

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ  
РОССИЙСКИЙ ФОНД ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
НИИ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ И МЕХАНИКИ ТОМСКОГО УНИВЕРСИТЕТА  
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ  
МЕХАНИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ  
СОВЕТ МОЛОДЫХ УЧЁНЫХ ТГУ

---



## **Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики**

**Международная молодежная научная конференция**

17–19 ноября 2014 г., Томск



Издательство Томского университета  
2015

ствии различного распределения точек, определяющих доверительные области. В первом случае точки распределены по нормальному закону с большей концентрацией возле центра области, во втором – точки равномерно распределены по граничной поверхности.

Подводя итог, необходимо отметить, что по причине большого разброса расчетных оценок вероятности во многих задачах для нас важен лишь сам факт отличия этих оценок от нулевого значения. Оценка, равная нулю либо единице, позволяет однозначно интерпретировать результат, во всех остальных случаях можно говорить лишь о возможности столкновения.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 12-02-00220-а.

#### *Литература*

1. Черницов А.М., Тамаров В.А., Сюсина О.М. Об оценивании вероятности столкновения астероидов с планетами // Изв. вузов. Физика. Приложение. Небесная механика и прикладная астрономия. 2013. № 10/2. С. 126–131.
2. Астероидно-кометная опасность: вчера, сегодня, завтра / под ред. Б.М. Шустова, Л.В. Рыхловой. М.: Физматлит, 2010. 384 с.
3. Баранников Е.А., Сюсина О.М., Черницов А.М., Тамаров В.А. Методы определения граничных точек доверительных областей в задаче исследования движения астероидов // Изв. вузов. Физика. Приложение. Небесная механика и прикладная астрономия. 2013. № 10/2. С. 119–125.

## **РАСЧЕТ СБЛИЖЕНИЙ АСТЕРОИДОВ С ЗЕМЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭФЕМЕРИД DE405, DE432 И EPM2011**

**А.П. Батурин, В.В. Кинзерский**

*Исследуется влияние выбора эфемерид больших планет и Луны, используемых при учете возмущений, на результаты вычисления обстоятельств сближений астероидов с Землей. Моделируется движение астероидов Апофис и 101955 с использованием при учете возмущений эфемерид DE405, DE432 и EPM2011.*

## **COMPUTING OF ASTEROIDS' ENCOUNTERS TO THE EARTH WITH THE EPHEMERIDES DE405, DE432 AND EPM2011**

**A.P. Baturin, V.V. Kinzersky**

*The influence of choice of ephemerides of major planets and the Moon on the results of calculation of encounters of asteroids to the Earth has been investigated. The motion of the asteroid Apophis and 101955 has been simulated calculating the perturbations with the ephemerides DE405, DE432 and EPM2011.*

Задача вычисления сближений астероидов с планетами и, в частности, с Землей является в настоящее время актуальной, поскольку она представляет собой начальный этап в решении проблемы оценивания вероятности столкновения астероидов с Землей. В настоящей работе исследуется влияние выбора эфемерид больших планет и Луны, используемых при учете возмущений, на результаты вычисления обстоятельств сближений астероидов с Землей. При проведении исследования применяются разработанные ранее [1–3] фортран-программы улучшения орбит и прогнозирования движения астероидов. Для программы улучшения орбит был разработан windows-интерфейс, упрощающий ее использование, а к программе прогнозирования движения, также имеющей windows-интерфейс, был добавлен блок расчета сближений с планетами.

Главное окно интерфейса программы улучшения орбиты приведено на рис. 1.

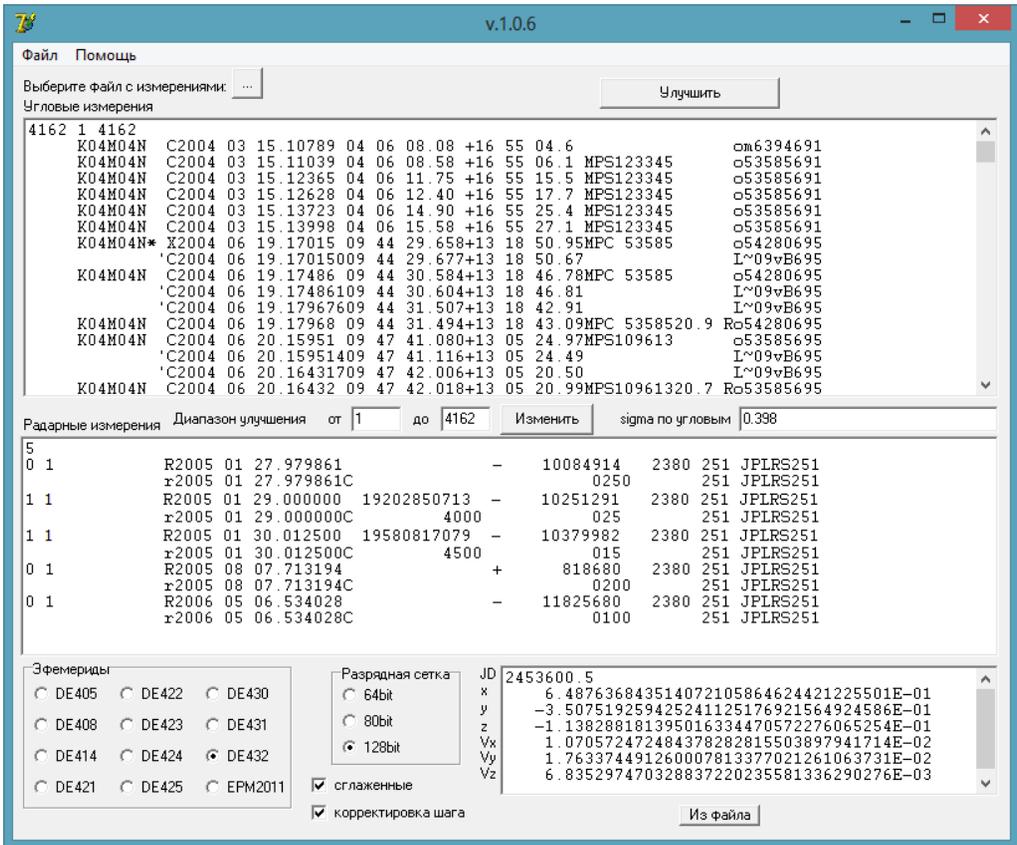


Рис. 1. Интерфейс программы улучшения орбит астероидов

В верхней части окна вводятся астрометрические (угловые) наблюдения астероида в формате, принятом в Центре малых планет (<http://minorplanetcenter.net>); в средней части – радарные наблюдения в том же формате. В нижней части окна справа вводится эпоха улучшаемых начальных параметров движения в виде юлианской даты и сами параметры в виде экваториальных гелиоцентрических координат и компонент скорости, отнесенных к стандартной эпохе 2000.0. Внизу окна интерфейса с левой стороны расположены переключатели используемых при учете возмущений эфемерид больших планет и Луны, а также переключатель разрядной сетки, т.е. размера чисел с плавающей точкой, используемых при выполнении вычислений. Кроме того, в программе предусмотрена возможность использования эфемерид, сглаженных на «стыках» интервалов интерполирования до первых производных от координат. Как показано в работах [3–7], применение сглаженных эфемерид значительно уменьшает ошибки численного интегрирования при расчетах на расширенной разрядной сетке (80 или 128 бит). Использование корректировки шага интегрирования в соответствии со «стыками» эфемеридных интервалов интерполирования также повышает [4–7] точность численного интегрирования, но уже на любой разрядной сетке.

Для программы прогнозирования движения астероидов ранее был разработан windows-интерфейс студентом физического факультета И.А. Вотчемел В настоящей

работе к функциям программы добавлена возможность расчета сближений с планетами, что привело к изменению ее интерфейса. Главное окно нового интерфейса приведено на рис. 2.

Прогнозирование движения с различными эфемеридами

Начальная эпоха: 2453600.5

Начальные данные 1

- Координаты (эквадор 2000.0)
- Элементы (эклиптика 2000.0)

Начальные данные 2

- Координаты (эквадор 2000.0)
- Элементы (эклиптика 2000.0)

X (a) 6.487633315223028247279335551484251E-01

Y (e) -3.507523221790698678501858920908543E-01

Z (i) -1.138288379904511519885439659472292E-01

X' (Omega) 1.070573559473855756760192257389128E-02

Y' (omega) 1.763374338960256881790172831455556E-02

Z' (M) 6.835292592451899480759879722299597E-03

Интервал прогнозирования, сут: 71040

Интервал выдачи, сут: 40

Порядок: 27

Начальный шаг, сут: 1

Выбор первой эфемериды

- DE 405 (2305424.5-2524624.5)
- DE 408 (-1938159.5-5376912.5)
- DE 414 (2305424.5-2524624.5)
- DE 421 (2414992.5-2469808.5)
- DE 422 (625648.5-2816816.5)
- DE 423 (2378480.5-2524624.5)
- DE 424 (625296.5-2780272.5) сгл.
- DE 425 (2305424.5-2524624.5)
- DE 430 (2287184.5-2688976.5)
- DE 431 (-3100015.5-7999984.5)
- DE 432 (2287184.5-2688976.5)
- EPM2011 (2374000.5-253000.5)

Корректировка шага

Выбор второй эфемериды

- DE 405 (2305424.5-2524624.5)
- DE 408 (-1938159.5-5376912.5)
- DE 414 (2305424.5-2524624.5)
- DE 421 (2414992.5-2469808.5)
- DE 422 (625648.5-2816816.5)
- DE 423 (2378480.5-2524624.5)
- DE 424 (625296.5-2780272.5) сгл.
- DE 425 (2305424.5-2524624.5)
- DE 430 (2287184.5-2688976.5)
- DE 431 (-3100015.5-7999984.5)
- DE 432 (2287184.5-2688976.5)
- EPM2011 (2374000.5-253000.5)

Корректировка шага

Расчет сближений с планетами (рядом указывается максимальное расстояние в а.е.)

Меркурий 0.1

Венера 0.1

Земля 0.1

Марс 0.1

Юпитер 0.1

Сатурн 0.1

Уран 0.1

Нептун 0.1

Плутон 0.1

Разрядная сетка, бит

- 64
- 80
- 128

Разрядность ОС, бит

- 32
- 64

Пуск

График

Рис. 2. Интерфейс программы прогнозирования движения астероидов

Данная программа предназначена для одновременного прогнозирования движения двух траекторий с различными или одинаковыми начальными параметрами с использованием при учете возмущений для каждой из траекторий различных эфемерид. Назначение всех окон ввода и переключателей понятно из их обозначений в окне интерфейса (см. рис. 2).

С помощью данной программы был выполнен расчет сближений астероидов Апофис и 101955 с Землей с использованием эфемерид DE405, DE432 (<ftp://ssd.jpl.nasa.gov/pub/eph/planets>) и EPM2011 [8] (<ftp://quasar.ipa.nw.ru/incoming/EPM>). Такой выбор эфемерид объясняется тем, что DE405 являются самыми старыми эфемеридами, широко используемыми в астрономической практике; DE432 – наиболее новыми, а EPM2011 – последними отечественными эфемеридами. Прогнозирование

выполнялось на интервале времени до 2200 г., поскольку этот год является конечной датой эфемерид DE405. Что касается выбора астероидов, то первый из них (Апофис) интересен тем, что в 2029 г. будет иметь очень тесное сближение с Землей (0,00026 а.е.), и это делает его «экстремальным» объектом с точки зрения прогнозирования дальнейшего движения, поскольку после такого тесного сближения в движении резко возрастает хаотичность. Второй астероид (101955) не имеет таких тесных сближений с планетами, вследствие чего его движение является хорошо прогнозируемым и позволяет использовать его как пример из множества подобных «регулярных» объектов.

Для корректного сравнения результатов прогнозируемого движения, получаемых с использованием различных эфемерид, необходимо, чтобы начальные параметры движения были улучшены с теми же эфемеридами, с какими выполняется прогноз. Поэтому для обоих объектов были выполнены улучшения орбиты с использованием эфемерид DE405, DE432 и EPM2011. При улучшении орбиты были использованы наблюдения астероидов, взятые с сайта <http://minorplanetcenter.net>. Для астероида Апофис было использовано 4162 угловых наблюдения, охватывающих период около 10 лет, и 7 радарных (2 временных задержки сигнала и 5 доплеровских); для астероида 101955 – 569 угловых наблюдений, охватывающих около 13 лет, и 28 радарных (22 временных задержки сигнала и 6 доплеровских). Полученные в результате улучшения орбиты начальные параметры были далее использованы при прогнозировании движения с соответствующими эфемеридами.

Таблица 1. Обстоятельства сближений астероида Апофис с Землей до 2200 г.

DE405		DE432		EPM2011	
$T$ (TAI)	$d_{\min}$ , а.е.	$T$ (TAI)	$d_{\min}$ , а.е.	$T$ (TAI)	$d_{\min}$ , а.е.
2029 4 13,90689	0,00026	2029 4 13,90689	0,00026	2029 4 13,90686	0,00026
2051 4 9,96726	0,05564	2051 4 9,96775	0,05564	2051 4 9,96715	0,05565
2059 9 15,39130	0,03715	2059 9 15,39097	0,03715	2059 9 15,39162	0,03715
2081 9 16,82767	0,06187	2081 9 16,82732	0,06186	2081 9 16,82789	0,06187
2095 4 13,70556	0,01912	2095 4 13,70627	0,01911	2095 4 13,70501	0,01913
2103 9 11,63184	0,04183	2103 9 11,61192	0,04195	2103 9 11,64080	0,04178
2133 4 16,66361	0,01003	2133 4 16,66689	0,01005	2133 4 16,66215	0,01003
2155 9 15,37669	0,03470	2155 9 15,26063	0,03344	2155 9 15,42720	0,03527
2162 9 7,95439	0,04480	2162 9 8,03831	0,04442	2162 9 7,90591	0,04502
2183 4 21,04877	0,03546	2183 4 21,82870	0,03944	2183 4 20,71034	0,03362
2190 4 17,03718	0,01008	2190 4 16,30729	0,00405	2190 4 17,51260	0,01393

Все расчеты выполнялись на 128-битовой разрядной сетке, т.е. с четверной машинной точностью, соответствующей 34-значной десятичной разрядности. Для численного интегрирования уравнений движения в описанных программах используется метод Эверхарта [9, 10] 27-го порядка с переменным шагом интегрирования. Во всех случаях применялись сглаженные варианты эфемерид и корректировка шага интегрирования в соответствии с границами эфемеридных интервалов интерполирования.

Результаты вычисления сближений с Землей, меньших 0,1 а.е., для астероида Апофис приведены в табл. 1, для астероида 101955 – в табл. 2.

В табл. 1 и 2 через  $T$  обозначен момент сближения по атомному времени TAI, приводимый в виде года, месяца и суток с дробной частью; через  $d_{\min}$  – минимальное расстояние до центра Земли в сближении.

Как видно из табл. 1, для астероида Апофис замена одних эфемерид другими приводит к заметному различию прогнозируемых сближений с Землей лишь в двух последних случаях, т.е. в сближениях 2183 и 2190 гг. В этих сближениях различия в

момента времени составляют около суток, а в минимальном расстоянии до Земли – несколько тысячных астрономической единицы, причем более близкие результаты получены при использовании эфемерид DE432 и EPM2011. Для более ранних сближений различия в моменте времени не превышают тысячных долей суток, а в минимальном расстоянии – 0,001 а.е.

Таблица 2. Обстоятельства сближений астероида 101955 с Землей до 2200 г.

DE405		DE432		EPM2011	
$T$ (ТА I)	$d_{\min}$ , а.е.	$T$ (ТА I)	$d_{\min}$ , а.е.	$T$ (ТА I)	$d_{\min}$ , а.е.
2037 2 11,56175	0,09872	2037 2 11,56175	0,09872	2037 2 11,56121	0,09872
2043 2 9,76010	0,09662	2043 2 9,76010	0,09662	2043 2 9,75806	0,09662
2054 9 30,04284	0,03931	2054 9 30,04284	0,03931	2054 9 30,04391	0,03931
2060 9 23,02370	0,00502	2060 9 23,02370	0,00502	2060 9 23,02371	0,00502
2068 2 15,15203	0,07042	2068 2 15,15202	0,07042	2068 2 15,15045	0,07042
2080 9 22,53921	0,01019	2080 9 22,53884	0,01020	2080 9 22,53894	0,01020
2087 9 17,32292	0,08715	2087 9 17,33260	0,08700	2087 9 17,33131	0,08703
2117 2 20,65808	0,08662	2117 2 20,66434	0,08676	2117 2 20,66332	0,08673
2124 2 19,85046	0,06914	2124 2 19,84974	0,06910	2124 2 19,84992	0,06911
2144 10 18,62682	0,09544	2144 10 18,69627	0,09555	2144 10 18,68220	0,09553
2151 10 1,12957	0,04393	2151 10 1,14159	0,04400	2151 10 1,13918	0,04398
2158 10 4,02670	0,05870	2158 10 3,99197	0,05857	2158 10 3,99935	0,05860
2187 2 17,82585	0,06707	2187 2 17,82316	0,06707	2187 2 17,82397	0,06707

Для астероида 101955, как это видно из табл. 2, во всех случаях обстоятельства вычисленных сближений практически совпадают. Лишь для последних сближений (начиная с 2087 г.) различия в моменте времени составляют сотые доли суток, в то время как минимальные расстояния до Земли остаются практически одинаковыми для всех сближений. Кроме того, можно видеть, что, как и для астероида Апофис, более близкие друг к другу результаты дает использование эфемерид DE432 и EPM2011.

Проведенное исследование позволяет заключить, что для астероидов, не имеющих слишком тесных сближений с планетами, таких как объект 101955, при прогнозировании сближений могут быть использованы любые эфемериды больших планет и Луны, начиная с эфемерид DE405. Для объектов же, имеющих тесные сближения, подобных астероиду Апофис, замена одних эфемерид другими может приводить к заметному изменению прогнозируемых сближений. Особенно это касается прогнозируемых моментов сближений и в меньшей степени – минимальных расстояний до планет. Кроме того, результаты исследования показывают, что использование последних выпущенных эфемерид, таких как DE432 и EPM2011, дает более близкие результаты, чем использование более старых эфемерид, таких как DE405. Поэтому при расчете сближений астероидов с планетами предпочтительнее применять наиболее современные эфемериды больших планет и Луны.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 12-02-00220-а.

#### Литература

1. Батурин А.П. Улучшение орбит астероидов с использованием радарных наблюдений // Изв. вузов. Физика. 2012. Т. 55, №10/2. С. 77–81.
2. Батурин А.П. Улучшение орбит астероидов по данным радарных и угловых наблюдений // Изв. вузов. Физика. 2013. Т. 56, №10/2. С. 139–143.
3. Батурин А.П. Прогнозирование движения астероидов с использованием слаженных эфемерид DE405, DE406, DE408, DE421, DE423 и DE722 // Изв. вузов. Физика. 2011. Т. 54, №6/2. С. 93–102.

4. Батурин А.П. Повышение точности прогнозирования движения космических объектов путем устранения влияния разрывов производных от координат возмущающих тел // Изв. вузов. Физика. 2012. Т. 55, №10/2. С. 82–88.

5. Батурин А.П., Вотчель И.А. Исследование влияния разрывов координат больших планет и Луны, а также их производных на точность прогнозирования движения астероидов // Изв. вузов. Физика. 2013. Т. 56, № 6/3. С. 188–190.

6. Батурин А.П., Вотчель И.А. Устранение влияния разрывов координат возмущающих тел и их производных на точность прогнозирования движения астероидов // Изв. вузов. Физика. 2013. Т. 56, №10/2. С. 113–118.

7. Батурин А.П. Влияние способов построения эфемерид больших планет и Луны на точность прогнозирования движения астероидов // Изв. вузов. Физика. 2014. Т. 57, №9. С. 72–79.

8. Pitjeva E.V. Updated IAA RAS planetary ephemerides EPM2011 and their use in scientific research // Solar System Research. 2013. Vol. 47, Issue 5. P. 386–402.

9. Бордовицына Т.В. Современные численные методы в задачах небесной механики. М.: Наука, 1984. 136 с.

10. Авдюшев В.А. Интегратор Гаусса–Эверхарта // Вычислительные технологии. 2010. Т. 15, №4. С. 31–46.

## ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОЙ ПРИРОДЫ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ГОРЮЧЕГО НА ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТВЕРДЫХ ТОПЛИВ

В.В. Кузнецова, Л.А. Савельева

*Рассмотрено влияние природы металлического горючего на термодинамические характеристики высокоэнергетических твердых топлив. Установлено, что наибольшее влияние на характеристики топливных систем оказывает применение смешанных металлических горючих.*

## THE INFLUENCE OF THE CHEMICAL NATURE OF METAL FUEL ON THE THERMODYNAMIC CHARACTERISTICS OF SOLID PROPELLANTS

V.V. Kuznetsova, L.A. Savelieva

*The influence of the nature of metal fuel on thermodynamic characteristics of high-energy solid propellants was considered. It is established that the greatest influence on the characteristics of fuel systems renders application of mixed metal fuels.*

К современным и перспективным композициям высокоэнергетических материалов (ВЭМ) предъявляется ряд требований, включающих высокие значения энергетических и физико-механических характеристик, технологичность при формировании зарядов, длительный срок хранения, возможность регулирования скорости горения, минимальное содержание токсичных компонентов в продуктах сгорания и т.д. Одновременное выполнение указанных требований проблематично, поэтому при разработке компонентных составов ВЭМ приходится искать компромиссные решения, выбирая «приоритетные» характеристики, исходя из целей использования ВЭМ [1].

Современные составы ТРТ базируются на трех компонентах: органическое горюче-связующее – бутадиеновый каучук СКДМ-80; окислитель – перхлорат аммония ( $\text{NH}_4\text{ClO}_4$ ); металлическое горючее – индивидуальные металлы и механические смеси на их основе.

Основной энергетической составляющей топливных композиций является металлическое горючее. Металлическое горючее определяет энергетические характеристики топлив (единичный импульс, температуру в камере сгорания и на срезе сопла) и влияет на состав газообразных продуктов сгорания и содержание к-веществ в