

## Моделирование функционирования систем защиты Земли для отведения астероидной опасности

© Е.А. Николаева, О.Л. Старинова

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва, г. Самара, 43086, Россия

*Выявлены параметры астероидов, сближающихся с Землей. Рассмотрены два метода изменения траектории потенциально опасного астероида: с помощью гравитационного тягача и с использованием двигательной установки, размещенной непосредственно на астероиде и использующей в качестве рабочего тела вещество астероида. Математические модели разработаны с учетом гравитационного возмущения от всех тел, а также реального положения небесных тел в системе. Для моделирования и визуализации траекторий движения астероидов и гравитационного тягача разработаны математические модели, программы управления и программное обеспечение. Полученные результаты моделирования подтверждают возможность отклонения астероида с опасной траектории при использовании современных космических аппаратов. Такие космические аппараты, проектируемые ПАО «РКК «Энергия», предназначены для осуществления транспортных операций в рамках Лунной программы.*

**Ключевые слова:** астероидная опасность, моделирование, математическая модель, программный комплекс, методы преодоления астероидной опасности, траектория движения

**Введение.** Проблема астероидной опасности для Земли достаточно давно привлекает внимание ученых и общества. Исследование следов катастроф космического происхождения на поверхности Земли и небесных тел, наблюдение астероидов в ближайшем околоземном пространстве показывают серьезность астероидной опасности для земной цивилизации и необходимость разработки мер для ее предотвращения [1].

Исследования, посвященные вопросам астероидной опасности, охватывают несколько направлений. Прежде всего — обнаружение и определение орбит опасных астероидов, сближающихся с Землей (АСЗ). В настоящее время имеется несколько национальных программ оптического наблюдения таких тел (NASA, LINEAR, ESA). Полагают, что с помощью этих программ выявлена большая часть указанных тел размерами порядка километра и более. Целый ряд исследований и проектов рассматривают меры противодействия небесным пришельцам — изменения их орбит или разрушения на мелкие осколки, сгорающие в атмосфере [2, 3].

Актуальность преодоления астероидной опасности в настоящее время не вызывает сомнений и разработка мер по ее предотвращению должна стать одной из важнейших задач, которые необходимо решать человечеству в XXI столетии [4].

В последние годы проблема астероидной опасности (безопасности) неоднократно обсуждалась на многих конференциях и описана во многих изданиях [2, 5, 6]. В частности, проблема пролета астероида 99942 Апофис на угрожающее расстояние от Земли в 2029 г., широко обсуждался в работах [2, 5].

Проведено уже множество исследований по изучению астероидов и траекторий их движения. Так, в 1975 г. Кларк Р. Чапмен, Дэвид Моррисон (David Morrison) и Бен Целлнер (Ben Zellner) разработали систему классификации астероидов, опирающуюся на показатели цвета, альbedo и характеристики спектра отраженного солнечного света [7].

Все существующие в настоящее время астероиды ученые подразделили на четыре основные категории, каждая из них названа в честь наиболее известных представителей: (1221) Амуры, (1862) Аполлоны, (163693) Атиры и (2062) Атоны [8]. Категории обозначены порядковым номером астероида, по имени которого названа группа. Номер любого астероида можно найти в соответствующем каталоге (например, в поисковой базе данных NASA: JPL Small-Body Database Browser).

Одной из наиболее важных была разработка качественной шкалы для оценки опасности столкновения с Землей астероидов и комет. Автор туринской шкалы — американский астроном Р. Бинзел (R. Binzel). Туринская шкала состоит из десяти пунктов. В соответствии с ними астероиды и другие небесные тела классифицируют (с учетом их размера и относительной скорости) по степени опасности для Земли [9].

В разные столетия было предложено множество вариантов преодоления астероидной опасности, например, отклонение астероидов с опасной орбиты с помощью кинетического перехватчика, зеркальной системы, перекрашивание астероида в белый цвет, применение ядерного оружия, солнечного паруса, углеродистых сетей и тяжелого космического аппарата [10].

Целью данной работы является изучение двух методов изменения траектории потенциально опасного астероида: 1) с помощью гравитационного тягача — размещение рядом с астероидом управляемого космического аппарата (тягача), который за счет гравитационного притяжения изменяет орбиту астероида; 2) использование двигательной установки с солнечными источниками энергии, размещаемой непосредственно на астероиде, в которой вещество астероида служит в качестве рабочего тела. При этом изменяется масса астероида, на него действует сила тяги, и астероид отклоняется от опасной орбиты.

Указанные методы позволяют осуществить управляемое отклонение астероида с опасной траектории без применения сложных и ненадежных методов захвата вращающегося астероида.

К основным задачам противодействия астероидной опасности относятся:

- заблаговременное обнаружение и мониторинг движения потенциально опасных небесных тел;
- определение характеристик таких тел и оперативные оценки рисков;
- меры активного воздействия на угрожающее небесное тело либо разработка и реализация других мероприятий по уменьшению опасности для населения [1].

**Моделирование функционирования систем противодействия астероидной опасности.** Рассмотрим подробно две такие системы.

*Математическая модель функционирования системы противодействия астероидной опасности с помощью гравитационного тягача.* Для моделирования процессов отражения астероидной опасности были разработаны математические модели, которые включают в себя уравнения движения астероида с изменяемой массой и реактивной тягой:

$$\frac{d^2\bar{r}_1}{dt^2} = -G \frac{m_2}{\bar{r}_1^3} \bar{r}_1 - \frac{P\bar{V}}{m_1|\bar{V}|}; \quad (1)$$

$$\frac{dm_1}{dt} = -\alpha. \quad (2)$$

где  $\bar{r}_1$  — расстояние между астероидом и Солнцем;  $m_2$  — масса Солнца;  $P$  — тяга двигателя;  $\bar{V}$  — скорость астероида;  $m_1$  — масса астероида;  $\alpha = \dot{m}$  — секундный расход рабочего тела.

*Математическая модель функционирования системы противодействия астероидной опасности с размещением двигательной установки на астероиде.* Математическая модель для полета с гравитационным тягачом выглядит следующим образом:

астероид 
$$\frac{d^2\bar{r}_1}{dt^2} = -\frac{Gm_2}{(r_1)^3} \bar{r}_1 - \frac{Gm_3}{(r_{1-3})^3} (\bar{r}_1 - \bar{r}_3); \quad (3)$$

гравитационный тягач 
$$\frac{d^2\bar{r}_3}{dt^2} = -\frac{Gm_2}{(r_3)^3} \bar{r}_3 - \frac{Gm_3}{(r_{1-3})^3} (\bar{r}_3 - \bar{r}_1) - \bar{a}; \quad (4)$$

$$\frac{dm_1}{dt} = 0; \quad (5)$$

$$\frac{dm_3}{dt} = -\alpha, \quad (6)$$

где

$$r_1 = \sqrt{x_1^2 + y_1^2 + z_1^2}; \quad (7)$$

$$r_3 = \sqrt{x_3^2 + y_3^2 + z_3^2}; \quad (8)$$

$$r_{1-3} = \sqrt{(x_3 - x_1)^2 + (y_3 - y_1)^2 + (z_3 - z_1)^2}. \quad (9)$$

Здесь  $m_3$  — масса тяжелого космического аппарата;  $r_1$  — расстояние между астероидом и Солнцем;  $r_3$  — расстояние между тяжелым космическим аппаратом и Солнцем;  $r_{1-3}$  — расстояние между тяжелым космическим аппаратом и астероидом;  $\bar{a}$  — ускорение от тяги КА.

**Результаты моделирования.** Будем считать, что тяжелый космический аппарат располагается на расстоянии 50 км от астероида. Моделирование движения тел осуществляем численно, методом Рунге — Кутты четвертого порядка. Программный комплекс позволяет визуализировать траектории движения всех тел, входящих в систему. При моделировании изменения орбиты задаем следующие параметры тяжелого космического аппарата (тягача):

$$m = 20\,000 \text{ кг}, \quad \alpha = 0,2 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с}, \quad P = 10 \text{ Н}.$$

При моделировании изменения орбиты астероида с помощью размещения на нем реактивных двигателей задаем тягу  $P = 1 \cdot 10^5 \text{ кг} \cdot \text{м/с}^2$  и массу  $\dot{m} = 1 \cdot 10^4 \text{ кг/с}$ , тогда скорость истечения рабочего тела составляет  $c = 10 \text{ м/с}$ .

Мощность энергоустановки рассчитываем по формуле

$$N = c \cdot P / 2, \quad (10)$$

тогда  $N = 1 \cdot 10^5 \cdot 10 / 2 = 5000 \text{ кВт}$ .

Мощность энергосъема с  $1 \text{ м}^2$  поверхности Земли составляет  $1366 \text{ Вт/м}^2$ . При КПД = 40 % площадь поверхности солнечной батареи

$$S_{\text{СБ}} = \frac{5000}{1366 \cdot 0,4} \approx 9000 \text{ м}^2. \quad (11)$$

Для расчетов был выбран астероид Минос, его начальная орбита представлена на рис. 1.

Орбита Миноса под влиянием тяги реактивного двигателя, направленной вдоль его скорости, показана на рис. 2, на котором видно, что астероид отклоняется с опасной траектории.

Орбита Миноса под влиянием тяги реактивного двигателя, направленной против скорости астероида, изображена на рис. 3: данный астероид отклоняется с опасной траектории, но продолжает пересекать орбиту Земли.

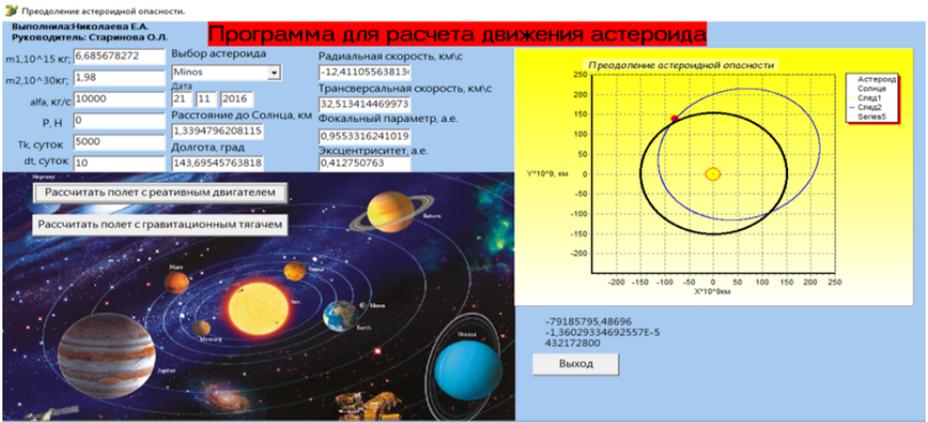


Рис. 1. Начальная орбита астероида



Рис. 2. Орбита астероида под влиянием тяги реактивного двигателя, направленной вдоль его скорости

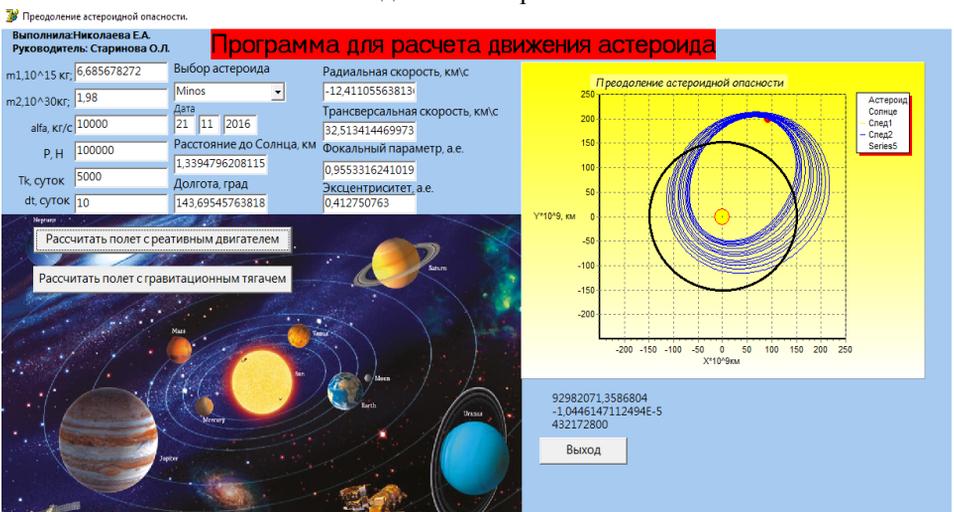


Рис. 3. Орбита астероида под влиянием тяги реактивного двигателя, направленной против скорости астероида

На рис. 4 представлено движение астероида под действием тягача. Используя данный метод, за короткий срок можно отвести астероиды небольшой массы с опасной траектории.

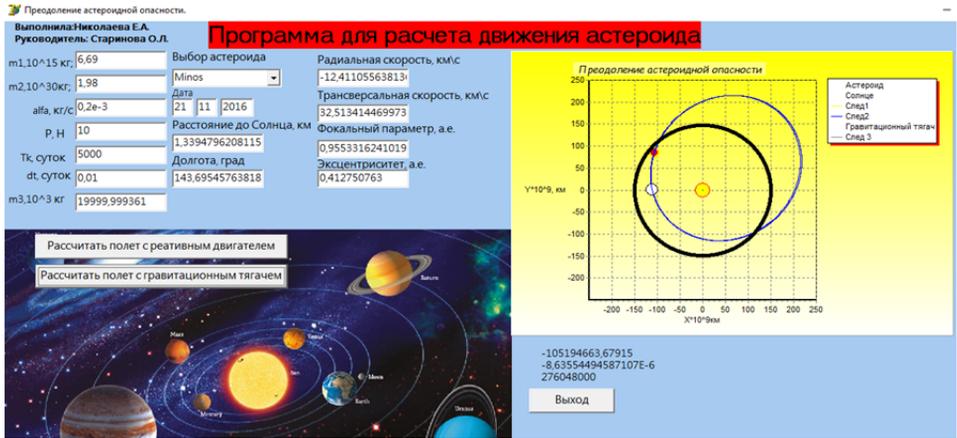


Рис. 4. Орбита астероида под действием гравитационного тягача

На рис. 5 показано движение астероида под действием тяжелого космического аппарата без управления. Согласно приведенным на рис. 5 данным, следует, что тяжелый космический аппарат без управления не сможет долгое время двигаться по орбите астероида и отвести астероидную опасность.

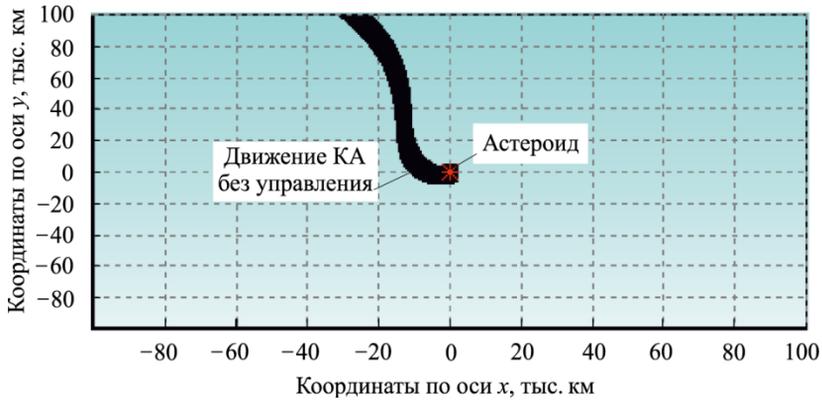
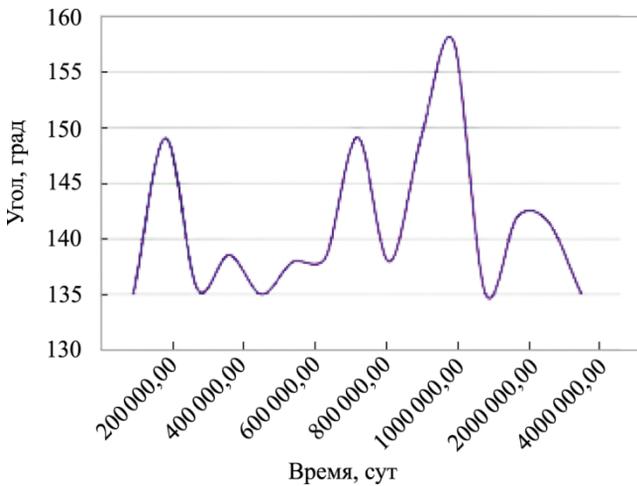


Рис. 5. Орбита астероида под действием гравитационного тягача без управления

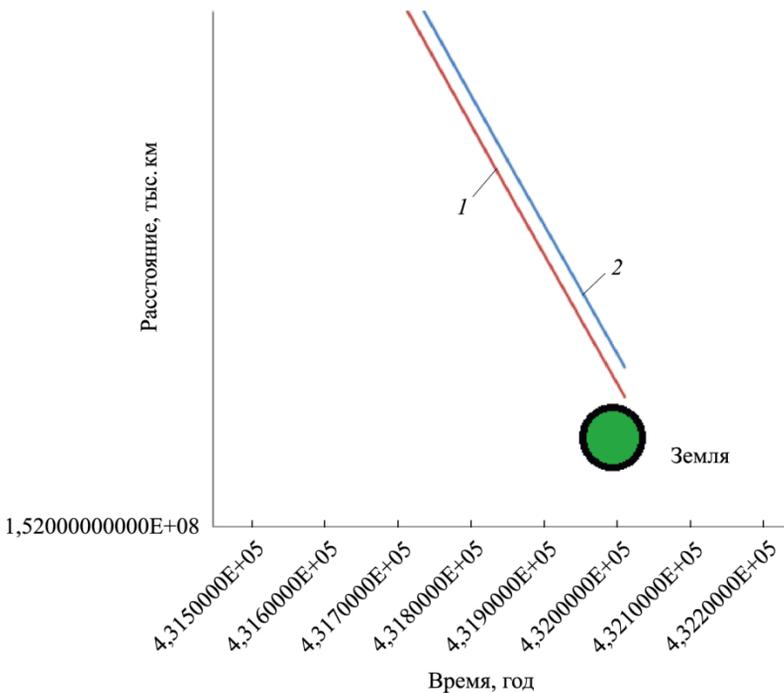
Используя результаты, полученные с помощью программного комплекса, находим параметры управления, позволяющие обеспечивать постоянное положение КА относительно астероида. График зависимости параметров управления — угла между радиус-вектором КА—астероид и направлением вектора тяги — от времени представлен на рис. 6.



**Рис. 6.** Зависимость угла между радиус-вектором КА—астероид и направлением вектора тяги от времени

Полученная величина управления по времени позволяет поддерживать необходимое постоянное положение КА относительно астероида.

На рис. 7 смоделировано отведение астероидной опасности при использовании КА с управлением.



**Рис. 7.** Отклонение опасной орбиты астероида:  
 1 — расстояние от астероида до Солнца с массой КА 20 000 т; 2 — расстояние от астероида до Солнца с массой КА 0,001 т

**Заключение.** В данной работе были выявлены параметры потенциально опасных астероидов, разработаны математические модели и программное обеспечение. С помощью программного комплекса смоделировано движение всех тел и проанализирована траектория астероида на заданную дату.

Анализируя проделанную работу, можно сделать выводы о том, что для преодоления астероидной опасности методом установленных реактивных двигателей на поверхность астероида, потребуется создание двигателей с заданными параметрами и способа превращения вещества астероида в реактивное топливо. Для применения этого метода требуются тщательная его проработка, время на подготовку и существенные материальные затраты. По результатам вычислений с использованием заданных параметров реактивных двигателей получаем, что увести астероид с опасной орбиты удастся за 10 лет.

При расчетах с заданными характеристиками тягача получаем, что увести астероид с опасной орбиты можно менее чем за 5 лет. Анализируя результаты моделирования, можно сделать вывод о том, что космический аппарат с такими расчетными характеристиками возможно использовать в качестве противодействия астероидной опасности. Кроме того, такие проектно-баллистические характеристики имеют КА с электроракетными двигательными установками, проектирующимися ПАО «РКК «Энергия», которые предназначены для реализации транспортных операций для Лунной программы. Это позволит использовать такой буксир и для отклонения от Земли потенциально опасного астероида.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Энеев Т.М., Ахметшин Р.З., Ефимов Г.Б. К вопросу об астероидной опасности. *Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша*, 2011, № 35, 40 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2011-35>
- [2] Финкельштейн А., Хьюбнер У., Шор В., ред. *Защита Земли от столкновений с астероидами и кометными ядрами. Труды Международной конференции «Астероидно-кометная опасность–2009»*. Санкт-Петербург, Наука, 2010, 427 с. ISBN в 978-5-02-025514-2.
- [3] Yeomans D.K., Chesley S.R., Chodas P.W. NASA's Near-Earth Object Program Office. В кн.: *Защита Земли от столкновений с астероидами и кометными ядрами. Труды Международной конференции «Астероидно-кометная опасность–2009»*. Санкт-Петербург, Наука, 2010, с. 244–254.
- [4] Зайцев А.В. Некоторые принципы построения системы предотвращения столкновений Земли с астероидами и кометами. *Труды XXIII Чтений К.Э. Циолковского (Калуга, 13–16 сентября 1988 г.). Секция «Проблемы ракетной и космической техники»*. Москва, ИИЕТ АН СССР, 1989, с. 141–147.
- [5] Сокольский А.Г., ред. *Астероидно-кометная опасность*. Санкт-Петербург, ИТА, 1996, 244 с.
- [6] Боярчук А.А., ред. *Угроза с неба: рок или случайность?* Москва, Коминформ, 1999, 218 с.

- [7] Андрущенко В.А., Шевелев Ю.Д. Обстрел Земли из космоса — хроники столетия. *Компьютерные исследования и моделирование*, 2013, т. 5, № 6, с. 907–916.
- [8] Шустов Б.М., Рыхлова Л.В. Астероидно-кометная опасность: новые подходы. *Вестник Российской академии наук*, 2009, т. 79, № 7, с. 379–586.
- [9] Карпенко Ю.А. Астероиды. *Названия звездного неба*. А.В. Суперанская, ред. Москва, Наука, 1981, 184 с.
- [10] Алексеев А.С., Ведерников Ю.А., Лаврентьев М.М. Обзор проектов систем противодействия столкновениям астероидов с Землей. *Большая Медведица*, 2002, № 1, с. 144–157.

Статья поступила в редакцию 22.03.2017

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Николаева Е.А., Старинова О.Л. Моделирование функционирования систем защиты Земли для отведения астероидной опасности. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2017, вып. 7. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-7-1652>

*Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XLI Академических чтениях по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 24–27 января 2017 г.*

**Николаева Елизавета Андреевна** — инженер кафедры космического машиностроения, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва. Область научных интересов: управление космическим аппаратом, преодоление астероидной опасности, исследование космического пространства, инновационные технологии. e-mail: [nikolevalizaveta@mail.ru](mailto:nikolevalizaveta@mail.ru)

**Старинова Ольга Леонардовна** — д-р техн. наук, профессор кафедры космического машиностроения, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва. Область научных интересов: полеты с малой тягой, относительное движение космического аппарата, управление космическим аппаратом, исследование космического пространства, инновационные технологии, преодоление астероидной опасности. e-mail: [solleo@mail.ru](mailto:solleo@mail.ru)

## Modelling the Earth protection systems for hazardous asteroids deflection

© Е.А. Николаева, О.Л. Старинова

Samara National Research University, Samara, 43086, Russia

*This study examines the characteristics of near-Earth asteroids. We consider two methods of changing the trajectory of a potentially hazardous asteroid: the first is with the help of the gravity tractor, and the second is by means of the propulsion device which is placed directly on the asteroid and uses local material as the propellant. Mathematical models have been developed by taking into account the gravitational perturbation from all bodies as well as the real positions of celestial bodies in the system. In this research we have generated mathematical models, control programs and software for the modelling and visualization of the asteroid's and gravity tractor's motion trajectories. The modelling results obtained prove the feasibility of the asteroid's deflection from the hazardous trajectory using modern space vehicles. Such space vehicles are designed by PAO RSC Energia and intended for the Lunar Program transportation missions.*

**Keywords:** hazardous asteroid, modelling, mathematical model, software package, methods of coping with asteroidal hazard, motion trajectory

### REFERENCES

- [1] Eneev T.M. *Preprinty IPM im. M.V. Keldysha — Keldysh Institute Preprints*, 2011, no. 35, 40 p. Available at: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2011-35>
- [2] 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"*. Saint Petersburg, Nauka Publ., 2010, 427 p. ISBN 978-5-02-025514-2
- [3] Yeomans D.K., Chesley S.R., Chodas P.W. NASA's Near-Earth Object Program Office. In: *Protecting the Earth against Collisions with Asteroids and Comet Nuclei. Proceedings of the International Conference "Asteroid-Comet Hazard-2009"*. Saint Petersburg, Nauka Publ., 2010, pp. 244–254.
- [4] Zaytsev A.V. Nekotorye printsipy postroeniya sistemy predotvrashcheniya stolknoveniy Zemli s asteroidami i kometami [Some principles of forming the system of preventing the Earth from the collision with asteroids and comets]. *Trudy XXIII Chteniy K.E. Tsiolkovskogo (Kaluga, 13–16 sentiabria 1988 g.). Sektsiya «Problemy raketnoy i kosmicheskoy tekhniki»* [Proceedings of XXIII Readings from K.E. Tsiolkovsky (Kaluga, September 13–16, 1988). Problems of rocket and space vehicles section]. Moscow, IET AN SSSR Publ., 1989, pp. 141–147.
- [5] Sokolsky A.G. *Asteroidno-kometnaya opasnost* [Asteroid-comet hazard]. Saint Petersburg, ITA, 1996, 244 p.
- [6] Boyarchuk A.A., ed. *Ugroza s neba: rok ili sluchainost?* [The Threat from the Sky: Fate or Coincidence?]. Moscow, Cominform Publ., 1999, 218 p.
- [7] Andrushchenko V.A., Shevelev Yu.D. *Kompyuternye issledovaniya i modelirovaniye — Computer Research and Modeling*, 2013, vol. 5, no. 6, pp. 907–916.
- [8] Shustov B.M., Rykhlola L.V. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk — Herald of the Russian Academy of Sciences*, 2009, vol. 79, no. 7, pp. 379–586.

- [9] Karpenko Yu.A. Asteroidy. In: *Nazvaniya zvezdnogo neba* [Asteroids. In: Names of the sky of stars.]. Superanskaya A.V., ed. Moscow, Nauka Publ., 1981, 184 p.
- [10] Alekseev A.S., Vedernikov Yu.A., Lavrentev M.M. *Bolshaya Medveditsa — the journal for the problems of Earth protection “Bol’shaya Medveditsa”*, 2002, no. 1, pp. 144–157.

**Nikolaeva E.A.**, engineer of the Space Rocket Engineering Department, Samara National Research University. Research interests include handling space vehicles, coping with asteroidal hazard, space exploration, innovative technologies.  
e-mail: nikolevalizaveta@mail.ru

**Starinova O.L.**, Dr. Sc. (Eng.), Professor of Space Rocket Engineering Department, Samara National Research University. Research interests include low-thrust missions, apparent motion of space vehicle, handling space vehicles, space exploration, innovative technologies, coping with asteroidal hazard. e-mail: solleo@mail.ru