

УДК 523.44

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ СТОЛКНОВЕНИЯ С ЗЕМЛЕЙ АСТЕРОИДОВ С ПЛОХО ОПРЕДЕЛЕННЫМИ ОРБИТАМИ

*Виноградова Т. А.<sup>1</sup>*

DETECTION OF POTENTIAL COLLISIONS WITH THE EARTH OF ASTEROIDS WITH LOW  
ACCURACY ORBITS

Vinogradova T. A.

A method of mean motion variations was applied to detect potential collisions with the Earth of single-apparition asteroids, whose orbits are close to intersection with the Earth orbit. With new set of varied elements, the asteroid was propagated to 100 years into the future. A step of the mean motion variation was divided to find most close approaches. As a result, several probable impact asteroids were found.

Keywords: celestial mechanics, asteroids, impacts.

### Введение

Падение Челябинского метеорита зимой 2013 г. лишний раз напомнило о необходимости своевременного обнаружения потенциально опасных астероидов и постоянного их мониторинга. Все астероиды, орбиты которых близки к пересечению с земной орбитой, должны быть проверены на возможность их столкновения с Землей в ближайшие десятилетия. При этом, многоопозиционные астероиды, орбиты которых определены достаточно надежно, можно исследовать обычными методами, производя численное интегрирование уравнений движения с использованием номинальной орбиты и определяя тесные сближения с Землей. При определении ошибок положения астероида в пространстве в таких случаях используется линейное приближение. Смысл его заключается в том, что по исходным данным наряду с номинальной орбитой определяется эллипсоид рассеяния, размер которого по сравнению с размером орбиты должен быть незначительным. Затем на момент сближения астероида с Землей строится плоскость мишени, на которую проецируется эллипсоид. В зависимости от того, попадает ли Земля внутрь эллипса, полученного на плоскости мишени в результате

такой проекции, делается вывод о возможности столкновения.

Но линейный метод при решении данной задачи применим не всегда. Нелинейный характер задачи может иметь в нескольких случаях. Например, в случае, когда эллипсоид ошибок недостаточно хорошо описывает область возможных начальных условий, так как распределение ошибок наблюдений не подчиняется закону Гаусса. Кроме того, после тесного сближения астероида с Землей, или другой большой планетой, тоже нельзя использовать линейный метод исследования при последующих сближениях, так как ошибки перестают описываться эллипсоидом. Если момент сближения астероида с Землей отдален от эпохи вычисления орбиты на десятилетия, эллипсоид может вытянуться в очень длинную узкую область. Форма такой области может уже не быть эллипсоидом, поскольку она искривляется в соответствии с кривизной орбиты астероида. Особенно это относится к нумерованным одноопозиционным астероидам, элементы орбит которых определены с большими ошибками, и эллипсоид рассеяния для которых изначально имеет большие размеры.

В таких случаях используются нелинейные методы исследования [1]. К таким методам относятся метод Монте-Карло и ме-

<sup>1</sup>Виноградова Тамара Алексеевна, научный сотрудник Института прикладной астрономии РАН; e-mail: vta@ipa.nw.ru.

тод линии вариации. Они используют понятие виртуального астероида. Множество таких астероидов заполняет все внутреннее пространство эллипсоида ошибок. Эти методы отличаются способом отбора некоторого представительного количества виртуальных астероидов. В методе Монте-Карло для этого используется датчик случайных чисел, который позволяет получить случайную выборку этих астероидов. В методе линии вариации для получения выборки производится варьирование одного из параметров. В случае, когда исходный эллипсоид ошибок построен для прямоугольных координат, в качестве варьируемого параметра выбирается линия вариации, соответствующая наибольшей оси эллипсоида. Если же в качестве исходных данных рассматриваются ошибки элементов орбит, варьированию в пределах ошибки может подвергаться среднее движение, так как именно ошибка в определении этого элемента играет главную роль в вытягивании эллипсоида вдоль орбиты.

### 1. Описание метода вариации среднего движения

В ИПА РАН был создан пакет программ для исследования возможности столкновения астероидов с Землей последним из описанных методов. Предполагается, что все астероиды из имеющегося списка АСЗ, которые наблюдались только в одной оппозиции, будут проверены на возможность столкновения с Землей. В качестве основы был использован Каталог АСЗ, который существует и регулярно обновляется в ИПА РАН (<http://www.ipa.nw.ru/PAGE/DEPFUND/LSBSS/hazard/>) [2]. В дальнейшем такой проверке в оперативном режиме будут подвергаться все вновь открываемые астероиды. В настоящее время число АСЗ превысило 10 тыс., при этом более 60% из них наблюдались только в одной оппозиции. Большая часть из них не представляет угрозы для Земли в ближайшем будущем, поскольку их минимальное расстояние до орбиты Земли (moid) велико. В Каталоге АСЗ ИПА РАН эта характеристика вычисляется и приводится для всех астероидов [3]. Для предварительного исследования были отобраны около 300 астероидов, для которых moid не превосходит 200 тыс. км, то есть, орбиты которых близки к пересечению с Земной орбитой.

К каждому исследуемому астероиду была применена следующая последовательность

действий. Первоначально вариация среднего движения  $n$  производилась с постоянным шагом в пределах ошибки  $\pm 4\sigma_n$ , где  $\sigma_n$  — средняя ошибка  $n$ . При каждой вариации производилось улучшение остальных пяти элементов орбиты методом наименьших квадратов для наилучшего соответствия имеющимся наблюдениям. Качество улучшения элементов орбит с зафиксированным средним движением контролировалось с помощью средней квадратической ошибки  $\sigma$ . Эта ошибка не должна сильно отличаться от  $\sigma_0$ , полученной при улучшении исходной орбиты с участием всех шести элементов. Для каждой, полученной таким способом, варьированной орбиты было произведено численное интегрирование уравнений движения астероида вперед на 50 или 100 лет. Интегрирование производилось методом Эверхарта с учетом возмущений от 8 больших планет и Луны, а также от трех самых крупных астероидов. При этом фиксировались все сближения астероида с Землей, и результат затем анализировался. На шкале варьированных средних движений среди множества найденных сближений в пределах отдельных интервалов времени определялось самое тесное сближение, то есть самый глубокий минимум расстояния до Земли. Затем для уточнения найденного минимального расстояния делалось последовательное дробление шага вариации вблизи значения  $n$ , давшего этот минимум. В результате определялось значение среднего движения, при котором достигается минимальное значение расстояния между астероидом и Землей.

### 2. Астероид 2007 VK184

Для демонстрации используемой методики можно рассмотреть конкретный астероид 2007 VK184, который имеет 102 наблюдения на интервале 60 суток. По абсолютной звездной величине астероида его диаметр приблизительно можно оценить, как 150 метров. Полученные в результате улучшения номинальной орбиты элементы и их ошибки приведены в табл. 1.

По имеющимся программам для этого астероида был получен эллипсоид ошибок [4]. Несмотря на большое количество наблюдений, эллипсоид, построенный на эпоху наблюдений 2007 г., имеет очень большой размер. Его большая полуось почти достигает 200 тыс. км, тогда как наименьшая ось равняется 90 км. Для номинальной ор-

Таблица 1. Номинальная и варьированные орбиты астероида 2007 VK184

	Номинальная орбита	Ошибки элементов	Вар. орбита, давшая сближение в 2048 г.	Вар. орбита, давшая сближение в 2057 г.
$T$	2455400,5		2455400,5	2455400,5
$M$	$90^\circ,257829$	$\pm 0^\circ,023100$	$90^\circ,180552$	$90^\circ,197422$
$\Omega$	$7^\circ,125886$	$\pm 0^\circ,000588$	$73^\circ,127491$	$73^\circ,127141$
$\omega$	$254^\circ,017591$	$\pm 0^\circ,000418$	$254^\circ,016654$	$254^\circ,016859$
$i$	$1^\circ,222226$	$\pm 0^\circ,000040$	$1^\circ,222352$	$1^\circ,222325$
$e$	0,569971	$\pm 0,000016$	0,570025	0,570013
$n$	$0^\circ,434577$	$\pm 0^\circ,000022$	$0^\circ,434504$	$0^\circ,434520$
$\sigma$	0,40 сек. дуги		0,41 сек. дуги	0,41 сек. дуги

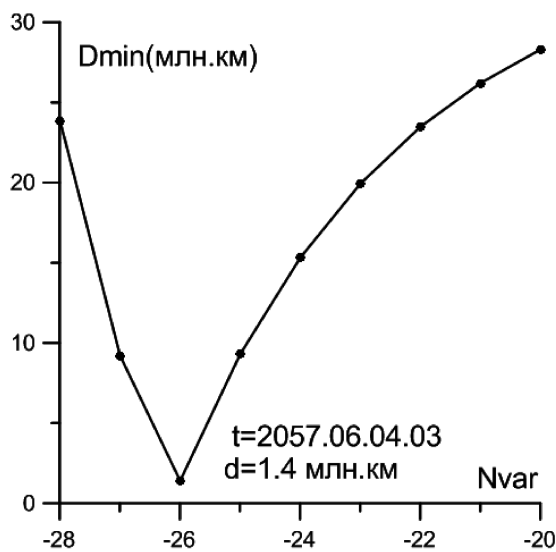


Рис. 1

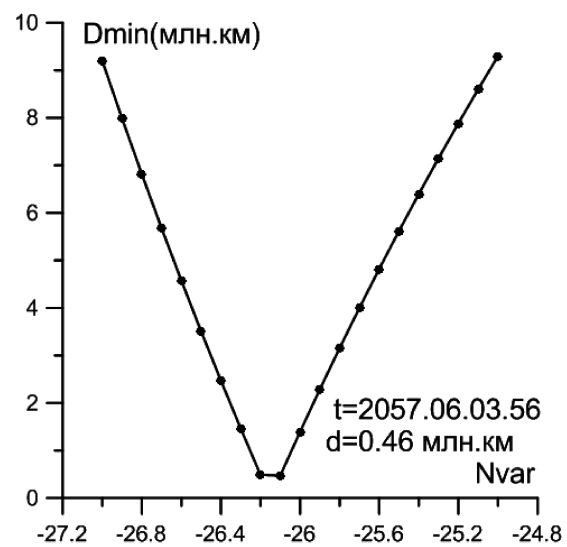


Рис. 2

биты вычисляются два сближения с Землей: 31 мая 2048 г. до расстояния 6 млн км и 26 июля 2057 г. до расстояния 37 млн км. Варьирование среднего движения с последующим улучшением элементов позволяет получить две близкие орбиты, движение по которым приводит астероид к столкновению с Землей вблизи этих же дат. Близость моментов сближения при движении по номинальной и по варьированной орбитам не обязательна. В данном случае это является следствием того, что орбита вычислена вполне надежно по большому числу наблюдений, которые получены на достаточно протяженном интервале времени, и численное интегрирование производится не очень далеко вперед от эпохи наблюдений.

На рис. 1–3 показано, как последовательно происходит уточнение минимума расстояния до Земли при дроблении шага вариации среднего движения. Графики построены

для сближения 2057 г. Первоначально были построены 40 варьированных орбит в сторону уменьшения среднего движения (отрицательные номера вариаций) и столько же в сторону возрастания, в пределах интервала ошибок среднего движения  $\pm 4\sigma_n$ . Все орбиты были численно проинтегрированы вперед и в 2057 году был обнаружен минимум расстояния 1,4 млн км для орбиты, соответствующей вариации с номером  $-26$  (рис. 1). Шаг вариации был уменьшен в 10 раз, и в окрестности этого минимума (от  $-25$  до  $-27$  вариации) были сделаны 20 новых вариаций. В номере вариации Nvar они отражены в десятых долях номера. В результате такой процедуры, после подведения итогов численного интегрирования минимальное расстояние уменьшилось в три раза, что показано на рис. 2. И только после пятого дробления шага был определен реальный минимум расстояния до центра Земли 3,96 тыс. км (рис. 3).

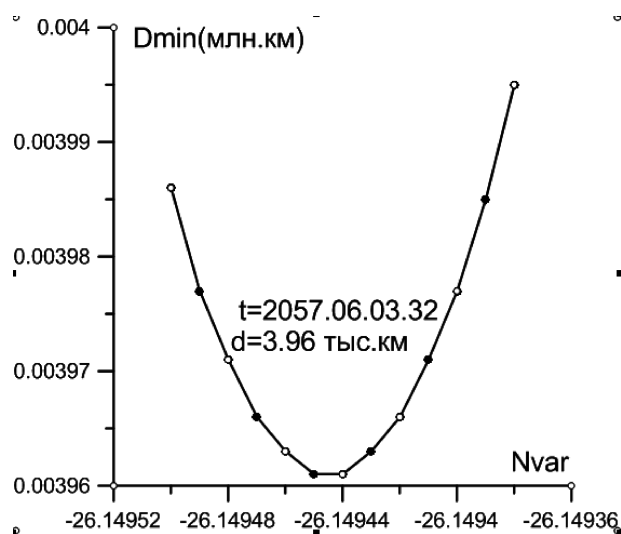


Рис. 3

Таблица 2. Возможные столкновения астероидов с Землей

Name	Н	Диаметр (м)	Наблюдения	Дата столкновения	Dmin ИПА (тыс. км)	Dmin JPL (тыс. км)	$\sigma/\sigma_0$
2005BS1	27,5	8–20	25 набл./ 3 сут.	2016 01 14.42	4,0	4,6	1,0
2007VK184	22,0	110–240	102 набл./60 сут.	2048 06 03.09	4,5	4,8	1,0
				2057 06 03.32	4,0	4,4	1,0
2008 JL3	25,4	20–50	31 набл. /4 сут.	2027 05 01.38	6,0	6,1	1,1
2009 JF1	27,1	11–24	25 набл. /1 сут.	2022 05 06.34	0,8	1,1	1,0
2013GW38	28,4	5–12	18 набл./ 1 сут.	2070 04 08.00	6,2	6,2	1,0
2007VE191	23,6	50–120	68 набл./ 13 сут.	2015 11 27.12	2,3		1,0

### 3. Результаты

К настоящему времени, пока еще в отладочном режиме, описанным выше методом были исследованы орбиты более 60 астероидов. Вычисления полностью автоматизированы, на входе в программу необходимо задать только обозначение астероида и момент времени, до которого будет осуществляться поиск сближений. В качестве предварительного результата можно представить табл. 2, в которой содержатся данные о найденных опасных астероидах, возможность столкновения которых с Землей в ближайшие годы нельзя исключить. Для этих астероидов найдена одна или две варьированных орбиты, движение по которым приводит к столкновению с Землей в этом столетии. Минимальное расстояние между астероидом и центром Земли  $D_{min}$  в момент сближения меньше радиуса Земли. Найденные орбиты очень хорошо согласуются с имеющимися наблюдениями. Средняя квадратическая ошибка  $\sigma$ , с которой они получены, практически не отлича-

ется от ошибки исходной номинальной орбиты  $\sigma_0$ . В последнем столбце таблицы приведено отношение этих ошибок  $\sigma/\sigma_0$ .

Вычисленные значения для первых пяти астероидов из этой таблицы хорошо согласуются с результатами, представленными на сайте JPL NASA (<http://neo.jpl.nasa.gov/risk/>). Моменты столкновения совпадают до сотых долей суток, минимальное расстояние может незначительно различаться. Тесные сближения астероидов с Землей в JPL вычисляются с использованием метода линии вариации и, в исключительных случаях, методом Монте-Карло. Несмотря на хорошее согласие результатов для указанных астероидов, тем не менее, следует заметить, что имеется и ряд разногласий. Так, для некоторых астероидов нами не найдено столкновения с Землей, а на сайте JPL таковые вычислены. С другой стороны, в нашей таблице зафиксировано возможное столкновение с астероидом 2007VE191 в 2015 г., тогда как его нет в списке JPL. По-видимому, это вызвано различием

ем использованных методик и требует более тщательного исследования.

### *Литература*

1. *Milani A., Chesley S.R., Chodas P.W., Valsecchi G.B.* Asteroid Close Approaches: Analysis and Potential Impact Detection / In *Asteroids III*. Bottke W.F. et al (eds.). University of Arizona Press, Tucson, 2002. P. 55–69.
2. *Виноградова Т. А., Заботин А. С.* Каталог АСЗ ИПА РАН // Тез. докл. Междунар. конф. «Околоземная астрономия 2007». 2007. С. 23.
3. *Виноградова Т. А.* Минимальные расстояния между орбитами планет и астероидами // Сб. тр. конф. «Околоземная астрономия-2003», Терскол. 2003. Т. 1, С. 290.
4. *Виноградова Т. А.* Определение возможности столкновения астероидов с Землей // Материалы всероссийской конференции «АКО-2005», СПб. 2005. С. 89–91.

Ключевые слова: небесная механика, астероиды, астероидная опасность.

---

Статья поступила 4 октября 2013 г.

Институт прикладной астрономии РАН, г. Москва

© Виноградова Т. А., 2013