

УДК 521.1

О ХАРАКТЕРИСТИКАХ ОСОБЫХ ТРАЕКТОРИЙ АСТЕРОИДА АПОФИС И ВОЗМОЖНОСТИ УВОДА ЕГО ОТ СОУДАРЕНИЙ С ЗЕМЛЕЙ

© 2021 г. Л. Л. Соколов^{а, *}, Г. А. Кутеева^а, Н. А. Петров^а,
Б. Б. Эскин^а, И. А. Баляев^а, А. А. Васильев^а

^аСанкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: lsok@astro.spbu.ru

Поступила в редакцию 16.07.2019 г.

После доработки 16.03.2020 г.

Принята к публикации 13.07.2020 г.

Рассматриваются сближения с Землей на траекториях, ведущих к возможным соударениям с Землей астероида Апофис. Тесные сближения, особенно в 2051 г., дают возможность использования эффекта гравитационного маневра для увода астероида от соударений при небольшой затрате энергии. Получены оценки изменения скорости Апофиса после 2029 г., которые требуются для увода от основных возможных его соударений с Землей.

Ключевые слова: астероид, резонансные возвраты, орбита соударения

DOI: 10.31857/S0320930X21010096

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность проблемы обеспечения астероидно-кометной безопасности не вызывает сегодня сомнения. Этой теме посвящено огромное число работ, невозможно дать их исчерпывающий обзор. Укажем работы (Артемьева и др., 2013; Шустов и др., 2013; Акимов и др., 2015), в которых эта комплексная проблема рассматривается с общих позиций. Информацию об опасных астероидах и их характеристиках, текущем уровне опасности удобно получать, например, с регулярно обновляемого сайта sneos.jpl.nasa.gov/sentry/ (сайт NASA), а также newton.spacedys.com/neodyd/ (сайт Пизанского университета, Италия, NEODyS).

Одной из труднейших компонент проблемы обеспечения астероидно-кометной безопасности является воздействие на астероид с целью изменения его орбиты для предотвращения столкновения с Землей. Соударение с астероидом размером менее полусотни метров может вызвать локальную катастрофу и в случае, если о соударении будет известно заблаговременно, мероприятия МЧС (в России) могут минимизировать ущерб. Если размеры астероида велики, для увода необходимо приложить большую энергию. Это принципиальная трудность, с учетом современного развития космической техники и ее обозримых перспектив, если не использовать энергию атомную (термоядерную). Последнее имеет свои очевидные проблемы, их мы обсуждать здесь не будем. Возможности атомной энергии применительно к

предотвращению соударений астероидов с Землей рассмотрены, например, в работе (Дегтярь, Волков, 2013).

Очевидно, чем больше интервал времени между воздействием на астероид и соударением, тем меньше необходимое для увода воздействие; причина — ляпуновская неустойчивость кеплерова движения. Мы будем далее рассматривать кинетический метод — удар по астероиду тяжелым телом для изменения скорости и орбиты астероида. Этот метод идейно самый простой и удобный для оценок. Очевидна также идея использования эффекта гравитационного маневра. Именно, если после воздействия на астероид до соударения с Землей имеет место тесное сближение с ней, то эффект воздействия кратно возрастает. Примером является опасный астероид Апофис, сближающийся в 2029 г. с Землей на расстояние 38 тыс. км. В работах (Ивашкин, Стихно, 2008; 2009а; 2009б и других) этот вопрос подробно исследован применительно к возможному тогда соударению Апофиса с Землей в 2036 г.; выигрыш от эффекта гравитационного маневра при воздействии на Апофис до 2029 г. составляет 4–5 десятичных порядков. Однако такое тесное сближение астероида с Землей ведет к появлению связанных с резонансными возвратами возможных соударений в большом количестве, а также к потере точности прогнозирования. Эти обстоятельства осложняют задачу. С их учетом возможности увода Апофиса от основных возможных в текущем столетии соударений были рассмотрены в работе (Соколов и др., 2018). Были

получены обнадеживающие результаты, свидетельствующие о принципиальной возможности увода Апофиса от множества известных возможных соударений при воздействии на него до сближения в 2029 г. Конечно, это будет иметь смысл только в том случае, если наблюдения этого астероида при сближении с Землей в 2020–2021 гг. покажут его реальную опасность, что очень маловероятно. В работе (Loucks и др., 2017) моделировалось движение множества виртуальных астероидов по траекториям, ведущим к соударению с Землей, и оценивалось изменение скорости за 30 лет до соударения, необходимое для его предотвращения. В среднем эта величина приращения скорости обратно пропорциональна времени до соударения (что соответствует вышеупомянутой ляпуновской неустойчивости). Были выделены траектории со сближениями (в сфере Хилла) до соударений. Их оказалось 518 из 10000. Для них потребное приращение скорости, естественно, оказалось существенно меньше, примерно в 10–100 раз.

Рассматриваются и другие способы предотвращения соударений астероида с Землей. Так, в работе (Wie и др., 2017) рассматриваются возможности и средства разрушения не очень большого астероида, когда времени на его увод от соударения уже недостаточно. В работе (Aleksandrova и др., 2016) рассматривается возможность разрушения астероида (термо)ядерным взрывом после его сближения с Землей до предполагаемого соударения с ней. Показано, что при разумных предположениях радиоактивное заражение Земли практически не грозит. В работах (Эйсмонт и др., 2013; Ледков и др., 2015) рассматривается любопытная идея удара астероида по другому астероиду для увода последнего от соударения с Землей, при этом астероид-ударник наводится на цель с использованием гравитационного маневра у Земли. Понятно, что в этом случае трудностей с энергией воздействия не возникает.

Основная цель настоящей работы — оценка принципиальной реализуемости увода астероида от соударения с Землей с использованием кинетического метода в сочетании с эффектом гравитационного маневра. Рассмотрение мы будем проводить на примере хорошо известного специалистам и подробно изученного астероида Апофис. В частности, ранее были тщательно исследованы его возможные соударения с Землей. Особые траектории, о которых говорится в названии настоящей статьи — это траектории, ведущие к возможным соударениям Апофиса с Землей. Еще конкретнее — это траектории Апофиса, ведущие к 13 его основным соударениям, рассмотренные ниже. Ограничимся случаем воздействия на астероид в первой половине текущего столетия, однако, после его тесного сближения с Землей 13 апреля 2029 г. Настоящую работу естественно считать продолжением работы (Соколов и др., 2018).

О СОУДАРЕНИЯХ АСТЕРОИДА АПОФИС С ЗЕМЛЕЙ

Астероид (99942) Апофис был открыт летом 2004 г. в обсерватории Кит ПиК (США). К концу года выяснилось, что возможно его соударение с Землей 13 апреля 2029 г. По мере роста числа наблюдений вероятность этого соударения росла, достигнув в декабре 2004 г. беспрецедентно высокого значения в 3%. Размеры астероида оценивались тогда примерно 400 м. После проведения радиолокации в начале 2005 г. и существенного уточнения орбиты Апофиса было установлено, что в 2029 г. соударение невозможно, будет иметь место тесное сближение. Минимальное расстояние в 2029 г. с тех пор уточнялось, сейчас оно равно 38 тыс. км.

Тесное сближения Апофиса с Землей в 2029 г. инициирует появление резонансных возвратов после этого сближения возможных сближений и соударений в будущем. В работе (Chesley, 2005) представлен набор возможных соударений, соответствующий точности орбиты Апофиса того времени, среди прочих — возможное соударение с Землей в 2036 г. Затем в связи с уточнением орбиты это соударение осталось основным из известных, а Апофис после 2006 до 2012 г. практически перестал наблюдаться из-за неблагоприятных условий. В это время исследовались траектории возможных соударений Апофиса с Землей, связанные с резонансными возвратами в 2036 г. (Соколов и др., 2008; 2012; Yeomans и др., 2009).

В работе (Chesley, 2011) было установлено, что важную роль играют возможные сближения Апофиса с Землей в 2051 г. (среди которых нет соударений). Резонансные возвраты после этих сближений порождают богатое множество соударений. Это множество и исследовалось далее (Соколов и др., 2013; Farnocchia и др., 2013; Соколов, Кутеева, 2015; Петров и др., 2018) после того как в результате наблюдений Апофиса в 2013 г. и уточнения его орбиты было установлено, что соударение в 2036 г. невозможно. Тем не менее это соударение “виртуального” Апофиса продолжает использоваться для моделирования (Ивашкин и др., 2017).

В настоящее время Апофис продолжает оставаться одним из опасных астероидов с вероятностью самого опасного соударения в 2068 г. порядка 7×10^{-6} . В настоящей работе мы рассматриваем выборку 13 основных возможных соударений его с Землей, ту же, что в табл. 2 из (Соколов и др., 2018); из них 7 присутствуют на сайте NASA (они обозначены в табл. 15 звездочкой). Методы, используемые нами для нахождения возможных соударений, и сравнение наших результатов с результатами других авторов обсуждаются в (Петров и др., 2018; Соколов и др., 2018) и других цитированных выше работах. Для прогнозирования движения мы используем интегратор Эверхарта (Everhart, 1974).

Таблица 1. Сближение Апофиса с Землей, минимальные расстояния (млн км), номинальная орбита

Дата сближения	21.04.2051	14.09.2066
Минимальное расстояние (млн км)	7.06	7.74

Таблица 2. Сближение Апофиса с Землей, минимальные расстояния (млн км), соударение в 2075 г.

Дата сближения	15.04.2051	13.04.2058	16.09.2067	2075
Минимальное расстояние (млн км)	1.81	0.577	5.13	0.000177

Для описания траекторий соударений 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).

Интересно и исключительно важно то, что указанные характеристики оказываются устойчивыми относительно малых изменений модели движения, в то время как сами исследуемые траектории демонстрируют сильнейшую ляпуновскую неустойчивость, связанную с тесными сближениями. Эти характеристики практически сохраняются при переходе от модели Солнечной системы DE405 (Standish, 1998) к модели DE430

(Folkner и др., 2014), а также при небольшом (для Апофиса) изменении номинальной орбиты. Подробнее этот вопрос обсуждается в нашей работе (Соколов и др., 2012). Высокоточное прогнозирование траектории Апофиса осложняется неопределенностью, связанной с наличием возмущающего эффекта Ярковского (Chesley, 2011; Шор и др., 2012). Указанная устойчивость характеристик возможных соударений облегчает положение.

СБЛИЖЕНИЯ С ЗЕМЛЕЙ НА ТРАЕКТОРИЯХ, ВЕДУЩИХ К ВОЗМОЖНЫМ СОУДАРЕНИЯМ АПОФИСА

Исследование возможных сближений (а не только соударений) астероидов с Землей представляет несомненный интерес. При сближении можно найти потерянный объект, уточнить орбиту из наблюдений; можно использовать эффект гравитационного маневра для целесообразного изменения орбиты астероида.

Имеющиеся сегодня ресурсы (например, вышеуказанные сайты NASA, NEODyS) позволяют получить сближения на номинальных орбитах опасных астероидов. Однако сближения с Землей на других возможных траекториях могут заметно отличаться и требуют специального исследования. Прежде всего, нас интересуют сближения на траекториях, ведущих к соударениям.

Для астероида Апофис мы выбрали 13 основных на сегодня возможных соударений, рассмотренных также в нашей работе (Соколов и др., 2018). В табл. 2–14 приведены полученные нами сближения с Землей на соответствующих траек-

Таблица 3. Сближение Апофиса с Землей, минимальные расстояния (млн км), соударение в 2064 г.

Дата сближения	15.04.2051	14.04.2058	2064
Минимальное расстояние (млн км)	1.77	0.577	0.00453

Таблица 4. Сближение Апофиса с Землей, минимальные расстояния (млн км), соударение в 2056 г.

Дата сближения	14.04.2051	2056
Минимальное расстояние (млн км)	0.179	0.00415

Таблица 5. Сближение Апофиса с Землей, минимальные расстояния (млн км), соударение в 2060 г.

Дата сближения	14.04.2051	2060
Минимальное расстояние (млн км)	0.129	0.00437

Таблица 6. Сближение Апофиса с Землей, минимальные расстояния (млн км), соударение в 2055 г.

Дата сближения	14.04.2051	2055
Минимальное расстояние (млн км)	0.0934	0.00588

Таблица 7. Сближение Апофиса с Землей, минимальные расстояния (млн км), соударение в 2074 г.

Дата сближения	14.04.2051	2074
Минимальное расстояние (млн км)	0.135	0.000300

Таблица 8. Сближение Апофиса с Землей, минимальные расстояния (млн км), соударение в 2066 г.

Дата сближения	14.04.2051	2066
Минимальное расстояние (млн км)	0.183	0.00519

Таблица 9. Сближение Апофиса с Землей, минимальные расстояния (млн км), соударение в 2065 г.

Дата сближения	14.04.2051	2065
Минимальное расстояние (млн км)	0.199	0.00296

Таблица 10. Сближение Апофиса с Землей, минимальные расстояния (млн км), соударение в 2078 г.

Дата сближения	14.04.2051	2078
Минимальное расстояние (млн км)	0.209	0.000331

Таблица 11. Сближение Апофиса с Землей, минимальные расстояния (млн км), соударение в 2091 г.

Дата сближения	14.04.2051	30.09.2052	10.04.2064	2091
Минимальное расстояние (млн км)	0.220	7.28	6.52	0.00568

Таблица 12. Сближение Апофиса с Землей, минимальные расстояния (млн км), соударение в 2077 г.

Дата сближения	13.04.2051	11.09.2060	11.04.2068	2077
Минимальное расстояние (млн км)	0.746	8.68	2.45	0.00245

ториях, а в табл. 1 – сближения на номинальной на сегодня траектории. В первой строке каждой из этих таблиц – дата сближения, во второй – минимальное геоцентрическое расстояние (млн км). Мы ограничились сближениями на расстоянии менее 10 млн км.

Большое число менее тесных сближений, которые встречаются, не могут дать заметного эффекта гравитационного маневра. Обращает на себя внимание важная тенденция, отмеченная нами в работе (Соколов и др., 2019): сближения на траек-

ториях соударения заметно более тесные и позволяют надеяться на то, что эффект гравитационного маневра даст возможность осуществить увод от соударений приемлемыми средствами. Подчеркнем, что это только тенденция, а не однозначная закономерность. В работе (Соколов и др., 2019) наличие сближений на траекториях, ведущих к соударениям, рассматривалось для опасного астероида 2008 EX₅, а также для “виртуальных” на сегодня траекторий соударения астероида Апофис, связанных со сближениями в 2036 г. Эти последние рассматривались в работе (Соколов и др.,

Таблица 13. Сближение Апофиса с Землей, минимальные расстояния (млн км), соударение в 2068 г.

Дата сближения	13.04.2051	15.09.2060	2068
Минимальное расстояние (млн км)	0.763	5.29	0.000185

Таблица 14. Сближение Апофиса с Землей, минимальные расстояния (млн км), соударение в 2076 г.

Дата сближения	13.04.2051	12.04.2059	13.09.2068	2076
Минимальное расстояние (млн км)	1.23	2.12	6.78	0.000724

Таблица 15. Избранные соударения астероида Апофис с Землей, положения и размеры щелей; необходимый для увода от соударения импульс скорости в 2035 г.

N	Дата	Da (10^3 км)	R_{51} (10^6 км)	da , м	dR_{51} , км	$\Delta V \times 10^{-12}$ (а. е./сут.)
1	2075	43.1	1.805	30.	3.7	0.93
2	2064	42.4	1.767	15.	2.0	0.50
3	2056	15.8	0.179	60.	9.8	2.4
4*	2060	15.0	0.129	21.	3.1	0.75
5	2055	14.4	0.093	12.	2.2	0.50
6	2074	10.3	0.134	21.	2.7	0.66
7	2066	9.49	0.183	18.	2.6	0.64
8*	2065	9.23	0.198	45.	5.6	1.4
9*	2078	9.06	0.209	45.	5.8	1.4
10*	2091	8.88	0.219	9.0	1.2	0.30
11*	2077	0.28	0.745	42.	5.6	1.35
12*	2068	0.00	0.763	1500	210.	50
13*	2076	-7.51	1.225	150	21.	5.0

2012). Подчеркнем, что рассматриваемая ситуация для возможных траекторий конкретного астероида и для траекторий семейства “виртуальных” астероидов (как например в работе (Loucks и др., 2017)) с точки зрения сближений, предшествующих соударениям, существенно другая.

Любопытно сегодня вспомнить работу (Елькин, Соколов, 1995), в которой высказано аналогичное утверждение о наличии сближений, предшествующих соударениям, и сделана попытка его обоснования примитивными средствами. В этой работе сближения, предшествующие соударениям, рассматривались с точки зрения заблаговременного обнаружения опасных астероидов.

ИЗМЕНЕНИЯ СКОРОСТИ АСТЕРОИДА, НЕОБХОДИМЫЕ ДЛЯ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ СОУДАРЕНИЙ

В табл. 15 приведены характеристики рассматриваемых избранных 13 основных соударений. Эта таблица является расширенным вариантом табл. 2 из нашей работы (Соколов и др., 2018).

Величина Da (10^3 км) есть разность оскулирующей (01.05.2035) большой полуоси, ведущей к данному соударению, и оскулирующей большой полуоси, ведущей к “основному” соударению в 2068 г. в тыс. км. Эта величина характеризует положение данной щели. Величина da (м) есть максимальная разность оскулирующих на тот же момент больших полуосей, для траекторий, ведущих к данному соударению в м. Эта величина характеризует размер данной щели. Дополнительно приведены положения R_{51} (10^6 км) и размеры dR_{51} (км) ведущих к соударениям щелей, определенные нами по минимальному геоцентрическому расстоянию при сближении с Землей в 2051 г. (как в нашей работе (Соколов и др., 2012) по минимальному геоцентрическому расстоянию при сближении с Землей в 2036 г.). Именно, R_{51} (10^6 км) есть минимальное геоцентрическое расстояние в 2051 г. для траекторий, ведущих к данному соударению в млн. км; dR_{51} (км) – максимальная разность минимальных геоцентрических расстояний для траекторий, ведущих к данному соударению. В последнем столбце приведено полученное нами приращение модуля скорости $\Delta V \times 10^{-12}$ (а. е./сут.)

по ее направлению в момент 01.05.2035, необходимое для того, чтобы минимальное геоцентрическое расстояние в соответствующий момент превосходило 10^4 км, т.е. не было соударения. Обращает на себя внимание близость к прямой пропорциональности трех последних столбцов. Причина в том, что приведенные в них числа фактически характеризуют одну и ту же величину — размер ведущих к соударениям щелей, хотя в разных переменных и в разные моменты времени. Отсюда прямо пропорциональная зависимость. Размер щели, ведущей к соударению, можно приближенно характеризовать, во-первых, диапазоном значений оскулирующей большой полуоси в некоторый момент (в данном случае 01.05.2035). Второй способ оценки использует диапазон минимальных геоцентрических расстояний при сближении с Землей (в данном случае в 2051 г.) для траекторий, ведущих к данному соударению. Третий способ оценки использует величину приращения скорости в некоторый момент (в данном случае 01.05.2035), необходимой для увода от соударения. При этом предполагается, что астероид без приращения скорости достигает минимального возможного для данного соударения геоцентрического расстояния.

Таким образом, чтобы увести Апофис от самого опасного соударения в 2068 г., достаточно изменить его скорость в 2035 г. на 0.087 мм/с. Приведенные в нашей работе (Соколов и др., 2018) оценки показывают, что такого изменения скорости можно достичь, если использовать ударник массой всего в три раза больший, чем в эксперименте с астероидом Дидим, о котором мы говорили выше. Таким образом, получаем ударник массой одна тонна, что в принципе соответствует возможностям современной космической техники. Мы пользовались упрощающим предположением о том, что орбита Апофиса в момент воздействия на него известна точно. Сравнительно малые величины нужного изменения скорости получились в частности благодаря эффекту гравитационного маневра при сближениях, в основном в 2051 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На примере основных возможных в настоящее время соударений с Землей астероида Апофис показано, что соответствующие траектории содержат более тесные сближения с Землей, чем, например, его номинальная траектория. Это важное свойство отмечалось нами ранее для других астероидов. Диапазоны минимальных геоцентрических расстояний в 2051 г. для траекторий, ведущих к каждому соударению, характеризуют размеры соответствующих щелей, также, как и диапазоны больших полуосей в некоторый момент, и также как необходимые для увода от соударения изменения скорости астероида в тот же

момент. Эти величины приблизительно пропорциональны друг другу, что позволяет оценить необходимое изменение скорости, если известны размеры щели по большой полуоси. Для рассмотренных 13 основных соударений необходимые изменения скорости в 2035 г. были вычислены и установлена указанная приближенная зависимость. Оценки изменения скорости были получены при упрощающем предположении о точном знании орбиты астероида. Таким образом, заблаговременно увести от соударения с Землей астероид средних размеров в принципе можно с учетом возможностей современной техники.

Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант 18-12-00050). При выполнении настоящей работы использовался компьютерный кластер Вычислительного центра Ресурсного центра Научного парка Санкт-Петербургского государственного университета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Акимов В.А., Глазачев В.О., Емельяненко В.В., Краминцев А.П., Нароенков С.А., Попова О.П., Пучков В.А., Рыхлова Л.В., Савельев М.И., Светцов В.В., Трубецкая И.А., Шувалов В.В., Шугаров А.С., Шустов Б.М. Астероидно-кометная опасность: стратегия противодействия. М.: Всеросс. научно-исслед. ин-т по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России, 2015. 272 с.
- Артемова Н.А., Баканас Е.С., Барабанов С.И., Витязев А.В., Волков В.А., Глазачев В.О., Дегтярь В.Г., Емельяненко В.В., Иванов Б.А., Кочетова О.М., Куликова Н.В., Медведев Ю.Д., Нароенков С.А., Немчинов И.В., Печерникова Г.В., Поль В.Г., Попова О.П., Рыхлова Л.В., Светцов В.В., Симонов А.В., Соколов Л.Л., Тиммербаев Р.М., Чернетенко Ю.А., Шор В.А., Шувалов В.В., Шустов Б.М. Астероидная опасность: вчера, сегодня, завтра. М.: Физматлит, 2013. 384 с.
- Ракетная концепция системы противоастероидной защиты Земли. М.: Машиностроение, 2013.
- Дегтярь В.Г., Волков В.А. Ракетная концепция системы противоастероидной защиты Земли. М.: Машиностроение, 2013.
- Елькин А.В., Соколов Л.Л. О последовательных прохождениях АСЗ вблизи Земли // Всеросс. Конф. с международным участием "Астероидная опасность — 95, 23–25 мая 1995 года. Тез. докл. Т. 2. С. 41. Санкт-Петербург: Институт теоретической астрономии РАН, Международный ин-т проблем астероидной опасности, 1995.
- Ивашкин В.В., Стихно К.А. О проблеме коррекции орбиты сближающегося с Землей астероида (99942) Apophis // Докл. РАН. Механика. 2008. Т. 419. № 5. С. 624–627.
- Ивашкин В.В., Стихно К.А. О применении гравитационного воздействия на астероид Apophis для коррекции его орбиты // Докл. РАН. Механика. 2009(а). Т. 424. № 5. С. 621–626.

- Ивашкин В.В., Стихно К.А.* О предотвращении возможного столкновения астероида Апофис с Землей // *Астрон. вестн.* 2009(6). Т. 43. № 6. С. 502–516. (Sol. Syst. Res. 2009. V. 43. № 6. P. 483–496).
- Ивашкин В.В., Стихно К.А., Гуо П. (Guo Peng)* О структуре множества вероятных траекторий соударения астероида Апофис с Землей в 2036 г. // *Докл. РАН. Механика.* 2017. Т. 475. № 4. С. 389–394.
- Ледков А.А., Эйсмонт Н.А., Боярский М.Н., Федяев К.С., Назиров Р.Р.* Управление движением околоземных астероидов // *Письма в Астрон. журн.* 2015. Т. 41. № 1–2. С. 72–89.
- Петров Н.А., Васильев А.А., Кутеева Г.А., Соколов Л.Л.* О траекториях соударения астероидов 2015 RN35 и Апофис с Землей // *Астрон. вестн.* 2018. Т. 52. № 4. С. 330–342. (Sol. Syst. Res. 2018. V. 52. № 4. P. 326–337).
- Соколов Л.Л., Башаков А.А., Питьев Н.П.* Особенности движения астероида 99942 Apophis // *Астрон. вестн.* 2008. Т. 42. № 1. С. 20–29. (Sol. Syst. Res. 2008. V. 42. № 1. P. 18–27).
- 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 // *Астрон. вестн.* 2012. Т. 46. № 4. С. 311–320. (Sol. Syst. Res. 2012. V. 46. № 4. P. 291–300).
- Соколов Л.Л., Борисова Т.П., Васильев А.А., Петров Н.А.* Свойства траекторий соударения астероидов с Землей // *Астрон. вестн.* 2013. Т. 47. № 5. С. 441–447. (Sol. Syst. Res. 2013. V. 47. № 5. P. 408–413).
- Соколов Л.Л., Кутеева Г.А.* Возможные соударения астероида Апофис после уточнения его орбиты // *Вестн. Санкт-Петербургского университета.* 2015. Сер. 1. Т. 2(60). Вып. 1. С. 148–156.
- Соколов Л.Л., Петров Н.А., Васильев А.А., Кутеева Г.А., Шмыров А.С., Эскин Б.Б.* О возможности увода Апофиса от соударений с Землей с использованием кинетического метода // *Астрон. вестн.* 2018. Т. 52. № 4. С. 343–350. (Sol. Syst. Res. 2018. V. 52. № 4. P. 338–346).
- Соколов Л.Л., Петров Н.А., Эскин Б.Б., Кутеева Г.А.* Сближения с Землей опасных астероидов // *XLIII Академические чтения по космонавтике, 29 января–1 февраля 2019 г. Сб. тезисов.* Т. 1. С. 120–121. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019.
- Шор В.А., Чернетенко Ю.А., Кочетова О.М., Железнов Н.Б.* О влиянии эффекта Ярковского на орбиту Апофиса // *Астрон. вестн.* 2012. Т. 46. № 2. С. 131–142. (Sol. Syst. Res. 2012. V. 46. № 2. P. 119–129).
- Шустов Б.М., Рыхлова Л.В., Кулешов Ю.П., Дубов Ю.Н., Елкин К.С., Вениаминов С.С., Боровин Г.К., Молотов И.Е., Нароенков С.А., Барабанов С.И., Емельяненко В.В., Девяткин А.В., Медведев Ю.Д., Шор В.А., Холшевников К.В.* Концепция системы противодействия космическим угрозам: астрономические аспекты // *Астрон. вестн.* 2013. Т. 47. № 4. С. 327–340. (Sol. Syst. Res. 2013. V. 47. № 4. P. 302–314).
- 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 // *Астрон. вестн.* 2013. Т. 47. № 4. С. 352–360. (Sol. Syst. Res. 2013. V. 47. № 4. P. 325–333).
- Aleksandrova A.G., Galushina T.Yu., Prishchepenko A.B., Kholshchevnikov K.V., Chechettkin V.M.* The preventive destruction of a hazardous asteroid // *Astron. Reports.* 2016. V. 60. № 6. P. 613–621.
- Chesley S.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. 215–228.
- Chesley S.R.* Asteroid Impact Hazard Assessment With Yarkovsky Effect // 2011 IAA Planet. Defense Conf.: From Threat to Action 9–12 May 2011, Bucharest, Romania.
- Everhart E.* Implicit single-sequence methods for integrating orbits // *Celest. Mech.* 1974. V. 10. P. 35–55.
- Farnocchia D., Chesley R.S., Chodas P.W. et al.* Yarkovsky-driven impact risk analysis for asteroid (99942) Apophis // arXiv:1301.1607v2 [astro-ph.EP] 19 Feb 2013.
- Folkner W.M., Williams J.G., Boggs D.H., Park R.S., Kuchynka P.* The Planetary and Lunar Ephemeris DE430 and DE431 // *JPL Interplanet. Network Progress Report.* 2014. V. 42–196. P. 1–81.
- Loucks M.E., Carrico J.P., Lu E.T., Clark R.* Chapman Asteroid Deflection Requirements as a Function of Warning Time Presented at “Asteroids, Comets, Meteors 2017”, Montevideo, Uruguay, April 10–14 2017.
- Standish E.M.* JPL Planetary and Lunar ephemerides, DE405/LE405 / Interoffice Memorandum, 1998. 312. F-98-048. 18 p.
- Wie B., Zimmerman B., Llyzhoft J., Vardaxis G.* Planetary defense mission concepts for disrupting/pulverizing hazardous asteroids with a short warning time // *Astrodynamics.* 2017. V. 1. № 1. P. 3–21. <https://doi.org/10.1007/s42064-017-0002-9>.
- Yeomans D.K., Bhaskaran S., Broschart S.B., Chesley S.R., Chodas P.W., Swweetsier T.H., Schweickart R.* Deflecting a Hazardous Near-Earth Object 1 IAA Planetary Defense Conference: Protecting Earth from Asteroids, 27–30 April 2009, Granada, Spain. 14 p.