

Труды МАИ. 2022. № 125
Trudy MAI, 2022, no. 125

Научная статья
УДК 629.78.015:531.55.001.2
DOI: [10.34759/trd-2022-125-18](https://doi.org/10.34759/trd-2022-125-18)

ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭФЕМЕРИД ЕРМ И DE

Павел Владимирович Казмерчук¹, Людмила Витальевна Вернигора²✉

^{1,2}НПО Лавочкина,

Химки, Московская область

¹pavel.kazmerchuk@gmail.com

²gorka_ya@mail.ru✉

Аннотация. В статье рассматривается использование в прикладных программах высокоточных эфемерид Ephemeris of Planets and Moon (EPM), созданных в Институте прикладной астрономии РАН и Development Ephemeris (DE), созданных в Лаборатории реактивного движения НАСА (JPL).

Ключевые слова: эфемериды, C++, Ephemeris of Planets and Moon (EPM), Development Ephemeris (DE)

Для цитирования: Казмерчук П.В., Вернигора Л.В. Практическое использование эфемерид ЕРМ и DE // Труды МАИ. 2022. № 125. DOI: [10.34759/trd-2022-125-18](https://doi.org/10.34759/trd-2022-125-18)

Original article

PRACTICAL USE OF EPM AND DE EPHEMERIS

Pavel V. Kazmerchuk¹, Lyudmila V. Vernigora²

^{1,2}Lavochkin Association, Himki, Moscow region

¹pavel.kazmerchuk@gmail.com

²gorka_ya@mail.ru✉

Abstract. The design of interplanetary space missions is impossible without knowledge of the position of solar system objects and their dynamics. To determine the position and speed of an astronomical object at a specific point in time (on a specific date), special tables called ephemeris are used. Modern ephemerides are built on the basis of integrating rather complex equations of motion that take into account the gravitation of many bodies in the solar system, including large asteroids and trans-Neptunian objects, relativistic effects, perturbations from the dynamic compression of the Sun, mutual perturbations of the planets, the Sun and the Moon, etc. When building dynamic models ephemeris, data from radar observations of planets, laser observations of the Moon, data on the parameters of the movement of spacecraft during their approach to large planets, the results of interferometry with very long bases, etc. are used.

To date, one of the most accurate are the Ephemeris of Planets and Moon (EPM) ephemerides developed by the Institute of Applied Astronomy of the Russian Academy of Sciences (IPA) and the Development Ephemeris (DE) ephemeris of the NASA Jet Propulsion Laboratory (JPL). Various variants of the DE series ephemeris appeared in the 60s of the XX century, the EPM ephemeris began to be created in 1974.

The coordinate system used in a particular version of the ephemeris must be specified in the documentation. In most versions, the coordinates are as close as possible to the International Celestial Reference System (ICRS - International Celestial Reference System). The origin is the barycenter of the solar system. The X axis is directed to the vernal equinox

at the J2000 epoch, the Z axis is perpendicular to the plane of the Earth's equator, the Y axis completes the system to the right. The resulting coordinate system is independent of the Earth's rotation. Units of measurement of coordinates are kilometers, measurements of time are days of barycentric coordinate time (TDB). The Julian day is used. Algorithms for converting a calendar date to a Julian day and vice versa can be found in.

There are quite a few tools that allow you to calculate the ephemeris data of astronomical objects, for example, online ephemeris services, as well as offline libraries. However, if the task is to use ephemeris in your own software, in which for some reason the use of third-party libraries is impossible or there are high performance requirements for subroutines working with ephemeris, which require specific code optimizations, you can use the text representation of ephemeris in the DE format available for free download from the IPA and NASA servers.

Keywords: ephemeris, C++, Ephemeris of Planets and Moon (EPM), Development Ephemeris (DE)

For citation: Kazmerchuk P.V., Vernigora L.V. Practical use of EPM and DE ephemeris.

Trudy MAI, 2022, no. 125. DOI: [10.34759/trd-2022-125-18](https://doi.org/10.34759/trd-2022-125-18)

Введение

Проектирование межпланетных космических миссий невозможно без знания положения объектов солнечной системы и их динамики [1], [2], [3], [4], [5]. Для

определения положения и скорости астрономического объекта в конкретный момент времени (на конкретную дату) используются специальные таблицы, называемые эфемеридами. Современные эфемериды строятся на основе интегрирования довольно сложных уравнений движения, учитывающих гравитацию многих тел солнечной системы, включая крупные астероиды и транснептуновые объекты, релятивистские эффекты, возмущения от динамического сжатия Солнца, взаимные возмущения планет, Солнца и Луны и т. д. При построении динамических моделей эфемерид используются данные радиолокационного наблюдения планет, лазерные наблюдения Луны, данные о параметрах движения космических аппаратов при сближении их с большими планетами, результаты интерферометрии со сверхдлинными базами и др. [6].

На сегодняшний день одними из самых точных являются эфемериды Ephemeris of Planets and Moon (EPM), разрабатываемые Институтом прикладной астрономии Российской академии наук (ИПА) [7] и эфемериды Development Ephemeris (DE) Лаборатории реактивного движения НАСА (JPL) [8], [9]. Различные варианты эфемерид серии DE появились в 60-ые годы XX-ого века, эфемериды EPM начали создаваться в 1974 г. [10].

Используемую в конкретной версии эфемерид систему координат необходимо уточнять в документации. В большинстве версий координаты максимально приближены к Международной Небесной Системе Координат (ICRS - International Celestial Reference System). Началом отсчёта является барицентр Солнечной системы. Ось X направлена в точку весеннего равноденствия на эпоху J2000, ось Z перпендикулярна плоскости земного экватора, ось Y дополняет систему до правой.

Полученная система координат независима от вращения Земли. Единицы измерения координат – километры, измерения времени – дни барицентрического координатного времени (TDB). Используется Юлианский день. Алгоритмы перевода календарной даты в Юлианский день и обратно можно найти в [11].

Существует достаточно много инструментов, позволяющих вычислять эфемеридные данные астрономических объектов, например, онлайн службы эфемерид [12], [13], а также библиотеки для работы оффлайн: [14], [15] и др. Однако, если стоит задача использования эфемерид в собственном программном обеспечении, в котором по каким-либо причинам использование сторонних библиотек невозможно или предъявляются высокие требования к производительности подпрограмм, работающих с эфемеридами, для которых необходимы специфические оптимизации кода, можно воспользоваться текстовым представлением эфемерид в формате DE, доступными для свободного скачивания с серверов ИПА и НАСА [16], [17].

1. Вычисление положения и скорости из эфемерид

В эфемеридах положения астрономических объектов аппроксимированы полиномами Чебышева [18]. Коэффициенты полиномов Чебышева доступны в виде текстовых файлов в кодировке ASCII. Другими словами, положения, скорость и другие данные астрономических объектов в эфемеридах не доступны прямо, а их необходимо вычислять на основе коэффициентов полиномов Чебышева [19].

Полиномы Чебышева $T(\tau)$ первого рода можно вычислить по рекуррентным соотношениям:

$$\begin{aligned}
T_0(\tau) &= 0; \\
T_1(\tau) &= \tau; \\
T_{i+1}(\tau) &= 2\tau \cdot T_i(\tau) - T_{i-1}(\tau), \quad i = \overline{1, n-1}.
\end{aligned}
\tag{1}$$

Где, $\tau \in [-1, 1]$ - нормализованное время.

Тогда траектория движения (по одной координате) на определённом интервале времени $t \in [t_1, t_2]$ может быть аппроксимирована следующей функцией

$$x(t) = \sum_{i=0}^n a_i T_i(\tau). \tag{2}$$

Где, $\tau = 2 \frac{t-t_1}{t_2-t_1} - 1$, a_i - коэффициенты, которые содержатся в файлах эфемерид.

Продифференцировав (2) по времени, можно получить соотношения для вычисления скорости на том же временном интервале:

$$\frac{dx(t)}{dt} = \frac{2}{t_2-t_1} \sum_{i=0}^n a_i V_i(\tau). \tag{3}$$

Где,

$$\begin{aligned}
V_0(\tau) &= 0; \\
V_1(\tau) &= 1; \\
V_2(\tau) &= 4\tau; \\
V_{i+1}(\tau) &= 2\tau \cdot V_i(\tau) + 2T_i(\tau) - V_{i-1}(\tau), \quad i = \overline{2, n-1}.
\end{aligned}
\tag{4}$$

Таким образом, зная коэффициенты a_i , можно вычислить позицию и скорость в момент времени $t \in [t_1, t_2]$. Т.к. коэффициенты a_i уменьшаются по абсолютному значению при росте i , то при вычислении по формулам (2),(3), производимым на компьютере, в связи с ограниченной разрядностью представления вещественных чисел для уменьшения погрешности вычислений суммирование рекомендуется производить в обратном порядке $i = \overline{n-1, 0}$.

2. Формат текстовых файлов эфемерид

Эфемериды содержат три типа файлов:

1. Файл вида `header.XXX` для описания (разметки) коэффициентов и хранения констант, где `XXX` – обычно номер эфемерид.
2. Файлы (один или несколько) с коэффициентами полиномов Чебышева.
3. Опционально, файл вида `testpo.XXX` с тестовыми значениями для проверки программного обеспечения, вычисляющего эфемериды.

Описание формата этих файлов рассмотрим на примере эфемерид DE441. Все коэффициенты a_i содержатся в файлах `ascXXXXXX.441` и разбиты на временные интервалы. Каждый интервал начинается с юлианской даты начала и юлианской даты конца интервала. Фактически каждый файл с коэффициентами можно рассматривать как матрицу.

Дата начала интервала	Дата конца интервала	Блок коэффициентов											
		Интервал для Меркурия						Интервал для Венеры					
		Подинтервал 1			...	Подинтервал N			Подинтервал 1			...	
		X	Y	Z	...	X	Y	Z	X	Y	Z	...	
$jd1_s$	$jd1_e$	$a_0...a_m$	$a_0...a_m$	$a_0...a_m$	...	$a_0...a_m$	$a_0...a_m$	$a_0...a_m$	$a_0...a_v$	$a_0...a_v$	$a_0...a_v$...	
.....													
jdN_s	jdN_e	$a_0...a_m$	$a_0...a_m$	$a_0...a_m$	...	$a_0...a_m$	$a_0...a_m$	$a_0...a_m$	$a_0...a_v$	$a_0...a_v$	$a_0...a_v$...	

Рисунок 1. Разметка файла с коэффициентами

Горизонтальный размер матрицы N_{coeff} (количество коэффициентов в строке) указан в первой строке файла `header.XXX`, например, для DE441: $N_{coeff}=1018$. Точное

количество коэффициентов в строке может быть меньше или равно N_{coeff} .

Вертикальный размер матрицы (количество интервалов) в каждом файле может различаться, однако если рассматривать все файлы с коэффициентами как одну большую матрицу, ее максимальный вертикальный размер можно вычислить на основе информации о дате начала и конца эфемерид и длине интервала (см. описание группы 1030 ниже). Интервалы в файлах с коэффициентами могут перекрывать друг друга. Также необходимо иметь в виду, что суммарный интервал, покрываемый эфемеридами из файлов коэффициентов, может быть меньше интервала, указанного в заголовочном файле header.XXX.

3. Формат файла header.XXX

Логически файл header.XXX разделен на несколько групп:

- GROUP 1010
- GROUP 1030
- GROUP 1040
- GROUP 1041
- GROUP 1050
- GROUP 1070

Группа 1010 содержит название и номер эфемерид, а также временной интервал эфемерид (начальную и конечную юлианскую и грегорианскую даты). Например:

JPL Planetary Ephemeris DE441/LE441

Start Epoch: JED= -3100015.5-13200-AUG-15 00:00:00

Final Epoch: JED= 8000016.5 17191-MAR-15 00:00:00

Группа 1030 содержит юлианские даты начала и конца эфемерид, а также размер (в Юлианских днях) временного интервала в файлах с коэффициентами. Если обозначить *begin* - дата начала эфемерид, *end* - дата окончания эфемерид, *d* - временной интервал, то вертикальный размер всей матрицы коэффициентов можно вычислить как $N = \frac{begin - end}{d}$.

Группа 1040 содержит имена констант, использованных при расчете эфемерид.

Группа 1041 содержит значения этих констант.

Группа 1050 основная в заголовке и содержит разметку коэффициентов в строке матрицы для различных планет (см. таблицу 1). Группа состоит из трех строк. Числа в каждой строке принадлежат следующим данным по порядку:

1. Меркурий
2. Венера
3. Барицентр системы Земля-Луна
4. Марс
5. Юпитер
6. Сатурн
7. Уран
8. Нептун
9. Плутон
10. Луна (относительно центра Земли)
11. Солнце
12. Нутация Земли

13. Либрация Луны

Опционально в некоторых эфемеридах доступны дополнительные данные о угловой скорости мантии Луны и разность земного и динамического времени:

14. Угловая скорость Луны

15. Разность земного и динамического времени (TT-TDB).

Таблица 1.

Разметка группы 1050.

	Меркурий	Венера	Барицентр 3-Л	Марс	Юпитер	Сатурн	Уран	Нептун	Плутон	Луна	Солнце	Нутация Земли	Либрация Луны	Вращение Луны	TT-TDB
i				309											
b															
n				11											
k				1											

Первая строка i_b – это позиция начала группы коэффициентов для конкретной планеты. Например, для Марса нужно взять четвертое число (в DE441 это 309). Т.е. коэффициенты для Марса начинаются с 309 позиции. Вторая строка n – степень многочлена или количество полиномов Чебышева, которые необходимо вычислить (по формулам (1)-(4)) для интерполяции координат (скоростей). Третья строка k - количество временных подинтервалов для конкретной планеты. Если в диапазоне не удастся обеспечить требуемую точность его дробят на подинтервалы со своим

набором коэффициентов. Другими словами, для каждой планеты интервал (все интервалы длиной d) может быть разбит на k подинтервалов со своими наборами коэффициентов.

Группа 1070 в файле header.XXX пустая. Это данные с коэффициентами полиномов Чебышева, которые находятся в отдельных файлах (см. раздел 2).

3. Алгоритм вычисления эфемерид

Все данные из файлов с коэффициентами полиномов Чебышева, объединенные в одну матрицу коэффициентов, будем далее называть матрицей коэффициентов C , размерностью $[N_{coeff} \times N]$. Обозначим дату, на которую требуется вычислить эфемеридные данные, $-jd$, дату начала первого интервала в матрице коэффициентов $-jd1_s$, размер временного интервала (дни) в файлах с коэффициентами $-d$ (см. описание группы 1030). Тогда алгоритм вычисления эфемеридных данных может быть представлен в следующем виде.

1. Пусть требуется вычислить эфемеридные данные для объекта с индексом P_l – это индекс столбца в таблице 1 (здесь и далее индексация начинается с нуля). Например, для Марса $P_l = 3$ и в соответствии с таблицей 1 выбираем данные для значений i_b, n, k из четвертого столбца.

2. Вычисляем индекс строки матрицы коэффициентов, соответствующий дате jd . Отнимаем 0,5, чтобы гарантировать соответствие индекса интервала диапазону $(jd1_s, jd1_e]$. В противном случае, при $jd = jd1_e$, получим индекс следующего интервала, что для последнего интервала приведет к выходу индекса за диапазон.

$$i_s = \text{int}\left(\frac{jd - 0,5 - jd1_s}{d}\right). \quad (5)$$

Где, int – функция отбрасывания дробной части.

3. Вычисляем дату, которой соответствует i_s -ая строка матрицы коэффициентов

$$jd_s = jd1_s \cdot d. \quad (6)$$

4. Вычисляем временной диапазон подинтервала, индекс смещения подинтервала и дату начала подинтервала.

$$\begin{aligned} d_{sub} &= \text{int}\left(\frac{d}{k}\right) \\ i_{sub} &= \text{int}\left(\frac{jd - 0,5 - jd_s}{d_{sub}}\right) \\ t_{sub} &= jd_s + i_{sub} \cdot d_{sub} \end{aligned} \quad (7)$$

5. Вычисляем индекс начала искомых коэффициентов

$$I = i_s \cdot N_{coeff} + i_b - 3 + i_{sub} \cdot D \cdot n \quad (8)$$

Где, D – «размерность траектории», которая для нутации Земли равна двум, для разности земного и динамического времени равна единице, для всех остальных объектов равна трем. Заметим, что мы вычитаем 3, из позиции начала группы коэффициентов i_b . Для экономии памяти мы не храним в каждой строке матрицы коэффициентов даты начала и конца интервала (поправка -2) и учитываем индексацию, начинающуюся с нуля (поправка -1). Индекс I даст позицию первого коэффициента a_0 если матрица C хранится в памяти в виде одномерного массива $a_0 = C[I]$. В случае хранения коэффициентов в виде двумерного массива $a_0 = C[i_s][i_b - 3 + i_{sub}Dn]$.

6. Вычисляем нормализованное время внутри подинтервала

$$\tau = 2 \cdot \frac{(jd - t_{sub})}{d} - 1 \quad (8)$$

7. По формулам (1) – (4) вычисляем искомые эфемеридные данные на дату jd .

4. Программная реализация алгоритма вычисления эфемерид

Представленный выше алгоритм был реализован на языке программирования C++ в виде простой библиотеки «Ephemeris» [20], состоящей из единственного заголовочного файла, доступной для свободного использования. Библиотека была протестирована со всеми доступными на момент написания статьи эфемеридами DE, начиная с DE102 до DE441 и эфемеридами EPM2021. Для её использования необходимо подключить заголовочный файл `eph.h` в программу и скачать необходимые текстовые файлы с эфемеридами [15] или [16]. Для сокращения занимаемого на диске места и сокращения времени загрузки реализована возможность сохранения в двоичный файл. Краткое описание и примеры использования также доступны на сайте библиотеки [20].

Выводы

В работе рассмотрен общий подход к вычислению эфемеридных данных на основе эфемерид, созданных в Институте прикладной астрономии РАН и Лаборатории реактивного движения НАСА. Оба набора эфемерид доступны в текстовом представлении, что позволяет абстрагироваться от вычислительной платформы и конкретных реализаций библиотек, если их использование в собственном программном обеспечении по каким-либо причинам невозможно.

Разработана программа на языке C++, демонстрирующая чтение текстового представления эфемерид, их тестирование и вычисление эфемеридных данных [20].

Список источников

1. Казмерчук П.В. Оптимизация траекторий с гравиманеврами КА, оснащенных солнечным парусом "роторного" типа // Труды МАИ. 2006. № 24. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=34076>
2. Казмерчук П.В. Использование метода последовательной линеаризации для оптимизации траекторий КА с солнечным парусом // Труды МАИ. 2006. № 23. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=34086>
3. Казмерчук П.В., Вернигора Л.В. Метод линеаризации в задачах перелета космических аппаратов с электроракетной двигательной установкой на геостационарную орбиту // Труды МАИ. 2020. № 115. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=119885>. DOI: [10.34759/trd-2020-115-09](https://doi.org/10.34759/trd-2020-115-09)
4. Гречкосеев А.К., Почукаев В.Н. Исследование задачи определения эфемерид системы ГЛОНАСС по межспутниковым измерениям на основе орбитального кристалла // Труды МАИ. 2009. № 34. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=8230>
5. Лёб Х.В., Петухов В.Г., Попов Г.А. Гелиоцентрические траектории космического аппарата с ионными двигателями для исследования Солнца // Труды МАИ. 2011. № 42. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=24275>
6. Питьева Е.В. Современные численные теории движения Солнца, Луны и больших планет // Сообщения ИПА РАН. 2003. № 156. 33 с.
7. Pitjeva E.V. EPM - High-precision planetary ephemerides of IAA RAS for scientific

research and astronavigation on the Earth and in space // Proceedings of the International Astronomical Union, 2012, vol. 10, no. H16, pp. 221-222.

8. Standish E.M., Newhall X.X., Williams J.G., Folkner W.F. JPL Planetary and Lunar Ephemerides DE403/LE403, 1995, JPL IOM 314.10-127.

9. Park et al. The JPL Planetary and Lunar Ephemerides DE440 and DE441 // The Astronomical Journal, 2021, vol. 161(3), pp. 105. DOI:[10.3847/1538-3881/abd414](https://doi.org/10.3847/1538-3881/abd414)

10. Питьева Е.В. EPM2011 - Обновленные планетные эфемериды ИПА РАН и их использование для научных исследований // Астрономический вестник. Исследования Солнечной системы. 2013. Т. 47. № 5. С. 419.

11. Meeus J. Astronomical algorithms, Willmann-Bell, 1998, 488 p.

12. Онлайн служба эфемерид института прикладной астрономии Российской академии наук. URL: // <https://iaaras.ru/dept/ephemeris/online/>

13. JPL Horizons on-line solar system data and ephemeris computation service. URL: <https://ssd.jpl.nasa.gov/horizons/app.html#/>

14. Программы доступа к эфемеридам в форматах семейства SPICE. URL: <https://gitlab.iaaras.ru/iaaras/ephemeris-access>

15. The SPICE Toolkit. URL: <https://naif.jpl.nasa.gov/naif/toolkit.html>

16. Эфемериды EPM (Ephemeris of Planets and Moon) в формате ASCII. URL: <https://ftp.iaaras.ru/pub/epm/EPM2021/DE/>

17. Jet Propulsion Laboratory Development Ephemeris in ASCII format. URL: <https://ssd.jpl.nasa.gov/ftp/eph/planets/ascii/>

18. Васильев Н., Зелевинский А. Многочлены Чебышёва и рекуррентные соотношения // Квант. 1982. № 1. С. 12-19.

19. Montenbruck O., Gill E. *Satellite Orbits: Models, Methods, Applications*, Springer Verlag, Berlin, 2000.

20. Библиотека «Ephemeris». URL: <https://github.com/highwatt/ephemeris>

References

1. Kazmerchuk P.V. *Trudy MAI*, 2006, no. 24. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=34076>

2. Kazmerchuk P.V. *Trudy MAI*, 2006, no. 23. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=34086>

3. Kazmerchuk P.V., Vernigora L.V. *Trudy MAI*, 2020, no. 115. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=119885>. DOI: [10.34759/trd-2020-115-09](https://doi.org/10.34759/trd-2020-115-09)

4. Grechkoseev A.K., Pochukaev V.N. *Trudy MAI*, 2009, no. 34. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=8230>

5. Leb Kh.V., Petukhov V.G., Popov G.A. *Trudy MAI*, 2011, no. 42. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=24275>

6. Pit'eva E.V. *Soobshcheniya IPA RAN*, 2003, no. 156, 33 p.

7. Pitjeva E.V. EPM - High-precision planetary ephemerides of IAA RAS for scientific research and astronavigation on the Earth and in space, *Proceedings of the International Astronomical Union*, 2012, vol. 10, no. H16, pp. 221-222.

8. Standish E.M., Newhall X.X., Williams J.G., Folkner W.F. *JPL Planetary and Lunar Ephemerides DE403/LE403*, 1995, JPL IOM 314.10-127.

9. Park et al. The JPL Planetary and Lunar Ephemerides DE440 and DE441, *The Astronomical Journal*, 2021, vol. 161(3), pp. 105. DOI: [10.3847/1538-3881/abd414](https://doi.org/10.3847/1538-3881/abd414)

10. Pit'eva E.V. *Astronomicheskii vestnik. Issledovaniya Solnechnoi sistemy*, 2013, vol. 47, no. 5, pp. 419.
11. Meeus J. *Astronomical algorithms*, Willmann-Bell, 1998, 488 p.
12. *Onlain sluzhba efemerid instituta prikladnoi astronomii Rossiiskoi akademii nauk*. URL: <https://iaaras.ru/dept/ephemeris/online/>
13. *JPL Horizons on-line solar system data and ephemeris computation service*. URL: <https://ssd.jpl.nasa.gov/horizons/app.html#/>
14. *Programmy dostupa k efemeridam v formatakh semeistva SPICE*. URL: <https://gitlab.iaaras.ru/iaaras/ephemeris-access>
15. *The SPICE Toolkit*. URL: <https://naif.jpl.nasa.gov/naif/toolkit.html>
16. *Efemeridy EPM (Ephemeris of Planets and Moon) v formate ASCII*. URL: <https://ftp.iaaras.ru/pub/epm/EPM2021/DE/>
17. *Jet Propulsion Laboratory Development Ephemeris in ASCII format*. URL: <https://ssd.jpl.nasa.gov/ftp/eph/planets/ascii/>
18. Vasil'ev N., Zelevinskii A. *Kvant*, 1982, no. 1, pp. 12-19.
19. Montenbruck O., Gill E. *Satellite Orbits: Models, Methods, Applications*, Springer Verlag, Berlin, 2000.
20. *Biblioteka «Ephemeris»*. URL: <https://github.com/highwatt/ephemeris>

Статья поступила в редакцию 02.06.2022

Статья после доработки 03.06.2022

Одобрена после рецензирования 12.07.2022

Принята к публикации 25.08.2022

The article was submitted on 02.06.2022; approved after reviewing on 12.07.2022; accepted

for publication on 25.08.2022