sredstv. Kn. 1 [Navigation and ballistic support of spacecraft. Vol. 1]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2018 (in Russ.).
- [6] Betanov V.V., Koryanov V.V. Generalization of structural properties of observability and identification in problems of navigation and ballistic support of spacecraft control. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2019, no. 4. DOI: 10.18698/2308-6033-2019-4-1872 URL: <http://engjournal.ru/catalog/arsetadb/1872.html> (in Russ.).
- [7] Lysenko L.N. Vneshnyaya ballistika [External ballistic]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2018 (in Russ.).
- [8] Ivanov N.M., Lysenko L.N. Ballistika inavigatsiya kosmicheskikh apparatov [Ballistics and navigation of spacecraft]. Moscow, Drofa Publ., 2004 (in Russ.).
- [9] [9] Ledkov A.A., Abakumov A.S., Nazarov V.N. [Visualization software pack for SPICE system]. *Fundamental'nye i prikladnye kosmicheskie issledovaniya. Tez. dokl.* [Fundamental and Applied Research. Coll. abs.]. Moscow, 2011 IKI RAS Publ., 2011, pp. 50 (in Russ.).
- [10] Eysmont N.A., Zasova L.V., Simonov A.V., et al. VENERA-D mission scenario and trajectory. *Vestnik NPO im. S.A. Lavochkina*, 2018, no. 4, pp. 11–18 (in Russ.).
- [11] Koryanov V.V., Kazakovtsev V.P. Osnovy teorii kosmicheskogo poleta. Ch. 2 [Fundamentals of space flight theory. Vol. 2]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2014 (in Russ.).
- [12] Zubko V.A., Belyaev A.A. Study of libration points in the Sun – Venus system in order to form the orbital system for the study of the Venus atmosphere. *Politekhicheskiy molodezhnyy zhurnal* [Politechnical student journal], 2019, no. 8. DOI: 10.18698/2541-8009-2019-8-508 URL: <http://ptsj.ru/catalog/arsetadbmc/508.html> (in Russ.).
- [13] Betanov V.V., Larin V.K. Using a systematic approach to solving the problematic issues of functioning of the automated complex of programs for ballistic and navigational support of GNSS spacecraft missions. *Raketno-kosmicheskoe priborostroenie i informatsionnye sistemy* [Rocket-space device engineering and information systems], 2016, vol. 3, no. 1, pp. 3–10 (in Russ.).
- [14] Betanov V.V., Larin V.K. Concept of development of basic engineering model for ballistic structure of unmanned spacecraft. *Raketno-kosmicheskoe priborostroenie i informatsionnye sistemy* [Rocket-space device engineering and information systems], 2016, vol. 3, no. 4, pp. 65–73 (in Russ.).
- [15] Tyulin A.E., Betanov V.V. Letnye ispytaniya kosmicheskikh ob"ektov. Opreделение i analiz dvizheniya po eksperimental'nym dannym [Flight test of spacecraft. Motion detection and analysis using experimental data]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2016 (in Russ.).
- [16] The SPICE toolkit. *naif.jpl.nasa.gov: website*. URL: <https://naif.jpl.nasa.gov/naif/toolkit.html> (accessed: 15.08.2019).

**Zubko V.A.** — Student, Department of Dynamics and Flight Control of Rockets and Spacecraft, Bauman Moscow State Technical University, Department of Space Dynamics and Mathematical Information Processing, Space Research Institute RAS, Moscow, Russian Federation.

**Beliaev A.A.** — Student, Department of Dynamics and Flight Control of Rockets and Spacecraft, Bauman Moscow State Technical University, Department of Space Dynamics and Mathematical Information Processing, Space Research Institute RAS, Moscow, Russian Federation.

**Scientific advisor** — Korianov V.V., Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Dynamics and Flight Control of Rockets and Spacecraft, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

**Please cite this article in English as:**

Zubko V.A., Beliaev A.A. Software implementation of a special module for the study of Venus atmosphere using two spacecraft. *Politekhicheskiy molodezhnyy zhurnal* [Politechnical student journal], 2019, no. 12(41). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2019-12-555.html> (in Russ.).