

Л. Л. Соколов, Н. А. Петров,
А. А. Васильев, Г. А. Кутеева
Санкт-Петербургский государственный университет

ОБ ОПАСНЫХ ТРАЕКТОРИЯХ АСТЕРОИДОВ

Обсуждаются траектории возможных соударений с Землей опасных астероидов. Найдено множество возможных соударений с Землей астероида 2015 RN35. Многие астероиды были ранее неизвестны. Получены основные характеристики и свойства соответствующих траекторий. Обсуждаются также возможные соударения с Землей астероида Апофис. Полученные результаты свидетельствуют о возможности и необходимости более подробного исследования множеств возможных соударений опасных астероидов с Землей. Такое исследование необходимо для планирования и реализации мероприятий по обеспечению астероидной безопасности.

We discuss trajectories with possible collisions of hazardous asteroids with the Earth. Possible collisions of asteroid 2015 RN35 with the Earth are presented, including previously unknown collisions. Main characteristics and properties of corresponding trajectories are derived. Possible collisions of asteroid Apophis with the Earth are discussed too. The results testifies that possible collisions of hazardous asteroids needs more carefully investigate and this investigation is practicable. Such investigation is necessary for planning and realisation measures to avoid collisions.

Введение

Актуальность проблемы обеспечения астероидно-кометной безопасности сегодня не вызывает сомнений [1, 2]. Важнейшая ее составляющая — выделение опасных объектов, прогнозирование их движения, определение возможных соударений с Землей и тесных сближений с ней.

Трудность нахождения возможных соударений связана, в частности, с так называемыми резонансными возвратами астероидов — повторными тесными сближениями с планетой в случае, когда после первого тесного сближения астероид переходит на резонансную

© Соколов Л. Л., Петров Н. А., Васильев А. А., Кутеева Г. А., 2017

орбиту. При сближениях теряется точность прогнозирования, движение становится практически недетерминированным. Для выделения опасных сценариев приходится применять специальные методы. Мы рассмотрим задачу нахождения возможных сближений и соударений на примере недавно открытого астероида 2015 RN35, а также хорошо известного астероида Апофис. Для последнего резонансные возвраты играют решающую роль, а число работ, посвященных ему, огромно. Укажем некоторые [3–11].

Опасный астероид 2015 RN35

Астероид 2015 RN35 открыт 9 сентября 2015 г. на обсерватории Pan-STARRS 1. В этот момент он находился на расстоянии 0.1907 а. е. от Земли, а наименьшее расстояние от Земли 0.1561 а. е. достигнуто 27 сентября 2015 г. На первом этапе наблюдений от 9 сентября 2015 г. до 3 ноября 2015 г. было получено 33 наблюдения. После улучшения орбиты на сайте НАСА было опубликовано решение, полученное 30 ноября 2015 г., которое соответствует первому этапу наблюдений.

На втором этапе, от 19 января 2016 г. до 7 марта 2016 г., было получено 23 наблюдения. После обработки наблюдений и улучшения орбиты на сайте НАСА было опубликовано новое решение, полученное 7 марта 2016 г., которое соответствует второму этапу наблюдений. Большая полуось получилась $a = (1.459378 \pm 11 \times 10^{-6})$ а. е. Точность большой полуоси на втором этапе наблюдений увеличилась примерно в 8 раз. Эксцентриситет орбиты 2015 RN35 равен $e = 0.34$, наклон — $i = 0.26^\circ$.

О методе нахождения соударений астероидов с Землей

Для поиска соударений астероидов с планетами мы используем численное интегрирование уравнений движения, интегратор Эверхарта [12] и современные динамические модели Солнечной системы (DE405, DE430 и др.) [13]. В основе метода — варьирование начальных данных в области возможных движений. Мы ограничиваемся варьированием на одномерном многообразии начальных данных вместо шестимерного, что значительно облегчает поиски. Численные эксперименты свидетельствуют, что обычно этого достаточно.

Поиск соударений происходит в два или три этапа. На первом этапе находятся локальные минимумы геоцентрического расстояния как функции времени и варьируемой координаты. На втором этапе эти минимумы уточняются с использованием более мелкого шага варьирования. Соударение соответствует уточненному минимуму меньше радиуса Земли, иначе это сближение. Основная трудность, с которой мы встречаемся в случае резонансных возвратов (примером является астероид Апофис) — потеря точности, связанная с рассеянием возможных траекторий при тесных сближениях (в 2029, 2036 и 2051 гг. для Апофиса). Для преодоления этой трудности мы переносим начальные данные вдоль траектории вперед, за 2029 г., для Апофиса [4] и варьируем начальные данные в новой области. Эти вычисления составляют третий этап поиска соударений. Обычно для Апофиса мы использовали варьирование «начальных данных» 01.05.2035. Это позволяет зафиксировать именно соударение, а не просто тесное сближение, видимое на втором этапе. «Разглядеть» соударение в интервале 2006—2016 гг. удастся только для самых больших ведущих к соударениям щелей.

Для идентификации и описания траекторий с соударениями мы использовали следующие характеристики: 1. Дата и момент соударения. 2. Относительное положение щели, ведущей к соударению. Это разность большой полуоси, ведущей к данному соударению, и большой полуоси некоторой фиксированной траектории (номинальной орбиты, или фиксированного соударения) в некоторый момент времени. Альтернативный метод определения положения щели — использование минимального геоцентрического расстояния в момент некоторого предыдущего тесного сближения астероида с Землей. 3. Размер щели, ведущей к соударению. Это максимальная разность больших полуосей траекторий, ведущих к данному соударению, в некоторый момент времени. Альтернативный метод определения размера щели — использование диапазона (максимальной разности) минимальных геоцентрических расстояний траекторий, ведущих к данному соударению в момент некоторого фиксированного предыдущего тесного сближения астероида с Землей. 4. Минимальное геоцентрическое расстояние в момент рассматриваемого соударения (из всех траекторий, ведущих к этому соударению).

Необходимо подчеркнуть, что указанные характеристики траекторий с соударениями оказываются устойчивыми относительно малых изменений модели движения, в то время как сами исследуемые траектории демонстрируют сильнейшую ляпуновскую неустой-

чивость, связанную с тесными сближениями. Эти характеристики практически сохраняются при переходе от модели Солнечной системы DE405 к модели DE430, а также при небольшом (для Апофиса) изменении номинальной орбиты. Даты и моменты найденных нами соударений соответствуют приведенным на сайте НАСА для основных (с самыми большими размерами щелей) соударений. Положение ведущей к соударению щели, определяемое по изменению исходной большой полуоси, и характеристика σ_{LOV} (см. сайт НАСА) оказываются линейно зависимыми с точностью порядка процента. Размеры щелей также коррелируют с соответствующими характеристиками на сайте НАСА, в том числе с вероятностями соударений, если положения щелей близки. Согласующиеся результаты получаются также, если брать начальные данные на номинальной траектории в разные моменты времени. Для основных (по размерам щелей) соударений сравнивались вышеуказанные альтернативные методы определения положений и размеров щелей, получаются согласующиеся результаты. Все это косвенно свидетельствует о правильности и надежности получаемых результатов, что исключительно важно.

Для поиска соударений астероидов с Землей нами использовался компьютерный кластер вычислительного центра Ресурсного центра научного парка Санкт-Петербургского государственного университета, что было обусловлено необходимостью проведения большого объема вычислений. Алгоритм позволяет естественно использовать распараллеливание вычислений, и использование компьютерного кластера оказалось исключительно эффективным.

Соударения и сближения астероида 2015 RN35

Используя номинальную орбиту, полученную 30.11.2015 после первого этапа наблюдений 2015 RN35, мы нашли 154 возможных соударения в текущем столетии. На рис. 1 показаны относительные положения и размеры соответствующих щелей. Положения определяются разностью большой полуоси, соответствующей текущему соударению, и номинального значения большой полуоси в начальный момент 30.11.2015 в метрах, размеры — диапазоном ведущих к соударению значений большой полуоси в начальный момент в метрах. На рис. 2 показаны относительные положения и даты соударений для соответствующих щелей. Кругами выделены соударения, которые были приведены на сайте НАСА.

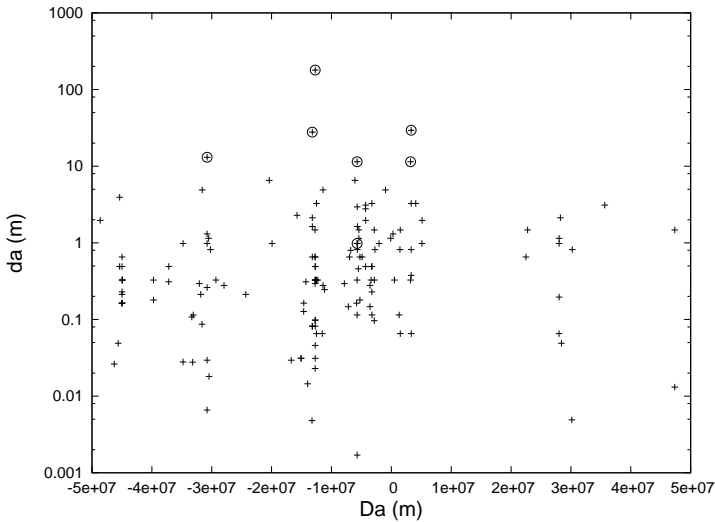


Рис. 1. Относительные положения и размеры щелей астероида 2015 RN35, первый этап наблюдений

Для той же номинальной орбиты нами было найдено семь сближений с Землей на расстояние менее 0.5 а. е. на интервале времени от 1978 до 2022 г. В табл. 1 приведены даты сближений, юлианские даты и минимальные геоцентрические расстояния (а. е.). Для сравнения приведены юлианские даты и минимальные геоцентрические расстояния, которые были указаны на сайте НАСА. Как видно из табл. 1, отличие по юлианской дате составляет 0.001 суток в 1985 г., а по геоцентрическому расстоянию максимальное отличие составляет 0.000013 а. е. в 1978 г.

Используя номинальную орбиту, полученную 07.03.2016 после второго этапа наблюдений 2015 RN35, мы нашли 21 возможное соударение в текущем столетии. На рис. 3 показаны относительные положения и размеры соответствующих щелей. Положения определяются разностью большой полуоси, соответствующей текущему соударению, и номинального значения большой полуоси в начальный момент (07.03.2016) в метрах, размеры — диапазоном ведущих к соударению значений большой полуоси в начальный момент в метрах. На рис. 4 показаны относительные положения и даты соударений для соответствующих щелей. Кругами выделены соударения, кото-

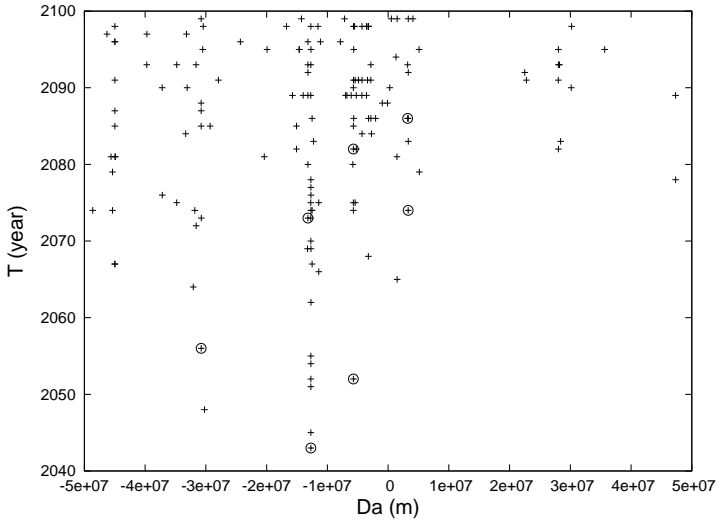


Рис. 2. Относительные положения и даты соударений астероида 2015 RN35, первый этап наблюдений

Таблица 1. Сближения астероида 2015 RN35 с Землей, первый этап наблюдений, d (а. е.) — минимальное расстояние

Дата	JD	JD НАСА	d	d НАСА
06-09-1978	2443757.600	2443757.600	0.493140	0.493127
10-10-1985	2446348.723	2446348.722	0.033738	0.033741
30-12-1992	2448987.476	2448987.476	0.099601	0.099595
22-01-2000	2451566.386	2451566.386	0.452191	0.452187
27-09-2015	2457292.542	2457292.542	0.156206	0.156206
30-01-2016	2457417.510	2457417.510	0.371670	0.371670
14-12-2022	2459928.286	2459928.286	0.003781	0.003782

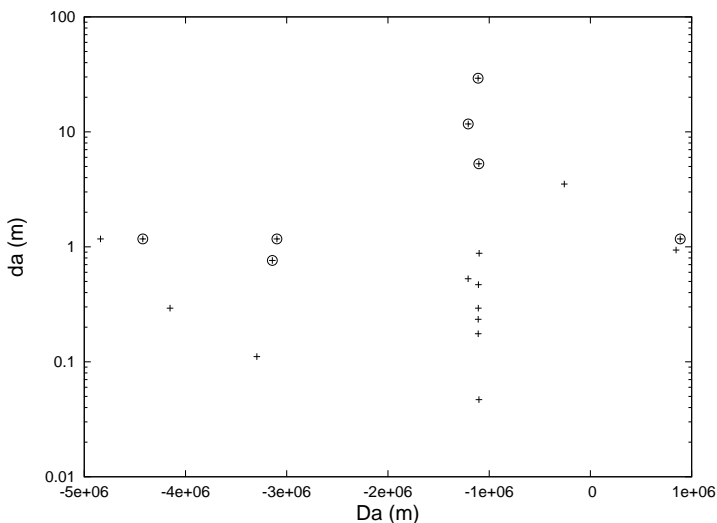


Рис. 3. Относительные положения и размеры щелей астероида 2015 RN35, второй этап наблюдений

рые приведены на сайте НАСА. Выделяются семейства соударений с близкими положениями щелей.

Для той же номинальной орбиты после второго этапа наблюдений нами были найдено 12 сближений с Землей на расстояние менее 0.5 а. е. на интервале времени от 1955 до 2031 г. В табл. 2 приведены даты сближений, юлианские даты и минимальные геоцентрические расстояния (а. е.). Для сравнения приведены юлианские даты и минимальные геоцентрические расстояния, которые были указаны на сайте НАСА. Как видно из табл. 2, максимальное отличие по юлианской дате составляет 0.035 суток в 2031 г., а по геоцентрическому расстоянию максимальное отличие составляет 0.000440 а. е. также в 2031 г. Отметим два сближения (1956 и 1962 гг.), не указанные на сайте НАСА, особенно сравнительно тесное в 1962 г. Если бы удалось найти соответствующие старые наблюдения, точность орбиты увеличилась бы существенно.

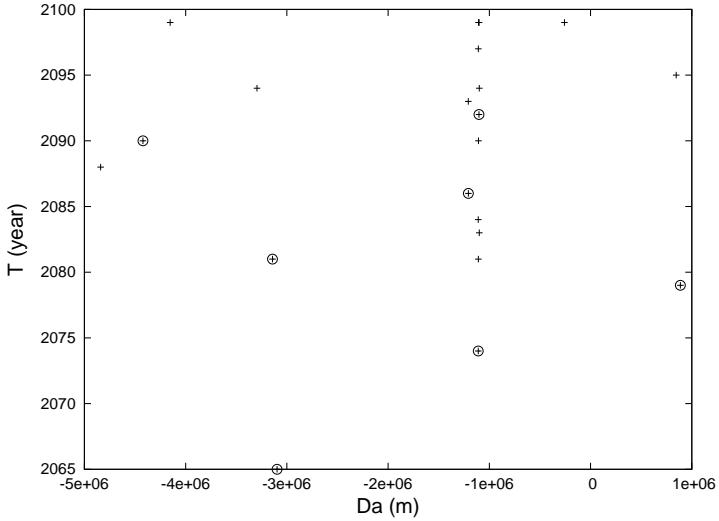


Рис. 4. Относительные положения и даты соударений астероида 2015 RN35, второй этап наблюдений

Таблица 2. Сближения астероида 2015 RN35 с Землей, второй этап наблюдений, d (а. е) — минимальное расстояние

Дата	JD	JD НАСА	d	d НАСА
16-09-1955	2435367.043	2435367.021	0.310523	0.310885
18-02-1956	2435521.666		0.476823	
01-11-1962	2437970.379		0.021406	
15-01-1970	2440602.142	2440602.147	0.336371	0.336467
06-09-1978	2443758.118	2443758.120	0.483357	0.483321
09-10-1985	2446348.271	2446348.269	0.036089	0.036098
30-12-1992	2448987.040	2448987.038	0.095208	0.095190
22-01-2000	2451566.221	2451566.220	0.448965	0.448952
27-09-2015	2457292.543	2457292.543	0.156211	0.156211
30-01-2016	2457417.508	2457417.508	0.371682	0.371682
15-12-2022	2459928.676	2459928.677	0.004305	0.004307
28-09-2031	2463137.547	2463137.582	0.164867	0.164427

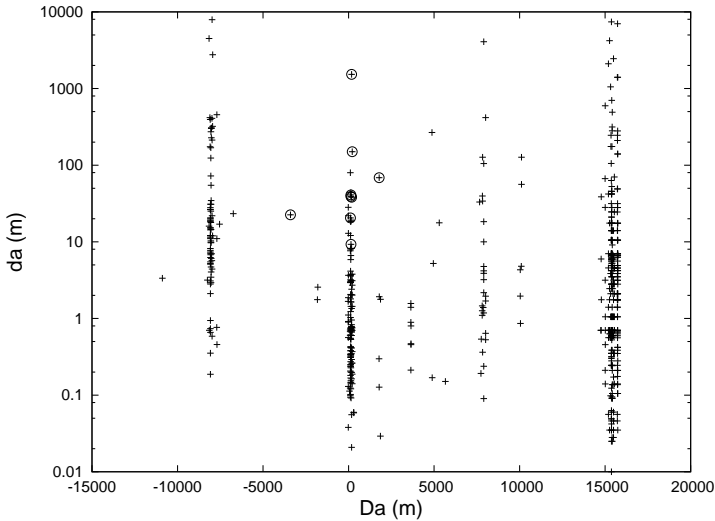


Рис. 5. Относительные положения и размеры щелей астероида Апофис

Соударения астероида Апофис

Любопытно сравнить результаты, полученные ранее для астероида Апофис (например, [9]), с аналогичными результатами для астероида 2015 RN35. На рис. 5 приведены относительные положения и размеры щелей, ведущих к соударениям с Землей астероида Апофис в текущем столетии. Использовался старый номинал (2006 г.), модель Солнечной системы DE405. Положения определялись разностью текущей большой полуоси (в метрах) и большой полуоси для «основного» (в 2068 г.) соударения в начальный момент в 2006 г., размеры щелей — диапазоном ведущих к соударению больших полуосей (в метрах) в 2035 г. На рис. 6 приведены относительные положения щелей и даты тех же соударений. Кругами выделены соударения, которые приведены на сайте НАСА. При внимательном рассмотрении отчетливо видна фрактальная структура.

На рис. 7 приведена центральная область рис. 5, ось абсцисс взята в крупном масштабе, ее начало сдвинуто от вышеуказанного и соответствует некоторой «промежуточной» (между 2006 и 2014 г.) номинальной орбите. В настоящее время актуальны только соударения в окрестности номинальной орбиты, где находятся эти круги.

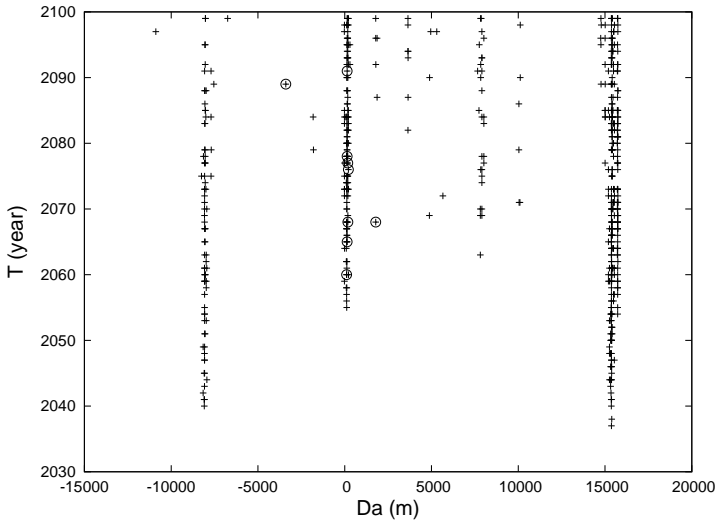


Рис. 6. Относительные положения щелей и даты соударений астероида Апофис

При внимательном рассмотрении отчетливо видна структура, похожая на фрактальную. Всего в самой широкой исследованной области на рис. 5, 6 приведено более 500 соударений, из них актуальны около 130. В этой широкой области отчетливо видны три самых богатых семейства. Центральное — около номинальной орбиты — связано с рассеянием возможных траекторий после сближения в 2051 г. Семейство слева связано с рассеянием возможных траекторий после сближения в 2036 г.; соответствующее соударение активно обсуждалось до уточнения орбиты Апофиса в 2012–2013 гг. Очень богатое семейство справа связано с рассеянием после сближений в 2037 и 2038 гг. Это семейство было актуальным только в самом начале исследования Апофиса, когда точность орбиты была мала.

Исследование «виртуальных» соударений астероида представляет не только академический интерес. При изменении орбиты астероида с целью предотвращения соударений необходимо знать, где находятся щели, а где — свободные от них области.

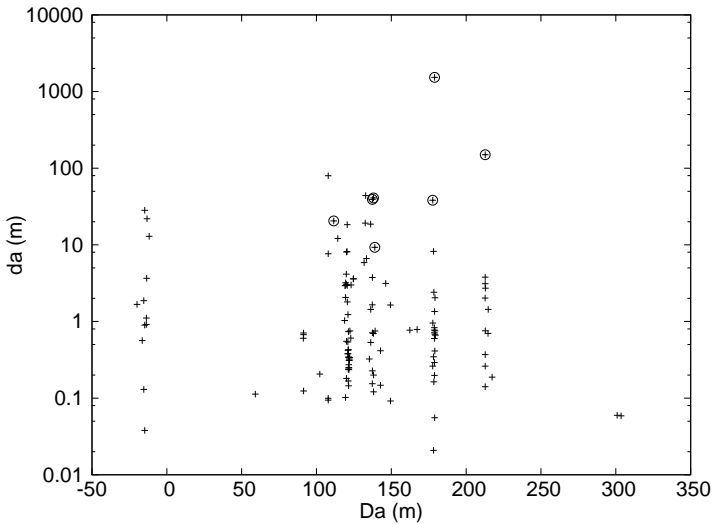


Рис. 7. Относительные положения и размеры щелей астероида Апофис в окрестности номинальной орбиты

Заклучение

Нами разработан метод выделения возможных соударений астероидов с Землей. Этот метод применен для астероида Апофис и 2015 RN35; найдено множество возможных соударений этих астероидов с Землей, большинство из них были ранее неизвестны. Получены основные характеристики и свойства соответствующих траекторий. Правильность полученных результатов подтверждается, в частности, сравнением с аналогичными результатами, полученными американскими коллегами и публикуемыми на сайте НАСА <http://neo.jpl.nasa.gov/risk/>. Характеристики траекторий с соударениями устойчивы по отношению к малым изменениям начальных данных и модели движения, что также свидетельствует об их надежности.

Можно сделать вывод о том, что в настоящее время опасность соударений астероидов с Землей недооценивается, ведь мы знаем далеко не все возможные соударения с Землей даже известных астероидов. Необходимо более подробно исследовать множества возможных соударений опасных астероидов с Землей. Получаемые данные яв-

ляются исходными для планирования и реализации мероприятий по обеспечению астероидной безопасности.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 14–02–00804-а, 15–02–04340, Программы проведения фундаментальных исследований СПбГУ по приоритетным направлениям (проект 6.37.341.2015). При выполнении настоящей работы использовался компьютерный кластер Вычислительного центра Ресурсного центра научного парка Санкт-Петербургского государственного университета.

Библиографические ссылки

1. *Шустов Б. М., Рыжлова Л. В.* Астероидная опасность: вчера, сегодня, завтра. — М., 2010.
2. *Шустов Б. М., Рыжлова Л. В., Кулешов Ю. П. и др.* Концепция системы противодействия космическим угрозам: астрономические аспекты // *Астрон. вестн.* — 2013. — Т. 47, вып. 4. — С. 327.
3. *Chesley Steven R.* Potential impact detection of near-Earth asteroids: The Case of 99942 (2004 MN4) // *Asteroids, Comets, Meteors : Proc. IAU Symposium 229th, 2005.* — Cambridge : Cambridge Univ. Press, 2006. — P. 215.
4. *Соколов Л. Л., Башаков А. А., Питъев Н. П.* Особенности движения астероида 99942 Apophis // *Астрон. вестн.* — 2008. — Т. 42, вып. 1. — С. 20.
5. *Yeomans D. K. et al.* Deflecting a Hazardous Near-Earth Object // *Protecting Earth from Asteroids : IAA Planetary Defense Conference, 27–30 April 2009, Granada, Spain.* — 2009.
6. *Chesley Steven R.* Asteroid Impact Hazard Assessment With Yarkovsky Effect // *From Threat to Action : IAA Planetary Defense Conference, 9–12 May 2011, Bucharest, Romania.* — 2011.
7. *Соколов Л. Л., Башаков А. А., Борисова Т. П. и др.* Траектории соударения астероида Апофис с Землей в XXI веке // *Астрон. вестн.* — 2012. — Т. 46, вып. 4. — С. 311.
8. *Шор В. А., Чернетенко Ю. А., Кочетова О. М., Железнов Н. Б.* О влиянии эффекта Ярковского на орбиту Апофиса // *Астрон. вестн.* — 2012. — Т. 46, вып. 2. — С. 131.

9. *Соколов Л. Л., Борисова Т. П., Васильев А. А., Петров Н. А.* Свойства траекторий соударения астероидов с Землей // *Астрон. вестн.* — 2013. — Т. 47, вып. 5. — С. 411.
10. *Farnocchia D. et al.* Yarkovsky-driven impact risk analysis for asteroid (99942) Apophis // *Icarus.* — 2013. — Submitted.
11. *Соколов Л. Л., Кутеева Г. А.* Возможные соударения астероида Апофис после уточнения его орбиты // *Вестн. С.-Петербург. ун-та.* — 2015. — Т. 2, Сер. 1, вып. 1. — С. 148.
12. *Everhart E.* Implicit single-sequence methods for integrating orbits // *Celest. Mech.* — 1974. — Vol. 10. — P. 35.
13. *M. Standish E.* JPL Planetary and Lunar ephemerides, DE405/LE405. — JPL Interoffice Memorandum, 312.F-98-048. — 1998.