

Санкт-Петербургский государственный университет
Кафедра небесной механики

Баляев Иван Алексеевич

Прогнозирование сближений и соударений
астероидов с Землей и другими планетами

Санкт-Петербург — 2022

Содержание

- Введение
- Программа R^0
- Расположение опасных астероидов
- Массовый расчет вероятностей соударения

Введение

История

- До 1800 года — «камни с неба падать не могут».
- XIX век — астероиды существуют, но далеко от Земли.
- XX век — осознание астероидной опасности.
- XXI век — изучение астероидной опасности.

Наше время

На 20 июня по данным NASA:

- Открыто 29248 NEO.
- 1412 астероидов имеют существенную (для NASA) вероятность столкновения с Землей.
- 917 болидов зафиксировано с 1988 года.

Направления исследований

- Открытие.
- Предсказание.
- Ликвидация угрозы.
- Разное.

Программный комплекс v19

- Поиск возможных соударений осуществляется путем варьирования начальных данных вдоль некоторого одномерного многообразия.
- Начальное сканирование производится с равным шагом.
- При обнаружении сближения шаг дробится, ищется минимальное расстояние.

Программа \mathbb{R}^0

Постановка задачи

По заданным начальным данным вывести список всех сближений с Землей до заданного расстояния на заданном интервале времени.

Подробная постановка задачи

- Метод интегрирования Гаусса — Эверхарта.
- Эфемериды DE430.
- Стабильность работы программы.
- Точность.
- Производительность.

Оптимизация

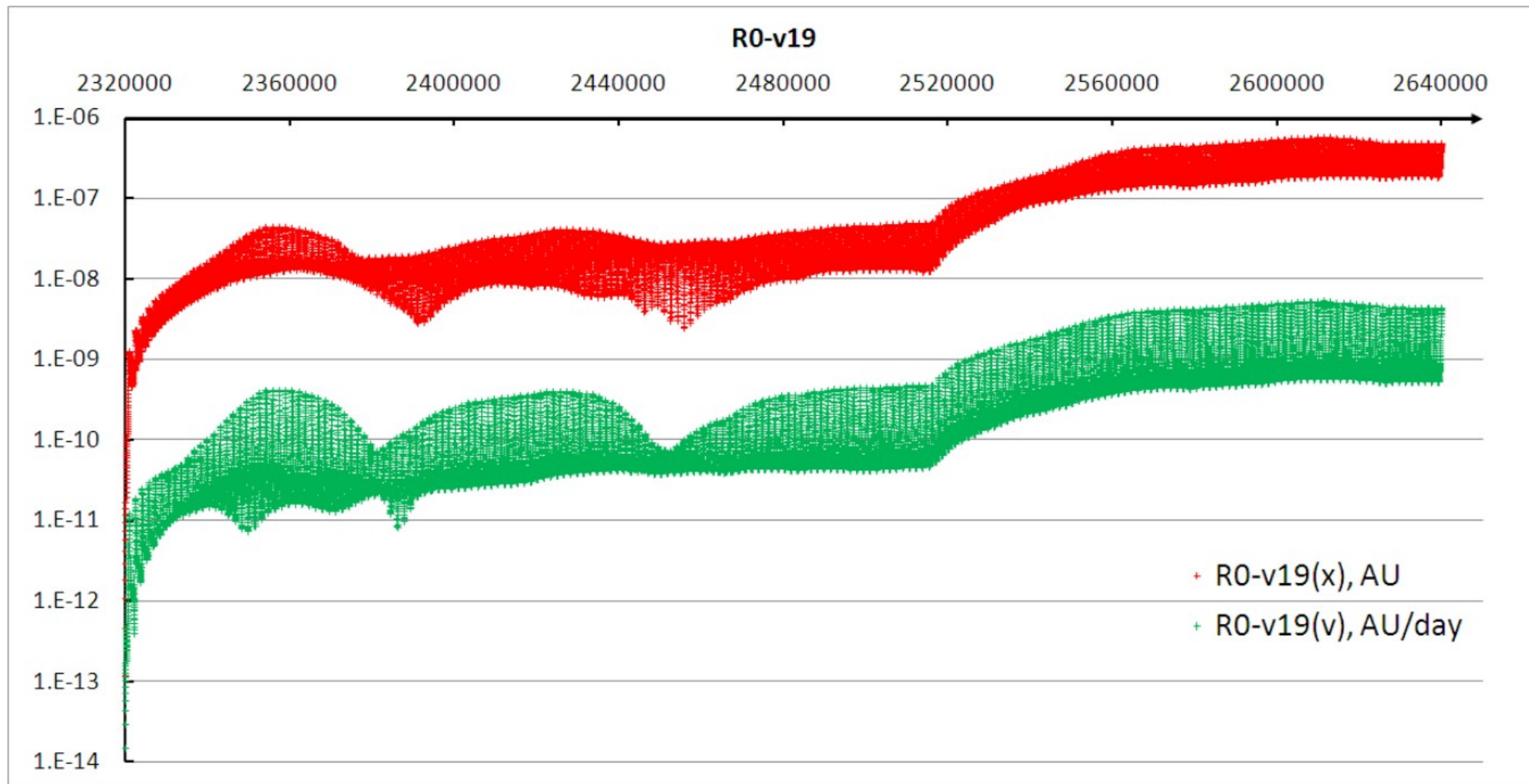
Основная идея — одновременный расчет большого количества виртуальных астероидов с одинаковым шагом. Если часть астероидов приближается к массивному телу, астероиды делятся на группы и объединяются после сближения.

Интегрирование производится только вперед и только один раз. Для оценки траектории астероида в течение шага интегрирования используется коллокационный полином.

КОНТРОЛЬ ТОЧНОСТИ

- Предусмотрена возможность произвести контрольный расчет с меньшим шагом.
- Сравнение со старой программой v19.

Контроль точности



Производительность

- Intel Pentium G3260.
- (99942) Апофис. ~1000 астероидов в окрестности номинальной орбиты.
- 20 000 суток (около 55 лет).
 - v_{19} : 300 мс на астероид.
 - R^0 : 13 мс на астероид.

Тестирование — выбор астероидов

- Астероиды с сайта NASA из списка имеющих вероятность столкнуться с Землей.
- Исключены астероиды размером меньше 30 метров.
- Исключены астероиды с вероятностью соударения менее 10^{-8} .

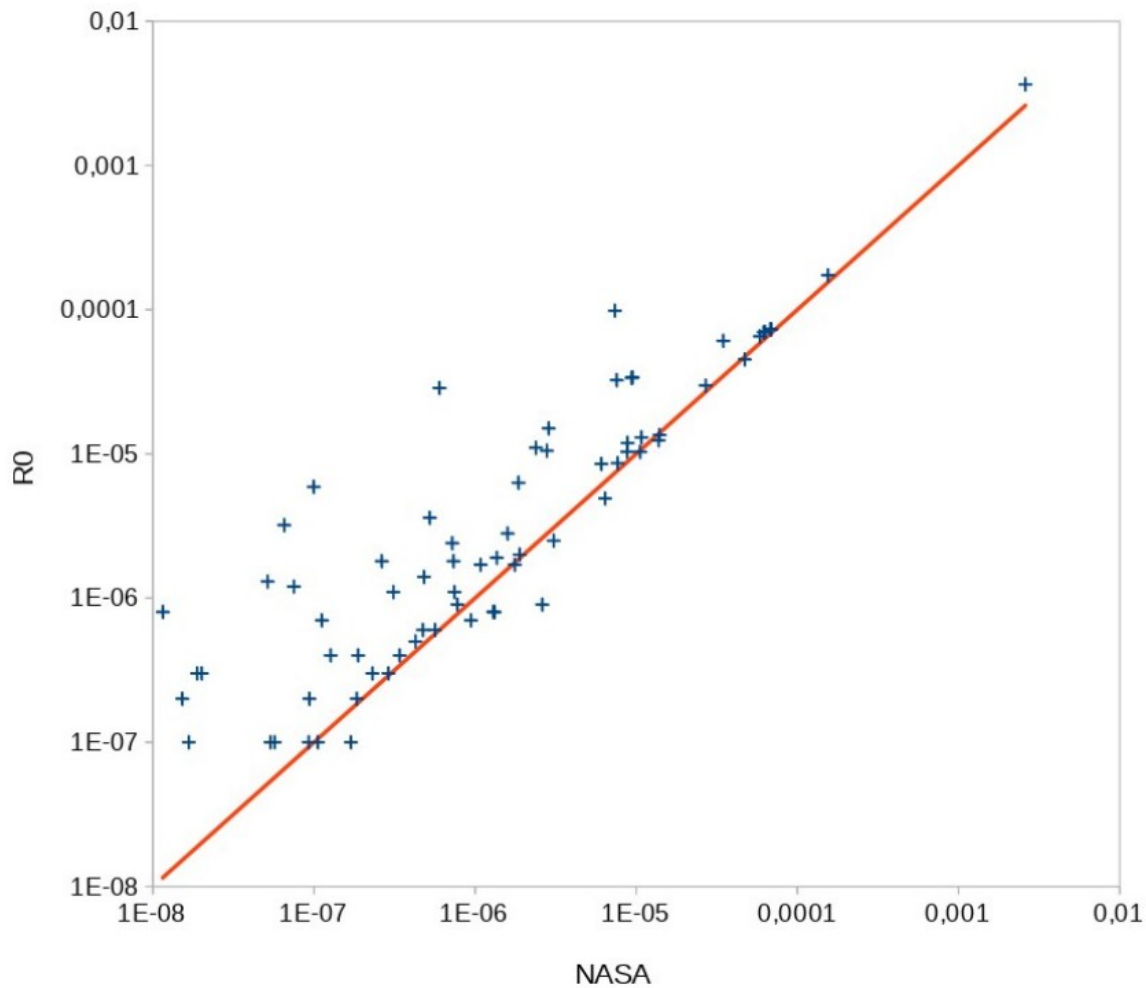
Начальные данные

- Номинальная орбита и матрица ковариаций — с сайта NASA. Распределение считается нормальным.
- Генерация случайных чисел — вихрь Мерсенна.
- На каждый реальный астероид сгенерировано по 10 млн виртуальных.
- Расчет траектории до 2132 года.

Тестирование — результаты

Астероид	NASA	Земля	Луна	Меркурий	Венера	Марс	Юпитер
2000 SG344	26000	36034	110	0	0	0	0
2008 EX5	472	502	91	0	0	0	0
2019 WG2	1650	1793	0	0	0	0	0
2008 OO1	2,31	4	189	0	0	0	0
2001 CA21	0,125	0	0	0	155	3	1
2015 FA345	1,65	1	0	0	0	0	652
1998 DK36	5,64	4	0	6	136	0	0
2004 GE2	0,654	33	0	0	0	101	0
99942	88,5	0	0	0	0	0	0

Тестирование — результаты



Промежуточные итоги

- Новая программа и метод определения вероятностей соударения протестирована на большом количестве астероидов.
- Многие опасные астероиды сближаются и даже могут столкнуться с другими планетами.

Расположение опасных астероидов

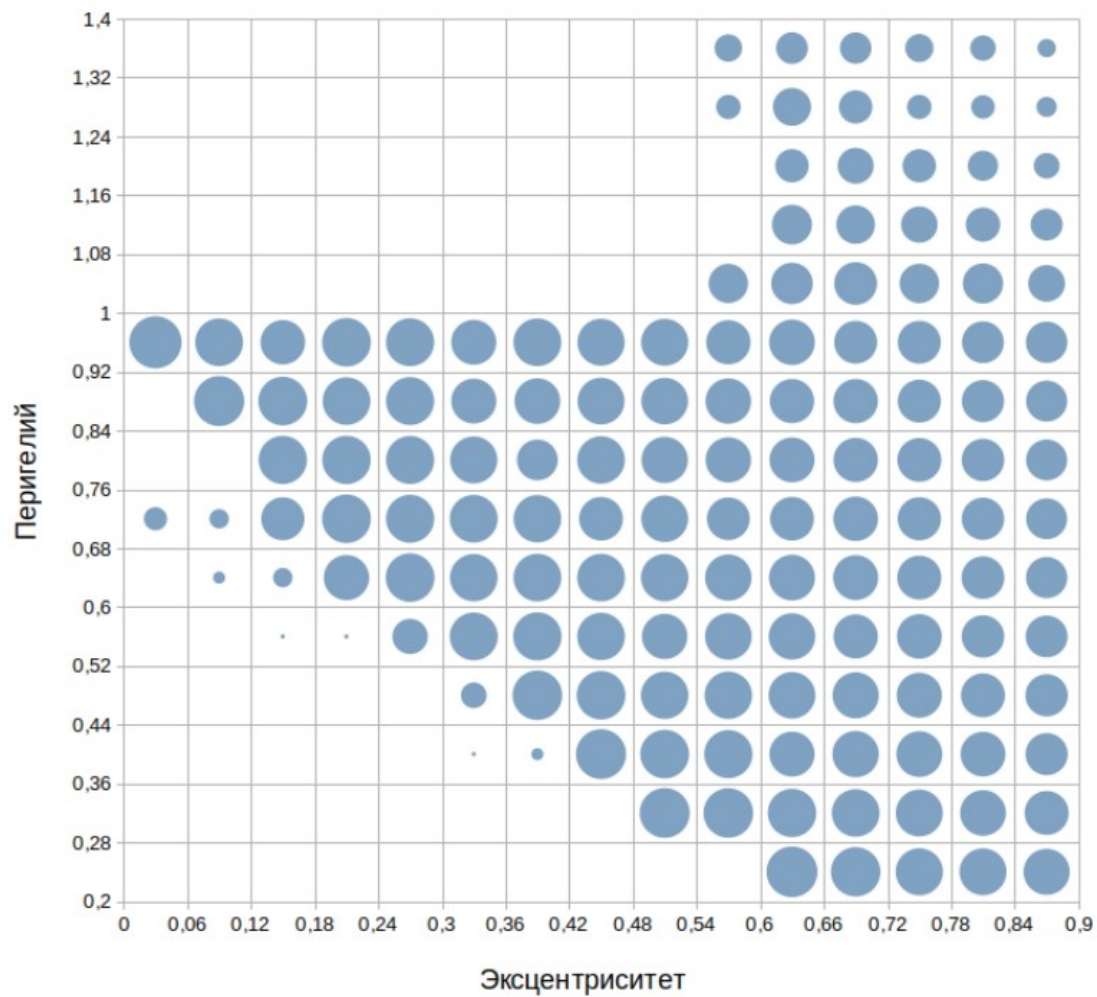
Суть эксперимента

- Берем некоторую комбинацию элементов (e, q, i) .
- Генерируем набор астероидов со случайными остальными элементами.
- Интегрируем на 200 лет вперед.
- Получаем количество сближений с Землей, Луной и другими планетами.

Область сканирования

- Заданный диапазон элементов:
e: 0—0,9
q: 0,2—1,4 а. е.
i: 0°—50°
- Выбрано по 15 значений e и q, 25 значений i. Значения равномерно заполняют диапазон.
- Для каждого набора элементов сгенерировано по 200 000 виртуальных астероидов.

Опасные астероиды



Сближения перед соударением

- Для траекторий соударения были проанализированы предыдущие 100 лет.
- Для Земли 97% траекторий соударения имели сближение с ней до 0,05 а. е. Аналогичный результат получен для Венеры.

Промежуточные итоги

- Выявлены потенциально опасные области элементов орбит за пределами границ АСЗ.
- В течение 100 лет до соударения с Землей вероятно наблюдать по меньшей мере одно сближение с ней (ближе 0,05 а. е.).

Массовый расчет вероятностей соударения

Выбор астероидов

- Исходный список — все известные астероиды Солнечной системы.
- Исключены астероиды малого размера по критерию ($H > 26$).
- Исключены астероиды Главного Пояса по критерию $(q > 1,8) \text{ AND } (Q < 4,0)$.
- Итого набралось 127 690 астероидов.

Трехступенчатая схема

- Этап 1: 2000 виртуальных астероидов на каждый реальный. Отбор по наличию сближения до 1000 радиусов с любой из планет.
- Этап 2: 20 000 виртуальных астероидов на каждый реальный. Отбор по наличию сближения до 100 радиусов.
- Этап 3: 200 000 виртуальных астероидов на каждый реальный.

Результат

- Для 423 астероидов найдены траектории соударения с планетой или Луной.
- Из них 163 астероида — с Землей.
- Несколько астероидов имеют траектории соударения по меньшей мере с двумя планетами.

Вероятности, P·200000

	Earth
2000 SG344	709
2015 CT13	74
2008 HJ	53
2014 YN	47
2000 SB45	34
2008 JL3	28
2018 HW1	27
2001 AV43	23
2017 VJ	21
2000 UK11	21

	Moon
2015 AZ43	12
2008 JL3	9
2001 BA16	7
2008 HJ	3
2007 DX40	2
2008 EX5	2
2015 XA378	2
2020 UL3	2
2019 EM1	2
2012 RR16	2

Вероятности, Р·200000

	Mercury
2009 UM1	5
2018 VB1	2
2019 XQ	2
1998 DK36	1
2016 TH10	1
2020 VY4	1

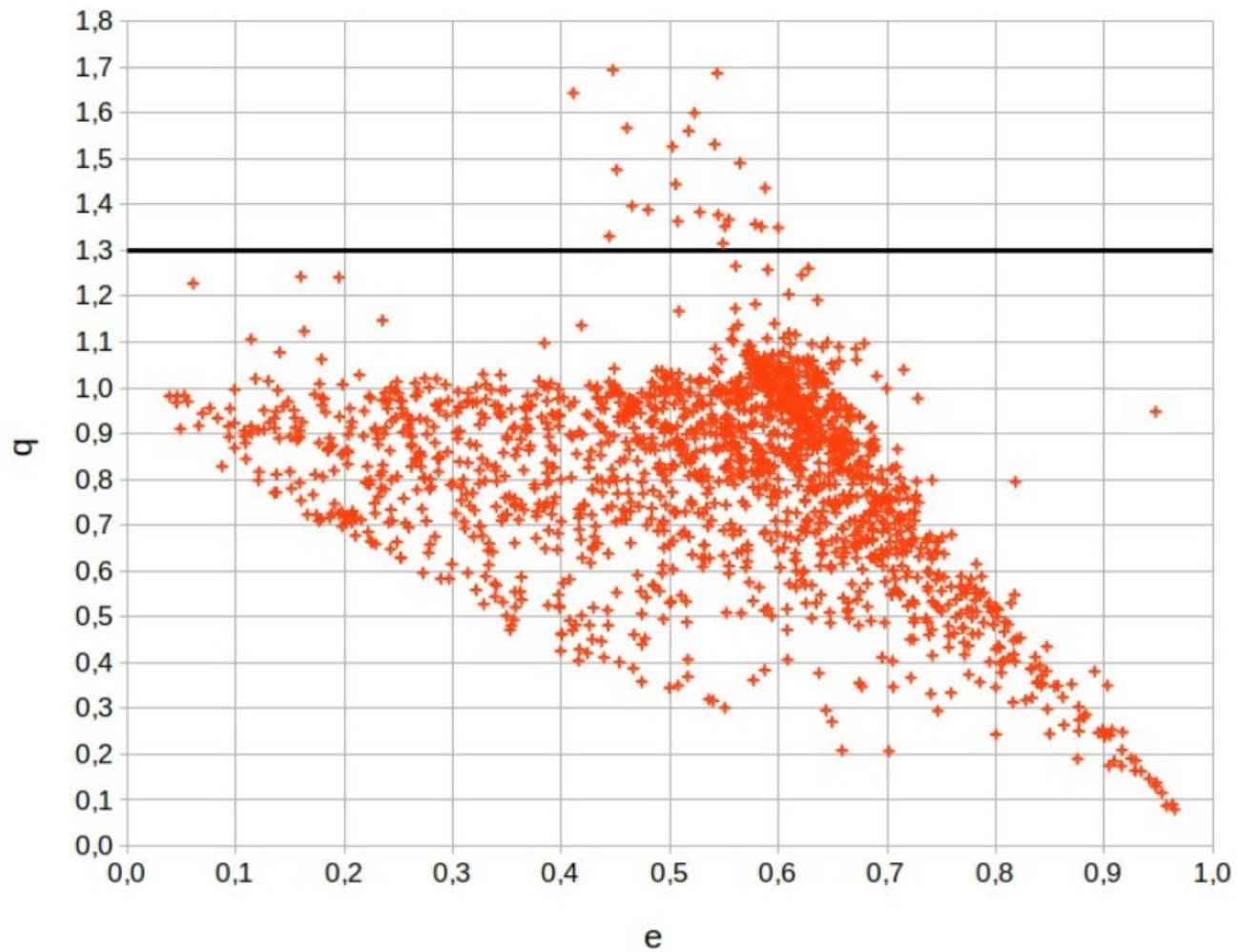
	Venus
2009 CE	144
2020 MA1	132
2019 PB2	55
2015 XK55	40
2018 GQ	14
2012 YF8	13
2015 KP57	12
2017 XJ60	11
2013 KK6	10
2021 AF3	8

Вероятности, P·200000

	Mars
2007 WD5	34
2006 BX39	9
2019 GW19	8
2019 PU	8
2018 KJ2	8
2014 UL115	7
2016 DF1	5
2017 ST19	4
2015 KO120	3
2013 RO9	2

	Jupiter
2018 BJ11	463
2019 JD14	303
2015 RS139	222
2003 WX178	118
2010 CJ109	104
2011 XD3	103
2016 UH162	99
2016 GZ109	85
2014 QY237	76
2014 AW55	63

Опасные астероиды



Промежуточные итоги

- Произведен расчет вероятностей соударения для 127 690 астероидов.
- Для 423 астероидов найдены траектории соударения. Из них 163 астероида — с Землей.
- Для нескольких десятков неоколоземных астероидов найдены траектории сближения с Землей до 100 радиусов до 2132 года.

Общие итоги

- Создание алгоритма и программы, позволивших быстро рассчитывать траектории миллионов виртуальных астероидов.
- Выделение области в пространстве (e, q, i) , где могут находиться опасные для Земли астероиды. Область выходит за границы определения АСЗ.

Общие итоги

- Выделение множества астероидов (>3000), имеющих траектории сближения до 100 радиусов с одной из планет до 2132 года.
- Получение вероятностей соударения астероидов до 2132 года со всеми планетами и Луной.

Общие итоги

- Нахождение астероидов с перигелийным расстоянием более 1,3 а. е., имеющих траектории сближения с Землей до 100 радиусов до 2132 года.
- Получение новым способом вероятности сближения астероида с Землей в течение 100 лет до соударения. 97% имели сближение до 0,05 а. е.