

Сближения с Землей опасных астероидов

© Л.Л. Соколов, Н.А. Петров, Б.Б. Эскин, Г.А. Кутеева

Санкт-Петербургский государственный университет,
Санкт-Петербург, 198504, Россия

Рассмотрены сближения с Землей астероидов, для которых возможны соударения с нашей планетой в XXI в. Тесных сближений на траекториях, ведущих к соударениям, нередко можно обнаружить больше, чем на номинальных траекториях. Тесные сближения позволяют использовать эффект гравитационного маневра для увода астероида от соударений с Землей. В результате увод можно осуществить на несколько десятичных порядков меньшим воздействием на астероид. Такое воздействие может быть реализовано с использованием современной космической техники. Сближения астероидов с Землей также способствуют обнаружению этих астероидов, уточнению их орбит из наблюдений и прогнозированию характеристик их возможных соударений с Землей в будущем. Рассмотрены сближения на траекториях, ведущих к соударениям с Землей для опасных астероидов 2008 EX₅, 2015 RN₃₅, Apophis.

Ключевые слова: астероидная опасность, траектории, соударения, сближения с Землей

Введение. Актуальность проблемы обеспечения астероидно-кометной безопасности не вызывает сомнений. Современные наблюдательные средства позволяют точнее оценить опасность, а развитие космической техники — ставить и решать вопрос о ее предотвращении. Такие события, как падение метеорита под Челябинском в 2013 г., позволяют понять важность проблемы не только специалистам, но и всем жителям планеты Земля.

Обеспечение астероидно-кометной безопасности — сложная междисциплинарная проблема. Она включает в себя, в частности, наблюдение за малыми небесными телами, определение и уточнение их орбит, выделение опасных тел, прогнозирование характеристик возможных соударений с Землей. Кроме астрономической части следует выделить мероприятия, направленные на минимизацию ущерба в случае, когда соударение астероида с Землей неминуемо; в России этим занимается МЧС. Наконец, мероприятия по предотвращению соударений — наиболее сложные, затратные и наименее разработанные — включают в себя воздействие на астероид для изменения его орбиты (или для разрушения астероида).

Проблеме астероидной опасности посвящено огромное число научных статей и монографий, а также регулярно проводятся конфе-

ренции, полностью или частично посвященные этой теме. Среди недавно изданных в России укажем, например, [1–4].

В настоящей работе рассмотрены некоторые особенности движения опасных астероидов, важные для понимания эволюции их траекторий и возможностей предотвращения соударений с Землей. Основная цель работы — исследование характеристик сближений с Землей, предшествующих возможным соударениям с ней, для ряда опасных астероидов.

Опасные астероиды и способы предотвращения соударений.

Сведения об опасных астероидах можно найти, в частности, на регулярно обновляемом сайте sneos.jpl.nasa.gov/sentry/ (далее сайт НАСА), а также на сайте newton.dm.unipi.it/neodys2/ (далее сайт NEODyS).

Приведем данные о нескольких крупных опасных астероидах, угрожающих Земле уже в ближайшие годы (к счастью, с очень малой вероятностью), взятые 27 октября 2018 г. с сайта НАСА (таблица).

Крупные опасные астероиды, угрожающие Земле в ближайшие годы

Название астероида	Оценка диаметра, км	Дата ближайшего соударения	Оценка вероятности соударения	Интервал наблюдений, сут	Точность периода обращения вокруг Солнца, сут
2010 KV21	1,20	09.06.2021	$4,4 \cdot 10^{-9}$	5	1374
2010 GD37	1,260	28.12.2019	$7,0 \cdot 10^{-10}$	4	1005
2007 FT3	0,370	03.10.2019	$9,2 \cdot 10^{-8}$	1	10
2001 CA21	0,673	08.10.2020	$3,2 \cdot 10^{-9}$	2	241
2016 WN55	0,451	13.09.2020	$8,9 \cdot 10^{-9}$	2	27
2015 ME131	0,499	19.08.2019	$1,4 \cdot 10^{-9}$	2	66
2001 VB	0,730	23.07.2023	$2,4 \cdot 10^{-9}$	7	124
2017 RZ17	0,371	23.11.2019	$3,4 \cdot 10^{-9}$	1	1502

Иногда вероятность соударения с Землей вновь открытых астероидов оказывается заметно больше указанных в таблице значений. Например, астероид 2017 YZ1 диаметром 260...280 м был открыт 20 декабря 2017 г., а 6 января 2018 г. имел вероятность соударения с Землей в 2047 г., равную $2 \cdot 10^{-4}$, единицу по Туринской шкале. Так было до 13 января 2018 г., когда вероятность соударения в 2047 г. стала равной $1,1 \cdot 10^{-7}$. Астероид 2017 XO2 диаметром 110 м был открыт 10 декабря 2017 г., 21 января 2018 г. имел вероятность соударения с Землей в 2057 г., равную $3,3 \cdot 10^{-4}$, единицу по Туринской шкале. Скоро выяснилось однако, что и он практически «летит мимо».

Отметим, что соударение с Землей астероида диаметром менее 100 м может вызвать локальную катастрофу («Тунгусский метеорит» диаметром 60 м, Челябинский метеорит диаметром 17 м). Региональ-

ная катастрофа соответствует соударению с астероидом диаметром до километра. В случае соударения с астероидом диаметром более километра Земле грозит глобальная катастрофа. Считается, что подавляющее большинство километровых угрожающих объектов уже известно, но, как нетрудно убедиться, не все. Вообще, многие опасные астероиды потеряны, их орбиты и характеристики возможных соударений известны с очень низкой точностью и более не уточняются. Интенсификация наблюдений опасных объектов — одна из ключевых задач для обеспечения астероидно-кометной безопасности.

Различные способы предотвращения соударений астероидов с Землей активно обсуждаются в научной литературе [1, 3–5]. Это изменение орбиты или разрушение угрожающего объекта. Если не рассматривать воздействие атомным (термоядерным) взрывом, самый простой способ — кинетический, т. е. удар по астероиду для изменения его скорости и тем самым увода от соударения с Землей. В настоящее время разрабатывается проект ESA-NASA экспериментального удара по малой компоненте двойного астероида Дидим болванкой массой 300 кг. Наблюдения за большой компонентой двойного астероида позволят точнее определить результат воздействия.

Представляется очевидным, что для небольших (диаметром менее 50 м) астероидов предотвращать соударения, вообще говоря, не обязательно, достаточно мероприятий МЧС. Для астероидов размером в несколько сотен метров при использовании кинетического метода возникает принципиальная трудность, связанная с возможностями современной космической техники — ограниченная масса ударника. В результате энергетическое воздействие на астероид оказывается недостаточным для увода его от соударения. Использование атомной (термоядерной) энергии эту проблему в принципе решает [3], но тогда возникают очевидные трудности другого рода.

Перспективной представляется идея применения эффекта гравитационного маневра — даровой гравитационной энергии планет Солнечной системы, прежде всего Земли. Эта идея рассматривалась, например, в работе [6], в которой предлагалось в качестве ударника использовать другой астероид, предварительно направив его к цели посредством гравитационного маневра у Земли. Ясно, что для воплощения такой идеи нужно будет решить еще ряд непростых задач.

В работе [7] для оценки приращения скорости астероида, необходимой для увода от соударения, проводится численное моделирование движения множества виртуальных астероидов. Отмечается, что в случаях, когда траектории содержат сближения с Землей, необходимая скорость существенно (на один-два десятичных порядка) меньше. Во многих работах, например в [8], отмечалось, что эффективнее уводить астероид Апофис от соударений, изменяя его скорость до тесного сближения с Землей в 2029 г.

В общем случае важно выяснить, существуют ли на траектории соударения астероида с Землей предшествующие этому соударению сближения и насколько эффективным будет «гравитационный маневр».

Выявление возможных соударений астероидов с Землей. Нахождение траекторий соударения с Землей с начальными данными из окрестности номинальной орбиты — стандартная (хотя и непростая) задача небесной механики. Результаты ее частичного решения приводятся на сайтах НАСА и NEODyS. На кафедре небесной механики СПбГУ также разработаны методы, алгоритмы и программы для решения этой задачи. Полученные результаты приведены в работах [9–13] и др. Методы сводятся к варьированию начальных данных в допустимой области с использованием интегратора Эверхарта [14], моделей Солнечной системы DE405 [15], DE430 [16] и др. При сравнении полученных нами результатов с результатами НАСА [17–20] оказалось, что мы находим существенно больше возможных соударений, однако все основные соударения на сайте НАСА представлены и их характеристики хорошо совпадают с тем, что получено в работах [9–13]. Следует отметить, что большое число найденных возможных соударений позволяет «увидеть» структуру фрактального типа для соответствующих начальных данных; очевидно, она связана с резонансными возвратами. Весьма важна также устойчивость основных характеристик траекторий соударения относительно малых изменений модели движения [10].

Сближения на траекториях соударения. Сближения с Землей опасных астероидов представляют особый интерес, поскольку способствуют обнаружению ранее неизвестных и потерянных опасных объектов, а также уточнению орбит. Тесные сближения позволяют использовать эффект гравитационного маневра для увода астероида от соударений с Землей. Сближения могут генерировать резонансные возвраты и возможные соударения с Землей в сравнительно недалеком будущем. Наконец, характеристики сближений (минимальные геоцентрические расстояния) являются «маркерами» будущих соударений.

Из-за невысокой точности орбит некоторых опасных астероидов сближения на траекториях возможных соударений могут заметно отличаться от сближений на номинальной орбите. Оказывается, что на траекториях, ведущих к соударению, тесных сближений больше. Например, для астероида 2008 EX5 из полученных на кафедре небесной механики СПбГУ 56 возможных соударений в текущем столетии 9 имеют сближение на расстояние менее 0,1 млн км, 21 — на 0,1...0,5 млн км, 11 — на 0,5...1,0 млн км и 15 — на 1,0...3,0 млн км. При этом номинальная орбита не содержит сближений с Землей теснее чем на 3 млн км.

Отметим, что при сближении на расстояние менее 0,5 млн км эффект гравитационного маневра позволяет выиграть примерно два десятичных порядка в изменении минимального геоцентрического расстояния, а при сближении на расстояние менее 0,1 млн км — три десятичных порядка.

Номинальная траектория астероида 2015 RN35 содержит сближение с Землей на 0,7 млн км в 2022 г., на 3 млн км в 2056 г. и 5 млн км в 2065 г., остальные сближения — на расстояние более 10 млн км. «Виртуальная» траектория соударения с Землей этого астероида в 2065 г. содержит сближения на 0,6 млн км в 2022 г., на 4 млн км в 2047 г. и на 0,79 млн км в 2056 г.

Траектории возможных соударений с Землей астероида Апофис и траектории его сближений с Землей исследованы весьма подробно. Большинство их связано с резонансными возвратами. Уникальной особенностью этого астероида является точно установленное тесное сближение с Землей 13 апреля 2029 г. на расстояние 38 тыс. км. Это сближение вызывает значительное рассеяние возможных траекторий, среди них имеются траектории, содержащие сближение в 2051 г. Соответствующие резонансные возвраты содержат множество (около сотни) возможных на сегодня соударений Апофиса с Землей, наиболее опасное — в 2068 г.

До уточнения орбиты Апофиса из наблюдений при его сближении с Землей в 2012–2013 гг. были возможны его соударение с Землей в 2036 г. и множество последующих соударений, связанных с резонансными возвратами. Из 67 таких «виртуальных» в настоящее время траекторий с соударениями только 3 имеют минимальные геоцентрические расстояния в 2036 г. более 2 млн км, 10 — 0,5...1,0 млн км, 5 — 0,2...0,5 млн км, 17 — 0,1...0,2 млн км, 2 — 0,08...0,10 млн км, 30 — 0,01...0,04 млн км.

Номинальная на сегодня орбита Апофиса кроме тесного сближения в 2029 г. содержит сближения в 2051, 2058, 2079 и 2086 гг. на расстояния от 1 до 10 млн км; остальные сближения в текущем столетии происходят на расстояние более 10 млн км.

Траектория, ведущая к соударению в 2068 г., содержит сближение с Землей в 2044 г. (16 млн км), а также сближения в 2051 г. на 0,76 млн км и в 2060 г. на 5 млн км, остальные — более чем на 10 млн км. Траектория, ведущая к соударению в 2060 г., имеет аналогичные сближения, однако в 2051 г. минимальное геоцентрическое расстояние составляет 0,13 млн км.

Траектория, ведущая к соударению в 2069 г., близка к траектории соударения в 2068 г., минимальное геоцентрическое расстояние в 2051 г. составляет 0,76 млн км, а в 2068 г. — 0,1 млн км.

Заключение. Необходимо тщательно исследовать не только возможные соударения астероидов с Землей, но и сближения с планетами на соответствующих траекториях. На примере ряда исследованных авторами опасных астероидов показано, что нередко траектории, ведущие к их соударению с Землей, содержат заметно больше тесных сближений, чем, например, номинальные траектории. В частности, в результате открываются возможности использования эффекта гравитационного маневра для увода астероида от соударений с Землей. При этом экономия энергии воздействия на астероид может достигать нескольких десятичных порядков.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 18-02-00552 А), и Российского научного фонда (грант 18-12-00050). Вычисления частично проводились с использованием компьютерного кластера в Ресурсном центре «Вычислительный центр Санкт-Петербургского государственного университета».

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Шустов Б.М., Рыхлова Л.В., ред. *Астероидная опасность: вчера, сегодня, завтра*. Москва, Физматлит, 2013, 384 с.
- [2] Шустов Б.М., Рыхлова Л.В., Кулешов Ю.П., Дубов Ю.Н., Елкин К.С., Вениаминова С.С. и др. Концепция системы противодействия космическим угрозам: астрономические аспекты. *Астрономический вестник*, 2013, т. 47, № 4, с. 327–340.
- [3] Дегтярь В.Г., Волков В.А. *Ракетная концепция системы противонастероидной защиты Земли*. Москва, Машиностроение, 2014, 336 с.
- [4] Wie B., Zimmerman B., Lyzhof J., Vardaxis G. Planetary defense mission concepts for disrupting/pulverizing hazardous asteroids with short warning time. *Astrodynamics*, 2017, vol. 1, no. 1, pp. 3–21.
- [5] Aleksandrova A.G., Galushina T.Yu., Prishchepenko A.B., Kholshevnikov K.V., Chechetkin V.M. The preventive destruction of a hazardous asteroid. *Astronomy Reports*, 2016, vol. 60, no. 6, pp. 613–621.
- [6] Эйсмонт Н.А., Боярский М.Н., Ледков А.А., Назиров Р.Р., Данхэм Д., Шустов Б.М. О возможности наведения малых астероидов на опасные небесные объекты с использованием гравитационного маневра. *Астрономический Вестник*. 2013, т. 47, № 4, с. 352–360.
- [7] Chapman C., Loucks M.E., Carrico J.P., Lu E.T. Asteroid deflection requirements as a function of warning time. *Abstract book “ASTEROIDS, COMETS, METEORS 2017”*. Montevideo, April 10–14, 2017.
- [8] Ивашкин В.В., Стихно К.А. О предотвращении возможного столкновения астероида Апофис с Землей. *Астрономический вестник*, 2009, т. 43, № 6, с. 502–516.
- [9] Соколов Л.Л., Башаков А.А., Питьев Н.П. Особенности движения астероида 99942 Арофис. *Астрономический вестник*, 2008, т. 42, № 1, с. 20–29.
- [10] Соколов Л.Л., Башаков А.А., Борисова Т.П., Петров Н.А., Питьев Н.П., Шайдулин В.Ш. Траектории соударения астероида Апофис с Землей в XXI веке. *Астрономический вестник*, 2012, т. 46, № 4, с. 311–320.

- [11] Соколов Л.Л., Борисова Т.П., Васильев А.А., Петров Н.А. Свойства траекторий соударения астероидов с Землей. *Астрономический вестник*, 2013, т. 47, № 5, с. 441–447.
- [12] Петров Н.А., Васильев А.А., Кутеева Г.А., Соколов Л.Л. О траекториях соударения астероидов 2015 RN35 и Апофис с Землей. *Астрономический вестник*, 2018, т. 52, № 4, с. 330–342.
- [13] Соколов Л.Л., Петров Н.А., Васильев А.А., Кутеева Г.А., Шмыров А.С., Эскин Б.Б. О возможности увода астероида от соударений с Землей с использованием кинетического метода. *Астрономический вестник*, 2018, т. 52, № 4, с. 343–350.
- [14] Everhart E. Implicit single-sequence methods for integrating orbits. *Celest. Mech.*, 1974, vol. 10, no. 1, pp. 35–55.
- [15] Standish E.M. JPL planetary and lunar ephemerides, DE405/LE405. *Jet Propulsion Laboratory, Interoffice Memorandum IOM 312. F-98-048*. Pasadena, Calif. Inst. Technol., 1998.
- [16] Folkner W.M., Williams J.G., Boggs D.H., Park R.S., Kuchynka P. The Planetary and Lunar Ephemerides DE430 and DE431. *IPN Progress Report*, vol. 42–196. Pasadena, Calif. Inst. Technol., 2014, pp. 1–81.
- [17] Chesley S.R. Potential impact detection of near-Earth asteroids: the case of 99942 (2004 MN4), *Proc. 229th Symp. of the International Astronomical Union “Asteroids, Comets, Meteors”, Rio de Janeiro, Brazil, August 7–12, 2005*, Cambridge, Cambridge Univ. Press, 2006, pp. 215–228.
- [18] Yeomans D.K., Bhaskaran S., Broschart S.B., Chesley S.R., Chodas P.W., Sweetser T.H., Schweickart R. Deflecting a hazardous near-Earth object. *1st IAA Planetary Defense Conf. “Protecting Earth from Asteroids” April 27–30, 2009*. Granada, 2009.
- [19] Chesley S.R. Asteroid impact hazard assessment with Yarkovsky effect. *2nd IAA Planetary Defense Conf. “From Threat to Action” May 9–12, 2011*. Bucharest, 2011.
- [20] Farnocchia D., Chesley S.R., Chodas P.W., Micheli M., Tholen D.J., Milani A., Elliott G.T., Bernardi F. Yarkovsky-driven impact risk analysis for asteroid (99942) Apophis. *Icarus*, 2013, vol. 224, no. 1, pp. 192–200.

Статья поступила в редакцию 25.04.2019

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Соколов Л.Л., Петров Н.А., Эскин Б.Б., Кутеева Г.А. Сближения с Землей опасных астероидов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2019, вып. 6.
<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2019-6-1891>

Соколов Леонид Леонидович — д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры небесной механики Санкт-Петербургского государственного университета. Область научных интересов — классическая небесная механика, задача N тел, астероидная опасность. e-mail: lsok@astro.spbu.ru

Петров Никита Александрович — инженер отдела обслуживания учебного процесса по астрономии Центра технического сопровождения образовательных программ Санкт-Петербургского государственного университета. Область научных интересов: классическая небесная механика, ограниченная задачей трех тел, астероидная безопасность.

Эскин Борис Борисович — старший преподаватель кафедры небесной механики Санкт-Петербургского государственного университета. Область научных интересов: проблемы астероидной опасности, экзопланетные системы, эффект Лидова — Кодзай, астрономическое образование.

Кутеева Галина Анатольевна — канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры теоретической и прикладной механики СПб ГУ. Область научных интересов: проблемы теоретической механики, гидроупругости, история механики и небесной механики.

Hazardous asteroids approach to the Earth

© L.L. Sokolov, N.A. Petrov, B.B. Eskin, G.A. Kuteeva

Saint-Petersburg State University, St. Petersburg, 199034, Russia

The paper considers the asteroids approach to the Earth, for which collisions with our planet in the XXI century are possible. Close encounters on trajectories leading to collisions can often be found more than on nominal trajectories. Close encounters provide an opportunity to use the effect of a gravitational maneuver to prevent an asteroid from collisions with the Earth. As a result, the deflection of the asteroid can be carried out by the impact which is by several decimal orders less. Such an impact can be basically implemented using modern space technology. The asteroids approach to the Earth also helps to detect these asteroids, to refine their orbits from observations and to predict the characteristics of their possible collisions with the Earth in the future. In this paper, we consider the approach on the trajectories leading to collisions with the Earth for dangerous asteroids 2008 EX5, 2015 RN35, Apophis, which we have studied in detail.

Keywords: asteroid hazard, trajectories, collisions, approach to the Earth

This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (Grant 18-02-00552 A), and the Russian Science Foundation (Grant 18-12-00050). The calculations were performed using a computer cluster of the Computing Center of the Resource Center of the Research Park of St. Petersburg State University.

REFERENCES

- [1] Shustov B.M., Rykhlova L.V., ed. *Asteroidnaya opasnost: vchera, segodnya, zavtra* [Asteroid hazard: yesterday, today, tomorrow]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2013, 384 p.
- [2] Shustov B.M., Rykhlova L.V., Kuleshov Yu.P., Dubov Yu.N., Elkin K.S., Veniaminova S.S., et al. *Astronomicheskij vestnik — Solar System Research*, 2013, vol. 47, no. 4, pp. 327–340.
- [3] Degtiar V.G., Volkov V.A. *Raketnaya kontseptsiya sistemy protivasteroidnoy zashchity Zemli* [Rocket concept to protect the Earth against asteroidal hazard]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2014, 336 p.
- [4] Wie B., Zimmerman B., Lyzhoft J., Vardaxis G. Planetary defense mission concepts for disrupting/pulverizing hazardous asteroids with short warning time. *Astrodynamics*, 2017, vol. 1, no. 1, pp. 3–21.
- [5] Aleksandrova A.G., Galushina T.Yu., Prishchepenko A.B., Kholshchikov K.V., Chechetkin V.M. The preventive destruction of a hazardous asteroid. *Astronomy Reports*, 2016, vol. 60, no. 6, pp. 613–621.
- [6] Eismont N.A., Boyarskiy M.N., Ledkov A.A., Nazirov R.R., Dunham D.W., Shustov B.M. *Astronomicheskij vestnik — Solar System Research*, 2013, vol. 47, 4, pp. 352–360.
- [7] Chapman Cl., Loucks M.E., Carrico J.P., Lu E.T. Asteroid deflection requirements as a function of warning time. *Abstract book “ASTEROIDS, COMETS, METEORS 2017”*. Montevideo, April 10–14, 2017.
- [8] Ivashkin V.V., Stikhno C.A. *Astronomicheskij vestnik — Solar System Research*, 2009, vol. 43, no. 6, pp. 483–496.
- [9] Sokolov L.L., Bashakov A.A., Pit'ev N.P. *Astronomicheskij vestnik — Solar System Research*, 2008, vol. 42, no. 1, pp. 20–29.

- [10] Sokolov L.L., Bashakov A.A., Borisova T.P., Petrov N.A., Pit'ev N.P. Shaydu-
lin V.S. *Astronomicheskij vestnik — Solar System Research*, 2012, vol. 46,
no. 4, pp. 311–320.
- [11] Sokolov L.L., Borisova T.P., Vasil'ev A.A., Petrov N.A. *Astronomicheskij
vestnik — Solar System Research*, 2013, vol. 47, no. 5, pp. 441–447.
- [12] Petrov N.A., Vasil'ev A.A., Kuteeva G.A., Sokolov L.L. *Astronomicheskij
vestnik — Solar System Research*, 2018, vol. 52, no. 4, pp. 330–342.
- [13] Sokolov L.L., Petrov N.A., Vasil'ev A.A., Kuteeva G.A., Shmyrov A.S., Eskin B.B.
Astronomicheskij vestnik — Solar System Research, 2018, vol. 52, no. 4,
pp. 343–350.
- [14] Everhart E. Implicit single-sequence methods for integrating orbits. *Celest.
Mech.*, 1974, vol. 10, pp. 35–55.
- [15] Standish E.M. JPL planetary and lunar ephemerides, DE405/LE405. *Jet Pro-
pulsion Laboratory Interoffice Memorandum 312*, F-98-048, Pasadena, Calif.
Inst. Technol., 1998.
- [16] Folkner W.M., Williams J.G., Boggs D.H., et al. The Planetary and Lunar
Ephemerides DE430 and DE431. *IPN Progress Report*, vol. 42-196. Pasadena,
Calif. Inst. Technol., 2014.
- [17] Chesley S.R. Potential impact detection of near-Earth asteroids: the case of
99942 (2004 MN4). *Proc. 229th Symp. of the International Astronomical Union
“Asteroids, Comets, Meteors,” Rio de Janeiro, Brazil, August 7–12, 2005*,
Cambridge, Cambridge Univ. Press, 2006, pp. 215–228.
- [18] Yeomans D.K., Bhaskaran S., Broschart S.B., Chesley S.R., Chodas P.W.,
Sweetser T.H., Schweickart R. Deflecting a hazardous near-Earth object. *1st
IAA Planetary Defense Conf. “Protecting Earth from Asteroids,” April 27–30,
2009*. Granada, 2009.
- [19] Chesley S.R. Asteroid impact hazard assessment with Yarkovsky effect, *2011
IAA Planetary Defense Conf. “From Threat to Action,” May 9–12, 2011*.
Bucharest, 2011.
- [20] Farnocchia D., Chesley S.R., Chodas P.W., Micheli M., Tholen D.J., Milani A.,
Elliott G.T., Bernardi F. Yarkovsky-driven impact risk analysis for asteroid
(99942). *Apophis. Icarus*, 2013, vol. 224, no. 1, pp. 192–200.

Sokolov L.L., Dr. Sc., Professor, St. Petersburg State University. Research interests: problems of classical celestial mechanics, problem of N bodies, asteroid hazard.

Petrov N.A. (b. 1950) graduated from Leningrad State University in 1973 with a degree in astronomy; engineer, Saint-Petersburg State University. Research interests: classical celestial mechanics, restricted three-body problem, asteroid safety.

Eskin B.B. graduated from Leningrad Pedagogical Institute in 1990; works at Saint-Petersburg State University, Department of Celestial Mechanics. Research interests: asteroid hazard problems, exoplanetary systems, Lidov—Kozai effect, astronomical education

Kuteeva G.A. graduated from Saint-Petersburg State University, Department of Theoretical and Applied Mechanics in 1996; Norwegian University of Science and Technology in 2001. Assoc. Professor, Saint-Petersburg State University. Research interests: problems of theoretical mechanics, hydroelasticity, history of mechanics and celestial mechanics.