

Предвычисление сближений и столкновений небесных тел с Землей и Луной в системе «Прогноз»

¹Д.Е. Вавилов, ¹Т.А. Виноградова, ¹Н.Б. Железнов,
²А.В. Зайцев, ¹О.М. Кочетова, ¹В.Б. Кузнецов,
¹Ю.А. Чернетенко, ¹В.А. Шор.

¹ИПА РАН, С.-Петербург,

²НП Центр планетарной защиты, Московская обл., Химки

Всероссийская астрометрическая конференция
"Пулково-2018"
1-5 октября 2018 г.

Основные составляющие задачи

1. Наблюдения
2. Уточнение орбит
3. Выявление опасных сближений и оценки вероятности столкновения
4. Обстоятельства столкновения

Minor Planet Center – циркуляры с наблюдениями,
предварительные орбиты

Центры прогнозирования сближений и столкновений с
Землей: JPL NASA, NEODYS (Пизанский университет (ESA))

**Предсказаны столкновения с Землей астероидов
2008 TC3, 2014 AA, 2018 LA**

Задача создания такого комплекса в России была поставлена
несколько лет тому назад.

И в общем, хотя и с некоторыми недоработками, она решена,
о чем авторы и хотят сообщить. Наш пакет последовательно
решает все задачи, входящие в настоящую тематику.

Некоторые определения и цифры

Потенциально опасными (ПОТ) считаются тела, диаметры которых превышают 100–150 м, ($H_0 \leq 22.0^m$), а минимальное межорбитальное расстояние (MOID), меньше или равно 0.05 а.е. В таких пределах можно ожидать неточность его определения по элементам предварительной орбиты и его изменения в обозримом будущем под влиянием возмущений.

На основе информации, полученной с космического телескопа WISE, оценивается наличие **4700 ± 1500** ПОТ с диаметром более 100 метров (16.05.2012)). В каталоге Центра малых планет и комет (ЦМП) содержится **1919** таких астероидов (на 13.08. 2018 г.)

Астероидами называют малые тела с диаметром больше 30 м. Другие авторы предлагают считать астероидами тела больше 1 м.

Тела с меньшими диаметрами также могут представлять значительную угрозу. Поэтому в нашей системе, как и в других службах, они также рассматриваются. Сейчас около **8500** таких объектов.

Структура пакета «ПРОГНОЗ»

1. Мониторинг открытий и наблюдений, определение орбит, оценивание точности текущих значений параметров
2. Оценивание вероятности столкновения
3. Вычисление параметров геоцентрической траектории и их ошибок (обстоятельства столкновения)
4. Поиск столкновений на варьируемых орбитах. Поиск точек полосы риска методом вариации среднего движения с постоянным шагом.
5. Имитационные орбиты (для учебных целей).
6. Предвычисление столкновений космических тел с Луной
7. Таблица сближений потенциально опасных тел с Землей и Луной (прошлые и будущие)

1. Мониторинг открытий и наблюдений, определение орбит, оценивание точности текущих значений параметров

Для организации вычислительной части мониторинга необходимы:
список всех ПОТ (каталог элементов орбит),
каталог наблюдений (МПЦ).

Помесячное обновление и обращение к сайту МПЦ каждые 6 минут.

Вычисление элементов орбиты,
матрицы ковариаций,
оценка точности определения орбиты,
определение MOID,
определение минимального расстояния и момента его достижения.

Движение тела моделируется численным интегрированием методом Эверхарта 15-го порядка с учетом возмущений от планет, светового давления, динамического сжатия Земли и Солнца, (сопротивления атмосферы). Также интегрируются уравнения в вариациях, который определяют частные (изохронные) производных текущих значений координат и скоростей тела по их начальным значениям.

Сравнение работы вычислительного комплекса «Прогноз» с результатами JPL и NEODYS на примере вычисления минимальных расстояний для астероидов с короткой дугой наблюдений

Астероид	Дата	Минимальное расстояние(а.е.)		
		JPL	NEODYS	ИПА РАН
2018 LA	2018.06.02 $\Delta t=0.16^d$	Столкновение 15набл., $\sigma=0.64''$	Столкновение 14набл., $\sigma=0.33''$	Столкновение 14набл., $\sigma=0.43''$
2018 SC	2018.09.18 $\Delta t=1^d$	0.00179 52набл., $\sigma=0.48''$	0.00179 52 набл., $\sigma=0.73''$	$0.00179 \pm 1e-06$ 47набл., $\sigma=0.72''$
2018 SJ1	2018.09.08 $\Delta t=2^d$	0.00426 37набл., $\sigma=0.31''$	0.00426 37 набл., $\sigma=0.63''$	$0.00426 \pm 1.5e-06$ 37набл., $\sigma=0.50''$
2018 SM	2018.09.15 $\Delta t=2^d$	0.00028 18набл., $\sigma=0.36''$	0.00028 18 набл., $\sigma=0.34''$	$0.00028 \pm 1e-07$ 18 набл., $\sigma=0.38''$

Сравнение прогноза сближений астероидов с Землей с результатами JPL и NEODYS

Астероид	Дата сближения	Минимальное расстояние (а.е.)			MOID (а.е.)
		JPL	NEODYS	ИПА РАН	
363599 (e=0.72)	2024 04 11.400276 2032 04 08.435597	0.05210 0.09753 $\sigma = 0.41''$	0.05209 0.09752 $\sigma = 0.62''$	0.05210 $\pm 1e-7$ 0.09753 $\pm 3e-7$ $\sigma = 0.54''$	0.0208
441987 (a=1а.е.)	2019 06 24.707544 2026 07 01.529411	0.01961 0.18269 $\sigma = 0.35''$	0.01961 0.18269 $\sigma = 0.54''$	0.01961 $\pm 1e-7$ 0.18269 $\pm 2e-7$ $\sigma = 0.32''$	0.0176
475534 (a=0.9а.е.)	2018 10 29.499407 2030 10 24.530246	0.01930 0.15854 $\sigma = 0.57''$	0.01930 0.15854 $\sigma = 0.65''$	0.01930 $\pm 3e-7$ 0.15854 $\pm 6e-7$ $\sigma = 0.46''$	0.0154
2010 WC9 (a=1.1а.е.)	2018 05 15.920328 2030 11 22.453152	0.00136 0.04713 $\sigma = 0.25''$	0.00136 0.04713 $\sigma = 0.31''$	0.00136 $\pm 2e-8$ 0.04719 $\pm 5e-5$ $\sigma = 0.24''$	0.0014

2. Оценивание вероятности столкновения

Метод статистических испытаний – метод Монте-Карло

Метод, использующий криволинейную систему координат
(Д.Е.Вавилов)

Line Of Variation (LOV) – используется в JPL и NEODYSS- комбинация
метода Монте-Карло и метода плоскости цели

Метод плоскости цели - Вероятность столкновения с Землей
вычисляется по взаимному расположению эллипса рассеяния на
плоскости цели и образа Земли на этой плоскости.

Время вычисления, точность, возможность получить решение

Вероятность столкновения в случае, когда точка потенциального столкновения находится достаточно далеко от номинального положения тела.

Астероид	Расст-е (а.е.)	Вероятность столкновения					
		ИПА РАН				NEODYS (M LOV)	JPL (M LOV)
		(M M-K)	(M KCK)	(M ПЦ)	(M ПЦ*)		
2006 JY26	0.01340	5.6e-5	1.1e-4	6.2e-5	2.1e-2	1.1e-6	9.0e-6
2010 UK	0.01586	3.1e-3	2.6e-3	0	1.7e-3	1.3e-4	4.9e-4
2006 QV89	0.02085	1.8e-3	2.2e-3	2.7e-3	3.9e-3	8.8e-5	4.9e-5
2008 CK70	0.01830	6.4e-4	6.4e-4	5.8e-4	7.1e-4	0	0
2009 JF1	0.00788	7.4e-4	6.6e-4	0	7.8e-4	2.2e-4	2.6e-4
2012 MF7	0.08464	3.1e-4	4.0e-4	0	6.9e-5	2.0e-4	1.3e-4
2014 WA	0.30840	3.5e-7	4.5e-7	0	6.2e-4	0	1.8e-5
2008 JL3	0.01139	3.0e-4	4.7e-4	0	2.5e-4	7.5e-5	8.5e-5
2005 QK76	0.33043	4.3e-5	3.8e-5	0	2.7e-7	3.7e-5	3.6e-5

Рассмотрим некоторую модификацию метода плоскости цели (M ПЦ*). Проектируем на плоскость цели координаты и скорости астероида, заменив лишь среднюю аномалию на среднюю аномалию точки на его орбите, соответствующей MOID (Земля) (они не должны сильно отличаться), а другие пять элементов оставим неизменными.

3. Вычисление параметров геоцентрической траектории и их ошибок

Осуществляется переход от системы координат J2000 к системе подвижного экватора и точки Весны.

Подсчитываются момент по UTC входа тела в атмосферу на высоте 100 км, долгота и широта точки, азимут и наклон траектории, скорость тела относительно атмосферы, а также средние ошибки всех этих величин с учетом неопределенности начальных условий движения.

Эти же параметры вычисляются для точки столкновения с Землей, но надо иметь ввиду, что движение тела в атмосфере выполняется без учета его возможной фрагментации.

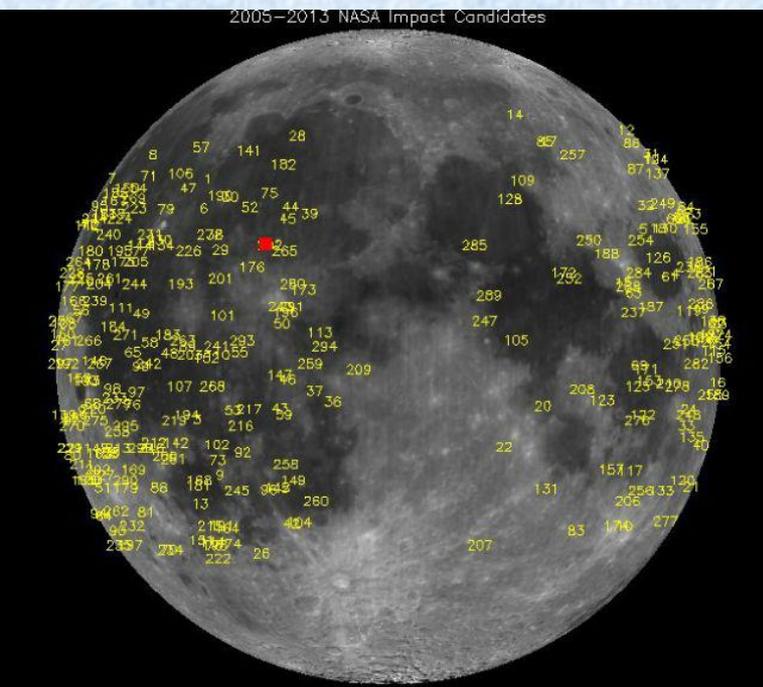
5. Имитационные орбиты (для учебных целей).

Имитационные орбиты - это искусственным образом формируемые гелиоцентрические орбиты фиктивных тел, отвечающие определенным требованиям. Обычно они выражаются в том, что тело на построенной орбите должно столкнуться с Землей в заданный момент времени и в заданной точке, имея при этом обусловленные параметры траектории. Такая задача возникает при определении гелиоцентрической орбиты наблюдавшегося при падении метеорита.

Исходными величинами для определения гелиоцентрической орбиты упавшего на поверхность Земли или взорвавшегося в атмосфере тела являются время падения или взрыва, географические координаты места падения или точки, над которой произошел взрыв, высота точки падения или взрыва над уровнем поверхности, скорость тела относительно поверхности Земли или атмосферы, наклон вектора скорости к горизонту, азимут проекции вектора скорости на горизонтальную плоскость и время упреждения, то есть промежуток времени между моментом обнаружения тела в качестве потенциально опасного и моментом падения.

6. Предвычисление столкновений космических тел с Луной

Предсказанные столкновения с Луной не зафиксированы



В 2005 году NASA начата программа наблюдений за столкновениями метеоритов с поверхностью Луны. За время наблюдений было зафиксировано более 300 крупных взрывов.

17 мая 2013 г. – падение тела диаметром до 0.5 м => кратер диаметром до 20 м.

11 сентября 2013 года диаметр упавшего тела составлял 0,6 – 1,4 метра, вес – около 400 кг, скорость - 17 км/с. Диаметр кратера может достигать 50 метров.

Тесные сближения в будущем <http://www.brera.mi.astro.it/sormano/>

Астероид	D (м)	T	Минимальное расстояние (км)
(99942)	325	2029-04-14.61	95214
2017 SS12	10-23	2066-09-24	65715
2000 SG344	31-69	2069-05-04	15249

Алгоритм вычисления для Луны

Методика предвычисления столкновений космических тел с Луной мало отличается от методики, используемой для Земли. Отличия: радиус сферы действия Луны принят равным $0.00108 \text{ а.е.} = 162\,000 \text{ км}$; нет атмосферы; места падения указываются в селенографической системе координат, связанной со средним экватором Луны и с вращением Луны вокруг полярной оси, совершаемым в соответствии с тремя законами Кассини.

Члены физической либрации Луны по долготе, в наклоне и в узле нами не учитываются, так как амплитуда наибольшего члена физической либрации не превосходит нескольких минут дуги, что меньше требующейся для настоящей задачи точности.

Возможно решение обратной задачи (известны время и место падения, а также параметры траектории падения и требуется найти соответствующую гелиоцентрическую орбиту).

Поиск точек полосы риска осуществляется тем же путем, что и для Земли.

7. Таблица сближений ПОТ с Землей и Луной (прошлые и будущие)

В ходе прогнозирования сближений ПОТ с Землей или Луной вся существенная информация об исходной орбите тела, точности, с которой она определена, моменте и обстоятельствах каждого сближения сохраняется. Чтобы сделать наиболее востребованную часть этой информации общедоступной, легко обозримой и сравнимой для сближений разных тел, организована таблица прошлых и предстоящих сближений ПОТ с Землей и Луной.

Для демонстрации на сайте помещается вырезка, охватывающая сближения в предстоящие 90 дней от текущего момента и сближения, состоявшиеся в последние 90 дней. Данные таблицы сближений на сайте можно просматривать и за пределами указанных окон.

Таблица сближений астероидов с Землей и Луной

Дата и время обновления 25.09.2018 13:19

Объект	Диаметр фотометрический (м)	С чем сближается	Дата сближения	Минимальное расстояние (в единицах расстояния Земля-Луна)	Относительная скорость (км/с)	MOID на дату сближения (в единицах расстояния Земля-Луна)	Вероятность столкновения	Энергия (Мт)	Палерм. шкала	Турин. шкала
418849 (2008 WM64)	142-604	Земля	2018 12 23.50116	16.55	17.63	13.51	0.00E+00	.92E+03		
2015 YQ1	4-21	Земля	2018 12 23.41946	30.20	10.16	0.21	0.00E+00	.11E-01		
418849 (2008 WM64)	142-604	Луна	2018 12 23.36407	15.94	17.98	12.58	0.00E+00	.96E+03		
163899 (2003 SD220)	679-2936	Земля	2018 12 22.04477	7.36	6.24	7.09	0.00E+00	.13E+05		
163899 (2003 SD220)	679-2936	Луна	2018 12 21.91628	8.20	6.98	7.84	0.00E+00	.16E+05		
2018 PK21	13-58	Земля	2018 12 21.90974	78.19	3.88	2.91	0.00E+00	.36E-01		

Протокол работы комплекса «ПРОГНОЗ» (пример вхождения в атмосферу (астероид 2008 TC3))

Обозначение объекта: 2008 TC3 (K08T03C)
принято из Центра малых планет М.Р.Е.С. 2008-T50, Issued
2008 Oct. 6, 14:59 UT

Выполнено **99 наблюдений** с 2008 10 06.277670 по 2008
10 06.844360 на 15 обсерваториях. Определена
предварительная орбита тела.

...

По имеющимся в наличии наблюдениям, общим числом
99, на интервале с 2008 10 06.277670 по 2008 10 06.844360
найдена орбита:

T = JDT 2454745.500000 = 2008 10 06.000000
M = 328.477708 x = .978354849
Peri = 233.951051 y = .205379686
Node = 194.132690 z = .089993027
Incl. = 2.327993 Vx = -.007766146
e = .2852172 Vy = .016081292
n = .68819302 Vz = .006148999
a = 1.2705620
P = 1.4321675
MOID = .0000086 H = 30.40 G = .15 U = 5

Орбита представляет использованные наблюдения со
**средней ошибкой 0.7 секунд дуги. Отброшено 8
наблюдений.**

Матрица ковариации координат и скоростей имеет вид:

```
.255583D-13 -.474290D-14 .368390D-14 -.318552D-13 .590520D-14 -.458775D-14
-.474290D-14 .896776D-15 -.686126D-15 .576336D-14 -.109619D-14 .834020D-15
.368390D-14 -.686126D-15 .539598D-15 .455170D-14 .848770D-15 -.666591D-15
-.318552D-13 .576336D-14 -.455170D-14 .422794D-13 -.753155D-14 .602420D-14
.590520D-14 -.109619D-14 .848770D-15 -.753155D-14 .138884D-14 -.108070D-14
-.458775D-14 .834020D-15 -.666591D-15 .602420D-14 -.108070D-14 .872751D-15
```

В момент **T = JDT2454746.615706** тело вошло в
атмосферу Земли на заданной высоте 100. км над
уровнем земного сфероида.

Вероятность столкновения равна **1.00000000**.

Найдены следующие значения параметров траектории
тела на входе в атмосферу Земли:

(время Московское (Всемирное время + 4 часа)):

год месяц день час. мин. сек.

2008 10 07 06 45 33. (JD2454746.781624)

Долгота, широта точки входа, наклон к местному
горизонту и азимут направления скорости, скорость
относительно Земли и размеры трубки входа:

l (гр) = 30.396 +/- .144

fi (гр) = + 20.954 +/- .040

teta (гр) = -20.117 +/- .070

Az (гр) = 100.684 +/- .059

V (км/с) = 12.785 +/- .010

Размеры трубки входа (км)

sigcsi = .3

sigdzeta = 2.2

D (м) = 3.0

M (Т) = 33.6

E (Кт) = 0.7

Протокол работы комплекса «ПРОГНОЗ» (пример вхождения в атмосферу (астероид 2018 LA))

**Обозначение объекта: 2018 LA (K18L00A)
принято из Центра малых планет М.Р.Е.С. 2018-L04 ,
Issued 2018 June 3, 16:15 UT**

Выполнено 14 наблюдений с 2018 06 02.343300 по 2018 06 02.500960
на 3 обсерваториях. Определенная Центром предварительная орбита тела:

$T_0 = \text{JDT } 2458200.500000 = 2018 \text{ 03 } 23.000000$

$M = 282.843090 \quad x = -1.366577184$

$\text{Peri} = 256.084980 \quad y = -.562491693$

$\text{Node} = 71.881750 \quad z = -.152587650$

$\text{Incl} = 4.278510 \quad V_x = .009970692$

$e = .4289022 \quad V_y = -.007954295$

$n = .61405312 \quad V_z = -.004451284$

$a = 1.3708778$

$P = 1.6050853$

$\text{MOID} = .0000 \quad H = 30.60 \quad G = .15 \quad U = 6$

По имеющимся в наличии наблюдениям, общим числом 14, на интервале
с 2018 06 02.343300 по 2018 06 02.500960 найдена орбита:

$T = \text{JDT } 2458200.500000 = 2018 \text{ 03 } 23.000000$

$M = 282.867961 \quad x = -1.366672733$

$\text{Peri} = 256.082909 \quad y = -.562628746$

$\text{Node} = 71.881627 \quad z = -.152627853$

$\text{Incl} = 4.279237 \quad V_x = .009972774$

$e = .4290349 \quad V_y = -.007952104$

$n = .61388565 \quad V_z = -.004450609$

$a = 1.3711271$

$P = 1.6055232$

$\text{MOID} = .0000322 \quad H = 30.24 \pm .08 \quad G = .15 \quad U = 7$

Орбита представляет использованные наблюдения со средней ошибкой .43".
Отброшено 0 взвешенных условных уравнений по правилу трех сигм .

Матрица ковариации координат и скоростей имеет вид:

.1746905D-07	.2413666D-07	.7069883D-08	-.3775500D-09	-.3883879D-09	-.1194160D-09
.2413666D-07	.3398707D-07	.9784937D-08	-.5236597D-09	-.5448013D-09	-.1656280D-09
.7069883D-08	.9784937D-08	.2863545D-08	-.1528524D-09	-.1573988D-09	-.4836649D-10
-.3775500D-09	-.5236597D-09	-.1528524D-09	.8166113D-11	.8419739D-11	.2582896D-11
-.3883879D-09	-.5448013D-09	-.1573988D-09	.8419739D-11	.8739713D-11	.2663100D-11
-.1194160D-09	-.1656280D-09	-.4836649D-10	.2582896D-11	.2663100D-11	.8171818D-12

Сближения с Землей

В момент $T = \text{JDT}2458271.340625 = 2018 \text{ 06 } 01.840625$ тело вошло в сферу действия Земли.

Расстояние тела от центра Земли в этот момент составило 930001.844 км,
скорость относительно Земли $V = 12.4 \text{ км/с}$.

Параметр сближения b (расстояние асимптоты гиперболы (траектории движения тела в сфере действия) от центра Земли) равен 8054.043 км,
радиус захвата = 8601.790 км, вероятность столкновения = 1.0000

В момент $T = \text{JDT}2458272.201304 = 2018 \text{ 06 } 2.701304$ тело вошло в атмосферу Земли на заданной высоте 100. км над уровнем земного сфероида.

Вероятность столкновения равна 1.0000.

Найдены следующие значения параметров траектории тела на входе в атмосферу Земли:

(время Московское (Всемирное время +3.0 часа)):

год месяц день час. мин. сек.

2018 06 02 19 48 44.48 (JD2458272.32551481)

Долгота, широта точки входа, наклон к местному горизонту и азимут направления скорости, скорость относительно Земли и размеры трубки входа:

l (гр) = 18.464 +/- 5.503

fi (гр) = -20.920 +/- .653

$teta$ (гр) = -21.477 +/- 3.981

Az (гр) = 276.904 +/- 1.962

V (км/с) = 16.993 +/- .155

Размеры трубки входа (км)

$sigcsi = 27.10$

$sigdzeta = 80.66$

D (м) = 3.2

M (Т) = 42.1

E (Кт) = 1.5

Заключение

Система создавалась 4 года, работает и является единственной системой мониторинга в РФ, рассматривающей все составляющие проблемы (отдельные задачи решаются в ИНАСАН, НИИПММ, ИДГ).

После внесения желательных изменений и дополнений (движение и фрагментация тела в атмосфере, включение комет) система «Прогноз» и весь комплекс может стать основным вычислительным инструментом для национальной программы противодействия астероидной опасности.

В ближайшее время «Таблица сближений с Землей и Луной» будет доступна на сайте ИПА РАН.

Спасибо за внимание!