

АСТРОНОМИЯ

УДК 521.14

MSC 70F15

**Ретроспективный анализ орбит
сталкивающихся с Землей астероидов****К. С. Холшевников, И. А. Баляев, Л. Л. Соколов, Б. Б. Эскин*Санкт-Петербургский государственный университет,
Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9

Для цитирования: Холшевников К. С., Баляев И. А., Соколов Л. Л., Эскин Б. Б. Ретроспективный анализ орбит сталкивающихся с Землей астероидов // Вестник Санкт-Петербургского университета. Математика. Механика. Астрономия. 2021. Т. 8 (66). Вып. 3. С. 523–532. <https://doi.org/10.21638/spbu01.2021.313>

В настоящей работе рассматриваются траектории реальных и модельных астероидов, ведущие к соударениям с Землей. На них выделяются предварающие соударения тесные сближения с Землей. Наличие таких сближений позволяет заблаговременно обнаружить опасный объект, уточнить его орбиту, а также использовать эффект гравитационного маневра для экономного предотвращения соударения астероида с Землей. В статье рассмотрены различные семейства траекторий соударения: возможные траектории реальных опасных астероидов, а также модельные траектории, не привязанные к конкретному объекту. Показано, что в первом случае сближений, предварающих соударение, заметно больше.

Ключевые слова: астероидная опасность, траектории, соударения, сближения.

1. Введение. Предпосылкой для данной работы является доклад А. В. Елькина и Л. Л. Соколова, представленный на международной конференции «Астероидная опасность — 95» в мае 1995 г. в Санкт-Петербурге [1]. В этом докладе фигурирует утверждение о том, что астероиды, сталкивающиеся с Землей, обычно имеют до этого как минимум одно тесное сближение с ней в обозримом прошлом. Для обоснования этого утверждения проводилось численное моделирование, при этом астероид

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 19-32-90149) и с использованием оборудования ресурсного центра Научного парка СПбГУ «Вычислительный центр».

© Санкт-Петербургский государственный университет, 2021

двигался по кеплеровой орбите. С другой стороны, приведенное утверждение можно считать справедливым из самых общих математических соображений, связанных с эргодической теорией, теоремой о возвращении и т. п. С практической точки зрения, связанной с проблемой обеспечения астероидно-кометной безопасности, важны конкретные значения понятий «тесное сближение», «обозримое прошлое», «обычно». Тесные сближения, предшествующие соударению, позволяют заблаговременно обнаружить опасный объект, в том числе ранее потерянный, уточнить его орбиту и предсказать опасные сценарии для его будущих возможных траекторий. Кроме того, тесные сближения, предшествующие соударениям, предоставляют потенциальную возможность использования эффекта гравитационного маневра для энергетически экономного целесообразного изменения его орбиты, в частности, увода астероида от соударения с Землей. В связи с этим рассматриваемый вопрос представляет несомненный интерес.

Уточним терминологию. Смысл понятия «траектория соударения» очевиден: на этой траектории существуют точки с геоцентрическим расстоянием, меньшим радиуса Земли. Но и здесь возможны нюансы, требующие уточнения. Нам встречались ситуации, когда минимальное геоцентрическое расстояние получалось равным 6450 км. Будет естественным в таких редких случаях взять несколько увеличенный радиус Земли с учетом атмосферы. В настоящей статье этого делать не понадобилось. Астероид сталкивается с Землей, если все его возможные траектории являются траекториями соударения. Понятие сближения можно формализовать как наличие минимума геоцентрического расстояния, большего радиуса Земли, на возможной траектории астероида при условии, что этот минимум не слишком велик. Понятие тесного сближения требует уточнения в зависимости от рассматриваемой задачи. Так, установленное сближение Апофиса с Землей в 2029 г. на расстояние 38 тыс. км позволяет экономить 4–5 порядков в величине импульса скорости, необходимой для предотвращения последующих соударений (если скорость астероида изменить до 2029 г.). Это, несомненно, тесное сближение. Такой же эффект гравитационного маневра может составлять 1–3 десятичных порядка, если имело место сближение на расстоянии 2–0.2 млн км [5]. Чтобы подчеркнуть важность экономии скорости, можно и такие сближения называть тесными. В конце 2020 г. и начале 2021 г. начались новые наблюдения знаменитого астероида Апофис. Минимальное геоцентрическое расстояние было достигнуто в марте этого года, оно составило около 14 млн км. Однако это сближение уже позволило провести высокоточные радиолокационные наблюдения, что привело к существенному уточнению орбиты Апофиса. В результате этот астероид стал безопасным; соответствующее изменение на сайте НАСА было произведено 26 марта сего года. Мы обычно считаем сближение тесным, если расстояние составляет меньше 100 тыс. км, иногда — меньше 10 млн км.

Чтобы уточнить приведенное выше утверждение о том, что соударениям обычно предшествуют сближения, в настоящей работе проведено численное моделирование движения различных семейств сталкивающихся с Землей астероидов. Результаты этого моделирования сравниваются с аналогичными результатами, полученными в других работах.

2. Интегрирование в прошлое: модель движения. Введем две системы отсчета: \mathcal{O} с центром в центре Солнца O и осями X, Y, Z , параллельными осям инерциальной системы ICRF для эпохи $t_0 =$ январь 1.2000; \mathcal{O}_1 с центром в центре масс Земли T и осями x, y, z , параллельными осям системы \mathcal{O} .

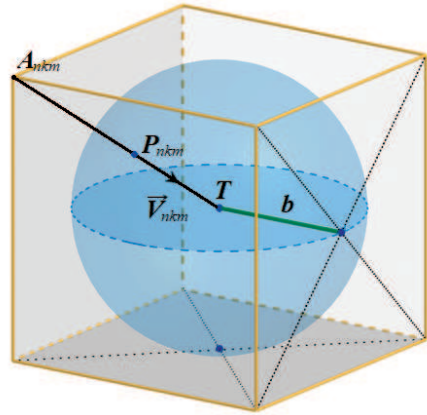


Рис. 1. Схематичное расположение начального положения астероида, участвующего в моделировании, и направления вектора начальной скорости.

Пусть K — поверхность куба с центром в точке T и ребрами длиной $2b$, параллельными осям O_1 . Расположим точки A_{nkm} , где n, k, m — целые числа, $m = 1, \dots, 6$, $n, k = 1, 2, \dots, 12$, на K , так, чтобы выполнялись равенства

$$m = 1 \Rightarrow x = -b,$$

$$m = 2 \Rightarrow x = b,$$

$$m = 3 \Rightarrow y = -b,$$

$$m = 4 \Rightarrow y = b,$$

$$m = 5 \Rightarrow z = -b,$$

$$m = 6 \Rightarrow z = b,$$

где b имеет значение 500 тыс. км, а n и k выбраны так, что точки образуют равномерную прямоугольную сетку на каждой грани. Всего мы имеем $12 \cdot 12 \cdot 6 = 864$ точки A_{nkm} .

Точки P_{nkm} , являющиеся радиальными проекциями точек A_{nkm} на поверхность сферы S , вписанной в куб K , примем за начальные положения модельных астероидов на момент t_0 . Начальные геоцентрические скорости равны V_{nkm} и направлены в точку T вдоль единичных векторов $\frac{P_{nkm}T}{b}$ (см. рис. 1).

Произведем численное интегрирование уравнений движения модельных астероидов от эпохи t_0 на временной интервал 100 лет назад. Предполагается, что астероиду сообщаются следующие ускорения:

1) ускорение, вызванное притяжением Солнца, по модулю определяемое как

$$w_0 = \frac{Gm_0}{r^2}, \quad r = |OQ_{nkm}|; \quad (1)$$

2) ускорения, вызванные притяжением восьми планет от Меркурия до Нептуна: ускорение от планеты с индексом p по модулю определяется как

$$w_p = \frac{Gm_p}{r_p^2}, \quad r_p = |O_p Q_{nkm}|, \quad (2)$$

где O_p — точка, совпадающая с центром масс соответствующей планеты, а Q_{nkm} — текущее положение модельного астероида.

Здесь, как обычно, G — гравитационная постоянная, m_0 — масса Солнца, m_p , $p = 1, 2, \dots, 8$, — массы восьми планет от Меркурия до Нептуна.

Планеты считаются движущимися по кеплеровым окружностям радиусов a_p с сидерическими периодами обращения P_p . Для каждой планеты элементы орбиты a_p (большая полуось), λ_p (средняя долгота), P_p (период обращения), i_p (наклон к эклиптике), Ω_p (долгота восходящего узла), GM_p (гравитационная постоянная планеты) взяты с сайта Государственного астрономического института имени П. К. Штернберга МГУ [3, 4] на момент 01.01.2000 00:00 и приведены в таблице.

Элементы орбит планет

p	a_p (а. е.)	λ_p (град.)	i_p (град.)	Ω_p (град.)	P_p (сут.)	GM_p (км ³ /сек ²)
1	0.3870983098	252.25090552	7.00498625	48.33089304	87.96843362	22032.08
2	0.7233298200	181.97980085	3.39466189	76.67992019	224.6954354	324858.60
3	1.0000010178	100.46645683	0.13054803	174.87317577	365.24218985	398600.44
4	1.5236793419	355.43299958	1.84972648	49.55809321	686.92970957	42828.314
5	5.2026032092	34.35151874	1.30326698	100.46440702	4330.5957654	126686537
6	9.5549091915	50.07744430	2.48887878	113.66550252	10746.940442	37931200
7	19.2184460618	314.05500511	0.77319689	74.00595701	30588.740354	5793939.3
8	30.1103868694	304.34866548	1.76995259	131.78405702	59799.900456	6835107

Численное интегрирование проводится методом Рунге — Кутты четвертого порядка с шагом в 10 минут. Фактором окончания процесса интегрирования является факт сближения с Землей астероида менее чем на 0.01 а. е. или окончание временного интервала интегрирования. Для контроля ошибок для модельного астероида на момент окончания интегрирования проводится обратный процесс интегрирования до момента t_0 и производится проверка попадания модельного астероида в окрестность 0.001 а. е. от начального положения. Под фактом тесного сближения здесь понимается приближение астероида к Земле на расстояние, меньшее чем 0.05 а. е.; также рассмотрен случай сближений на 0.01 а. е.

3. Интегрирование в прошлое: зависимость числа сближений от скорости астероидов. В соответствии с работой [5] наиболее вероятные начальные скорости астероидов лежат в диапазоне от 3 до 30 км/с. На первом этапе возьмем значения начальной скорости V_{nkm} от 3 до 30 км/с с шагом 3 км/с. Для каждого значения начальной скорости рассмотрим семейство из 864 модельных астероидов с начальными положениями в точках P_{nkm} .

Точки P_{nkm} являются радиальными проекциями на сферу S_{nkm} точек A_{nkm} , расположенных следующим образом:

$$m = 1 \Rightarrow A_{nkm} = \left(-b; b - \frac{2}{13}n; b - \frac{2}{13}k \right),$$

$$m = 2 \Rightarrow A_{nkm} = \left(b; b - \frac{2}{13}n; b - \frac{2}{13}k \right),$$

$$m = 3 \Rightarrow A_{nkm} = \left(b - \frac{2}{13}n; -b; b - \frac{2}{13}k \right),$$

$$m = 4 \Rightarrow A_{nkm} = \left(b - \frac{2}{13}n; b; b - \frac{2}{13}k \right),$$

$$m = 5 \Rightarrow A_{nkm} = \left(b - \frac{2}{13}n; b - \frac{2}{13}k; -b \right),$$

$$m = 6 \Rightarrow A_{nkm} = \left(b - \frac{2}{13}n; b - \frac{2}{13}k; b \right).$$

Для каждого модельного астероида произведем поиск тесных сближений на временном интервале предыдущих ста лет. Для каждого семейства модельных астероидов с одинаковыми по модулю начальными скоростями рассчитаем процент астероидов, имевших тесные сближения с Землей за интервал интегрирования, от общего количества астероидов в семействе.

На рис. 2 представлена зависимость доли астероидов с зафиксированным сближением (от общего количества астероидов, участвующих в моделировании) на указанное расстояние от значения их начальной геоцентрической скорости.

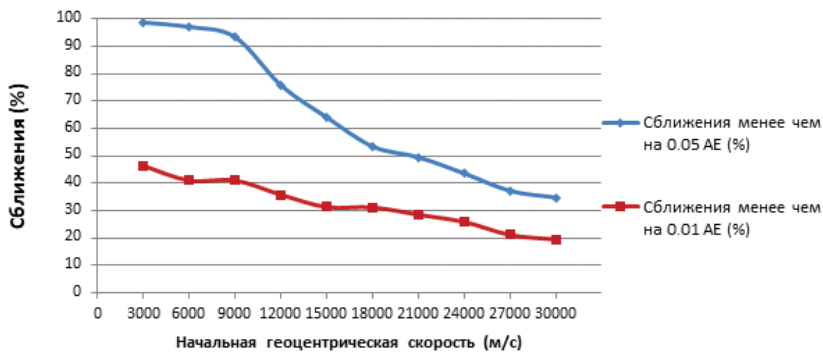


Рис. 2. Зависимость доли астероидов с зафиксированным сближением на указанное расстояние от значения их начальной геоцентрической скорости.

Данная модель включает в себя как астероиды с замкнутой эллиптической, так и с гиперболической орбитами. Последние не имеют ни одного тесного сближения, предшествующего соударению. С целью отбраковки таких астероидов в процессе интегрирования на расстоянии в 10 млн км от Земли была произведена оценка параметров орбиты. Астероиды, имеющие гиперболическую орбиту, были исключены из моделирования, так как в условиях поставленной задачи тела, прибывшие в Солнечную систему извне, не учитываются. После исключения гиперболических орбит диаграмма принимает вид, представленный на рис. 3.

4. Интегрирование в прошлое: среднее по скорости число сближений.

На следующем этапе исследования примем во внимание распределение астероидов по начальным скоростям. Это распределение, его свойства, характеристики и особенности, в частности для сближающихся с Землей астероидов, были рассмотрены в работе [5], результаты которой мы используем в настоящей статье.

Считаем, что модуль скорости V подчинен распределению Максвелла [5]. Пусть $V = ax$. Значение $a \approx 17$ км/с уточним позже. Плотность вероятности случайной величины x и функция распределения даются формулами

$$f(x) = Ax^2 e^{-x^2}, \quad A = \frac{4}{\sqrt{\pi}}, \quad 0 \leq x < \infty, \quad (3)$$

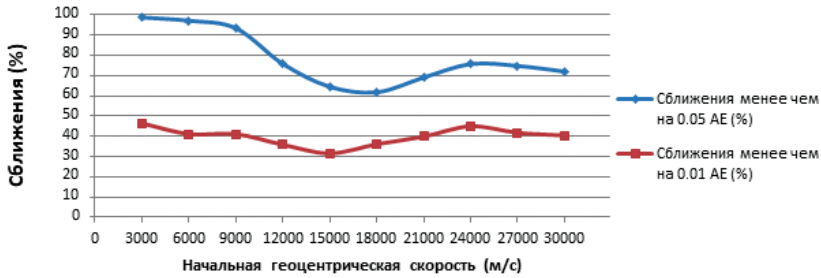


Рис. 3. Зависимость доли астероидов с зафиксированным сближением на указанное расстояние от значения их начальной геоцентрической скорости после исключения гиперболических орбит.

$$F(x) = A \int_0^x t^2 e^{-t^2} dt = 1 - \frac{A}{2} x e^{-x^2} - \frac{A}{2} \int_x^\infty e^{-t^2} dt. \quad (4)$$

Моменты

$$M_k = \int_0^\infty x^k f(x) dx, \quad (5)$$

где k — порядковый номер момента, при $k \geq 0$ существуют и определяются как

$$M_0 = 1, \quad M_1 = \frac{2}{\sqrt{\pi}}, \quad M_k = \frac{1+k}{2} M_{k-2}, \quad (6)$$

так что

$$M_2 = \frac{3}{2}, \quad M_3 = \frac{4}{\sqrt{\pi}}, \dots \quad (7)$$

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} = \sqrt{M_2 - M_1^2} = \sqrt{\frac{3}{2} - \frac{4}{\pi}}, \quad (8)$$

где σ — среднеквадратическое отклонение случайной величины x .

Функция f имеет единственный максимум при $x = x_0 = 1$ и две точки перегиба

$$x_1^2 = \frac{5 - \sqrt{17}}{4}, \quad x_2^2 = \frac{5 + \sqrt{17}}{4}. \quad (9)$$

Отсюда получаем

$$x_1 = 0.4682, \quad x_2 = 1.5109. \quad (10)$$

Отбросим «хвосты» распределения. Для этого найдем точки x_* и x^* , такие что $F(x_*) = 0.01$, $F(x^*) = 0.99$. Прямое вычисление дает

$$x_* = 0.236, \quad x^* = 2.4. \quad (11)$$

Левый промежуток $[0, x_*]$ отброшен, так как в нем есть геоцентрические эллипсы, а правый $[x^*, \infty)$ содержит нереалистично большие скорости.

В [5] вычислено значение параметра a на бесконечности (a_∞) для $V_\infty = a_\infty x$. Интеграл энергии для гиперболы запишем в виде

$$\frac{V^2}{2} - \frac{\varkappa^2}{r} = \frac{V_\infty^2}{2} \Rightarrow V^2 = V_\infty^2 \left(1 + \frac{2\varkappa^2}{rV_\infty} \right), \quad (12)$$

где r — расстояние до притягивающего центра, а V_∞ — гиперболическая избыточная скорость. Там же показано, что $a = \frac{V}{M_1}$, так что

$$a = a_\infty \sqrt{1 + \frac{2\varkappa^2}{rM_1^2 a_\infty^2}} = 16.78. \quad (13)$$

Введем генератор случайных чисел, распределенных по вышеизложенному закону. Для этого возьмем значение p , полученное стандартным генератором случайных чисел с равномерным распределением на интервале $[F(x_*), F(x^*)]$, и найдем x такой, что $F(x) = p$. Как и на предыдущем этапе, возьмем 864 модельных астероида, расположенных в точках P_{nkm} . Но начальные скорости теперь будем задавать, используя вышеописанный генератор случайных чисел:

$$V_{nkm} = x_p a, \quad (14)$$

где x_p — результат работы генератора.

Произведем поиск тесных сближений для каждого астероида за предшествующие 100 лет по ранее описанному алгоритму. Для накопления статистических данных выполним построение семейства начальных положений и последующий поиск тесных сближений за предшествующие 100 лет 10 раз, используя в качестве модулей начальных скоростей различные результаты работы вышеописанного генератора случайных чисел.

На основе полученной информации подсчитаем процент тесных сближений для 8640 модельных астероидов. Процент астероидов, имеющих сближение менее чем на 0.05 а. е., равен 60, менее чем на 0.01 а. е. — 31.

В данном случае также имеет смысл произвести исключение гиперболических орбит, используя только такие V_{nkm} , при которых орбита будет являться гелиоцентрическим эллипсом. Тогда процент тесных сближений будет равен 74 и 39 соответственно.

Таким образом, можно сказать, что «в среднем» около 3/4 сталкивающихся с Землей модельных астероидов подходили к Земле в течение предыдущих 100 лет ближе, чем на 0.05 а. е.; а около 2/5 — ближе, чем на 0.01 а. е.

5. Интегрирование в будущее: выделение соударений и предшествующих сближений. Рассмотрим альтернативный подход к решению рассматриваемой в настоящей статье задачи. Выберем исходную кеплерову орбиту астероида (модельного или реального астероида, сближающегося с Землей), рассмотрим множество в том или ином смысле близких траекторий и выделим среди них траектории, ведущие в будущем к соударению. На этих траекториях соударения найдем предшествующие тесные сближения, если они есть.

В настоящей статье мы представляем результаты такого подхода для семейства модельных астероидов, выбранного следующим образом. Рассмотрим область эксцентриситетов от 0.0 до 0.8, перигелиев от 0.3 до 1.3 а. е., наклонов от 0 до 15 градусов. Эта область содержит большинство опасных астероидов, сближающихся с

Землей. В ней берем 10 равноотстоящих значений эксцентриситета, 10 равноотстоящих значений перигелийного расстояния и 5 равноотстоящих значений наклона. Для каждой из 500 получившихся комбинаций эксцентриситета, перигелийного расстояния и наклона вычисляем начальные данные 10^5 астероидов со случайными значениями трех оставшихся угловых переменных. Движение каждого из полученных $5 \cdot 10^7$ модельных астероидов численно прогнозируется на 200 лет в будущее, находятся сближения и соударения с Землей, Луной и планетами. Используется разработанная И. А. Баляевым модификация интегратора Эверхарта [6], значительно увеличившая быстродействие за счет использования однотипности проводимых вычислений. Учитываются только гравитационные возмущения в движении астероидов, используется модель движения планет DE430.

Приведем некоторые результаты численного интегрирования $5 \cdot 10^7$ модельных астероидов, имеющие отношение к рассматриваемому в настоящей статье вопросу. Всего было найдено 868 траекторий соударения, из них 147 — с Землей, 2 — с Луной, 81 — с Венерой, 14 — с Меркурием, 6 — с Марсом, 616 — с Юпитером, 2 — с Сатурном. Из них были выделены соударения, происходящие более чем через 100 лет после начала интегрирования. Для Земли таких оказалось 72; из них 20 имели предварительные сближения с Землей на расстояние до 0.01 а. е., 70 — на расстояние до 0.05 а. е. Для 5 из 72 соударений предвещающее сближение имеет место за 358–365 суток до соударения, т. е. соударение происходит с резонансной 1/1 орбиты, имеет место «резонансный возврат». Для Венеры было выделено 33 соударения, проходящие через 100 и более лет после начала интегрирования; все они имели предварительные сближения на расстояние до 0.05 а. е., а 18 — на расстояние до 0.01 а. е. С Юпитером более чем через 100 лет происходит 327 соударений, и только в 28 случаях имеются предвещающие их сближения на расстояние до 0.05 а. е.

6. Сравнение с результатами других исследований. В работе [7] семейство модельных астероидов, имеющих соударения с Землей, строилось с использованием интегрирования в прошлое способом, похожим на наш. Именно, были взяты 10^4 виртуальных астероидов, имеющих соударения с Землей. Взяты их начальные данные за 30 дней до соударения и построены траектории с помощью численного интегрирования в прошлое. В основном авторы работы [7] интересовались величиной изменения скорости астероида, необходимой для предотвращения соударения, и ее зависимостью от времени до соударения. Сближения на расстояние ближе радиуса Хилла (0.01 а. е.) имели место за 30 лет в 518 случаях из 10000, т. е. примерно в 5 процентах случаев, что позволяет уменьшить потребное для увода от соударения астероида с Землей изменение его скорости примерно на два десятичных порядка.

В работе [2] тот же вопрос исследовался с использованием интегрирования в будущее. Брался реальный опасный астероид, определялся наиболее полный список его возможных (исходя из точности орбиты) соударений с Землей, на полученных траекториях соударения искались предвещающие их сближения. Оказалось, что при таком (в некотором смысле более естественном) подходе сближений перед соударениями заметно больше. В частности, сближения на орбитах соударения обычно более тесные, чем на номинальной орбите. Например, для астероида 2008 EX₅ на кафедре небесной механики СПбГУ было найдено 56 возможных соударений с Землей в текущем столетии [2]. Из них 9 имели перед соударениями сближения на расстояние менее 0.1 млн км, 21 — от 0.1 до 0.5 млн км, 11 — от 0.5 до 1.0 млн км, 15 — от 1.0

до 3.0 млн км. Номинальная орбита этого астероида не имела в текущем столетии сближений теснее, чем 3.0 млн км.

В «исходной» работе [1] сформулировано утверждение о том, что опасный астероид обычно появляется в окрестности Земли радиуса 0.1 а. е. за несколько (1–30) лет до соударения с ней. Можно сказать, что если рассматриваются возможные соударения конкретного астероида в будущем, то это утверждение недалеко от истины.

7. Заключение. Подводя общие итоги, можно сделать вывод о том, что тенденция наличия тесных сближений астероидов с Землей перед соударением с ней несомненно имеет место. Получаемые оценки числовых характеристик этого явления таковы, что его можно использовать как для экономного увода астероидов от соударения с Землей, так и для обнаружения опасных объектов. Несомненно, вопрос нуждается в дальнейших исследованиях. Это важно еще и потому, что наблюдается неустойчивость результатов (числа предваряющих сближений) по отношению к выбранному для исследования множеству траекторий соударения. Особенно важно проводить эти исследования для конкретных опасных астероидов.

Литература

1. Елькин А. В., Соколов Л. Л. О последовательных прохождении АСЗ в окрестностях Земли. *Международная конференция «Астероидная опасность — 95»*, 23–25 мая 1995 г., Санкт-Петербург. Т. 2, 41 (1995).
2. Sokolov L., Kuteeva G., Petrov N., Eskin B. Hazardous near-Earth asteroids approach. *AIP Conference Proceedings* **2171**, 13019 (2019). <https://doi.org/10.1063/1.5133286>
3. Орбитальные параметры планет. Доступно на: www.sai.msu.ru/neb/rw/natsat/plaorbw.htm (дата обращения: 27.05.2021).
4. Физические данные планет. Доступно на: www.sai.msu.ru/neb/rw/natsat/plaphyw.htm (дата обращения: 27.05.2021).
5. Kholshchevnikov K. V., Shor V. A. Velocity distribution of meteoroids in the vicinity of planets and satellites. *Earth, Moon, and Planets* **72**, 419–423 (1996).
6. Баляев И. А. Об ускорении численного интегрирования уравнений движения астероидов. *Астрономический вестник* **54** (6), 567–576 (2020). <https://doi.org/10.31857/S0320930X20330014>
7. Loucks M. E., Carrico J. P., Lu E. T., Chapman C. R. Asteroid Deflection Requirements as a Function of Warning Time. *“Asteroids, Comets, Meteors 2017”*, April 2017, Montevideo, Uruguay (2017).

Статья поступила в редакцию 10 октября 2020 г.;
после доработки 26 октября 2020 г.;
рекомендована в печать 19 марта 2021 г.

Контактная информация:

Холшевников Константин Сергеевич — аспирант; kholshchevnikov@yandex.ru
Баляев Иван Александрович — аспирант; balasteravan@yandex.ru
Соколов Леонид Леонидович — проф.; l.sokolov@spbu.ru
Эскин Борис Борисович — ст. преп.; esk@astro.spbu.ru

Retrospective analysis of the orbits of asteroids colliding with the Earth*

K. S. Kholshchevnikov, I. A. Balyaev, L. L. Sokolov, B. B. Eskin

St. Petersburg State University, 7–9, Universitetskaya nab., St. Petersburg, 199034, Russian Federation

For citation: Kholshchevnikov K. S., Balyaev I. A., Sokolov L. L., Eskin B. B. Retrospective analysis of the orbits of asteroids colliding with the Earth. *Vestnik of Saint Petersburg University. Mathematics. Mechanics. Astronomy*, 2021, vol. 8 (66), issue 3, pp. 523–532.

<https://doi.org/10.21638/spbu01.2021.313> (In Russian)

In this paper, we consider the trajectories of real and model asteroids that lead to collisions with the Earth. They highlight the close approaches to the Earth that precede the impact. The presence of such approaches allows you to detect a dangerous object in advance, clarify its orbit, and also use the effect of a gravitational maneuver to economically prevent an asteroid from hitting the Earth. The article considers various families of collision trajectories: possible trajectories of real dangerous asteroids, as well as model ones trajectories that are not linked to a specific object. It is shown that in the first case, the approaches preceding the collision are noticeably greater.

Keywords: asteroid hazard, trajectories, collisions, approaches.

References

1. Elkin A. V., Sokolov L. L. On successive passes of ASZ in the vicinity of the Earth. *International Conference “Asteroid Hazard — 95”*, May 23–25, 1995, St. Petersburg. Vol. 2, 41 (1995). (In Russian)
2. Sokolov L., Kuteeva G., Petrov N., Eskin B. Hazardous near-Earth asteroids approach. *AIP Conference Proceedings* **2171**, 13019 (2019). <https://doi.org/10.1063/1.5133286>
3. The orbital parameters of the planets. Available at: www.sai.msu.ru/neb/rw/natsat/plaorbw.htm (accessed: May 27, 2021).
4. Physical data of the planets. Available at: www.sai.msu.ru/neb/rw/natsat/plaphyw.htm (accessed: May 27, 2021).
5. Kholshchevnikov K. V., Shor V. A. Velocity distribution of meteoroids in the vicinity of planets and satellites. *Earth, Moon, and Planets* **72**, 419–423 (1996).
6. Balyaev I. A. Acceleration of numerical integration of the equations of motion of asteroids. *Astronomicheskii vestnik* **54** (6), 567–576 (2020). <https://doi.org/10.31857/S0320930X20330014> (In Russian) [Engl. transl.: *Solar System Research* **54** (6), 557–566 (2020). <https://doi.org/10.1134/S0038094620330011>].
7. Loucks M. E., Carrico J. P., Lu E. T., Chapman C. R. Asteroid Deflection Requirements as a Function of Warning Time. *“Asteroids, Comets, Meteors 2017”*, April 2017, Montevideo, Uruguay (2017).

Received: October 10, 2020

Revised: October 26, 2020

Accepted: March 19, 2021

Authors' information:

Konstantin S. Kholshchevnikov — kholshchevnikov@yandex.ru

Ivan A. Balyaev — balasteravan@yandex.ru

Leonid L. Sokolov — l.sokolov@spbu.ru

Boris B. Eskin — esk@astro.spbu.ru

*This work is supported by Russian Foundation for Basic Research (grant No. 19-32-90149) and using the equipment of the resource center of the St. Petersburg State University Science Park “Computing Center”.