

УДК 521

DOI: 10.18384/2310-7251-2022-4-35-44

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО ТЕЛА В НЕОДНОРОДНОМ ГРАВИТАЦИОННОМ ПОЛЕ

**Антонов В. С., Калашников Е. В.**

*Московский государственный областной университет  
141014, Московская область, г. Мытищи, ул. Веры Волошиной, д. 24,  
Российская Федерация*

### **Аннотация**

**Цель.** Моделирование поведения нескольких тел с ньютоновским потенциалом взаимодействия. Выделение в этой системе двух тел с целью изучения их сближения.

**Процедура и методы исследования.** Строится система дифференциальных уравнений второго порядка. Эти уравнения переводятся в систему алгебраических уравнений. В системе нескольких тел выделяются два тела. Исследуется взаимное поведение этих тел путём вариации масс остальных тел системы. Всё исследование строится на языке Python.

**Результаты проведённого исследования.** Найдены траектории движения тел в модели, в неоднородном гравитационном поле, сформированном самими этими телами. Найдены траектории сближения двух выделенных тел. Проведены исследования устойчивости такой траектории.

**Теоретическая и/или практическая значимость.** В системе нескольких тел, взаимодействующих через гравитационные потенциалы между собой, выделена подсистема двух тел. Рассмотрена устойчивость орбиты сближения двух тел в поле действия остальных тел выбранной системы. Практическая значимость выражена в исследовании безопасности Земли.

**Ключевые слова:** ньютоновский потенциал, моделирование системы нескольких тел, сближение двух тел

## SIMULATION OF THE MOTION OF A COSMIC BODY IN AN INHOMOGENEOUS GRAVITATIONAL FIELD

**V. Antonov, E. Kalashnikov**

*Moscow Region State University  
ul. Very Voloshinoi 24, Mytishchi 141014, Moscow Region, Russian Federation*

### **Abstract**

**Aim.** We simulate the behavior of several bodies with Newtonian interaction potential and identify two bodies in this system in order to study their convergence.

**Methodology.** A system of second-order differential equations is constructed. These equations are translated into a system of algebraic equations. In a system of several bodies, two bodies are distinguished. The mutual behavior of these bodies is investigated by varying the masses of the remaining bodies of the system. All research is based on the Python language.

**Results.** The trajectories of motion of bodies in an inhomogeneous gravitational field formed by these bodies themselves are found. The approach trajectories of two selected bodies are obtained. The stability of such a trajectory is studied.

**Research implications.** In a system of several bodies interacting through gravitational potentials, a subsystem of two bodies is singled out. The stability of the orbit of rendezvous of two bodies in the field of action of other bodies of the chosen system is considered. The practical significance is expressed in the study of the security of the Earth.

**Keywords:** Newtonian potential, modeling of a system of several bodies, convergence of two bodies

## Введение

Столкновение малых космических тел (комет, астероидов, метеоров) с планетами играет огромную роль в формировании на ранних стадиях самих этих планет [14; 15]. Особое место в задачах возможного столкновения с малыми космическими объектами занимают задачи безопасного существования планеты Земля [8; 10; 12; 13; 15; 16]. Все эти проблемы относятся к общим задачам небесной механики и являются хорошо разработанной многовековой областью знаний [1; 3–6]. Тем не менее, исследование взаимодействия многих тел и выделение из этой системы многих тел только двух тел, которые могут столкнуться, всегда будет представлять как познавательный, так и практический интерес.

В качестве модели системы многих тел рассматриваем некоторые планеты солнечной системы и само Солнце. В эту систему входит комета. Все эти тела формируют неоднородное гравитационное поле, в котором движутся они сами. Однако, из-за огромной разницы в массах Солнца и его планет (табл. 1), о моделировании влияния неоднородности гравитационного поля на остальные тела солнечной системы можно говорить только после перехода к системе отсчёта, связанной с Солнцем. Таким образом, целью нашей работы является исследование взаимодействия нескольких тел, массы которых равны массам планет солнечной системы, в которую входит комета. И наша задача состоит в том, чтобы из этой системы многих тел с разными массами, формирующими неоднородное гравитационное поле, выделить только два тела: планету Земля и комету, и выяснить, как они будут вести себя при учёте воздействия остальных тел.

## 1. Модель

Планеты солнечной системы обращаются относительно Солнца приблизительно в одной плоскости, называемой плоскостью эклиптики [7; 9; 11]<sup>2</sup>. В качестве тел, формирующих неоднородное поле, рассматриваем Солнце, Землю, Марс, Юпитер, Сатурн (см. табл. 1). Поскольку все эти тела лежат в одной плоскости, то будем рассматривать двумерную задачу. Соответственно, при рассмотрении кометы, входящей в эту плоскость, будем рассматривать только проекции

---

<sup>2</sup> См. также: Солнце и солнечная система // Большая энциклопедия астрономии / Александрова О. В., Аюков С. В., Засов А. В. и др.; сост. Л. А. Феоктистов. М.: Росмэн-Пресс, 2009. С. 80–129..

её движения на эту плоскость. Декартова система отсчёта совмещена с Солнцем (все координаты тел даны в этой системе отсчёта).

Таблица 1 / Table 1

**Параметры  $k$  – ых тел, их начальные положения  $(x_{0k}, y_{0k})$  и начальные скорости  $(V_{0kx}, V_{0ky})$  / Parameters of  $k$ th bodies, as well as their initial positions  $(x_{0k}, y_{0k})$  and initial velocities  $(V_{0kx}, V_{0ky})$ .**

$k$	Тела	$m, kg \times 10^{28}$	$x_{0k}, km \times 10^6$	$y_{0k}, km \times 10^6$	$V_{0kx}, km/s$	$V_{0ky}, km/s$
1	Солнце	200	0	0	0	0
2	Земля	0.0006	-14	133	29	2
3	Марс	0.001	-194	-159	-9	23
4	Юпитер	0.2	13	536	12	-6
5	Сатурн	0.1	31	1230	8	-3
6	Комета	$2.2 \times 10^{-14}$	2100	-1600	-0.02	0.015

Источник: составлено авторами на основе [2; 4; 9; 11].

Вся задача по влиянию неоднородного гравитационного поля на тела (планеты солнечной системы) распадается на две части. В первой части рассматривается движение выбранных планет и кометы в системе отсчёта, связанной с Солнцем. А вторая часть задачи связана с рассмотрением движения кометы относительно Земли в неоднородном гравитационном поле, созданном Солнцем и остальными планетами, используемыми в модели.

### 2 а. Движение тел относительно Солнца

Для решения первой части задачи рассматриваем движение выбранных планет и кометы в системе отсчёта, связанной с Солнцем. Используем второй закон Ньютона и закон Всемирного тяготения. В системе отсчёта связанной с Солнцем для проекции на ось  $x$  для  $i$ -го тела уравнение движения выглядит так:

$$\begin{cases}
 M_i \frac{d^2 x_i}{dt^2} = -\gamma_{i1} \frac{M_i M_1}{(x_i - x_1)^2} - \gamma_{i2} \frac{M_i M_2}{(x_i - x_2)^2} - \dots - \\
 \gamma_{ik} \frac{M_i M_k}{(x_i - x_k)^2} & M_i \frac{d^2 y_i}{dt^2} = -\gamma_{i1} \frac{M_i M_1}{(y_i - y_1)^2} - \\
 \gamma_{i2} \frac{M_i M_2}{(y_i - y_2)^2} - \dots - \gamma_{ik} \frac{M_i M_k}{(y_i - y_k)^2} \\
 \gamma_{ik} = \frac{F_{ik}(x_i - x_k)^2}{M_i M_k} = \frac{F_{ik} r_{ik}^2}{M_i M_k} & M_i \neq M_k
 \end{cases} \quad (1)$$

$\gamma_{ik}$  – гравитационная постоянная взаимодействия  $i$ -го тела с  $k$ -ым телом. Начальные условия для системы уравнений (1) приведены в табл. 1. Для планет начальные условия находили из условий, что они обращаются относительно Солнца по эллипсоидам [2; 4; 6; 9; 11].

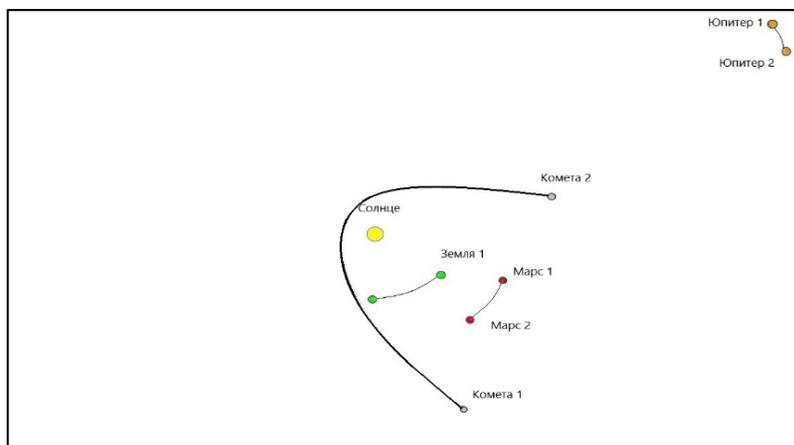
Интегральные кривые, полученные из (1) и начальных условий (табл. 1), образуют в нашем случае систему из 12 уравнений.

$$\begin{cases} x_i = x_{i0} + \int_0^t v_{i0} dt + \int_0^t dt \int_0^t d\tau \sum_k^N \gamma_{ik} M_k (x_i - x_k) (r_{ik}^{-3}) \\ y_i = y_{i0} + \int_0^t v_{i0} dt + \int_0^t dt \int_0^t d\tau \sum_k^N \gamma_{ik} M_k (y_i - y_k) (r_{ik}^{-3}) \end{cases} \quad (2)$$

Эта система уравнений позволяет найти траектории объектов – положение, скорость и ускорение каждого тела в любой момент времени. Чтобы найти эти траектории и их визуализировать, нужно перейти от системы (2) к дискретной форме этой системы:

$$\begin{cases} x_i = x_{0i} + \sum_{i=0}^k \frac{x_i}{t_i} + \sum_{i=0}^k \sum_{i=0}^k \left( \frac{x_i}{t_i} \right) / t_i \\ y_i = y_{0i} + \sum_{i=0}^k \frac{y_i}{t_i} + \sum_{i=0}^k \sum_{i=0}^k \left( \frac{y_i}{t_i} \right) / t_i \end{cases} \quad (3)$$

Минимальный временной интервал равен  $\frac{1}{50}$  s, а число итераций равно  $n = 15000$ . На рис. 1 приведены фрагменты траекторий в произвольный момент времени  $t + 4320$  часов. При этом начальному (выбранному) моменту времени  $t$  соответствуют положения тел с индексом «1». Положение тел через 4320 часа обозначены индексом «2». В качестве тел выбраны планеты солнечной системы, а легчайшее тело соответствует комете Галлея (см. табл. 1).

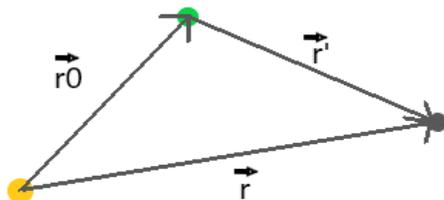


**Рис. 1 / Fig. 1.** Положение тел в момент времени  $t$  и  $t + 4320$  часов. Индексы «1» и «2» соответствуют начальному и конечному положению тел. Фрагменты траектории кометы относительно Солнца соответствуют интервалу времени, равному 4320 часам (180 дням) / Position of the bodies at time  $t$  and  $t + 4320$  hours. Indices 1 and 2 correspond to the initial and final positions of the bodies. Fragments of the comet's trajectory relative to the Sun correspond to a time interval equal to 4320 hours (180 days).

Источник: составлено авторами.

## 2 б. Движение кометы относительно Земли

Как следует из рис. 1 комета очень близко (визуально) проходит около Земли. В таком случае возникает необходимость выяснить близость этих двух тел, т. е. определить скорость данной кометы и её положение относительно Земли. Для этого необходимо перейти к системе отсчёта, связанной с Землёй (рис. 2).



**Рис. 2 / Fig. 2.** Переход от гелиоцентрической системы к геоцентрической системе.

Здесь  $r$  – радиус-вектор кометы относительно Солнца,  $r_0$  – радиус-вектор Земли относительно Солнца и  $r'$  – радиус вектор кометы относительно Земли / Transition from a heliocentric system to a geocentric system. Here  $r$  is the radius vector of the comet relative to the Sun,  $r_0$  is the radius vector of the Earth relative to the Sun, and  $r'$  is the radius vector of the comet relative to the Earth.

Источник: составлено авторами

Поскольку все положения зависят от времени, то мы переходим к интегральной форме для геоцентрической системы координат и получаем:

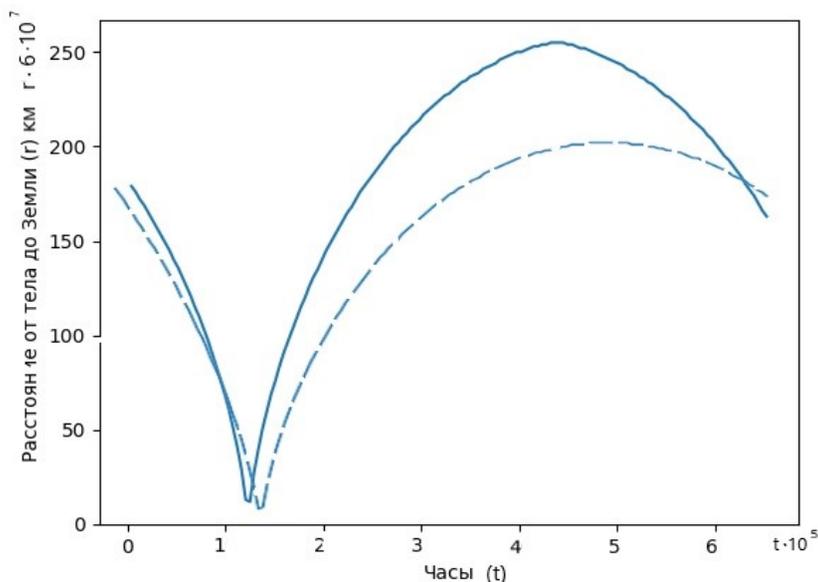
$$x'_i = x'_{i0} + \int_0^t v'_{i0} dt + \int_0^t \int_0^t \left( \left( \frac{d^2 x'_i}{d\tau^2} \right) d\tau \right) dt \quad (4)$$

Здесь  $v_x$  – скорость кометы относительно Солнца,  $v_{x0}$  – скорость Земли относительно Солнца и  $v'_x$  – скорость кометы относительно Земли.

Далее, для построения программы и получения вида траектории сближения кометы с Землёй переведем выражение (4) к дискретной форме в системе отсчёта, связанной с Землёй:

$$\begin{cases} x'_i = x'_{i0} + \sum_{i=0}^k \frac{x'_i}{t_i} + \sum_{i=0}^k \sum_{i=0}^k \left( \frac{x'_i}{\tau_i} \right) / t_i \\ y'_i = y'_{i0} + \sum_{i=0}^k \frac{y'_i}{t_i} + \sum_{i=0}^k \sum_{i=0}^k \left( \frac{y'_i}{\tau_i} \right) / t_i \end{cases} \quad (5)$$

Здесь также минимальный временной интервал равен  $\frac{1}{50} s$ , а число итераций равно  $n = 15000$ . Зависимость расстояния «Земля – комета» от времени приведена на рис. 3.



**Рис. 3 / Fig. 3.** Траектория сближения кометы с Землёй. Сплошная линия соответствует реальным массам из табл. 1. Штриховая линия соответствует изменённым массам (масса Солнца уменьшена в 2 раза, масса Земли увеличена в 200 раз) / Trajectory of the comet's approach to the Earth. The solid curve corresponds to the real masses from Table 1. The dashed curve corresponds to the changed masses (the mass of the Sun is reduced by 2 times, and the mass of the Earth is increased by 200 times).

Источник: составлено авторами

Траектория сближения кометы с Землёй оказывается достаточно устойчивой. Это означает, что влияние вариации масс планет, создающих неоднородное гравитационное поле, действующее на комету, оказывается не очень значительным. Чтобы добиться «видимого» изменения траектории кометы относительно Земли пришлось существенно варьировать массы тел, включённых в саму систему многих тел, заданную в табл. 1. Оказалось, что при уменьшении массы Солнца в 2 раза и увеличении массы Земли в 200 раз возникла возможность увидеть существенное изменение траектории сближения кометы с Землёй. При этом, конечно же, изменяется и общая картина поведения тел, соответствующая рис. 1. Рассматривая движение кометы вблизи Земли, получаем скорость 65,6 км/с. Данная скорость соотносится с экспериментальной [2; 6; 10; 12] с точностью в 7 процентов.

## Приложение

Все вычисления велись на языке Python. Основные части программного кода, позволяющие проводить данные операции, представлены на рис. 4. и рис. 5. В первых пяти строчках (рис. 4) происходит расчёт расстояния от данного тела до планет по формуле эллипса, а в последних двух происходит нахождение ускорения в данный момент времени.

```
r4 = sqrt((x - X7) ** 2 + (y - Y7) ** 2)
r = sqrt((x - X0) ** 2 + (y - Y0) ** 2)
r1 = sqrt((x - a) ** 2 + (y - b) ** 2)
r2 = sqrt((x - X5) ** 2 + (y - Y5) ** 2)
r3 = sqrt((x - X6) ** 2 + (y - Y6) ** 2)
ax = (M0 * (X0 - x) / r ** 3) + (M1 * (a - x) / r1 ** 3) + (M3 * (X5 - x) / r2 ** 3) + (M4 * (X6 - x) / r3 ** 3) + (M5 * (X7 - x) / r4 ** 3)
ay = (M0 * (Y0 - y) / r ** 3) + (M1 * (b - y) / r1 ** 3) + (M3 * (Y5 - y) / r2 ** 3) + (M4 * (Y6 - y) / r3 ** 3) + (M5 * (Y7 - y) / r4 ** 3)
```

**Рис. 4 / Fig. 4.** Фрагмент программы для вычисления расстояния от тела до планеты и расчёт ускорения тела в данный момент времени / Fragment of a program for calculating the distance from a body to a planet and calculating the acceleration of a body at a given time

Источник: составлено авторами

На рис. 5 представлено задание движения планет.

```
draw.circle(planet5, Color(Saturn), (X2, Y2), 5)
if h <= 360*(192*2):
    angle2 = (h * (3.14 / (360*192)) + 80) #
    X6 = 770 * numpy.cos(angle2) + X0
    Y6 = 700 * numpy.sin(angle2) + Y0 - 20
    h += 3
else:
    h = 0
```

**Рис. 5 / Fig. 5.** Фрагмент программы для вычисления движения одной из планет (Сатурн). Здесь  $h$  – масштаб периода,  $\text{numpy.cos/sin}$  – расчёт косинуса и синуса / Fragment of a program for calculating the motion of one of the planets (Saturn). Here  $h$  is the period scale, and  $\text{numpy.cos/sin}$  is the calculation of cosine and sine

Источник: составлено авторами

## Заключение

Моделирование поведения нескольких (шести) тел в неоднородном гравитационном поле, которое эти тела сами формируют, представляет интерес хотя бы из-за существенной разницы масс самих этих тел. В качестве модели системы многих тел, взаимодействующих между собой через ньютоновский потенциал, мы рассматривали лишь некоторые планеты солнечной системы, комету и само Солнце. Все эти тела формируют неоднородное гравитационное поле, в котором

движутся они сами. Однако огромная разница в массах Солнца и его планет (табл. 1) сразу же заставляет перейти к системе отсчёта, связанной с Солнцем. И только после такого перехода открывается возможность анализировать влияние неоднородности гравитационного поля, созданного планетами, на сами эти планеты. Оказалось, что траектории планет и тел, входящих в систему «со стороны» являются достаточно устойчивыми объектами. Эти траектории оказались настолько устойчивыми, что для того, чтобы изменить траекторию кометы потребовалось изменить (уменьшить в два раза) массу Солнца и (увеличить в 200 раз) массу Земли. Такие вариации масс лишней раз доказывают, что определяющим воздействием на все тела в солнечной системе является Солнце с его огромной массой (табл. 1).

*Статья поступила в редакцию 28.10.2022 г.*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Авдюшев В. А. Численное моделирование орбит небесных тел. Томск: Издательский Дом Томского государственного университета, 2015. 335 с.
2. Беляев Н. А., Чурюмов К. И. Комета Галлея и её наблюдение. М.: Наука, 1985. 272 с.
3. Бутиков Е. И. Компьютерное моделирование движений космических тел. СПб.: СПбГУ, 2016. 303 с.
4. Лукьянов Л. Г., Ширмин Г. И. Лекции по небесной механике. Алматы: Эверо, 2009. 227 с.
5. Поляхова Е. Н. Небесная механика в трудах русских ученых: от М. В. Остроградского до А. Н. Крылова; изд. 2-е, испр. и доп. М.: ЛЕНАНД, 2019. 224 с.
6. Поляхова Е. Н., Вьюга А. А., Титов В. Б. Орбитальный космический полет в задачах с подробными решениями и в числах. М.: ЛЕНАНД, 2016. 256 с.
7. Calvert J. B. Celestial Mechanics. University of Denver, 2003 [Электронный ресурс]. URL: <https://web.archive.org/web/20060907120741/http://www.du.edu/~jcalvert/phys/orbits.htm> (дата обращения: 07.09.2022).
8. Chirikov B. V., Vecheslavov V. V. Chaotic dynamics of Halley comet // Astronomy Astrophysics. 1989. Vol. 221. No. 1. P. 146–154.
9. Fitzpatrick R. An Introduction to Celestial Mechanics. Cambridge: Cambridge University Press, 2012. 216 p.
10. Ipatov S. I., Mather J. C. Comet and asteroid hazard to the terrestrial planets // Advances in Space Research. 2004. Vol. 33. Iss. 9. P. 1524–1533. DOI: 10.1016/S0273-1177(03)00451-4.
11. Morbidelli A. Modern Celestial Mechanics. Aspects of Solar System Dynamics; 1st edition. Boca Raton, FL: CRC Press, 2011. 355 p.
12. Post-perihelion observations of comet 1P/Halley / Hainaut O. R., Delsanti A., Meech K. J., West R. M. // Astronomy and Astrophysics. EDP Sciences, 2004. Vol. 417. P. 1159–1164. DOI: 10.1051/0004-6361:20035658.
13. Protecting the Earth against Collisions with Asteroids and Comet Nuclei. Proceedings of the International Conference “Asteroid-Comet Hazard-2009” / eds. Finkelstein A. M., Huebner W. F., Shor V. A. Saint Petersburg: Nauka, 2010. 427 p.
14. Tolstikhin I., Kramers J. The Evolution of Matter. From the Big Bang to the Present Day Earth. Cambridge: Cambridge University Press, 2008. 521 p.

15. Worlds in Interaction: Small Bodies and Planets of the Solar System: Proceedings of the Meeting "Small Bodies in the Solar System and their Interactions with the Planets" (Mariehamn, Finland, August 8-12, 1994) / eds. H. Rickman, M. J. Valtonen. The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1996. 508 p.
16. Zheng J. Q., Valtonen M. J. On the probability that a comet that has escaped from another solar system will collide with the Earth // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 1999. Vol. 304. Iss. 3. P. 579–582. DOI: 10.1046/j.1365-8711.1999.02337.x.

### REFERENCES

1. Avdyushev V. A. *Chislennoe modelirovanie orbit nebesnykh tel* [Numerical modeling of the orbits of celestial bodies]. Tomsk, Tomsk State University Publ., 2015. 335 p.
2. Belyayev N. A., Churyumov K. I. *Kometa Galleya i ee nablyudenie* [Halley's Comet and its observation]. Moscow, Nauka publ., 1985. 272 p.
3. Butikov Ye. I. *Komp'yuternoe modelirovanie dvizhenii kosmicheskikh tel* [Computer simulation of motions of space bodies]. St. Petersburg, St. Petersburg State University Publ., 2016. 303 p.
4. Luk'yanov L. G., Shirmin G. I. *Lektsii po nebesnoi mekhanike* [Lectures on Celestial Mechanics]. Almaty, Evero Publ., 2009. 227 p.
5. Polyakhova Ye. N. *Nebesnaya mekhanika v trudakh russkikh uchenykh: ot M. V. Ostrogradskogo do A. N. Krylova* [Celestial mechanics in the works of Russian scientists: from M. V. Ostrogradsky to A. N. Krylov]. Moscow, LENAND Publ., 2019. 224 p.
6. Polyakhova E. N., V'yuga A. A., Titov V. B. *Orbital'nyi kosmicheskii polet v zadachakh s podrobnymi resheniyami i v chislakh* [Orbital space flight in problems with detailed solutions and in numbers]. Moscow, LENAND Publ., 2016. 256 p.
7. Calvert J. B. *Celestial Mechanics*. University of Denver, 2003. Available at: <https://web.archive.org/web/20060907120741/http://www.du.edu/~jcalvert/phys/orbits.htm> (accessed: 07.09.2022).
8. Chirikov B. V., Vechev V. V. Chaotic dynamics of Halley comet. In: *Astronomy Astrophysics*, 1989, vol. 221, no. 1, pp. 146–154.
9. Fitzpatrick R. *An Introduction to Celestial Mechanics*. Cambridge, Cambridge University Press, 2012. 216 p.
10. Ipatov S. I., Mather J. C. Comet and asteroid hazard to the terrestrial planets. In: *Advances in Space Research*, 2004, vol. 33, iss. 9, pp. 1524–1533. DOI: 10.1016/S0273-1177(03)00451-4.
11. Morbidelli A. *Modern Celestial Mechanics. Aspects of Solar System Dynamics*. Boca Raton, FL, CRC Press, 2011. 355 p.
12. Hainaut O. R., Delsanti A., Meech K. J., West R. M. Post-perihelion observations of comet 1P/Halley. In: *Astronomy and Astrophysics. EDP Sciences*, 2004, vol. 417, pp. 1159–1164. DOI: 10.1051/0004-6361:20035658.
13. Finkelstein A. M., Huebner W. F., Shor V. A., eds. *Protecting the Earth against Collisions with Asteroids and Comet Nuclei. Proceedings of the International Conference "Asteroid-Comet Hazard-2009"*. St. Petersburg, Nauka Publ., 2010. 427 p.
14. Tolstikhin I., Kramers J. *The Evolution of Matter. From the Big Bang to the Present Day Earth*. Cambridge, Cambridge University Press, 2008. 521 p.
15. Rickman H., Valtonen M. J., eds. *Worlds in Interaction: Small Bodies and Planets of the Solar System: Proceedings of the Meeting "Small Bodies in the Solar System and their Interactions with the Planets"* (Mariehamn, Finland, August 8-12, 1994). The Netherlands, Kluwer Academic Publishers, 1996. 508 p.

16. Zheng J. Q., Valtonen M. J. On the probability that a comet that has escaped from another solar system will collide with the Earth. In: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 1999, vol. 304, iss. 3, pp. 579–582. DOI: 10.1046/j.1365-8711.1999.02337.x.
- 

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Антонов Владислав Сергеевич* – студент второго курса физико-математического факультета Московского государственного областного университета;

e-mail: vlad230805566@mail.ru;

*Калашников Евгений Владимирович* – доктор физико-математических наук, профессор кафедры вычислительной математики и информационных технологий Московского государственного областного университета;

e-mail: ekevkalashnikov1@gmail.com

### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Vladislav S. Antonov* – Second-year student, Faculty of Physics and Mathematics, Moscow Region State University;

e-mail: vlad230805566@mail.ru;

*Evgenii V. Kalashnikov* – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Department of Computational Mathematics and Information Technology, Moscow Region State University;

e-mail: ekevkalashnikov1@gmail.com

---

### ПРАВИЛЬНАЯ ССЫЛКА НА СТАТЬЮ

Антонов В. С., Калашников Е. В. Моделирование движения космического тела в неоднородном гравитационном поле // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-математика. 2022. № 4. С. 35–44.

DOI: 10.18384/2310-7251-2022-4-35-44.

### FOR CITATION

Antonov V. S., Kalashnikov E. V. Simulation of the motion of a cosmic body in an inhomogeneous gravitational field. In: *Bulletin of the Moscow Region State University. Series: Physics and Mathematics*, 2022, no. 4, pp. 35–44.

DOI: 10.18384/2310-7251-2022-4-35-44.