

# Проблемы при оценке вероятности столкновения с Землей астероида, испытавшего тесное сближение

Вавилов Д.Е.

ИПА РАН

Пулково 2015



# Введение

На данный момент существует 2 центра, вычисляющие и публикующие вероятности столкновения различных астероидов с Землей.

- Лаборатория реактивного движения NASA — 585 объекта.
- Университет в Пизе — 520 объектов.



# Методы оценки вероятности

Существует несколько методов оценки вероятности столкновения астероидов с Землей.

- Метод Монте-Карло.
- Линейные методы оценки вероятности (в частности метод плоскости цели).
- Методы вариации среднего движения и метод LOV.



## Метод Монте-Карло

**Предположение:** На эпоху наблюдений имеется нормальный закон распределения ошибок параметров орбиты.

Из облака виртуальных астероидов на эпоху наблюдений выбираются виртуальные астероиды в соответствии с функцией распределения. Вероятность столкновения  $P_{MC}$ :

$$P_{MC} = \frac{k}{n}$$

$k$  — число виртуальных астероидов, сталкивающихся с Землей,

$n$  — число всех рассмотренных виртуальных астероидов.

Среднеквадратическая ошибка  $\sigma_{MC}$ :

$$\sigma_{MC} = \frac{\sqrt{P_{MC}(1 - P_{MC})}}{\sqrt{n}} \approx \frac{P_{MC}}{\sqrt{k}}$$



# Метод Монте-Карло. Преимущества и недостатки

## Преимущества:

- Не имеется дополнительных предположений и ограничений в использовании.

## Недостатки:

- Количество орбит виртуальных астероидов, которые нужно проинтегрировать  $\sim P_{MC}^{-1}$ .
- При каждом вычислении получаются различные значения вероятности столкновения.



## Линейный метод

**Предположение:** Ошибки координат и скоростей имеют нормальный закон распределения на всем рассматриваемом интервале времени.

$$P = \frac{|\det \mathbf{N}|^{\frac{1}{2}}}{(2\pi)^3} \int_{\Theta} e^{-\frac{1}{2} \mathbf{x}^T \mathbf{N} \mathbf{x}} d\mathbf{x},$$

$\mathbf{N}$  — нормальная матрица  $6 \times 6$ ,

$\mathbf{x}$  — шестимерный вектор отклонений координат и скоростей от номинальных значений,

$\Theta$  — шестимерная область, которую занимает Земля в координатах и скоростях.



# Линейный метод. Преимущества и недостатки

## Преимущества:

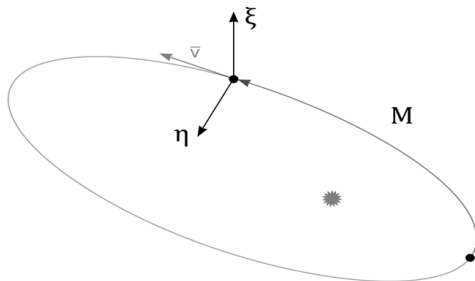
- Количество орбит виртуальных астероидов, которые нужно проинтегрировать = 1.

## Недостатки:

- Должны отсутствовать тесные сближения с массивными телами на рассматриваемом интервале времени.
- При использовании Декартовой системы координат не учитывается тот факт, что область возможных положений астероида вытянута вдоль номинальной орбиты объекта.



## Криволинейная система координат $(\xi, \eta, M)$



- Фиксируется оскулирующая орбита (эллипс) в момент времени  $t$ .
- Средняя аномалия ( $M$ ) одна из координат системы.
- $\xi$  и  $\eta$  — пространственные координаты.
- $(\xi, \eta, M)$  — ортогональная система координат.





## Метод вариации одного параметра

**Предположение:** Сохраняется нормальный закон распределения для 5 параметров орбиты, кроме варьируемого.

- Рассматриваются виртуальные астероиды с отличающимся одним параметром орбиты от номинального.
- Среди рассматриваемых виртуальных астероидов находится имеющий самое тесное сближение с Землей.
- Этот виртуальный астероид рассматривается как номинальный, и для него линейным методом оценки вероятности вычисляется вероятность столкновения  $\tilde{P}$ .
- Корректируется значение вероятности столкновения

$$P = \tilde{P}e^{-\frac{1}{2}\sigma^2}$$



# Метод вариации одного параметра. Преимущества и недостатки

## Преимущества:

- Количество орбит виртуальных астероидов, которые нужно проинтегрировать, не зависит от вероятности столкновения и составляет порядка нескольких тысяч.
- Учет отклонения от нормального закона для варьируемого параметра орбиты.

## Недостатки:

- Учет отклонения от нормального закона проводится только для одного параметра орбиты.
- Неточное вычисление вероятности столкновения в определенных случаях даже при отсутствии тесных сближений.



## Недостаток метода вариации одного параметра

- Рассмотрим одномерный (однопараметрический) линейный случай
- Пусть область, ведущая к столкновению, является отрезок  $[3; 5]$  ошибок параметра
- Вероятность столкновения  $= 1.4 \cdot 10^{-3}$ .

- Вариация одного параметра:

$$e^{-\frac{\sigma_*^2}{2}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{3-\sigma_*}^{5-\sigma_*} e^{-\frac{x^2}{2}} dx \in [5.3 \cdot 10^{-3}; 1.8 \cdot 10^{-6}]$$

- При  $\sigma_* = 4$  получаемая вероятность:  $2.3 \cdot 10^{-4}$



## Общие сведения об астероиде 2010 RF12

- Открыт 5 сентября 2010 года в 09:43.
- Последнее наблюдение 8 сентября 12:21.
- 312 наблюдений.
- 8 сентября в 21:13 испытывает очень тесное сближение с Землей ( $5.3 \cdot 10^{-4} \text{ а.е.} < 10R_{\oplus}$ ) на скорости 6 км/с
- Оценочный диаметр  $\approx 7$  м
- Потенциальное столкновение в 2095 году
- $P_{JPL} = 6.5 \cdot 10^{-2}$
- $P_{NEODYS} = 8.52 \cdot 10^{-2}$



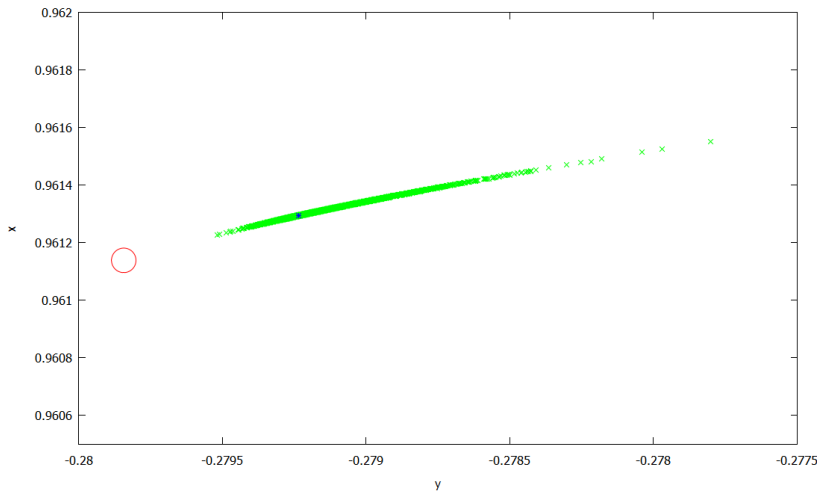
# Астероид 2010 RF12

$P_{\xi\eta M}$	$6.12 \cdot 10^{-2}$
$P_{LOV}$	$3.51 \cdot 10^{-2}$
$P_n$	$8.76 \cdot 10^{-2}$
$P_{MC}$	0

Методом Монте-Карло было рассмотрено 972000 виртуальных астероидов  $\Rightarrow P < 3 \cdot 10^{-6}$ .



# Положения виртуальных астероидов на 23:47 5 сентября 2095 г. в плоскости $(y, x)$



## Заключение

- На данный момент для надежного вычисления вероятности столкновения астероида с Землей, испытавшего тесное сближение с массивным объектом, применим только метод Монте-Карло.



Спасибо за внимание!

