

Правительство Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Санкт-Петербургский государственный университет»

Математико-механический факультет

Кафедра небесной механики

**Петров Никита Александрович**

**Исследование возможных соударений астероидов с Землей**

Выпускная квалификационная работа

Допущена к защите.

Зав. кафедрой:

(д.ф.-м.н., проф.) Холшевников К.В.

Научный руководитель:

(д.ф.-м.н., проф.) Соколов Л.Л.

Рецензент:

(к.ф.-м.н., н.сотр.) Вавилов Д.Е.

Санкт-Петербург

2016

SAINT-PETERSBURG STATE UNIVERSITY

Mathematics & Mechanics Faculty

Chair of Celestial Mechanics

Nikita Petrov

Research of virtual impacts of asteroids with the Earth

Graduation Thesis

Admitted for defence.

Head of the chair:

(Professor) Konstantin Kholshevnikov

Scientific supervisor:

(Prof.) Leonid Sokolov

Reviewer:

(Science fellow) Dmitry Vavilov

Saint-Petersburg

2016

# Содержание

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>Введение</b>   | <b>4</b>  |
| <b>2</b> | <b>Два опасных астероида</b>  | <b>5</b>  |
| 2.1      | Астероид Апофис . . . . .   | 5         |
| 2.2      | Астероид 2015 RN35 . . . . .  | 8         |
| <b>3</b> | <b>Метод выделения соударений</b>   | <b>10</b> |
| 3.1      | Вычисление траекторий . . . . .   | 10        |
| 3.2      | Программный комплекс v19 . . . . .  | 12        |
| <b>4</b> | <b>Соударения Апофиса</b>   | <b>19</b> |
| 4.1      | Соударения Апофиса после сближения в 2036 году . . . . .  | 19        |
| 4.2      | Соударения Апофиса после сближения в 2051 году . . . . .  | 22        |
| 4.3      | Сравнение с характеристиками соударений Апофиса, приведенными на сайте НАСА . . . . .                       | 27        |
| <b>5</b> | <b>Соударения астероида 2015 RN35</b>   | <b>35</b> |
| 5.1      | Начальные данные, номинал 30.11.2015 . . . . .  | 35        |
| 5.2      | Результаты работы программного комплекса v19 (2015 RN35, номинал 30.11.2015) . . . . .                      | 35        |
| 5.3      | Сравнение положений возможных орбит соударений на сайте НАСА и наших результатов . . . . .                  | 51        |
| 5.4      | Предварительные выводы по 2015 RN35 . . . . .   | 51        |
| 5.5      | Новые данные об астероиде 2015 RN35 на сайте NASA после второго этапа наблюдений . . . . .                  | 52        |
| 5.6      | Начальные данные для астероида 2015 RN35 (второй этап наблюдений, номинал 07.03.2016) . . . . .             | 54        |
| 5.7      | Сравнение данных на сайте НАСА и результатов численного интегрирования программным комплексом v19 . . . . . | 54        |
| 5.8      | Результаты работы программного комплекса v19 (второй этап наблюдений, номинал 07.03.2016) . . . . .         | 56        |
| 5.9      | Сравнение положений возможных орбит соударений на сайте НАСА и наших результатов . . . . .                  | 65        |
| 5.10     | Окончательные выводы по 2015 RN35 . . . . .   | 65        |
| <b>6</b> | <b>Заключение</b>   | <b>70</b> |
|          | <b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ</b>  | <b>71</b> |

# 1 Введение

Астероидно-кометная опасность — одна из сложных, междисциплинарных проблем, актуальность которых сегодня общепризнана. Астрономические компоненты этой проблемы включают в себя определение и уточнение орбит астероидов из наблюдений, выделение опасных астероидов, для которых возможны тесные сближения и соударения с Землей и более подробное исследование возможных траекторий этих опасных астероидов. Последствием соударения Земли с достаточно крупным астероидом может быть глобальная катастрофа, размеры которой трудно оценить. В последнее время открыто большое число потенциально опасных объектов, для них получены траектории возможных соударений с Землей (к счастью, маловероятные). С учетом опасности глобальной катастрофы необходимо заблаговременно выделять все возможные соударения с Землей и исследовать соответствующие траектории, несмотря на их малую вероятность. Заблаговременное обнаружение угрозы дает возможность предотвращения соударения с меньшими затратами ресурсов.

В настоящее время возможные соударения опасных астероидов с Землей приводятся на сайтах НАСА ([neo.jpl.nasa.gov /risk /](http://neo.jpl.nasa.gov/risk/)) и NEODyS ([newton.dm.unipi.it /neodys2 /index.php?pc=1.0](http://newton.dm.unipi.it /neodys2 /index.php?pc=1.0)), однако соответствующие списки необходимо дополнить, как будет показано в настоящей работе. Для рассмотренных ниже астероидов Апофис и 2015 RN35 на указанных сайтах приведены не совпадающие списки соударений.

Для каждого астероида орбита известна с ограниченной точностью, фактически известна трубка возможных траекторий. Если установлено, что она пересекается с Землей, возможно соударение. Возможны ли другие соударения вблизи найденного (в той же трубке), как устроено их множество? Различные проекты предотвращения соударений предполагают небольшое изменение траектории астероида. В связи с этим необходимо знать, где вблизи могут находиться другие опасные зоны. Тот же вопрос возникает, если речь идет о разрушении астероида: крупные осколки оказываются на близких к исходной орбитах.

Трубка возможных траекторий, содержащих соударение, всегда больше Земли, иначе соударение было бы достоверным фактом. Поэтому возможны также тесные сближения, заметно изменяющие орбиту. В том числе возможны, вообще говоря, переходы на резонансные орбиты со сближениями (или даже соударениями) через небольшое число лет. Такие сближения называют резонансными возвратами. На возможность и важность резонансных возвратов специалисты обратили внимание благодаря астероиду Апофис. Однако приведенное рассуждение справедливо и для других опасных объектов. Для множества областей, соответствующих возможным сближениям (включая соударения), можно ожидать сложную структуру, похожую на структуру фрактала. Такие области, ведущие к соударениям, мы называем щелями. Действительно, имеет место "рекурсия": каждое сближение порождает несколько новых сближений, и так далее. Размеры последующих щелей, ведущих к

соударениям, убывают.

Прогнозирование возможных соударений, связанных с резонансными возвратами – трудная задача из-за потери точности при сближениях. Этой задаче и посвящена настоящая работа.

Разработан оригинальный метод выделения возможных соударений астероидов с Землей. Этот метод применен для астероида Апофис и 2015 RN35, найдено множество возможных соударений этих астероидов с Землей, большинство из них были ранее неизвестны. Получены основные характеристики и свойства соответствующих траекторий. Правильность полученных результатов подтверждается сравнением с аналогичными результатами, полученными американскими коллегами и публикуемыми на сайте <http://neo.jpl.nasa.gov/risk/>.

Вторая глава содержит обзор некоторых результатов исследования траекторий соударения астероидов с Землей. Параграф 1.1 посвящен истории астероида Апофис, параграф 1.2 – выбору астероида 2015 RN35 для дальнейшего исследования.

Третья глава содержит описание применяемого в настоящей работе метода выделения и исследования траекторий соударения.

В четвертой главе приведены полученные нами характеристики траекторий соударения астероида Апофис. Параграф 2.1 - соударения, связанные с резонансными возвратами после сближения в 2036 году, параграф 2.2 - соударения, связанные с резонансными возвратами после сближения в 2051 году, в параграфе 2.3 сравниваются характеристики 13 "основных" соударений, полученных нами и приведенными на <http://neo.jpl.nasa.gov/risk/>.

Глава 5 посвящена соударениям с Землей астероида 2015 RN35. Использовались две номинальные орбиты, соответствующие двум этапам наблюдений этого астероида. После второго этапа наблюдений точность большой полуоси увеличилась в восемь раз, и существенно изменилось множество возможных соударений.

В Заключении сформулированы основные результаты и намечены нерешенные задачи.

## 2 Два опасных астероида

### 2.1 Астероид Апофис

Астероид Апофис, открытый в 2004 году в обсерватории Китт Пик (США), имеет достоверно установленное сближение с Землей на расстояние около 38 тысяч км 13 апреля 2029 года. После этого тесного сближения происходит значительная потеря точности из-за расхождения возможных траекторий из области погрешности начальных данных. Среди возможных до 2013 г. траекторий, в частности, имелось маловероятное соударе-

ние 13 апреля 2036 года. Размеры Апофиса были тогда около 270 метров, и соударение вызовет катастрофу, масштабы которой трудно предвидеть. Точность его орбиты анализировалась, в частности, в работах российских авторов (Ягудина, Шор, 2005), (Виноградова и др., 2008), (Кочетова и др., 2009), (Шор и др., 2011). Проведенные исследования возможностей по изменению орбиты этого астероида показывают, что коррекция орбиты эффективна лишь при проведении ее достаточно заблаговременно до сближения в 2029 году, см. напр., (Ивашкин, Стихно, 2008), (Соколов и др., 2008). Однако в апреле 2036 года возможно не только соударение, но и просто тесное сближение Апофиса с Землей. Второе рассеяние возможных траекторий приведет к практически недетерминированному движению, содержащему множество возможных опасных сближений и соударений сразу после 2036 года. Оценки вероятности столкновения Апофиса с Землей оказываются весьма чувствительными относительно исходных данных, как показано в работах (Виноградова и др., 2008), (Кочетова и др., 2009), (Шор и др., 2011) и поэтому разброс их значений велик. В работе (Шор и др., 2011) рассмотрены результаты последних уточнений орбиты Апофиса с учетом самого полного на тот момент набора наблюдений. Возможные траектории Апофиса несколько приблизились к "щели", ведущей к соударению в 2036 году, однако из-за уменьшения размеров трубки этих траекторий вероятность столкновения ничтожно мала. В то же время при других способах обработки наблюдений вероятность столкновения могла достигать 0.000027. Разработке и анализу различных методов оценки вероятности соударения посвящена диссертация Д.Е. Вавилова (Вавилов, 2015). В ней показано, что для астероида Апофис не работают многие методы оценки из-за сильной нелинейности, обусловленной сближениями с Землей. Следует также учитывать возможность дополнительных негравитационных ускорений, в частности, связанных с эффектом Ярковского. Если выбрать "самое опасное" значение дополнительного негравитационного ускорения из диапазона возможных, то вероятность соударения достигает 0.0022 (Шор и др., 2011). Как отмечается в работе (Хьюбнер и др., 2009), "поскольку потенциальные последствия столкновения с опасным объектом имеют глобальный масштаб", то "разговор о его [незначительной] вероятности неуместен". Когда условия наблюдения Апофиса снова будут благоприятны, соответствующие вероятности будут радикально пересмотрены. Естественно необходимо подготовиться заранее и рассмотреть различные варианты развития событий, включая самые неблагоприятные.

Первый список резонансных возвратов Апофиса приведен в (Chesley, 2006). Возможные сближения и соударения Апофиса рассматривались также в (Соколов и др., 2008), (Yeomans et al., 2009), (Sokolov et al., 2010), (Chesley, 2011), (Соколов и др., 2012), (Соколов и др., 2013), (Farnocchia et al., 2013a), (Farnocchia et al., 2013b). До 2011 г. рассматривались возвраты после сближений в 2029 и 2036, позднее - после 2029 и 2051. Сближение в 2051 расположено вблизи номинальной орбиты Апофиса (Chesley, 2011). В (Соколов и др., 2008) приведено одно соударение в 2040 году после сближения в 2036 году, а также сближения

в 2037, 2038, 2039 годах. В (Sokolov et al., 2010) приведено 6 соударений в 2040, 2041, 2042, 2044, 2047, 2051 г. после сближения в 2036 г. После сравнения с результатами (Yeomans et al., 2009) (6 соударений) установлено, что три соударения в этих работах совпадают (в 40, 42, 51 г.), а три "новых" соударения (в 41, 45, 59 г.) были подтверждены. В (Sokolov et al., 2010) рассматривались области начальных данных, ведущих к соударениям. На плоскости: изменение барицентрического расстояния - изменение барицентрической скорости область, ведущая к соударению, представляет собой узкую полосу (линию), соответствующую постоянному значению большой полуоси. Ширина этой полосы характеризует размер щели, также как и диапазон минимальных геоцентрических расстояний в 2036. В работе (Chesley, 2011) приведены важные возможные соударения в в 36, 56, 68, 68, 76 г. и их характеристики. 4 последних соударения связаны со сближением с Землей в 2051, соответствующие траектории расположены вблизи номинальной орбиты. В (Соколов и др., 2012) приведены 67 возможных соударений после сближения с Землей в 2036. Положения щелей определяются отклонениями начального значения большой полуоси (или минимальным геоцентрическим расстоянием в 2036). Размеры щелей определяются диапазоном больших полуосей в момент 01.05.2035 для каждой траектории соударения (или диапазоном минимальных геоцентрических расстояний в 2051 г. для каждой траектории соударения). Эти два различных метода определения положений щелей и их размеров хорошо согласуются друг с другом. В (Соколов и др., 2012) обсуждается устойчивость положений и размеров щелей, а также минимальных геоцентрических расстояний при соударениях относительно малых изменений модели движения (DE405, DE423) и номинальной орбиты. Там же обсуждается фракталоподобная структура положений щелей. В (Соколов и др., 2013) также обсуждаются возможные соударения астероидов AG5, VK184, найдены их новые соударения. Используются по два метода определения положений и размеров щелей, аналогичные вышеописанному методам для Апофиса.

В 2012 открылось окно для наблюдений Апофиса с поверхности Земли. Произошло уточнение его орбиты. Обычно после уточнения орбиты астероид исключается из списка опасных объектов, примерами являются астероиды AG5, VK184 и многие другие. Апофис является исключением из этого правила.

Несмотря на сильное разбегание траекторий после сближений, основные характеристики найденных возможных соударений (положение и размеры щелей, ведущих к соударениям, минимальные геоцентрические расстояния) мало зависят от модели движения. Этот важнейший факт, свидетельствующий о надежности полученных результатов, был получен в (Соколов и др., 2012), где находились соударения с использованием различных моделей движения планет (DE423, DE405, EPM2008). Другое важнейшее свидетельство надежности получено при сравнении с независимо вычисленными в НАСА возможными соударениями (Yeomans et al., 2009), (Chesley, 2011), (Соколов и др., 2012).

Рассеяние возможных траекторий после сближения в 2051 г., расположенное вблизи

номинальной орбиты (по сравнению со сближением в 2036 г.) также дает множество соударений, в том числе наиболее вероятное в 2068 году (Chesley, 2011). Щели, ведущие к соударениям в окрестности номинальной орбиты, существенно меньше по размерам, чем щель 2036 года. Причина в том, что они ведут к соударениям после двух рассеяний в 2029 и 2051 году, а щель 2036 года - только после рассеяния в 2029 году. В результате получилось, что вероятности соударений в 2036 и 2068 годах были одного порядка (Chesley, 2011). Первое – большая щель далеко от номинала, второе – наоборот, малая щель вблизи номинала.

## 2.2 Астероид 2015 RN35

На 21 декабря 2015 года на сайте НАСА было 13509 астероидов, сближающихся с Землей до расстояния 1.3 а.е. (NEA). Из них опасных астероидов, у которых  $H < 22^m$  (т.е.  $D > 140$  метров) и  $MOID < 0.05$  а.е., оказалось 1627. В разделе Impact Risk на сайте НАСА в этот момент было 593 астероида. В этом разделе для каждого астероида приведено значение его диаметра, вычисленное при альбедо равном  $p=0.154$ . Были отобраны те астероиды, у которых диаметр больше 50 метров, и разделены на 5 групп по размерам.

Всего - 593

$D > 0.050$  км - 107

$D > 0.100$  км - 47

$D > 0.140$  км - 33

$D > 0.500$  км - 8

$D > 1.000$  км - 2

Далее было проведено исследование каждой группы по всевозможным параметрам, начиная с самых больших астероидов и составлена таблица, в которой представлены некоторые наиболее важные данные о 107 астероидах в этих пяти группах с размерами более 50 метров. Как оказалось, только 5 астероидов имеют номера, т.е. их орбиты хорошо определены и ошибки элементов сравнительно маленькие. В разделе Impact Risk только для одного астероида Апофис (99942) возможные опасные орбиты найдены с 2060 года по 2105 годы, а для остальных четырех астероидов возможные опасные орбиты найдены после 2101 года. Остальные 102 астероида, к сожалению, имеют орбиты с небольшой точностью, что обусловлено тем, что их орбиты вычислены по небольшому числу наблюдений на небольшой дуге в одном появлении.

В результате анализа различных параметров 102 астероидов получена таблица, в которой приведены некоторые данные о выбранных 23 астероидах и, прежде всего, ошибки по большой полуоси. После исследования этой таблицы был выбран астероид 2015 RN35, у которого наиболее приемлемая точность элементов орбиты и возможные орбиты соударений есть в этом столетии. Дальнейшее подробное исследование информации об астероиде



Таблица 1: Основные параметры возможных орбит соударений астероида 2015 RN35 с Землей на интервале времени 2043-2109 на сайте НАСА (номинал 30.11.2015)

| Date          | Distance | Width    | Sigma LOV | Impact Probability | Palermo Scale | Torino Scale |
|---------------|----------|----------|-----------|--------------------|---------------|--------------|
| yyyy-mm-dd.dd | (rEarth) | (rEarth) | (rEarth)  |                    |               |              |
| 2043-12-13.10 | 0.36     | 2.17e-03 | 1.04229   | 4.0e-06            | -4.35         | 0            |
| 2052-12-14.56 | 0.52     | < 1.e-04 | 0.46865   | 4.0e-07            | -5.47         | 0            |
| 2056-12-18.57 | 0.34     | 1.39e-02 | 2.54366   | 4.6e-08            | -6.45         | 0            |
| 2073-12-12.67 | 0.27     | 4.81e-03 | 1.07922   | 8.1e-07            | -5.35         | 0            |
| 2074-12-12.66 | 0.78     | 7.61e-03 | -0.27065  | 1.1e-06            | -5.23         | 0            |
| 2082-12-15.35 | 0.98     | < 1.e-04 | 0.49892   | 3.6e-08            | -6.78         | 0            |
| 2086-12-16.27 | 0.76     | 1.18e-02 | -0.26333  | 4.2e-07            | -5.73         | 0            |
| 2108-12-15.37 | 0.77     | < 1.e-04 | -0.44445  | 4.1e-09            | -7.86         | 0            |
| 2109-12-16.60 | 0.43     | < 1.e-04 | 0.14735   | 4.6e-07            | -5.81         | 0            |

2015 RN35 в трех разделах Impact Table, Orbit Elements и Close Approach на сайте НАСА показало, что этот астероид был выбран не случайно и очень удачно.

Астероид 2015 RN35 был открыт 9 сентября 2015 года на обсерватории Pan-STARRS 1 при сближении астероида с Землей на расстоянии 0.1907 а.е. (28.53 млн. км), а наименьшее расстояние с Землей 0.1561 а.е. (23.35 млн. км) произошло 27 сентября 2015 года. Видимая звездная величина астероида в момент открытия была приблизительно  $22^m$ . На первом этапе было получено 33 наблюдения на дуге 55 суток (2015-Sep-09.52 to 2015-Nov-03.64). После обработки наблюдений и улучшения орбиты на сайте НАСА было опубликовано решение, полученное 30 ноября 2015 года, которое легло в основу наших дальнейших исследований.

В таблице 1 приведены возможные орбиты соударений астероида 2015 RN35, вычисленные на интервале времени 2043-2109 годы и представленные в разделе Impact Risk сайта НАСА. Исследование данных о тесных сближениях астероида 2015 RN35 с Землей на сайте НАСА в ближайшем будущем показало, что этот астероид будет сближаться с Землей в окрестности 30 января 2016 года, следовательно возможны новые наблюдения, увеличение дуги наблюдений, улучшение орбиты и как следствие уменьшение ошибок элементов орбиты. Все это должно привести к улучшению наших знаний об орбите астероида и как следствие к более правильным знаниям о возможных орбитах соударений.

## 3 Метод выделения соударений

### 3.1 Вычисление траекторий

Для прямого численного интегрирования с нынешними начальными данными и поиска таким образом опасных траекторий астероида Апофис со сближениями после 2036 (2051) года во многих случаях не хватает точности (Быкова, Галушина, 2007), (Соколов и др., 2008). Причина — рассеяние возможных траекторий при сближениях с Землей в 2029 и 2036 годах. Поэтому для поиска интересных нас движений область допустимых начальных данных, размеры которой зависят от погрешности начальных данных, транспортируется вдоль траекторий за момент тесного сближения в 2029 году, например, в 2035 год. При этом размеры области начальных данных, включающей условия для множества опасных траекторий, увеличиваются на несколько порядков. В новой области поиск этих данных уже не вызывает принципиальных затруднений. Использование порождающих квазислучайных решений, составленных из резонансных орбит соударения с помощью метода точечных гравитационных сфер (ТГС), оказывается весьма полезным как для качественного описания множества опасных траекторий, так и в качестве начального приближения (Соколов и др., 2008).

Для численного построения траекторий мы использовали интегратор Эверхарта (Everhart, 1974). При расчетах обычно использовались параметры интегратора: NOR=15, LL=10, NI=2.

Вычисления проводились в барицентрической экваториальной системе координат ICRF, эпоха J2000.0.

Для поиска возможных столкновений с Землей астероида использовались планетные эфемериды DE405, позднее DE430 (иногда также DE423, EPM2008).

Для Апофиса использовались различные наборы начальных данных. Первый взят с сайта НАСА <http://neo.jpl.nasa.gov/cgi-bin/db?name=99942>, он был опубликован там 18 мая 2006 г. Вторые начальные условия получены в работе (Шор и др., 2011) на 23 июля 2010 г. и представлены в ней как решение "А". Наконец, использовались "современные" начальные данные Апофиса, решение 2014 года на сайте НАСА.

Важно то, что для поиска соударений варьировались начальные данные на одномерном многообразии — среднее движение, или большая полуось, или просто одна из фазовых координат.

Обычно мы меняли одну координату в начальный момент, после фиксации тесного сближения мы производили сдвиг вдоль траектории до некоторого следующего момента. Координаты и скорости в этот следующий момент мы считали начальными и повторяли варьирование одной из координат до момента фиксации соударения. Таким способом мы преодолевали потерю точности, обусловленную сближением Апофиса с Землей в 2029.

Для вычислений использовался высокопроизводительный компьютерный кластер Санкт-Петербургского ун-та. Кластер состоит из 384 ядер. Для нашей задачи используется не более чем 64 ядра. Программный комплекс использует алгоритмы распараллеливания потоков данных по технологии MPI для оптимизации времени вычислений.

Для каждого соударения мы имеем узкую трубку траекторий в 7-мерном пространстве (3 координаты, 3 скорости и время). Конец траектории - соударение. Для каждой траектории с соударением и некоторого момента времени мы имеем малую область (щель) в пространстве координат и скоростей, ведущую к соударению. Каждая щель соответствует узкой области больших полуосей.

Для описания траекторий соударения Апофиса часто используют понятие "keyhole". Именно, keyhole есть область в  $b$ -плоскости для Апофиса в момент 13.04.29, соответствующая некоторому соударению. Мы не используем keyhole в этом точном смысле. Для описания положений и размеров щелей в разные моменты времени мы берем соответствующие значения больших полуосей. Важно, что различные описания дают согласованные результаты.

Основные характеристики щелей следующие:

1. Дата и момент соударения.
2. Положение щели. Для оценки положения щели Апофиса в некоторый момент времени мы используем в настоящей работе отклонение большой полуоси от значения, ведущего к "основному" соударению 2068 г. Такое относительное положение щели можно получить сравнительно точно и независимо от номинальной орбиты. Альтернативный метод оценки положения щели - использование минимального геоцентрического расстояния в предыдущем тесном сближении. Для Апофиса это 2051 и 2036 г.
3. Размер щели. Чтобы оценить размер щели в некоторый момент времени, вычислялся диапазон больших полуосей, ведущих к соударению. Альтернативный метод оценки - использование диапазона минимальных геоцентрических расстояний в предыдущем тесном сближении (2036, 2051 г.) Мы вычисляли диапазоны больших полуосей, соответствующих соударениям на моменты после 2029, обычно на 01.05.2035, иначе эти размеры могут быть слишком малы.
4. Минимальное геоцентрическое расстояние при соударении для соответствующих траекторий.

Если некоторое соударение найдено и щель не слишком мала, вычисление этих характеристик не представляет принципиальных трудностей.

Для поиска и выделения возможных орбит соударений на базе многолетнего опыта огромных вычислений нами был разработан так называемый метод "цепочек" .

Исходной явилась программа, разработанная в 2006 году в лаборатории небесной механики и звездной астрономии СПбГУ А.А. Башаковым, в которой вычислялись все сближения астероида с планетой менее заданного расстояния на заданном интервале времени.

В настоящее время вычисления производятся с использованием программного комплекса, именуемого v19. В его создании принимал активное участие сотрудник кафедры астрофизики СПбГУ А.А. Васильев.

### 3.2 Программный комплекс v19

Программный комплекс v19 состоит из трех этапов. Основные - первые два этапа, а третий этап необходим для особенных астероидов.

Первый этап - это вычисление эфемериды. В файле начальных данных задаются начальный и конечный моменты интегрирования и прямоугольные координаты и скорости рассматриваемого астероида. Далее интегрируются уравнения движения и вычисляется траектория в виде эфемеридных данных, т.е. координаты и скорости на определенные моменты времени с шагом вывода. По этим определяющим данным можно получить много других различных величин. Но эти данные не выводятся, а запоминаются несколько последних точек. Далее, если на пути астероида встречается планета, т.е. предстоит сближение на расстоянии меньше заданного, то включается подпрограмма вычисления момента такого сближения и наименьшего расстояния с планетой в этот момент. Вначале программа находит три последовательных момента времени с начальным шагом интегрирования, среди которых на второй момент приходится наименьшее расстояние с планетой. Далее подпрограмма делит начальный момент интегрирования на десять равных частей и проводит интегрирование уравнений движения с меньшим шагом в обратном направлении, пока не находит три момента времени с таким же условием как и раньше. Подпрограмма вычисляет момент времени и расстояние с высокой точностью. Если начальный шаг интегрирования равен 10 суткам, то окончательный момент сближения вычисляется с точностью до  $10^{-7}$  суток, а расстояние до планеты вычисляется с точностью до  $10^{-2}$  км (1а.е.= 149 597 871 км). Таким образом, для начального положения тела, т.е. прямоугольных координат и скоростей в заданный начальный момент времени, программа с высокой точностью на заданном интервале времени вычисляет все сближения с планетой и многие параметры, которые могут быть записаны в выходном файле. Итак у нас вычислена траектория астероида для одного набора начальных данных.

Будем варьировать только одну переменную - координату  $x$ . В области шириной  $\pm 3 \sigma$  относительно номинальной орбиты астероида ( $1 \sigma$  - ошибка по большой полуоси) выберем шаг сканирования, который меньше  $1 \sigma$  приблизительно на 4 десятичных порядка (10000 раз). Тогда число точек сканирования этой области окажется равным 60 000. Основные исследования и разработка метода проводились прежде всего для опасного астероида Апофис, поэтому оценки и результаты вычислений будут приводиться для астероида Апофис. Время вычислений одной траектории на интервале времени 2006-2100 годы оценивается около 8 секунд. Следовательно время вычислений для всей совокупности 60000 точек со-

ставит (480000 секунд=8000 минут=5.56 суток), т.е. около 1 недели процессорного время, но если исходить из практических реалий, то время вычислений может составить 1,5 - 2 недели или больше. Если каждая траектория вычислена на интервале времени 2006-2100 годы и среднее число сближений астероида Апофис за это время составит приблизительно 10, то общее число строк выходного файла `aprch_out.txt` можно оценить в 600000, поэтому объем выходного файла может быть оценен в 60-70 Мб. Из этого большого объема вычислительного материала можно попытаться извлечь полезную информацию для дальнейших вычислений. Фактически изучается двумерная поверхность, т.е. функция  $dr(t,x)$  от двух переменных время  $t$  и координата  $x$ , где  $dr$  - расстояние от астероида до центра Земли (планеты). Эта поверхность имеет довольно сложную структуру. Если представить, что для картинки выводятся все промежуточные значения координаты  $x$  с шагом интегрирования по времени (шаг вывода) и результаты вычислений всех сближений астероида с Землей, то поверхность  $dr(t,x)$  будет похожа на сильно взволнованную водную поверхность, на которой местами торчат вниз острые конусы (иглы), не достигая поверхности  $z=0$ . Конусы могут быть разного углового раствора (узкие и более широкие). Для нас значения минимумов конусов являются самой важной информацией, поэтому из этих конусов можно попытаться извлечь полезную информацию. Для вычисления выходного файла `aprch_out.txt` необходимо подготовить несколько файлов, из которых файл начальных данных `config.ini` наиболее важный. В него записывается большая часть начальных данных, а именно

- прямоугольные координаты и скорости
- начальный и конечный моменты интегрирования
- шаг интегрирования
- число шагов сканирования
- шаг сканирования исследуемой области

и некоторые другие величины.

Выходной файл `aprch_out.txt` имеет следующую структуру:

- номер точки сканирования
- текущая координата  $x$  (точность  $10^{-15}$  а.е.)
- календарная дата сближения
- момент сближения (точность  $10^{-2}$  секунды)
- юлианская дата сближения (точность  $10^{-2}$  секунды)
- наименьшее расстояния в момент сближения (точность  $10^{-2}$  км).

Пример выходного файла `aprch_out.txt` для астероида Апофис для сближения с Землей при следующих начальных условиях

JD 2453800.5 - начальный момент интегрирования (2006.03.06.0)

JD 2488100.5 - конечный момент интегрирования (2100.02.06.0)

$10^{-15}$  а.е. - шаг сканирования

0.25 а.е. - ограничение при вычислении сближений.

Как видно из таблицы 2 на интервале времени интегрирования 2006-2100 годы произошло 14 сближений астероида Апофис с Землей до расстояния 0.25 а.е. (для приведенных значений координаты  $x$ ). В таблице 3 представлены 3 точки с шагом сканирования  $10^{-13}$  а.е., поэтому в начале интервала интегрирования изменения практически равны нулю, а к концу интервала изменения заметны, например, для соударения 8 апреля 2087 года рассмотрим разности.

Как видно из таблицы 3 в последней строчке приведены разности, которые показывают следующее: изменение координаты  $x$  на  $2 \cdot 10^{-13}$  а.е. приводит к изменению сближения 8 апреля 2087 года по моменту времени на 59.15 секунды, а по расстоянию от центра Земли на 1535.65 км. Если взять все точки соударения 8 апреля 2087 года по области неопределенности  $\pm 3 \sigma$  (решение НАСА 09.10.2014, ошибка большой полуоси  $1 \sigma = 5.3344 \cdot 10^{-10}$  а.е. = 79.8 м, т.е. около 30000 точек), то изменения будут весьма большими. Если собрать из файла `aprch_out.txt` на некоторый предполагаемый момент соударения все точки из рассматриваемой области неопределенности, то получим некоторое множество точек, из которого можно попытаться получить полезную информацию. Такое множество точек назовем "цепочкой". Если теперь из полученного множества точек рассмотреть функцию  $dr$  от координаты  $x$ , то получим довольно сложную кривую, часто разрывную. У этой кривой может быть несколько минимумов. Если окажется, что среди этих минимумов есть такие, которые меньше радиуса Земли, то такие точки являются начальными данными для возможных орбит соударений астероида с Землей (начало -2006.03.06). Для астероида Апофис такие точки встречаются очень редко. Другие точки, у которых минимумы  $dr > R_E$ , могут быть просто тесными сближениями, а могут быть кандидатами в возможные орбиты соударений, поэтому это надо проверить. Программа `gw3a` позволяет строить такие "цепочки". Вначале приведем "цепочку" 2051 года. Это очень тесное сближение (наименьшее расстояние от Земли составило бы 8434.16 км, если бы начальное значение величины  $D_a$  астероида в 2006 году составило значение 0.6041 км) порождает в центральной части большой исследуемой области серию большого числа сближений, в том числе, тесных сближений и соударений. Каталог возможных орбит соударений в этой области по нашим исследованиям составил 122 орбиты.

На рис 1 представлены минимумы расстояний между астероидом Апофис и Землей в момент сближения при различных значениях координаты  $x$  в окрестности апреля 2051 года (сближение 14 апреля). Этот набор минимумов мы называем "цепочкой". Для 2051 года "цепочка" является полной, т.е. практически непрерывной для всех выбранных точек координаты  $x$ . Т.к. номера точек и значения координаты  $x$  линейно связаны, то по оси  $x$  проставлены номера точек сканирования по выбранной области на координате  $x$ . Мы используем также "цепочки", где по оси абсцисс отложены моменты сближений по относительной юлианской дате.

Таблица 2: Параметры выходного файла `prch_out.txt`

| $n$ | $x$ (AU)           | $Date$     | $T$         | $JD$            | $d_{rd}$ (km) |
|-----|--------------------|------------|-------------|-----------------|---------------|
| 12  | -1.061144817353900 | 2013 1 9   | 11 43 10.95 | 2456301.9883212 | 14460374.45   |
| 12  | -1.061144817353900 | 2020 10 12 | 8 36 49.96  | 2459134.8589116 | 32354562.68   |
| 12  | -1.061144817353900 | 2021 3 6   | 1 14 51.41  | 2459279.5519839 | 16852368.95   |
| 12  | -1.061144817353900 | 2029 4 13  | 21 45 50.97 | 2462240.4068400 | 38003.27      |
| 12  | -1.061144817353900 | 2037 9 24  | 12 37 41.97 | 2465326.0261802 | 34145431.36   |
| 12  | -1.061144817353900 | 2044 8 28  | 8 11 42.96  | 2467855.8414694 | 10959964.50   |
| 12  | -1.061144817353900 | 2051 4 21  | 22 5 41.29  | 2470283.4206168 | 7365148.00    |
| 12  | -1.061144817353900 | 2058 3 31  | 14 47 57.38 | 2472819.1166363 | 33087592.52   |
| 12  | -1.061144817353900 | 2066 9 14  | 14 32 10.87 | 2475908.1056813 | 6975117.88    |
| 12  | -1.061144817353900 | 2073 7 24  | 1 14 38.41  | 2478412.5518335 | 17271276.86   |
| 12  | -1.061144817353900 | 2080 5 12  | 11 39 10.48 | 2480896.9855380 | 13637685.24   |
| 12  | -1.061144817353900 | 2087 4 8   | 22 10 42.44 | 2483419.4241023 | 11180502.09   |
| 12  | -1.061144817353900 | 2095 9 25  | 6 1 41.23   | 2486510.7511717 | 35945600.92   |
| 13  | -1.061144817353800 | 2006 4 10  | 23 49 12.68 | 2453836.4925079 | 30341409.51   |
| 13  | -1.061144817353800 | 2013 1 9   | 11 43 10.95 | 2456301.9883212 | 14460374.45   |
| 13  | -1.061144817353800 | 2020 10 12 | 8 36 49.96  | 2459134.8589116 | 32354562.68   |
| 13  | -1.061144817353800 | 2021 3 6   | 1 14 51.41  | 2459279.5519839 | 16852368.95   |
| 13  | -1.061144817353800 | 2029 4 13  | 21 45 50.97 | 2462240.4068400 | 38003.27      |
| 13  | -1.061144817353800 | 2037 9 24  | 12 37 43.63 | 2465326.0261994 | 34145500.47   |
| 13  | -1.061144817353800 | 2044 8 28  | 8 12 12.18  | 2467855.8418077 | 10959864.80   |
| 13  | -1.061144817353800 | 2051 4 21  | 22 5 56.95  | 2470283.4207980 | 7365251.56    |
| 13  | -1.061144817353800 | 2058 3 31  | 14 47 55.27 | 2472819.1166119 | 33087663.20   |
| 13  | -1.061144817353800 | 2066 9 14  | 14 32 0.79  | 2475908.1055647 | 6974875.51    |
| 13  | -1.061144817353800 | 2073 7 24  | 1 14 32.68  | 2478412.5517672 | 17271284.71   |
| 13  | -1.061144817353800 | 2080 5 12  | 11 40 8.42  | 2480896.9862085 | 13637821.65   |
| 13  | -1.061144817353800 | 2087 4 8   | 22 10 57.61 | 2483419.4242779 | 11180107.27   |
| 13  | -1.061144817353800 | 2095 9 25  | 6 1 47.91   | 2486510.7512490 | 35945774.04   |
| 14  | -1.061144817353700 | 2006 4 10  | 23 49 12.68 | 2453836.4925079 | 30341409.51   |
| 14  | -1.061144817353700 | 2013 1 9   | 11 43 10.93 | 2456301.9883209 | 14460374.45   |
| 14  | -1.061144817353700 | 2020 10 12 | 8 36 49.96  | 2459134.8589116 | 32354562.69   |
| 14  | -1.061144817353700 | 2021 3 6   | 1 14 51.41  | 2459279.5519839 | 16852368.95   |
| 14  | -1.061144817353700 | 2029 4 13  | 21 45 50.97 | 2462240.4068400 | 38003.26      |
| 14  | -1.061144817353700 | 2037 9 24  | 12 37 48.43 | 2465326.0262550 | 34145705.08   |
| 14  | -1.061144817353700 | 2044 8 28  | 8 13 37.75  | 2467855.8427980 | 10959571.68   |
| 14  | -1.061144817353700 | 2051 4 21  | 22 6 42.61  | 2470283.4213265 | 7365551.49    |
| 14  | -1.061144817353700 | 2058 3 31  | 14 47 49.14 | 2472819.1165410 | 33087869.73   |
| 14  | -1.061144817353700 | 2066 9 14  | 14 31 31.42 | 2475908.1052248 | 6974172.94    |
| 14  | -1.061144817353700 | 2073 7 24  | 1 14 15.66  | 2478412.5515702 | 17271307.24   |
| 14  | -1.061144817353700 | 2080 5 12  | 11 42 55.35 | 2480896.9881406 | 13638213.85   |
| 14  | -1.061144817353700 | 2087 4 8   | 22 11 41.59 | 2483419.4247870 | 11178966.44   |
| 14  | -1.061144817353700 | 2095 9 25  | 6 2 7.39    | 2486510.7514745 | 35946280.18   |

Таблица 3: Параметры выходного файла arch\_out.txt для сближения 8 апреля 2087 года

| $n$ | $x$ (AU)           | Date     | $T$         | $JD$            | $d_{rd}$ (km) |
|-----|--------------------|----------|-------------|-----------------|---------------|
| 12  | -1.061144817353900 | 2087 4 8 | 22 10 42.44 | 2483419.4241023 | 11180502.09   |
| 13  | -1.061144817353800 | 2087 4 8 | 22 10 57.61 | 2483419.4242779 | 11180107.27   |
| 14  | -1.061144817353700 | 2087 4 8 | 22 11 41.59 | 2483419.4247870 | 11178966.44   |
| 2   | 0.000000000000200  |          | 0 59.15     | 0.0006847       | - 1535.65     |

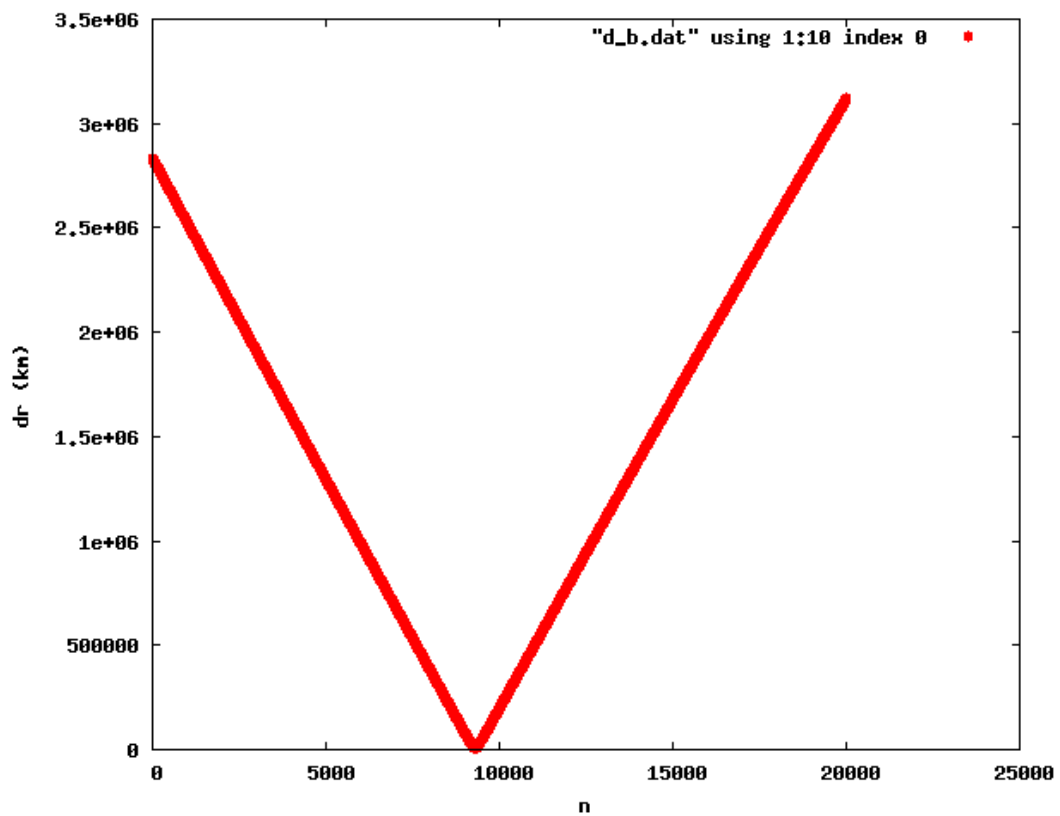


Рис. 1: Цепочка 2051 года, ось абсцисс - координата  $x$



Второй этап работы программного комплекса v19.

Чтобы проверить, принадлежит ли точка с минимумом возможной орбите соударения, необходимо продолжить вычисления, т.е. уточнить значение минимума. Далее будем считать значение координаты  $x$  некоторого выбранного момента сближения серединой отрезка, который построим следующим образом. В отрицательном и положительном направлениях вдоль оси  $x$  отложим по 10 отрезков с шагом  $10^{-13}$  а.е. Таким образом у нас получилась 21 точка и между ними 20 отрезков. Проинтегрируем этот набор из 21 точки из 2006 года до 2100 года. Теперь получим новый вариант файла `aprch_out.txt`, но очень небольшой. Выделим из файла `aprch_out.txt` все точки с выбранным ранее моментом сближения. Получим новую "цепочку" для этого момента. Найдем в этой "цепочке" минимум, который скорее всего будет меньше предыдущего. Выберем в качестве новой орбиты координату  $x$  с точкой нового минимума. Будем считать координату  $x$  серединой нового отрезка. Поделим шаг сканирования  $10^{-13}$  а.е. на 10 частей, т.е. уменьшим в 10 раз и получим шаг  $10^{-14}$ , построим новый отрезок и повторим процесс как описано выше. На следующей итерации повторим процесс, при этом шаг сканирования станет равным  $10^{-15}$  а.е. (предельное значение для 2006 года). Если оказалось, что последнее значение минимума меньше радиуса Земли, то считаем, что нашли возможную орбиту соударения, если же нет, то скорее всего это орбита тесного сближения. Хотя есть вероятность того, что это возможная орбита соударения, если значение последнего минимума  $dr$  довольно близко к величине радиуса Земли. Итак мы нашли параметры возможной орбиты соударения:

- координата  $x$
- момент соударения
- расстояние от центра Земли (минимум).

Найдем теперь еще один важный параметр орбиты соударения - размер "щели". В процессе уточнения минимума при некотором шаге сканирования можно увидеть, что есть точки, где  $dr > R_E$ , а есть точки, где  $dr < R_E$ . Значит можно выделить точки перехода  $dr$  через значение  $R_E$  и далее с уменьшением шага сканирования уточнять значение координат  $x$  точек перехода. На шаге сканирования  $10^{-15}$  а.е. можно получить разность координат  $x$  точек перехода через  $R_E$ . Это будет ширина "щели видимой из 2006 года, возможной орбиты соударения по координате  $x$ , т.е. область начальных значений координаты  $x$  траекторий, пересекающих поверхность Земли для выбранного момента соударения (проходящих под поверхностью Земли).

Третий этап работы программного комплекса v19.

Перенесем начальные данные для астероида Апофис, например, на 1 мая 2035 года. Теперь выберем один из найденных моментов времени с минимумом  $dr$  в 2006 году и проинтегрируем начальные данные, в которых координата  $x$  соответствует выбранному моменту времени с минимумом  $dr$ , а остальные координаты и скорости такие же. По-

лученное решение является набором начальных данных для дальнейших исследований. Так как шаг сканирования области неопределенности в 2006 году был взят равным  $10^{-13}$  а.е., то для исследования в 2035 году возьмем шаг сканирования равным  $10^{-9}$  а.е. (на 4 десятичных порядка больше), а процесс итераций как на втором этапе работы программного комплекса v19 будем заканчивать при шаге  $10^{-14}$ . Будем опять варьировать координату  $x$ . Далее будем считать значение координаты  $x$ , полученное путем переноса начальных данных на 1 мая 2035 года серединой отрезка. Повторим процесс итераций нахождения минимума выбранного момента сближения, описанного во втором этапе работы программного комплекса v19. Интегрирование будем теперь проводить из 2035 года до 2100 года. Каждый раз будем находить новое значение минимума выбранного момента, пока шаг сканирования не станет равным  $10^{-14}$  а.е. Если оказалось, что последнее значение минимума меньше радиуса Земли, то считаем, что нашли возможную орбиту соударения, если же нет, то это орбита тесного сближения. В процессе работы третьего этапа программного комплекса v19 мы нашли 4 параметра орбиты соударения:

- координата  $x$
- момент соударения
- расстояние от центра Земли (минимум)
- размер щели

Это будут параметры возможной орбиты соударения, видимой из 2035 года. Этот алгоритм вычислений проведем последовательно для всех моментов сближений и возможных орбит соударений из области неопределенности начальных данных, полученных программным комплексом v19 из 2006 года. Как видно из приведенных таблиц, во первых, число возможных орбит соударений, видимых из 2035 года, значительно больше возможных орбит соударений, видимых из 2006 года. Во вторых, размеры щелей, видимых из 2035 года, на несколько десятичных порядков (5-6 порядков) больше размеров тех же щелей, видимых из 2006 года. Эти эффекты естественно обусловлены процессом рассеяния траекторий из-за тесного сближения с Землей 13 апреля 2029 года.

## 4 Соударения Апофиса

### 4.1 Соударения Апофиса после сближения в 2036 году

В таблице 4, содержащей 67 возможных соударений в XXI веке после 2036 года, приводятся дата соударения, минимальное геоцентрическое расстояние, а также отклонение начального значения большой полуоси от значения, ведущего к соударению 2036 года (к минимальному геоцентрическому расстоянию в 2036 году). Кроме того, приведены значения минимальных геоцентрических расстояний в 2036 году. Результаты получены по "старым" начальным данным НАСА 2006 г. и модели эфемерид *DE405*. Входящие в таблицу 4 соударения были получены нами также по начальным данным ИПА РАН 2010 г. и эфемеридам *DE405*. Максимальное отличие минимальных геоцентрических расстояний, найденных по начальным данным НАСА и ИПА РАН, не превосходит 100 км, а в большинстве случаев — 10 км. Большинство столкновений происходит 12-14 апреля указанного года. Несколько найденных столкновений происходят в другой точке пересечения орбит, и для этих случаев указан не только год, но и число, месяц.

Не вызывает сомнений, что в малой окрестности траектории каждого приведенного соударения существуют траектории тесных сближений через некоторое время после этого соударения, часть из них являются траекториями новых соударений. Поэтому нам ясно, что найдены не все возможные соударения в текущем столетии. Однако размеры соответствующих щелей для подходящих условий будут как правило значительно меньше, чем для приведенных возможных соударений, как и вероятность попадания в них. Кроме того, ненайденные возможные соударения происходят позднее, ближе к концу века или за его пределами.

Список столкновений в таблице 4 включает также возможные соударения, найденные в работе (Йоманс и др., 2009).

Кроме указанных возможных соударений, при численном интегрировании нами было зафиксировано множество возможных опасных сближений Апофиса с Землей в XXI веке. Количество обнаруженных сближений было существенно больше, чем найденных столкновений, как и в работе (Йоманс и др., 2009). Большинство этих сближений можно выявить с помощью метода точечных гравитационных сфер, что иллюстрируется таблицей 8 в работе (Соколов и др., 2008).

Таблица 4: Возможные соударения Апофиса с Землей  
после сближения в 2036 г

| N  | Дата        | $r_{min}$ ( $10^3$ km) | $r_{min}(2036)(10^3$ km) | $\Delta a$ (m) |
|----|-------------|------------------------|--------------------------|----------------|
| 0  | 2036        | 2.1                    | 2.1                      | 0              |
| 1  | 2040        | 2.8                    | 101.                     | -18.3          |
| 2  | 2041a       | 5.6                    | 30.7                     | -6.5           |
| 3  | 2041b       | 5.7                    | 203.                     | -35.0          |
| 4  | 2042        | 2.9                    | 500.                     | -83.6          |
| 5  | 2043        | 3.8                    | 25.3                     | -5.6           |
| 6  | 2044        | 6.0                    | 771.                     | 127.7          |
| 7  | 2045a       | 5.0                    | 142.                     | -25.0          |
| 8  | 2045b       | 2.6                    | 22.6                     | -5.1           |
| 9  | 2047a       | 3.0                    | 20.9                     | -4.8           |
| 10 | 2047b       | 4.0                    | 39.5                     | -8.0           |
| 11 | 2048        | 3.1                    | 27.5                     | -6.0           |
| 12 | 2049a       | 0.045                  | 19.8                     | -4.6           |
| 13 | 2049b       | 1.6                    | 502.                     | -83.9          |
| 14 | 2051a       | 2.0                    | 164.                     | 28.5           |
| 15 | 2051b       | 0.026                  | 19.0                     | -4.5           |
| 16 | 2053a       | 3.0                    | 551.                     | 91.9           |
| 17 | 2053b       | 0.57                   | 18.4                     | -4.3           |
| 18 | 2054a       | 6.3                    | 33.2                     | -6.9           |
| 19 | 2055        | 0.022                  | 18.0                     | -4.3           |
| 20 | 2057        | 1.1                    | 2.1                      | -4.2           |
| 21 | 2059a       | 0.44                   | 123.                     | 21.8           |
| 22 | 2059b       | 5.7                    | 17.3                     | -4.1           |
| 23 | 2059c       | 5.4                    | 32.6                     | -6.8           |
| 24 | 2060a       | 4.7                    | 120.                     | 21.3           |
| 25 | 2060b       | 0.030                  | 20.3                     | -4.7           |
| 26 | 30.01.2061a | 0.44                   | 20.1                     | 5.4            |
| 27 | 2061b       | 2.6                    | 17.0                     | -4.1           |
| 28 | 2061c       | 2.9                    | 760.                     | 125.9          |
| 29 | 2062        | 0.029                  | 542.                     | 90.4           |
| 30 | 2063a       | 4.3                    | 547.                     | 91.2           |
| 31 | 2063b       | 0.039                  | 16.8                     | -4.0           |
| 32 | 16.10.2064  | 0.32                   | 129.                     | 22.8           |
| 33 | 2065a       | 4.5                    | 176.                     | 30.5           |

Таблица 4: Возможные соударения Апофиса с Землей  
после сближения в 2036 г

| N  | Дата          | $r_{min}$ ( $10^3$ km) | $r_{min}(2036)(10^3$ km) | $\Delta a$ (m) |
|----|---------------|------------------------|--------------------------|----------------|
| 34 | 2065 <i>b</i> | 0.65                   | 22.0                     | -5.0           |
| 35 | 2067 <i>a</i> | 5.2                    | 163.                     | 28.4           |
| 36 | 2067 <i>b</i> | 2.6                    | 154.                     | 27.0           |
| 37 | 2067 <i>c</i> | 0.067                  | 21.4                     | -4.9           |
| 38 | 2068          | 6.1                    | 18.7                     | -4.4           |
| 39 | 2069          | 6.2                    | 26.1                     | -5.7           |
| 40 | 2070 <i>a</i> | 1.6                    | 23.1                     | -5.2           |
| 41 | 2070 <i>b</i> | 0.31                   | 761.                     | 126.0          |
| 42 | 2071          | 0.036                  | 20.5                     | -4.7           |
| 43 | 2072          | 3.3                    | 18.2                     | -4.3           |
| 44 | 2073          | 3.5                    | 20.2                     | -4.7           |
| 45 | 2075 <i>a</i> | 5.2                    | 16.0                     | -3.9           |
| 46 | 2075 <i>b</i> | 0.030                  | 2260.                    | 370.2          |
| 47 | 2077 <i>a</i> | 5.9                    | 182.                     | 31.6           |
| 48 | 2077 <i>b</i> | 6.3                    | 177.                     | 30.7           |
| 49 | 2078 <i>a</i> | 3.9                    | 183.                     | 31.7           |
| 50 | 2079 <i>a</i> | 0.028                  | 170.                     | 29.5           |
| 51 | 2079 <i>b</i> | 3.0                    | 15.7                     | -3.84          |
| 52 | 16.10.2083    | 4.5                    | 125.                     | 22.2           |
| 53 | 2084          | 0.33                   | 2260.                    | 370.2          |
| 54 | 2085          | 0.24                   | 245.                     | 41.9           |
| 55 | 2086          | 0.49                   | 97.8                     | 17.7           |
| 56 | 2088 <i>a</i> | 5.8                    | 542.                     | 90.4           |
| 57 | 2088 <i>b</i> | 6.1                    | 16.8                     | -4.1           |
| 58 | 2088 <i>c</i> | 0.86                   | 116.                     | 20.6           |
| 59 | 2088 <i>d</i> | 5.0                    | 534.                     | 89.0           |
| 60 | 2091 <i>a</i> | 0.20                   | 120.                     | 21.3           |
| 61 | 2091 <i>b</i> | 0.041                  | 15.3                     | -3.74          |
| 62 | 2092          | 0.79                   | 182.                     | 31.6           |
| 63 | 2095 <i>a</i> | 0.049                  | 95.0                     | 17.2           |
| 64 | 2095 <i>b</i> | 1.8                    | 205.                     | 35.4           |
| 65 | 2099 <i>a</i> | 1.8                    | 279.                     | 47.5           |
| 66 | 2099 <i>b</i> | 0.29                   | 8159.                    | 1330.          |
| 67 | 2099 <i>c</i> | 0.041                  | 280.                     | 47.7           |

$r_{min}(2036)$  — минимальные геоцентрические расстояния при сближении 2036 г.;  $\Delta a_0$  — сдвиг начальной (в 2006 году) большой полуоси от значения, соответствующего соударению в 2036 году.

## 4.2 Соударения Апофиса после сближения в 2051 году

В настоящее время нам известно более 250 виртуальных траекторий соударения с Землей астероида Апофис.

На рисунках ?? – ?? приведены характеристики траекторий возможных соударений. Размер щели определяется через диапазон больших полуосей (в 2035 году) траекторий, ведущих к соударению. Треугольниками обозначены соударения, указанные на сайте НАСА . Если рассмотреть соударения в окрестности номинальной орбиты в меньшем масштабе по оси абсцисс, соответствующая линия расщепляется на несколько линий. Видна структура, похожая на фрактальную. Узкие "опасные" области чередуются со сравнительно широкими "безопасными".

Положения щелей группируются в окрестности нескольких значений. Первую слева направо группу составляют соударения после сближения Апофиса с Землей в 2036, сейчас все они уже невозможны. Следующая богатая группа расположена вблизи номинальной орбиты и вблизи "основного" соударения в 2068 году связана со сближениями Апофиса и Земли в 2051. В настоящее время опасны только щели, расположенные в области, где и щели, отмеченные треугольниками. Далее мы рассматриваем эту группу более подробно. Последняя особенно богатая группа содержит соударения после сближения Апофиса с Землей в 2037. Эта группа также как и первая содержит невозможные на сегодня соударения. До 2011 мы исследовали только первую слева группу, соударения после сближения в 2036. Важно исследовать все соударения не только потому, что их структура интересна и может появиться у других опасных объектов. Эту сложную структуру следует иметь в виду при разработке мероприятий по предотвращению соударений. Важно знать расположение "безопасных" областей, чтобы переместить астероид в такую область, свободную от соударений.

В таблице 5 приведены упорядоченные положения опасных щелей Апофиса даты соударений, минимальные геоцентрические расстояния при соударении и размеры щелей на 2035 г. Первое соударение может произойти в 2055 г.; найдены соударения в каждом году кроме 2057 и 2063.

Таблица 5: Возможные соударения астероида Апофис с Землей после сближения в 2051 г.

| N | $\Delta a$ (м) | Дата           | $r_{min}$ (км) | $\delta a$ (м) |
|---|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 1 | -198.885       | 2097 4 12.6538 | 22.43          | 0.167D+01      |

Таблица 5: Возможные соударения астероида Апофис с Землей после сближения в 2051 г.

| N   | $\Delta a(\text{м})$ | Дата           | $r_{min}(\text{км})$ | $\delta a(\text{м})$ |
|-----|----------------------|----------------|----------------------|----------------------|
| 2   | -195.379             | 2098 4 13.0754 | 3954.37              | 0.563D+00            |
| 3   | -194.337             | 2073 4 13.1850 | 4772.19              | 0.130D+00            |
| 4   | -194.307             | 2083 4 13.3130 | 1029.76              | 0.187D+01            |
| 5   | -193.713             | 2075 4 13.2101 | 49.24                | 0.282D+02            |
| 6   | -193.712             | 2085 4 12.8557 | 6138.12              | 0.380D-01            |
| 7   | -193.690             | 2084 4 12.6336 | 211.76               | 0.896D+00            |
| 8   | -192.621             | 2072 4 12.8571 | 3800.03              | 0.915D+00            |
| 9   | -192.606             | 2073 4 13.1118 | 1325.43              | 0.111D+01            |
| 10  | -192.389             | 2059 4 13.6741 | 3478.36              | 0.366D+01            |
| 11  | -190.754             | 2064 4 13.0235 | 4575.66              | 0.129D+02            |
| 12  | -119.820             | 2084 4 11.9460 | 3354.50              | 0.113D+00            |
| 13  | -87.675              | 2064 4 12.9994 | 5534.07              | 0.604D+00            |
| 14  | -87.638              | 2074 4 12.9038 | 38.47                | 0.708D+00            |
| 15  | -87.586              | 2058 4 13.3884 | 4425.72              | 0.124D+00            |
| 16  | -87.537              | 2062 4 13.4094 | 3033.00              | 0.674D+00            |
| 17  | -76.703              | 2067 4 13.7233 | 5811.75              | 0.206D+00            |
| 18  | -71.103              | 2060 4 12.8202 | 1414.28              | 0.995D-01            |
| 19  | -71.095              | 2065 4 13.1981 | 5053.37              | 0.942D-01            |
| 20  | -71.095              | 2056 4 13.0972 | 4204.05              | 0.798D+02            |
| 21* | -67.384              | 2060 4 13.0882 | 4404.01              | 0.205D+02            |
| 22  | -64.712              | 2055 4 13.8186 | 5921.09              | 0.121D+02            |
| 23  | -60.129              | 2084 4 12.0410 | 814.89               | 0.103D+01            |
| 24  | -59.881              | 2095 4 13.9578 | 696.74               | 0.417D+00            |
| 25  | -59.797              | 2080 4 13.4384 | 1565.63              | 0.294D+01            |
| 26  | -59.781              | 2092 4 13.3853 | 1545.92              | 0.119D+00            |
| 27  | -59.691              | 2097 4 13.6979 | 2428.35              | 0.600D-01            |
| 28  | -59.556              | 2092 4 13.3852 | 1546.21              | 0.102D+00            |
| 29  | -59.491              | 2088 4 13.1162 | 293.71               | 0.890D-01            |
| 30  | -59.486              | 2074 4 13.9537 | 2935.79              | 0.206D+01            |
| 31  | -59.429              | 2084 4 13.4086 | 1435.08              | 0.320D+01            |
| 32  | -59.045              | 2078 4 13.7278 | 1148.50              | 0.305D+01            |
| 33  | -58.985              | 2073 4 13.4591 | 1399.42              | 0.414D+01            |
| 34  | -58.858              | 2090 4 13.7400 | 2338.27              | 0.551D+00            |
| 35  | -58.850              | 2080 4 13.0950 | 1821.87              | 0.181D+00            |

Таблица 5: Возможные соударения астероида Апофис с Землей после сближения в 2051 г.

| N  | $\Delta a(\text{м})$ | Дата           | $r_{min}(\text{км})$ | $\delta a(\text{м})$ |
|----|----------------------|----------------|----------------------|----------------------|
| 36 | -58.847              | 2068 4 13.2084 | 556.93               | 0.807D+01            |
| 37 | -58.625              | 2095 4 13.7602 | 1400.45              | 0.480D-01            |
| 38 | -58.511              | 2068 4 13.1972 | 34.34                | 0.817D+01            |
| 39 | -58.406              | 2073 4 13.4308 | 284.43               | 0.296D+01            |
| 40 | -58.360              | 2078 4 13.6827 | 19.86                | 0.183D+02            |
| 41 | -58.351              | 2083 4 13.9059 | 31.89                | 0.180D+01            |
| 42 | -57.980              | 2078 4 13.6655 | 2060.35              | 0.540D+00            |
| 43 | -57.961              | 2070 4 13.6113 | 5315.45              | 0.379D+00            |
| 44 | -57.924              | 2062 4 13.6250 | 39.14                | 0.123D+01            |
| 45 | -57.891              | 2065 4 13.3622 | 5353.07              | 0.380D+00            |
| 46 | -57.825              | 2077 4 13.3748 | 1088.82              | 0.420D+00            |
| 47 | -57.700              | 2073 4 13.3901 | 1516.30              | 0.341D+00            |
| 48 | -57.695              | 2070 4 13.6098 | 5590.58              | 0.167D+00            |
| 49 | -57.678              | 2067 4 13.8508 | 5509.12              | 0.238D+00            |
| 50 | -57.676              | 2094 4 13.5618 | 1737.94              | 0.268D+00            |
| 51 | -57.623              | 2061 4 13.3595 | 2599.14              | 0.736D+00            |
| 52 | -57.617              | 2088 4 13.0213 | 5765.85              | 0.270D-01            |
| 53 | -57.589              | 2058 4 13.5975 | 5517.28              | 0.429D+00            |
| 54 | -57.499              | 2082 4 13.5806 | 5078.33              | 0.145D+00            |
| 55 | -57.356              | 2075 4 13.8662 | 3130.60              | 0.250D+00            |
| 56 | -57.319              | 2072 4 13.1252 | 2375.99              | 0.273D+00            |
| 57 | -57.308              | 2067 4 13.8467 | 1590.42              | 0.344D+00            |
| 58 | -57.306              | 2078 4 13.6044 | 2033.31              | 0.235D+00            |
| 59 | -57.297              | 2062 4 13.5896 | 5263.99              | 0.248D+00            |
| 60 | -57.212              | 2071 4 13.8438 | 307.33               | 0.311D+00            |
| 61 | -57.046              | 2099 4 13.6277 | 2730.78              | 0.810D-01            |
| 62 | -57.021              | 2066 4 13.5893 | 3650.09              | 0.311D+00            |
| 63 | -57.013              | 2077 4 13.2630 | 3971.24              | 0.268D+00            |
| 64 | -57.001              | 2098 4 13.4266 | 2366.52              | 0.890D-01            |
| 65 | -56.997              | 2067 4 13.8445 | 2020.71              | 0.324D+00            |
| 66 | -56.847              | 2092 4 12.9144 | 2970.11              | 0.119D+00            |
| 67 | -56.795              | 2078 4 13.5138 | 46.09                | 0.339D+00            |
| 68 | -56.570              | 2068 4 13.0709 | 1245.96              | 0.753D+00            |
| 69 | -56.509              | 2077 4 13.1509 | 23.40                | 0.890D-01            |



Таблица 5: Возможные соударения астероида Апофис с Землей после сближения в 2051 г.

| N   | $\Delta a(\text{м})$ | Дата            | $r_{min}(\text{км})$ | $\delta a(\text{м})$ |
|-----|----------------------|-----------------|----------------------|----------------------|
| 70  | -55.995              | 2095 4 13.1282  | 2149.08              | 0.607D+00            |
| 71  | -55.830              | 2098 4 13.0267  | 5191.02              | 0.300D+01            |
| 72  | -54.764              | 2096 4 12.1486  | 3003.12              | 0.240D-01            |
| 73  | -54.399              | 2092 4 17.9170  | 5099.20              | 0.570D-01            |
| 74  | -54.286              | 2088 4 12.7328  | 595.74               | 0.360D+01            |
| 75  | -47.140              | 2079 10 16.8086 | 1214.97              | 0.586D+01            |
| 76  | -47.094              | 2099 4 13.4968  | 5813.57              | 0.239D+00            |
| 77  | -46.339              | 2074 4 13.3568  | 30.01                | 0.192D+02            |
| 78  | -46.173              | 2095 4 13.4856  | 2823.12              | 0.447D+00            |
| 79  | -46.148              | 2099 4 13.3636  | 1895.03              | 0.330D-01            |
| 80  | -46.108              | 2098 10 16.4792 | 1232.91              | 0.439D+02            |
| 81  | -45.530              | 2090 10 16.5753 | 225.96               | 0.663D+01            |
| 82  | -43.872              | 2090 4 13.2377  | 1350.79              | 0.570D-01            |
| 83  | -43.568              | 2081 4 12.9635  | 898.15               | 0.324D+00            |
| 84  | -43.077              | 2097 4 13.0624  | 5657.34              | 0.600D-01            |
| 85  | -42.739              | 2066 4 13.5824  | 5239.31              | 0.186D+02            |
| 86  | -42.700              | 2093 4 12.9521  | 34.93                | 0.533D+00            |
| 87  | -42.699              | 2080 4 12.7770  | 579.22               | 0.144D+01            |
| 88  | -41.638              | 2080 4 12.7689  | 4931.10              | 0.165D+01            |
| 89  | -41.638              | 2096 4 12.7097  | 1732.76              | 0.154D+00            |
| 90  | -41.610              | 2081 4 13.0546  | 16.65                | 0.712D+00            |
| 91  | -41.599              | 2082 4 13.3903  | 2779.98              | 0.227D+00            |
| 92* | -41.586              | 2065 4 13.1313  | 2866.35              | 0.392D+02            |
| 93  | -40.848              | 2093 4 13.0271  | 3851.17              | 0.696D+00            |
| 94  | -40.817              | 2094 4 13.3006  | 4060.79              | 0.200D+00            |
| 95* | -40.803              | 2078 4 13.3755  | 371.03               | 0.409D+02            |
| 96  | -40.797              | 2079 4 13.3975  | 29.71                | 0.121D+00            |
| 97  | -40.070              | 2095 4 13.0606  | 4857.94              | 0.120D-01            |
| 98* | -40.003              | 2091 4 13.3708  | 5454.01              | 0.928D+01            |
| 99  | -39.765              | 2075 4 13.4812  | 735.39               | 0.751D+00            |
| 100 | -36.182              | 2099 4 13.4016  | 2198.58              | 0.147D+00            |
| 101 | -36.173              | 2098 4 12.9238  | 2342.26              | 0.415D+00            |
| 102 | -29.538              | 2099 4 13.1452  | 654.05               | 0.164D+01            |
| 103 | -29.517              | 2075 4 13.7053  | 6084.62              | 0.918D-01            |

Таблица 5: Возможные соударения астероида Апофис с Землей после сближения в 2051 г.

| N    | $\Delta a(\text{м})$ | Дата            | $r_{min}(\text{км})$ | $\delta a(\text{м})$ |
|------|----------------------|-----------------|----------------------|----------------------|
| 104  | -24.816              | 2097 4 13.0938  | 6108.24              | 0.360D-01            |
| 105  | -16.559              | 2086 4 13.1801  | 5027.57              | 0.769D+00            |
| 106  | -11.722              | 2088 10 15.7617 | 29.48                | 0.788D+00            |
| 107  | -1.273               | 2085 4 13.0042  | 3504.85              | 0.261D+00            |
| 108* | -1.266               | 2077 4 13.1125  | 2484.03              | 0.382D+02            |
| 109  | -1.211               | 2096 4 12.7238  | 2262.32              | 0.956D+00            |
| 110  | -0.727               | 2094 4 12.9472  | 3899.60              | 0.208D-01            |
| 111  | -0.724               | 2096 4 12.5436  | 161.86               | 0.346D+00            |
| 112  | -0.713               | 2087 4 13.3967  | 407.74               | 0.822D+01            |
| 113  | -0.516               | 2097 4 12.8211  | 3716.23              | 0.163D+00            |
| 114  | -0.501               | 2078 4 13.2656  | 5816.31              | 0.241D+01            |
| 115  | -0.370               | 2081 4 12.4202  | 3023.70              | 0.600D-02            |
| 116  | -0.318               | 2071 4 12.9930  | 3631.28              | 0.600D-01            |
| 117  | -0.194               | 2095 4 13.0993  | 2048.82              | 0.773D+00            |
| 118  | -0.164               | 2082 4 12.9246  | 531.68               | 0.829D+00            |
| 119  | -0.164               | 2083 4 13.1321  | 1299.23              | 0.713D+00            |
| 120  | -0.146               | 2084 4 12.4360  | 243.11               | 0.600D+00            |
| 121  | -0.116               | 2092 4 12.3518  | 21.32                | 0.198D+00            |
| 122  | -0.097               | 2093 10 16.0022 | 3146.41              | 0.292D+00            |
| 123  | -0.063               | 2069 4 12.7248  | 3107.42              | 0.135D+01            |
| 124* | 0.000                | 2068 4 12.6318  | 40.28                | 0.153D+04            |
| 125  | 0.008                | 2072 4 12.2427  | 2326.97              | 0.555D-01            |
| 126  | 0.085                | 2073 4 20.6818  | 43.23                | 0.413D+00            |
| 127  | 0.134                | 2074 4 12.9464  | 1272.28              | 0.681D+00            |
| 128  | 0.233                | 2075 4 13.1979  | 880.33               | 0.204D+01            |
| 129  | 0.273                | 2090 4 12.9052  | 5004.67              | 0.755D+00            |
| 130  | 0.494                | 2093 4 12.2460  | 282.57               | 0.663D+00            |
| 131  | 33.725               | 2084 4 12.4547  | 873.08               | 0.202D+01            |
| 132  | 33.775               | 2098 4 12.9696  | 2269.06              | 0.261D+00            |
| 133  | 33.797               | 2083 4 13.2189  | 1339.86              | 0.370D+00            |
| 134  | 33.803               | 2082 4 13.0056  | 42.28                | 0.141D+00            |
| 135* | 33.818               | 2076 4 12.6966  | 702.03               | 0.150D+03            |
| 136  | 33.873               | 2095 5 7.3834   | 57.56                | 0.755D+00            |
| 137  | 33.914               | 2085 4 13.1116  | 3431.90              | 0.272D+01            |

Таблица 5: Возможные соударения астероида Апофис с Землей после сближения в 2051 г.

| N    | $\Delta a(\text{м})$ | Дата            | $r_{min}(\text{км})$ | $\delta a(\text{м})$ |
|------|----------------------|-----------------|----------------------|----------------------|
| 138  | 35.685               | 2073 4 13.0516  | 3480.03              | 0.700D+00            |
| 139  | 35.846               | 2060 4 12.9937  | 4862.49              | 0.144D+01            |
| 140  | 38.370               | 2099 4 13.3483  | 6294.30              | 0.188D+00            |
| 141  | 121.920              | 2095 4 13.3202  | 6056.35              | 0.597D-01            |
| 142  | 124.609              | 2092 4 12.5181  | 4704.72              | 0.588D-01            |
| 143  | 1606.715             | 2099 4 14.5881  | 2154.24              | 0.298D+00            |
| 144  | 1607.640             | 2096 4 14.8829  | 24.81                | 0.127D+00            |
| 145* | 1610.591             | 2068 10 15.3232 | 2973.61              | 0.686D+02            |
| 146  | 1614.010             | 2092 4 10.8109  | 2376.54              | 0.192D+01            |
| 147  | 1684.927             | 2096 4 12.1659  | 3125.46              | 0.292D-01            |
| 148  | 1686.110             | 2087 4 13.0017  | 1763.37              | 0.178D+01            |
| 149  | 3465.530             | 2094 4 6.1114   | 212.59               | 0.212D+00            |
| 150  | 3465.709             | 2098 4 4.8156   | 35.19                | 0.140D+01            |
| 151  | 3465.711             | 2099 4 5.0600   | 661.94               | 0.892D+00            |
| 152  | 3465.714             | 2082 4 4.7226   | 192.24               | 0.157D+01            |
| 153  | 3472.360             | 2094 4 9.1062   | 2660.40              | 0.456D+00            |
| 154  | 3472.367             | 2093 4 17.6726  | 2679.21              | 0.800D+00            |
| 155  | 3472.919             | 2087 4 9.1628   | 1058.61              | 0.468D+00            |
| 156* | 4697.565             | 2069 10 15.5930 | 374.42               | 0.267D+03            |
| 157  | 4712.480             | 2090 10 15.6852 | 5710.46              | 0.169D+00            |
| 158  | 4777.404             | 2097 4 11.9934  | 1229.65              | 0.522D+01            |

### 4.3 Сравнение с характеристиками соударений Апофиса, приведенными на сайте НАСА

Из списка 158 соударений (таблица 5) были выбраны 13 соударений с наибольшими размерами щелей (звездочкой отмечены "американские"). Для них в таблицах 6 и 7 приведены оценки положений и размеров щелей, полученные разными методами. Величины  $\Delta(\Delta\zeta)$  и  $\Delta\sigma_{LOV}$  есть приращения величин  $\Delta\zeta$  и  $\sigma_{LOV}$ , характеризующих положения щелей в работе ((Farnocchia et al.,2013, v2), p.31, Table 4.). Величины "width" и  $P$  характеризуют ширину щелей и вероятность соответствующих соударений в той же работе ((Farnocchia et al.,2013, v2), p.31, Table 4.). Все линейные оценки относительных положений щелей согласуются между собой с точностью порядка 0.05. Три различные оценки размеров щелей также согласуются друг с другом, однако с худшей точностью (порядка 0.2), что естественно. Ве-

Таблица 6: **Оценки положений щелей**

| N   | Date | $Da$  | $\Delta r_{min51}$ | $\Delta(\Delta\zeta)$ | $\Delta\sigma_{LOV}$ |
|-----|------|-------|--------------------|-----------------------|----------------------|
| 1   | 2075 | 43.1  | -2.57              |                       |                      |
| 2   | 2064 | 42.4  | -2.53              |                       |                      |
| 3   | 2056 | 15.8  | -0.941             |                       |                      |
| 4*  | 2060 | 15.0  | -0.892             | -10.9                 | 0.125                |
| 5   | 2055 | 14.4  | -0.856             |                       |                      |
| 6   | 2074 | 10.3  | -0.629             |                       |                      |
| 7   | 2066 | 9.49  | -0.580             |                       |                      |
| 8*  | 2065 | 9.23  | -0.565             | -6.7                  | 0.084                |
| 9*  | 2078 | 9.06  | -0.554             | -6.6                  | 0.082                |
| 10* | 2091 | 8.88  | -0.544             | -6.5                  | 0.080                |
| 11* | 2077 | 0.28  | -0.017             | -0.2                  | 0.003                |
| 12* | 2068 | 0.00  | 0.00               | 0.0                   | 0.000                |
| 13* | 2076 | -7.51 | 0.463              | 5.4                   | -0.068               |

роятности соударений коррелируют с размерами щелей. Оценку размеров щелей получить значительно проще, чем оценку вероятности. В некоторых случаях размеры щелей можно использовать для приближенной оценки "важности" соударения.

Таблица 7: Оценки размеров щелей

| N   | Date | $da$  | $dr_{min}51$ | width | $P \cdot 10^7$ |
|-----|------|-------|--------------|-------|----------------|
| 1   | 2075 | 28.   | 3.62         |       |                |
| 2   | 2064 | 13.   | 1.74         |       |                |
| 3   | 2056 | 80.   | 9.12         |       |                |
| 4*  | 2060 | 21.   | 2.66         | 0.03  | 1.0            |
| 5   | 2055 | 12.   | 1.76         |       |                |
| 6   | 2074 | 19.   | 2.63         |       |                |
| 7   | 2066 | 19.   | 2.59         |       |                |
| 8*  | 2065 | 39.   | 5.45         | 0.08  | 2.6            |
| 9*  | 2078 | 41.   | 5.71         | 0.07  | 2.2            |
| 10* | 2091 | 9.3   | 1.26         | 0.07  | 2.2            |
| 11* | 2077 | 38.   | 5.19         | 0.06  | 1.8            |
| 12* | 2068 | 1500. | 208.         | 2.25  | 67.            |
| 13* | 2076 | 150.  | 20.3         | 0.19  | 5.4            |

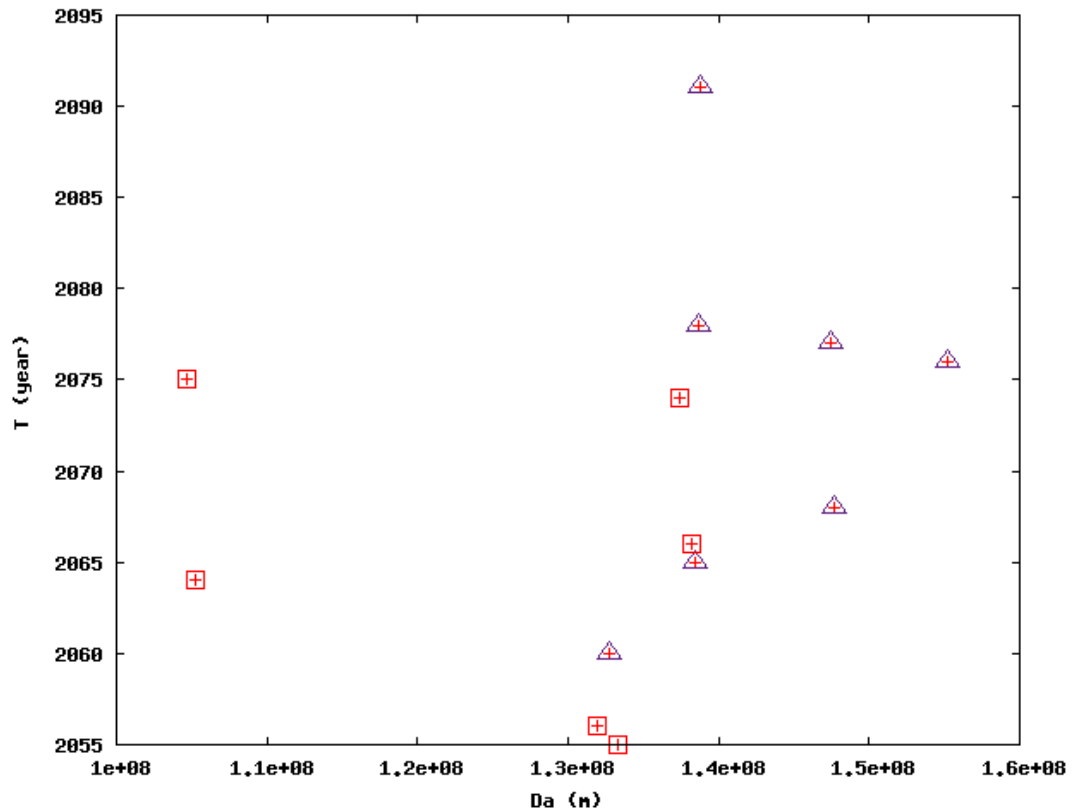


Рис. 2: Моменты соударения Апофиса с Землей, номинал 2014 г., относительные положения щелей в 2035 г.

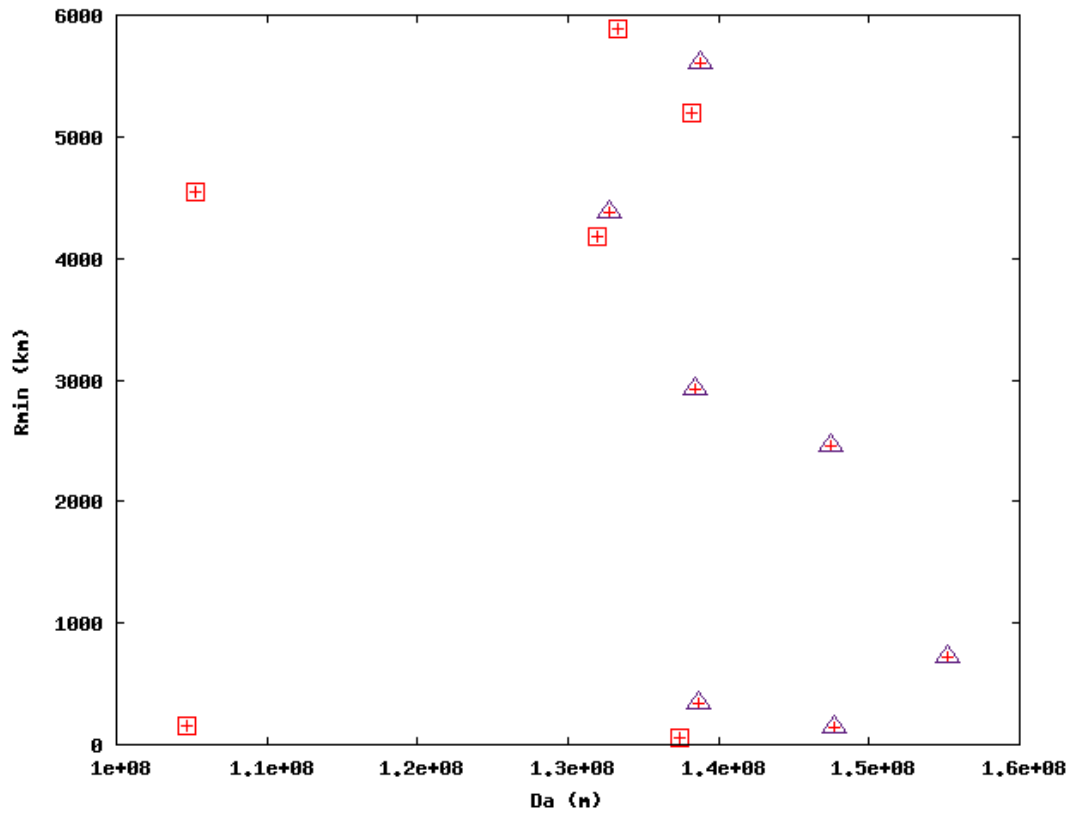


Рис. 3: Минимальное геоцентрическое расстояние при соударении Апофиса с Землей, номинал 2014 г., относительные положения щелей в 2035 г.

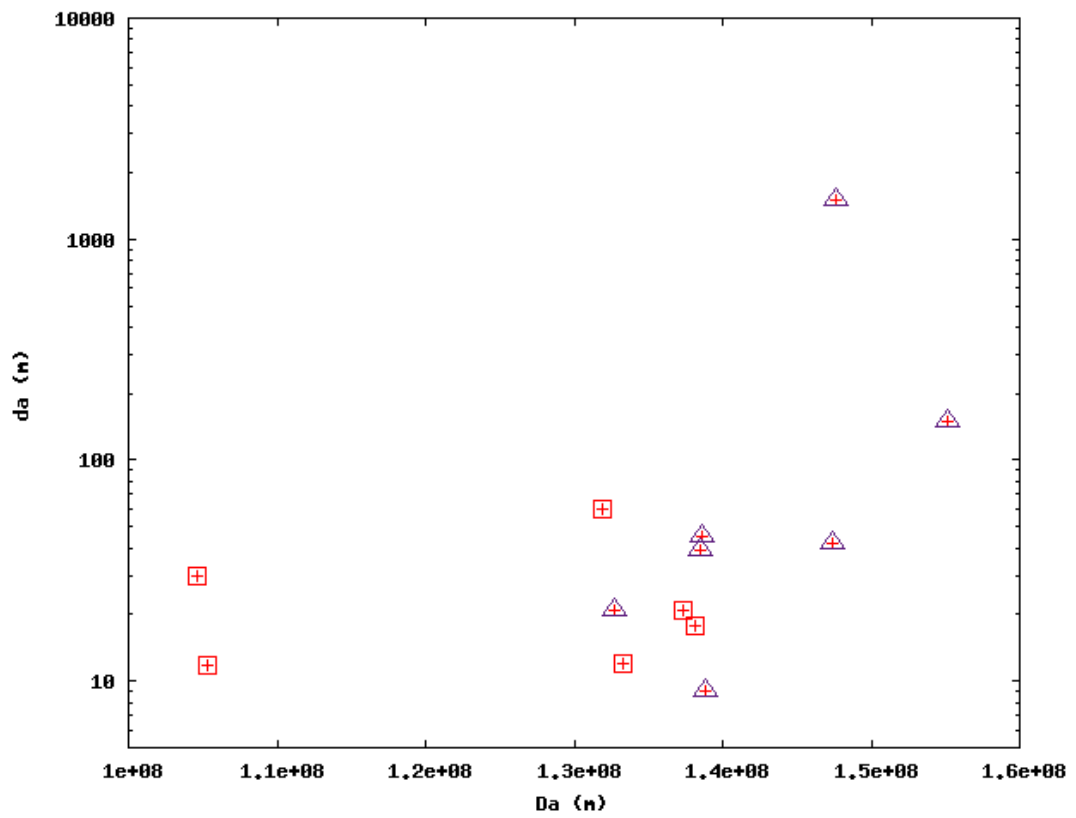


Рис. 4: Размер щелей Апофиса в 2035 г., номинал 2014 г., относительные положения щелей в 2035 г.

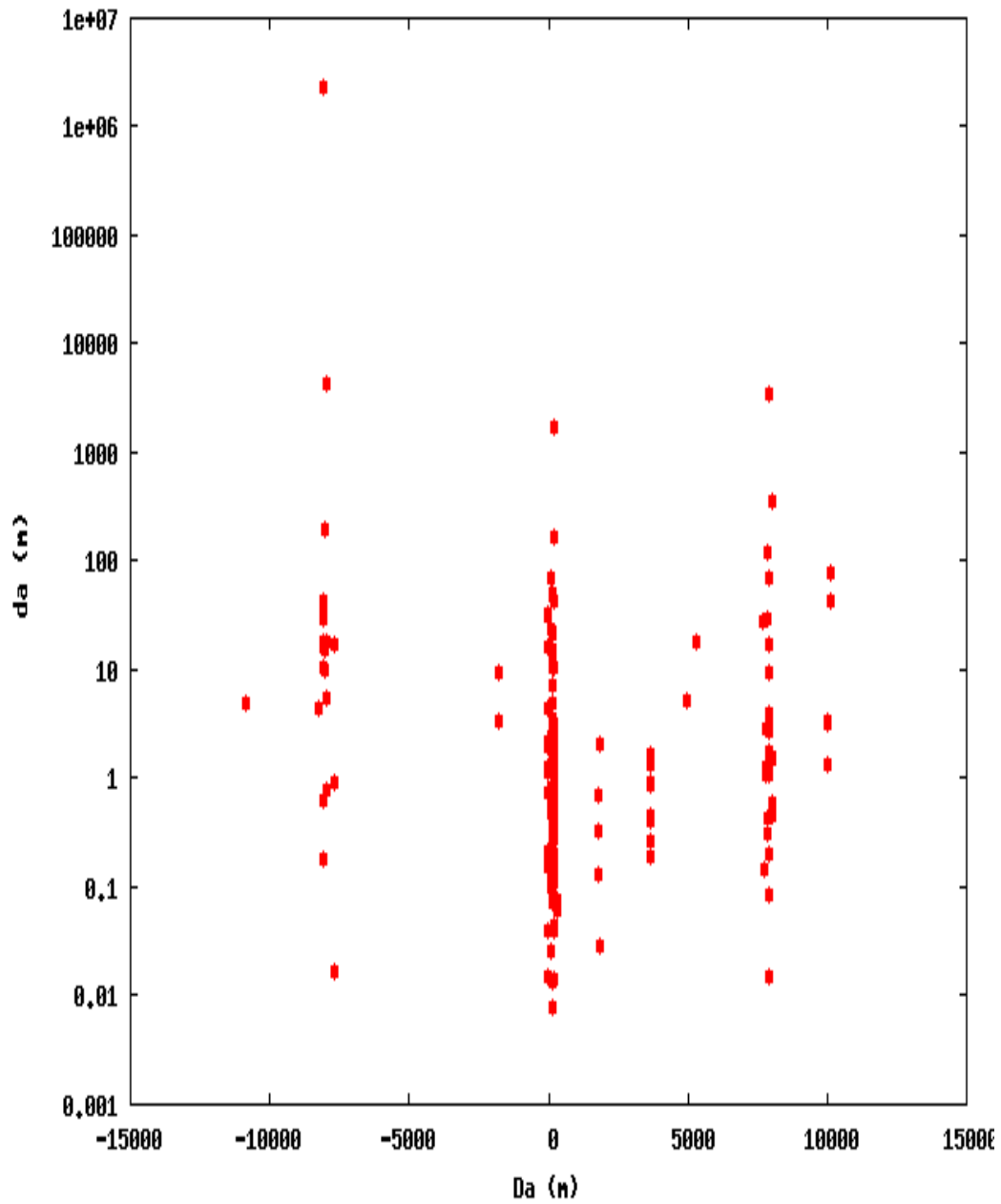


Рис. 5: Относительное начальное положение и размеры в 2035 г. щелей, ведущих к соударениям Апофиса с Землей. Номинал 2006 г.



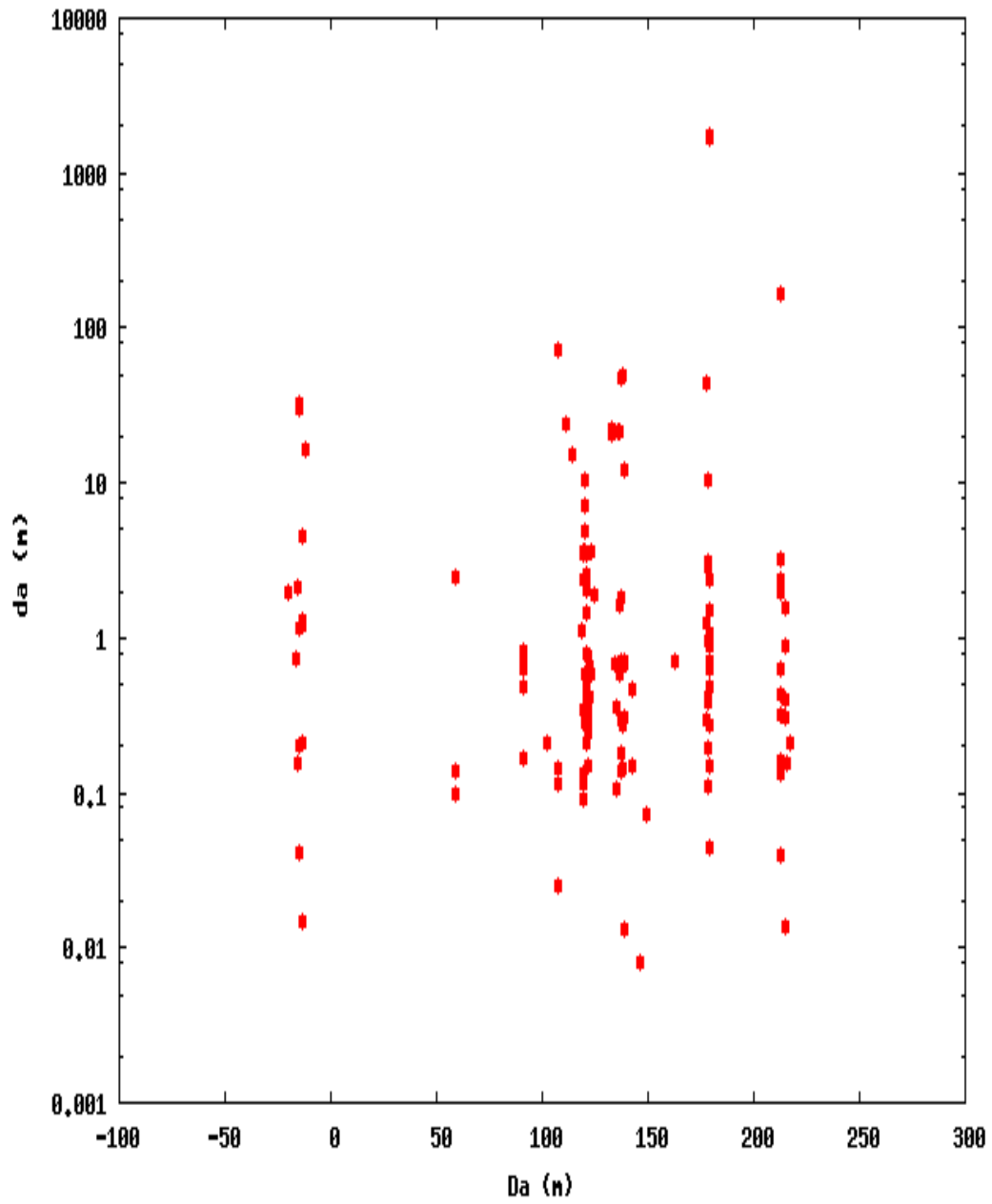


Рис. 6: Относительное начальное положение и размеры в 2035 г. щелей, ведущих к соударениям Апофиса с Землей. Номинал 2006 г., окрестность номинальной орбиты.

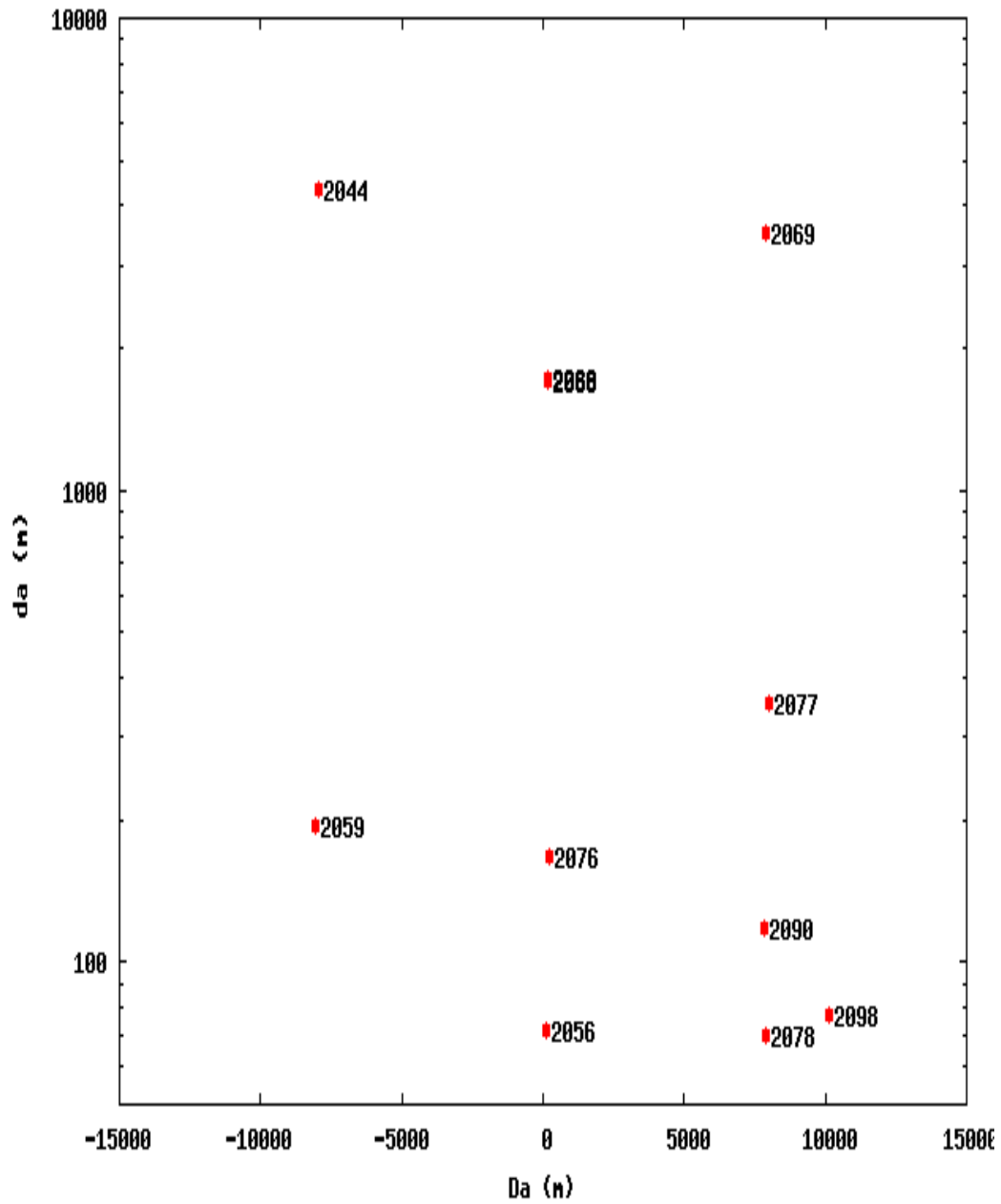


Рис. 7: Относительное начальное положение, размеры в 2035 г. больших щелей, ведущих к соударениям Апофиса с Землей, и даты соударений. Номинал 2006 г.

## 5 Соударения астероида 2015 RN35

### 5.1 Начальные данные, номинал 30.11.2015

Для получения начальных координат и скоростей по программе HORIZON на сайте НАСА для астероида 2015 RN35 выбрана барицентрическая экваториальная система прямоугольных координат (с центром в барицентре Солнечной системы) и на интервале времени с 1 января 2015 года по 31 декабря 2016 года вычислены прямоугольные координаты и скорости на каждые сутки.

Затем после изучения этих эфемерид были выбраны координаты и скорости на эпоху JD 2457200.5 TDB (27 июня 2015 года).

### 5.2 Результаты работы программного комплекса v19 (2015 RN35, номинал 30.11.12015)

Сначала для программы v19 был подготовлен файл начальных данных config.ini, в котором задаются многие нужные параметры, в том числе координаты и скорости, начальный и конечный моменты численного интегрирования, параметры для вариации координаты  $x$  для поиска опасных орбит, в частности:

$x_0$  - начальное значение координаты  $x$ ,

$n_x$  - число шагов на координате  $x$ ,

$dx$  - шаг, с которым происходит сканирование по координате  $x$ , отсюда

$$x_i = x_0 + dx * i.$$

Эти три параметра задают область, в которой происходит поиск опасных орбит:

$$dx = dx * n_x.$$

Понятно, что число точек сканирования заданной области будет на 1 больше числа шагов (начало и конец области).

На первом этапе (stage 1) программный комплекс v19 с файлами начальных данных config.ini, integrator.ini и planet.ini получает выходной файл arch\_out, в который выводятся в некоторой удобной форме различные параметры всех тесных сближений астероида с Землей (расстояния сближений меньше заданного) и другими планетами в заданной области на заданном интервале времени методом численного интегрирования. Т.е. для каждой точки сканирования заданной области приводятся основные параметры всех сближений, а именно

- номер точки,
- координата  $x$  (с точностью  $10^{-15}$  а.е.),
- календарная дата сближения (с точностью  $10^{-2}$  секунды),
- юлианская дата сближения (с точностью  $10^{-2}$  секунды),
- минимальное расстояние (с точностью  $10^{-2}$  км).

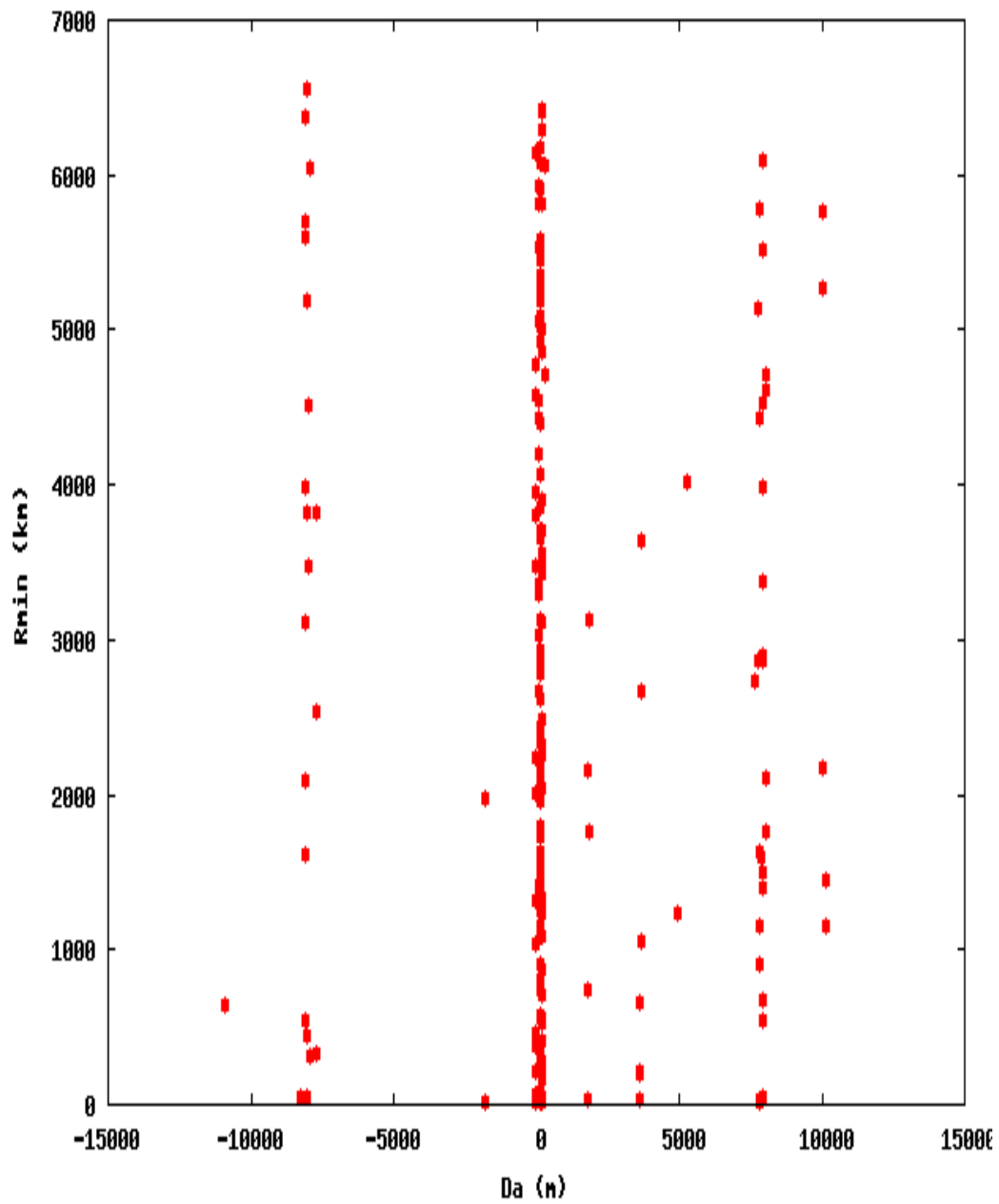


Рис. 8: Относительное начальное положение щелей, ведущих к соударениям Апофиса с Землей, и минимальные геоцентрические расстояния при соударениях. Номинал 2006 г.

Далее этот огромный файл `aprch_out` (достигающий иногда размера в сотни Мб) для начала изучается программой `rw3a`. Содержание файла `aprch_out` записано в двоичном (внутреннем) формате, поэтому для исследования его сначала переводят в файл `aprch_out.txt` в обычном (десятичном) формате с помощью программы `convert`. Программа `rw3a` позволяет собирать так называемые “цепочки”. Т.е. в файле начальных данных программы `rw3a` задается приближенный момент времени сближения астероида с Землей и некоторая его окрестность, в которую собираются точки из файла `aprch_out.txt`. Далее с помощью графического средства `gnuplot` строятся графики – расстояния астероида от Земли в зависимости от координаты  $x$  и затем предварительно изучаются визуально.

На втором этапе (stage 2) программный комплекс `v19` с файлами начальных данных `config.ini`, `integrator.ini`, `planet.ini` и `daterange_in.txt` получает выходные файлы `edges_out` и `final_out`. Во входном файле `daterange_in.txt` записываются последовательно некоторые предполагаемые моменты соударений астероида с Землей на заданном интервале времени интегрирования и некоторые окрестности этих моментов. Информация на сайте НАСА о тесных сближениях и соударениях исследуемого астероида позволяет быстрее, эффективнее и экономнее провести предварительные вычисления программным комплексом `v19` для исследования орбиты астероида. В выходном файле `edges_out` содержится информация о виртуальных орбитах соударений исследуемого астероида с Землей. В выходном файле `final_out` содержится информация о всех возможных тесных сближениях и соударениях астероида с Землей в заданной области по координате  $x$ . Файл `final_out` записан в двоичном формате (внутреннем), поэтому его сначала переводят в файл `final_out.txt` в десятичном формате с помощью программы `convert`. Затем с помощью программы обработки `prgw6bac` содержимое файла `final_out.txt` преобразуют в различные таблицы, а таблицы с помощью `gnuplot` преобразуются в рисунки, удобные для дальнейших исследований. Например, данные таблицы переводят в рисунки:

- распределение моментов (годов) возможных орбит соударений астероида с Землей в зависимости от положения орбиты соударения относительно номинала,
- распределение расстояний от астероида до центра Земли в момент соударения в зависимости от положения орбиты соударения относительно номинала,
- распределение размеров щелей возможных орбит соударений в зависимости от положения орбиты соударения относительно номинала.

На втором этапе (stage 2) работы программного комплекса `v19` во входном файле `daterange_in.txt` были записаны последовательно 7 предполагаемых моментов (годов) сближений астероида с Землей в середине декабря, а интервал времени около месяца относительно этих моментов.

Результатом работы программного комплекса `v19` (stage1, stage2) и программы обработки `prgw6bac` явился каталог виртуальных орбит соударений астероида 2015 RN35 с Землей на интервале времени 2043-2086 годов (7 моментов), состоящий из 26 орбит в окрестно-

Таблица 8: Соударения астероида 2015 RN35 с Землей, первый этап наблюдений, краткий список.

| n  | Da (m)        | Date            | Date        | dJD (d)    | dr (km) | da (m)   | dx (m)   |
|----|---------------|-----------------|-------------|------------|---------|----------|----------|
| 1  | -12714583.784 | 2043 12 13.1617 | 2043.952256 | 10396.1617 | 1244.68 | 179.7774 | 164.5577 |
| 2  | -12715368.967 | 2045 12 12.0731 | 2045.949518 | 11126.0731 | 6006.58 | 0.0311   | 0.0284   |
| 3  | -12714219.208 | 2052 12 12.1369 | 2052.949518 | 13683.1369 | 1495.57 | 0.0000   | 0.0015   |
| 4  | -5716005.879  | 2052 12 14.5911 | 2052.954993 | 13685.5911 | 1868.95 | 11.4411  | 10.4719  |
| 5  | -30772023.338 | 2056 12 18.7104 | 2056.965944 | 15150.7104 | 5538.45 | 13.0724  | 11.9678  |
| 6  | -30768127.445 | 2073 12 28.9900 | 2073.993320 | 21369.9900 | 126.81  | 1.3073   | 1.1968   |
| 7  | -13193104.205 | 2073 12 12.7333 | 2073.949518 | 21353.7333 | 1575.35 | 27.7837  | 25.4316  |
| 8  | -12743427.580 | 2073 12 13.3901 | 2073.952256 | 21354.3901 | 3287.67 | 1.4708   | 1.3464   |
| 9  | -48634270.356 | 2074 12 20.3386 | 2074.971419 | 21726.3386 | 3763.77 | 1.9605   | 1.7952   |
| 10 | -45375608.541 | 2074 12 22.7296 | 2074.976894 | 21728.7296 | 200.22  | 3.9211   | 3.5904   |
| 11 | -31827864.663 | 2074 12 7.9808  | 2074.935830 | 21713.9808 | 460.46  | 0.2125   | 0.1945   |
| 12 | -12709455.226 | 2074 12 12.9009 | 2074.949518 | 21718.9009 | 1079.77 | 0.3268   | 0.2992   |
| 13 | -12510911.325 | 2074 12 16.0608 | 2074.960469 | 21722.0608 | 186.46  | 0.0654   | 0.0598   |
| 14 | -5716238.647  | 2074 12 14.9576 | 2074.954993 | 21720.9576 | 1191.21 | 0.0017   | 0.0015   |
| 15 | 3310785.836   | 2074 12 12.6413 | 2074.949518 | 21718.6413 | 3955.47 | 29.4225  | 26.9276  |
| 16 | -15080698.377 | 2082 12 13.7110 | 2082.952256 | 24641.7110 | 3642.43 | 0.0311   | 0.0284   |
| 17 | -5713484.592  | 2082 12 15.1409 | 2082.957731 | 24643.1409 | 2943.69 | 0.9807   | 0.8976   |
| 18 | -5242056.275  | 2082 12 14.8479 | 2082.954993 | 24642.8479 | 5893.90 | 0.1797   | 0.1646   |
| 19 | 28033897.514  | 2082 12 9.5315  | 2082.941305 | 24637.5315 | 2247.24 | 0.9809   | 0.8976   |
| 20 | -12510297.209 | 2086 12 16.2231 | 2086.960469 | 26105.2231 | 1159.49 | 0.3269   | 0.2992   |
| 21 | -5666712.609  | 2086 12 12.3357 | 2086.949518 | 26101.3357 | 5598.37 | 1.6345   | 1.4960   |
| 22 | -3224811.517  | 2086 12 13.1596 | 2086.952256 | 26102.1596 | 5270.80 | 0.1144   | 0.1047   |
| 23 | -2848592.347  | 2086 12 13.3712 | 2086.952256 | 26102.3712 | 50.69   | 1.4711   | 1.3464   |
| 24 | -2045899.953  | 2086 12 15.2302 | 2086.957731 | 26104.2302 | 2923.62 | 0.9808   | 0.8976   |
| 25 | 3221232.398   | 2086 12 16.2569 | 2086.960469 | 26105.2569 | 3757.93 | 11.4422  | 10.4719  |
| 26 | 3329014.438   | 2086 12 11.3521 | 2086.946781 | 26100.3521 | 177.38  | 0.0654   | 0.0598   |

сти  $\pm 3 \sigma$  от номинальной орбиты ( $p=0.997$ ). Надо учесть, что ошибка большой полуоси номинальной орбиты по данным сайта НАСА составила  $1 \sigma = 8.94 \cdot 10^{-5}$  а.е. (решение 30.11.2015). Среди найденных 26 орбит было 7 орбит, указанных на сайте NASA, а также и другие не указанные орбиты соударений.

На основе результатов 2-ой части каталога орбит соударений получены рис 9, рис 10 и рис 11. На этих рисунках по оси абсцисс отложено расстояние от номинальной орбиты Da в метрах, а по оси ординат

для рис 9 – момент соударения астероида с Землей,

для рис 10 – минимальное расстояние траектории от центра Земли в момент соударения (встречи),

для рис 11 – начальная ширина (размер) щели орбиты соударения.

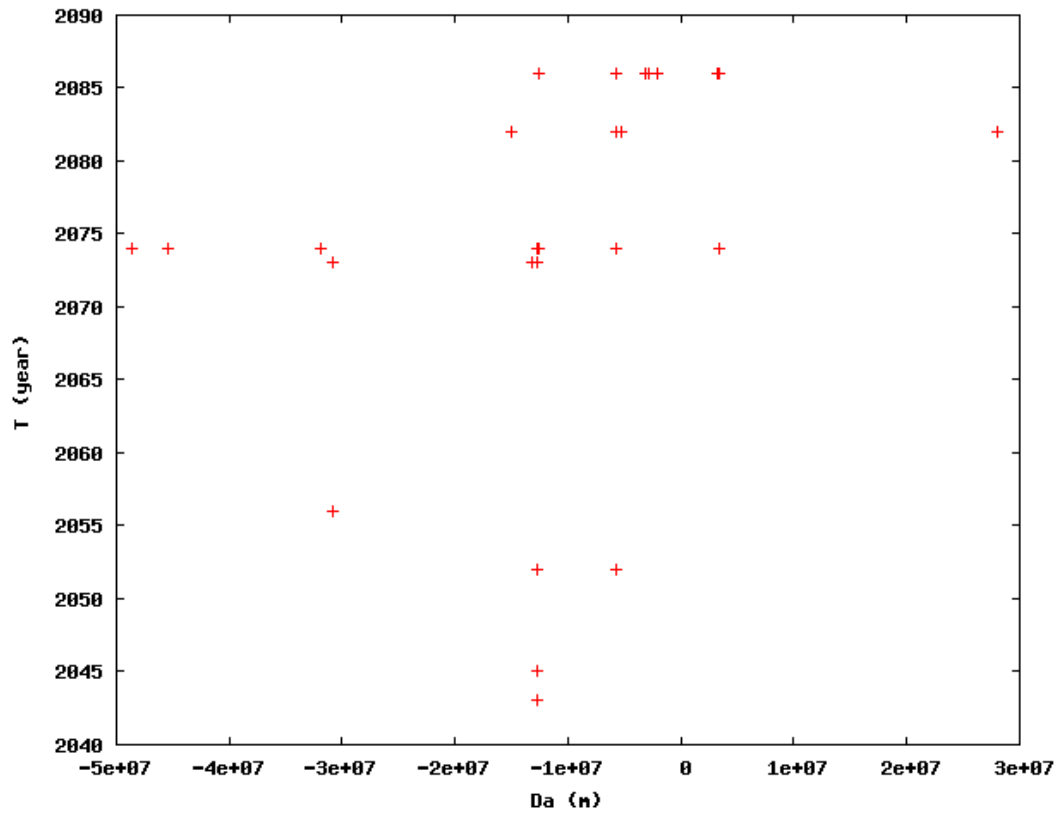


Рис. 9: Моменты соударения астероида 2015 RN35 с Землей, первый этап наблюдений, краткий список.

Треугольниками показаны орбиты соударений, представленные на сайте НАСА (7 орбит).

В пункте 5.2 во входном файле `daterange_in.txt` были записаны последовательно 7 предполагаемых моментов (годов) сближений астероида с Землей в середине декабря, указанных на сайте НАСА в разделе `Impact Risk`. В результате работы программного комплекса `v19` на втором этапе (`stage 2`) было получено 26 возможных орбит соударений астероида с Землей.

В этом пункте рассматривается расширенный вариант работы программного комплекса `v19` на втором этапе (`stage 2`), когда во входном файле начальных данных `daterange_in.txt` были записаны последовательно 86 предполагаемых моментов (2015-2100 годы) сближений астероида с Землей в середине декабря, а интервал времени около месяца относительно этих моментов.

Результатом работы программы `v19` (`stage1`, `stage2`) и программы обработки `pgrwbac` явился каталог виртуальных орбит соударений астероида 2015 RN35 с Землей на интервале времени 2043-2099 годов (30 моментов), состоящий из 154 орбит в окрестности  $\pm 3 \sigma$  от номинальной орбиты.

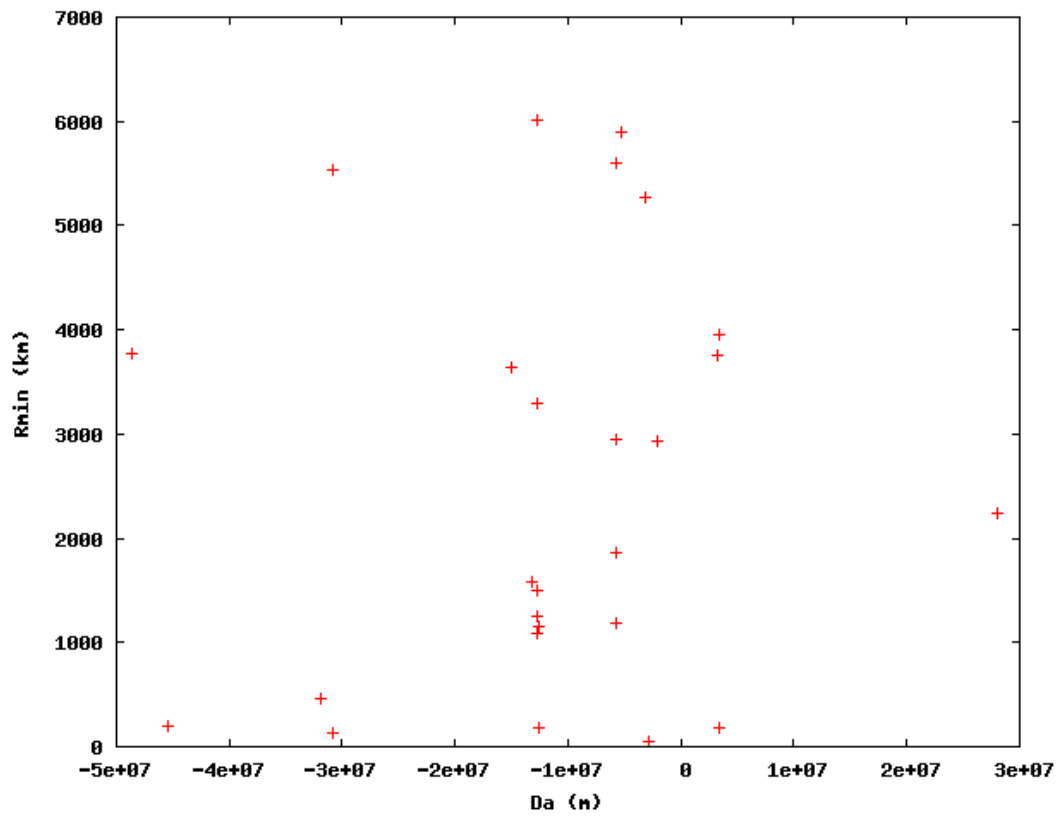


Рис. 10: Минимальное геоцентрическое расстояние астероида 2015 RN35, первый этап наблюдений, краткий список.



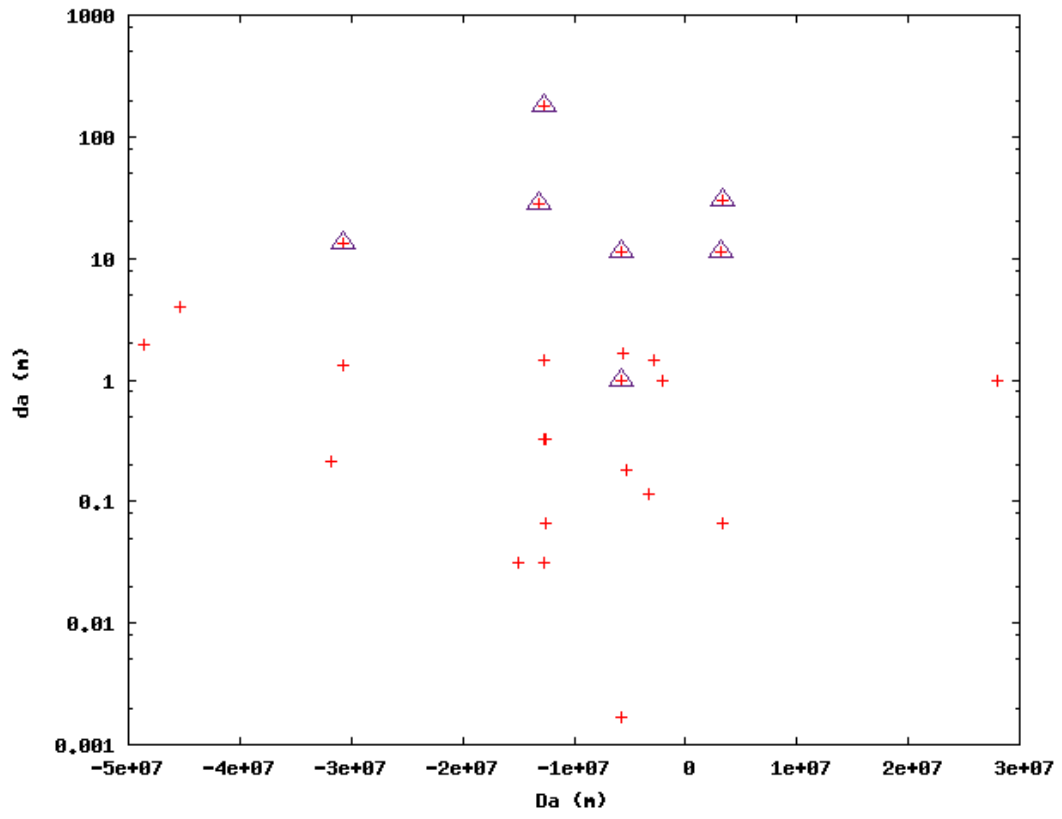


Рис. 11: Размеры щели астероида 2015 RN35, первый этап наблюдений, краткий список.

Пример этого каталога возможных орбит соударений, который состоит из 2-х частей.

Таблица 9: Соударения астероида 2015 RN35 с Землей, первый этап наблюдений, полный список.

| n  | Da (m)        | Date            | Date        | dJD (d)    | dr (km) | da (m)   | dx (m)   |
|----|---------------|-----------------|-------------|------------|---------|----------|----------|
| 1  | 2             | 3               | 4           | 5          | 6       | 7        | 8        |
| 1  | -12714583.784 | 2043 12 13.1617 | 2043.952256 | 10396.1617 | 1244.68 | 179.7774 | 164.5577 |
| 2  | -12715368.967 | 2045 12 12.0731 | 2045.949518 | 11126.0731 | 6006.58 | 0.0311   | 0.0284   |
| 3  | -30221729.468 | 2048 12 12.3555 | 2048.949518 | 12222.3555 | 2507.48 | 0.8170   | 0.7480   |
| 4  | -12713396.602 | 2051 12 12.8947 | 2051.949518 | 13317.8947 | 672.34  | 0.0458   | 0.0419   |
| 5  | -12714219.208 | 2052 12 12.1369 | 2052.949518 | 13683.1369 | 1495.57 | 0.0000   | 0.0015   |
| 6  | -5716005.879  | 2052 12 14.5911 | 2052.954993 | 13685.5911 | 1868.95 | 11.4411  | 10.4719  |
| 7  | -12717006.352 | 2054 12 12.8626 | 2054.949518 | 14413.8626 | 3381.69 | 0.0980   | 0.0898   |
| 8  | -12710385.835 | 2055 12 14.6445 | 2055.954993 | 14780.6445 | 81.06   | 0.3269   | 0.2992   |
| 9  | -30772023.338 | 2056 12 18.7104 | 2056.965944 | 15150.7104 | 5538.45 | 13.0724  | 11.9678  |
| 10 | -12708643.506 | 2062 12 12.7486 | 2062.949518 | 17335.7486 | 447.55  | 0.4903   | 0.4488   |
| 11 | -32083905.571 | 2064 12 15.9864 | 2064.957731 | 18069.9864 | 1940.76 | 0.2943   | 0.2693   |
| 12 | 1489805.168   | 2065 12 13.0879 | 2065.952256 | 18432.0879 | 5433.01 | 1.4711   | 1.3464   |
| 13 | -11416967.562 | 2066 12 15.1383 | 2066.957731 | 18799.1383 | 3269.02 | 4.9030   | 4.4879   |
| 14 | -44984669.171 | 2067 12 7.7076  | 2067.935830 | 19156.7076 | 182.26  | 0.6536   | 0.5984   |
| 15 | -44976370.079 | 2067 12 6.2306  | 2067.933092 | 19155.2306 | 276.67  | 0.1633   | 0.1496   |
| 16 | -12511075.351 | 2067 12 16.5218 | 2067.960469 | 19165.5218 | 633.18  | 3.2687   | 2.9920   |
| 17 | -3248636.227  | 2068 12 14.5120 | 2068.954993 | 19529.5120 | 80.83   | 3.2691   | 2.9920   |
| 18 | -13259268.157 | 2069 12 12.6909 | 2069.949518 | 19892.6909 | 693.66  | 0.0048   | 0.0045   |
| 19 | -12707151.969 | 2069 12 12.6534 | 2069.949518 | 19892.6534 | 1889.00 | 0.6538   | 0.5984   |
| 20 | -12711947.821 | 2070 12 12.9165 | 2070.949518 | 20257.9165 | 179.85  | 0.0981   | 0.0898   |
| 21 | -31593708.419 | 2072 12 9.6377  | 2072.941305 | 20985.6377 | 2197.91 | 4.9020   | 4.4879   |
| 22 | -30768127.445 | 2073 12 28.9900 | 2073.993320 | 21369.9900 | 126.81  | 1.3073   | 1.1968   |
| 23 | -13193104.205 | 2073 12 12.7333 | 2073.949518 | 21353.7333 | 1575.35 | 27.7837  | 25.4316  |
| 24 | -12743427.580 | 2073 12 13.3901 | 2073.952256 | 21354.3901 | 3287.67 | 1.4708   | 1.3464   |
| 25 | -48634270.356 | 2074 12 20.3386 | 2074.971419 | 21726.3386 | 3763.77 | 1.9605   | 1.7952   |
| 26 | -45375608.541 | 2074 12 22.7296 | 2074.976894 | 21728.7296 | 200.22  | 3.9211   | 3.5904   |
| 27 | -31827864.663 | 2074 12 7.9808  | 2074.935830 | 21713.9808 | 460.46  | 0.2125   | 0.1945   |
| 28 | -12709455.226 | 2074 12 12.9009 | 2074.949518 | 21718.9009 | 1079.77 | 0.3268   | 0.2992   |
| 29 | -12510911.325 | 2074 12 16.0608 | 2074.960469 | 21722.0608 | 186.46  | 0.0654   | 0.0598   |

Продолжение на следующей странице

| 1  | 2             | 3               | 4           | 5          | 6       | 7       | 8       |
|----|---------------|-----------------|-------------|------------|---------|---------|---------|
| 30 | -5716238.647  | 2074 12 14.9576 | 2074.954993 | 21720.9576 | 1191.21 | 0.0017  | 0.0015  |
| 31 | 3310785.836   | 2074 12 12.6413 | 2074.949518 | 21718.6413 | 3955.47 | 29.4225 | 26.9276 |
| 32 | -34793385.252 | 2075 12 18.3983 | 2075.965944 | 22089.3983 | 104.83  | 0.9804  | 0.8976  |
| 33 | -12727439.176 | 2075 12 14.0000 | 2075.954993 | 22085.0000 | 111.07  | 0.2942  | 0.2693  |
| 34 | -11418686.155 | 2075 12 14.0196 | 2075.954993 | 22085.0195 | 284.89  | 0.2779  | 0.2543  |
| 35 | -5714579.177  | 2075 12 15.2170 | 2075.957731 | 22086.2170 | 69.19   | 0.3269  | 0.2992  |
| 36 | -5420121.535  | 2075 12 15.2865 | 2075.957731 | 22086.2865 | 5604.28 | 1.4710  | 1.3464  |
| 37 | -37173104.973 | 2076 12 17.4390 | 2076.963206 | 22454.4390 | 1996.37 | 0.4902  | 0.4488  |
| 38 | -12705679.874 | 2076 12 12.6358 | 2076.949518 | 22449.6358 | 5829.38 | 0.3269  | 0.2992  |
| 39 | -12721259.456 | 2077 12 13.0270 | 2077.952256 | 22815.0270 | 2026.89 | 0.4903  | 0.4488  |
| 40 | -12713400.526 | 2078 12 12.9453 | 2078.949518 | 23179.9453 | 4315.10 | 0.0000  | 0.0015  |
| 41 | 47334880.841  | 2078 12 6.2302  | 2078.933092 | 23173.2302 | 954.05  | 1.4717  | 1.3464  |
| 42 | -45376052.362 | 2079 12 22.9113 | 2079.976894 | 23554.9113 | 143.81  | 0.4902  | 0.4488  |
| 43 | 5136040.422   | 2079 12 16.0107 | 2079.960469 | 23548.0107 | 965.13  | 1.9615  | 1.7952  |
| 44 | -13190536.133 | 2080 12 12.2495 | 2080.949518 | 23910.2495 | 223.84  | 1.6343  | 1.4960  |
| 45 | -5796768.934  | 2080 12 13.1345 | 2080.952256 | 23911.1345 | 151.82  | 0.1634  | 0.1496  |
| 46 | -45623510.067 | 2081 12 10.6486 | 2081.944043 | 24273.6486 | 1703.64 | 0.0489  | 0.0449  |
| 47 | -44927137.990 | 2081 12 12.8587 | 2081.949518 | 24275.8587 | 2712.78 | 0.3268  | 0.2992  |
| 48 | -44925919.424 | 2081 12 12.8774 | 2081.949518 | 24275.8774 | 1676.96 | 0.3267  | 0.2992  |
| 49 | -20390769.223 | 2081 12 16.0076 | 2081.960469 | 24279.0076 | 6058.58 | 6.5368  | 5.9839  |
| 50 | 1449157.231   | 2081 12 14.9072 | 2081.954993 | 24277.9072 | 583.23  | 0.8172  | 0.7480  |
| 51 | -15080698.377 | 2082 12 13.7110 | 2082.952256 | 24641.7110 | 3642.43 | 0.0311  | 0.0284  |
| 52 | -5713484.592  | 2082 12 15.1409 | 2082.957731 | 24643.1409 | 2943.69 | 0.9807  | 0.8976  |
| 53 | -5242056.275  | 2082 12 14.8479 | 2082.954993 | 24642.8479 | 5893.90 | 0.1797  | 0.1646  |
| 54 | 28033897.514  | 2082 12 9.5315  | 2082.941305 | 24637.5315 | 2247.24 | 0.9809  | 0.8976  |
| 55 | -12270116.984 | 2083 12 13.6967 | 2083.952256 | 25006.6967 | 2438.08 | 0.3268  | 0.2992  |
| 56 | 3320114.395   | 2083 12 12.3517 | 2083.949518 | 25005.3517 | 2544.59 | 0.8173  | 0.7480  |
| 57 | 28404277.078  | 2083 12 11.6642 | 2083.946781 | 25004.6642 | 190.92  | 0.0490  | 0.0449  |
| 58 | -33319855.797 | 2084 12 9.3544  | 2084.941305 | 25368.3544 | 5394.57 | 0.1080  | 0.0988  |
| 59 | -4292118.520  | 2084 12 13.9834 | 2084.952256 | 25372.9834 | 375.14  | 3.1055  | 2.8424  |
| 60 | -2738080.263  | 2084 12 15.2481 | 2084.957731 | 25374.2481 | 2205.60 | 0.8173  | 0.7480  |
| 61 | -44981896.403 | 2085 12 7.3319  | 2085.935830 | 25731.3319 | 4369.72 | 0.2287  | 0.2094  |
| 62 | -30769638.067 | 2085 12 19.1285 | 2085.968682 | 25743.1285 | 1848.72 | 0.2614  | 0.2393  |
| 63 | -29300390.948 | 2085 12 20.0718 | 2085.971419 | 25744.0718 | 488.08  | 0.3268  | 0.2992  |
| 64 | -15083492.023 | 2085 12 15.7888 | 2085.957731 | 25739.7888 | 165.54  | 0.0312  | 0.0284  |

*Продолжение на следующей странице*

| 1  | 2             | 3               | 4           | 5          | 6       | 7       | 8       |
|----|---------------|-----------------|-------------|------------|---------|---------|---------|
| 65 | -5716735.957  | 2085 12 15.0393 | 2085.957731 | 25739.0393 | 1758.31 | 0.1144  | 0.1047  |
| 66 | -12510297.209 | 2086 12 16.2231 | 2086.960469 | 26105.2231 | 1159.49 | 0.3269  | 0.2992  |
| 67 | -5666712.609  | 2086 12 12.3357 | 2086.949518 | 26101.3357 | 5598.37 | 1.6345  | 1.4960  |
| 68 | -3224811.517  | 2086 12 13.1596 | 2086.952256 | 26102.1596 | 5270.80 | 0.1144  | 0.1047  |
| 69 | -2848592.347  | 2086 12 13.3712 | 2086.952256 | 26102.3712 | 50.69   | 1.4711  | 1.3464  |
| 70 | -2045899.953  | 2086 12 15.2302 | 2086.957731 | 26104.2302 | 2923.62 | 0.9808  | 0.8976  |
| 71 | 3221232.398   | 2086 12 16.2569 | 2086.960469 | 26105.2569 | 3757.93 | 11.4422 | 10.4719 |
| 72 | 3329014.438   | 2086 12 11.3521 | 2086.946781 | 26100.3521 | 177.38  | 0.0654  | 0.0598  |
| 73 | -44985719.296 | 2087 12 8.3592  | 2087.938568 | 26462.3592 | 247.52  | 0.3268  | 0.2992  |
| 74 | -30772592.850 | 2087 12 19.6068 | 2087.968682 | 26473.6068 | 5240.93 | 0.0294  | 0.0269  |
| 75 | -30777064.346 | 2088 12 19.0392 | 2088.968682 | 26839.0392 | 3357.51 | 0.9805  | 0.8976  |
| 76 | -965145.752   | 2088 12 13.4203 | 2088.952256 | 26833.4203 | 642.51  | 4.9036  | 4.4879  |
| 77 | -105845.957   | 2088 12 13.4961 | 2088.952256 | 26833.4961 | 4496.26 | 1.1442  | 1.0472  |
| 78 | -15750836.746 | 2089 12 16.4524 | 2089.960469 | 27201.4524 | 252.25  | 2.2880  | 2.0944  |
| 79 | -13982949.136 | 2089 12 13.4168 | 2089.952256 | 27198.4168 | 1126.82 | 0.0145  | 0.0135  |
| 80 | -13196368.467 | 2089 12 12.9643 | 2089.949518 | 27197.9643 | 4328.95 | 0.6537  | 0.5984  |
| 81 | -12740101.346 | 2089 12 12.5496 | 2089.949518 | 27197.5496 | 3784.02 | 0.6537  | 0.5984  |
| 82 | -6994432.136  | 2089 12 14.6009 | 2089.954993 | 27199.6009 | 6102.44 | 0.6538  | 0.5984  |
| 83 | -6782029.918  | 2089 12 14.7252 | 2089.954993 | 27199.7252 | 87.10   | 0.7976  | 0.7300  |
| 84 | -6084018.994  | 2089 12 15.2885 | 2089.957731 | 27200.2885 | 115.84  | 6.5377  | 5.9839  |
| 85 | -5241934.798  | 2089 12 14.6858 | 2089.954993 | 27199.6858 | 1662.09 | 0.6539  | 0.5984  |
| 86 | -4314070.854  | 2089 12 14.3363 | 2089.954993 | 27199.3363 | 2391.89 | 0.4904  | 0.4488  |
| 87 | -3566022.761  | 2089 12 14.4510 | 2089.954993 | 27199.4510 | 3914.26 | 0.1471  | 0.1346  |
| 88 | 47334915.825  | 2089 12 5.8812  | 2089.930355 | 27190.8812 | 492.85  | 0.0131  | 0.0120  |
| 89 | -37190751.374 | 2090 12 7.3213  | 2090.935830 | 27557.3213 | 3724.99 | 0.3104  | 0.2842  |
| 90 | -33085263.641 | 2090 12 10.2629 | 2090.944043 | 27560.2629 | 5845.01 | 0.1145  | 0.1047  |
| 91 | -5719997.547  | 2090 12 15.8081 | 2090.957731 | 27565.8081 | 2511.19 | 0.0000  | 0.0015  |
| 92 | 277339.243    | 2090 12 13.7241 | 2090.952256 | 27563.7241 | 6183.88 | 1.3076  | 1.1968  |
| 93 | 30148647.002  | 2090 12 23.7542 | 2090.979632 | 27573.7542 | 2178.77 | 0.0049  | 0.0045  |
| 94 | -44984046.600 | 2091 12 7.9090  | 2091.935830 | 27922.9090 | 1079.70 | 0.1634  | 0.1496  |
| 95 | -27936315.289 | 2091 12 20.7781 | 2091.971419 | 27935.7781 | 4350.28 | 0.2778  | 0.2543  |
| 96 | -5697706.914  | 2091 12 14.3750 | 2091.954993 | 27929.3750 | 31.56   | 0.9807  | 0.8976  |
| 97 | -5425107.547  | 2091 12 14.1377 | 2091.954993 | 27929.1377 | 530.63  | 1.1442  | 1.0472  |
| 98 | -4879527.297  | 2091 12 15.3728 | 2091.957731 | 27930.3728 | 3484.88 | 0.6537  | 0.5984  |
| 99 | -4297171.743  | 2091 12 15.2505 | 2091.957731 | 27930.2505 | 3077.87 | 1.9615  | 1.7952  |

*Продолжение на следующей странице*

| 1   | 2             | 3               | 4           | 5          | 6       | 7      | 8      |
|-----|---------------|-----------------|-------------|------------|---------|--------|--------|
| 100 | -3387571.618  | 2091 12 14.8926 | 2091.954993 | 27929.8926 | 1081.34 | 0.3269 | 0.2992 |
| 101 | -2837022.557  | 2091 12 15.9238 | 2091.957731 | 27930.9238 | 4546.70 | 0.3269 | 0.2992 |
| 102 | 22765081.258  | 2091 12 10.2948 | 2091.944043 | 27925.2948 | 1397.87 | 1.4714 | 1.3464 |
| 103 | 28015158.852  | 2091 12 12.8264 | 2091.949518 | 27927.8264 | 191.26  | 0.0654 | 0.0598 |
| 104 | -13192094.489 | 2092 12 12.3601 | 2092.949518 | 28293.3601 | 1146.02 | 0.0818 | 0.0748 |
| 105 | 3317901.947   | 2092 12 11.2816 | 2092.946781 | 28292.2816 | 1537.77 | 3.2692 | 2.9920 |
| 106 | 22489321.113  | 2092 12 9.7059  | 2092.941305 | 28290.7059 | 414.36  | 0.6539 | 0.5984 |
| 107 | -39730973.383 | 2093 12 19.2589 | 2093.968682 | 28665.2589 | 869.72  | 0.3268 | 0.2992 |
| 108 | -34792795.357 | 2093 12 7.3370  | 2093.935830 | 28653.3370 | 4177.06 | 0.0279 | 0.0254 |
| 109 | -31623787.110 | 2093 12 12.8840 | 2093.949518 | 28658.8840 | 777.69  | 0.0867 | 0.0793 |
| 110 | -13193894.964 | 2093 12 12.7406 | 2093.949518 | 28658.7406 | 2413.05 | 0.0818 | 0.0748 |
| 111 | -12725870.235 | 2093 12 12.9797 | 2093.949518 | 28658.9797 | 1696.54 | 0.0229 | 0.0210 |
| 112 | -2849384.676  | 2093 12 13.3202 | 2093.952256 | 28659.3202 | 2694.20 | 0.0965 | 0.0883 |
| 113 | 3220149.775   | 2093 12 15.9147 | 2093.957731 | 28661.9147 | 656.13  | 0.3268 | 0.2992 |
| 114 | 28034070.344  | 2093 12 9.1616  | 2093.941305 | 28655.1616 | 1611.25 | 0.1962 | 0.1795 |
| 115 | 28232688.131  | 2093 12 21.2737 | 2093.974157 | 28667.2737 | 4817.74 | 2.1255 | 1.9448 |
| 116 | 1308702.824   | 2094 12 14.5463 | 2094.954993 | 29025.5463 | 3642.69 | 0.1144 | 0.1047 |
| 117 | -30521268.088 | 2095 12 16.3931 | 2095.960469 | 29392.3931 | 257.29  | 1.1439 | 1.0472 |
| 118 | -19926782.714 | 2095 12 15.4856 | 2095.957731 | 29391.4856 | 534.10  | 0.9805 | 0.8976 |
| 119 | -14649072.474 | 2095 12 12.7059 | 2095.949518 | 29388.7059 | 12.99   | 0.1275 | 0.1167 |
| 120 | -14620856.837 | 2095 12 13.3366 | 2095.952256 | 29389.3366 | 141.18  | 0.1634 | 0.1496 |
| 121 | -12707501.521 | 2095 12 13.0004 | 2095.952256 | 29389.0004 | 343.14  | 0.0818 | 0.0748 |
| 122 | -5671428.177  | 2095 12 14.0000 | 2095.954993 | 29390.0000 | 60.92   | 0.8173 | 0.7480 |
| 123 | 5097945.558   | 2095 12 16.0422 | 2095.960469 | 29392.0422 | 85.62   | 0.9807 | 0.8976 |
| 124 | 28037109.957  | 2095 12 8.9589  | 2095.938568 | 29384.9589 | 60.73   | 1.1446 | 1.0472 |
| 125 | 35659247.697  | 2095 12 23.3453 | 2095.979632 | 29399.3453 | 705.02  | 3.1066 | 2.8424 |
| 126 | -44989405.136 | 2096 12 7.1076  | 2096.935830 | 29749.1076 | 2817.53 | 0.1634 | 0.1496 |
| 127 | -44980358.335 | 2096 12 6.8231  | 2096.933092 | 29748.8231 | 5367.86 | 0.2123 | 0.1945 |
| 128 | -24320236.646 | 2096 12 20.0601 | 2096.971419 | 29762.0601 | 5612.54 | 0.2125 | 0.1945 |
| 129 | -13201086.974 | 2096 12 12.8115 | 2096.949518 | 29754.8115 | 4766.08 | 2.1246 | 1.9448 |
| 130 | -11144057.977 | 2096 12 13.3509 | 2096.952256 | 29755.3509 | 5547.33 | 0.2452 | 0.2244 |
| 131 | -7857286.698  | 2096 12 16.0713 | 2096.960469 | 29758.0713 | 86.59   | 0.2941 | 0.2693 |
| 132 | -46277530.463 | 2097 12 9.1281  | 2097.941305 | 30116.1281 | 4987.58 | 0.0262 | 0.0239 |
| 133 | -39713371.349 | 2097 12 7.1698  | 2097.935830 | 30114.1698 | 5915.27 | 0.1797 | 0.1646 |
| 134 | -33184929.695 | 2097 12 13.0610 | 2097.952256 | 30120.0610 | 2150.69 | 0.0277 | 0.0254 |

*Продолжение на следующей странице*

| 1   | 2             | 3               | 4           | 5          | 6       | 7      | 8      |
|-----|---------------|-----------------|-------------|------------|---------|--------|--------|
| 135 | -44987917.247 | 2098 12 7.6536  | 2098.935830 | 30479.6536 | 1277.72 | 0.4902 | 0.4488 |
| 136 | -30441050.055 | 2098 12 18.1500 | 2098.965944 | 30490.1500 | 972.47  | 0.0180 | 0.0165 |
| 137 | -16715974.028 | 2098 12 14.5821 | 2098.954993 | 30486.5821 | 515.24  | 0.0294 | 0.0269 |
| 138 | -12710295.511 | 2098 12 12.7914 | 2098.949518 | 30484.7914 | 3935.87 | 0.0000 | 0.0015 |
| 139 | -11530459.196 | 2098 12 20.8149 | 2098.971419 | 30492.8149 | 146.34  | 0.0654 | 0.0598 |
| 140 | -5700905.178  | 2098 12 14.4213 | 2098.954993 | 30486.4213 | 556.12  | 2.9421 | 2.6928 |
| 141 | -5503257.845  | 2098 12 18.4785 | 2098.965944 | 30490.4785 | 65.15   | 0.4577 | 0.4189 |
| 142 | -4300930.829  | 2098 12 15.3260 | 2098.957731 | 30487.3260 | 1143.30 | 2.7785 | 2.5432 |
| 143 | -3567465.121  | 2098 12 15.6743 | 2098.957731 | 30487.6743 | 2468.48 | 0.2778 | 0.2543 |
| 144 | -3268271.534  | 2098 12 14.8727 | 2098.954993 | 30486.8727 | 1422.60 | 0.4903 | 0.4488 |
| 145 | -3254543.763  | 2098 12 15.5991 | 2098.957731 | 30487.5991 | 2157.23 | 0.4904 | 0.4488 |
| 146 | -3250217.451  | 2098 12 15.0322 | 2098.957731 | 30487.0322 | 6119.12 | 0.2288 | 0.2094 |
| 147 | 30210490.868  | 2098 12 9.1018  | 2098.941305 | 30481.1018 | 5609.17 | 0.8174 | 0.7480 |
| 148 | -30770484.478 | 2099 12 19.6785 | 2099.968682 | 30856.6785 | 4706.42 | 0.0066 | 0.0060 |
| 149 | -14267134.049 | 2099 12 15.7095 | 2099.957731 | 30852.7095 | 224.48  | 0.3105 | 0.2842 |
| 150 | -7179050.281  | 2099 12 15.4684 | 2099.957731 | 30852.4684 | 883.92  | 0.1471 | 0.1346 |
| 151 | 523618.867    | 2099 12 13.0623 | 2099.952256 | 30850.0623 | 4700.97 | 0.3269 | 0.2992 |
| 152 | 1490032.673   | 2099 12 13.4981 | 2099.952256 | 30850.4981 | 322.29  | 0.0654 | 0.0598 |
| 153 | 3313452.423   | 2099 12 12.9367 | 2099.949518 | 30849.9367 | 1341.57 | 0.3759 | 0.3441 |
| 154 | 4089518.700   | 2099 12 13.1296 | 2099.952256 | 30850.1296 | 5227.52 | 3.2691 | 2.9920 |

На основе результатов 2-ой части каталога орбит соударений получены рис 12, рис 13, рис 14 и рис 15. На этих рисунках по оси абсцисс отложено расстояние от номинальной орбиты  $D_0$  в метрах, а по оси ординат

для рис 12 – момент соударения астероида с Землей,

для рис 13 – минимальное расстояние траектории от центра Земли в момент соударения (встречи),

для рис 14 – начальная ширина (размер) щели орбиты соударения,

для рис 15 – также начальная ширина (размер) щели орбиты соударения, но показаны щели с размерами больше 1 метра, т.е. на рис 15 число орбит соударений равно 48. Треугольниками показаны орбиты соударений, представленные на сайте НАСА (7 орбит).

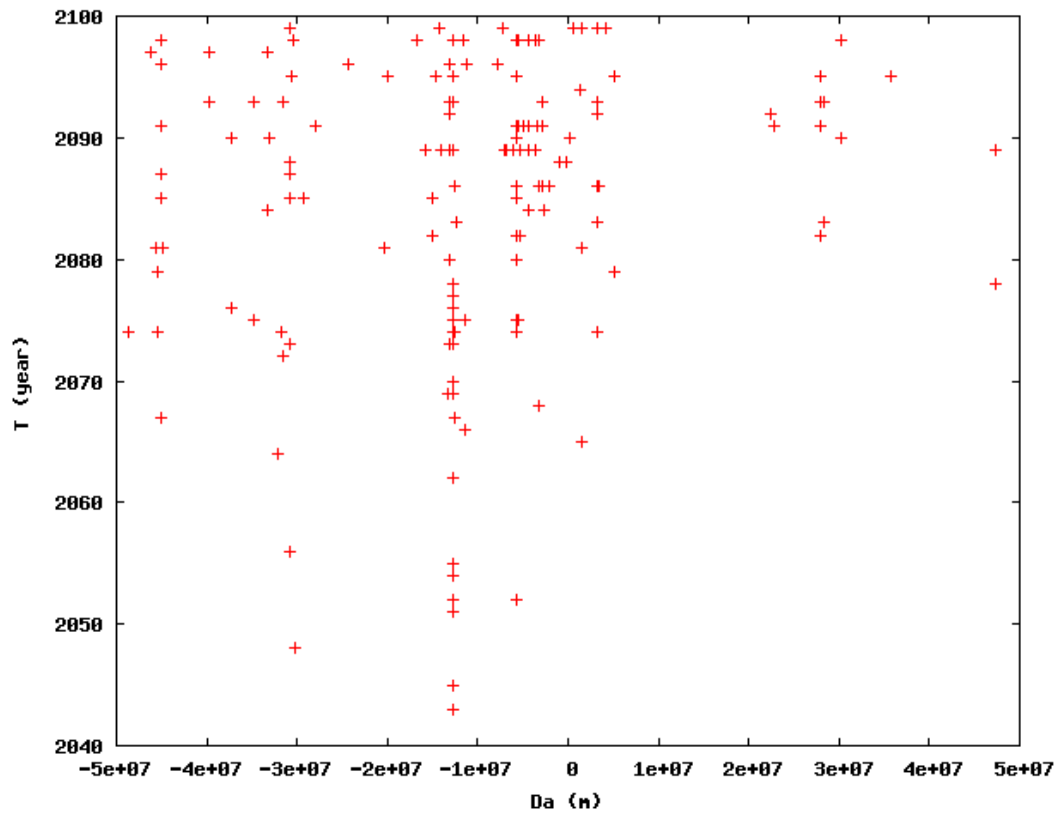


Рис. 12: Моменты соударения астероида 2015 RN35 с Землей, первый этап наблюдений, полный список.

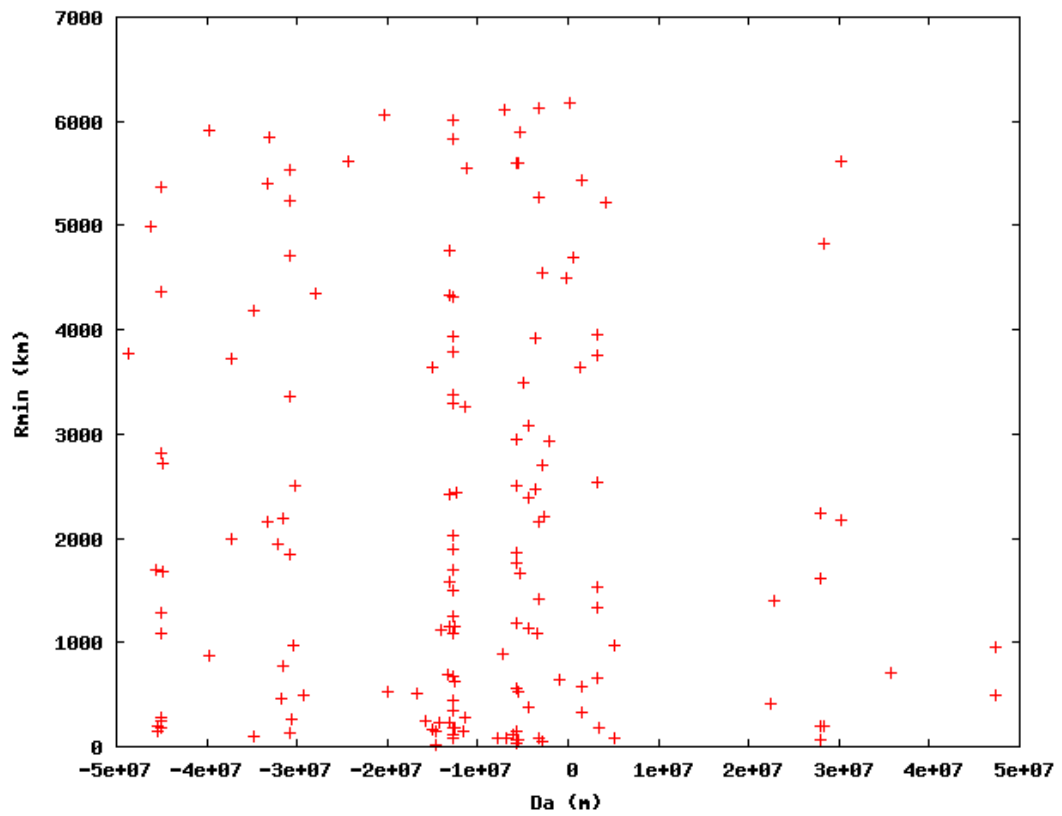


Рис. 13: Минимальное геоцентрическое расстояние астероида 2015 RN35, первый этап наблюдений, полный список.



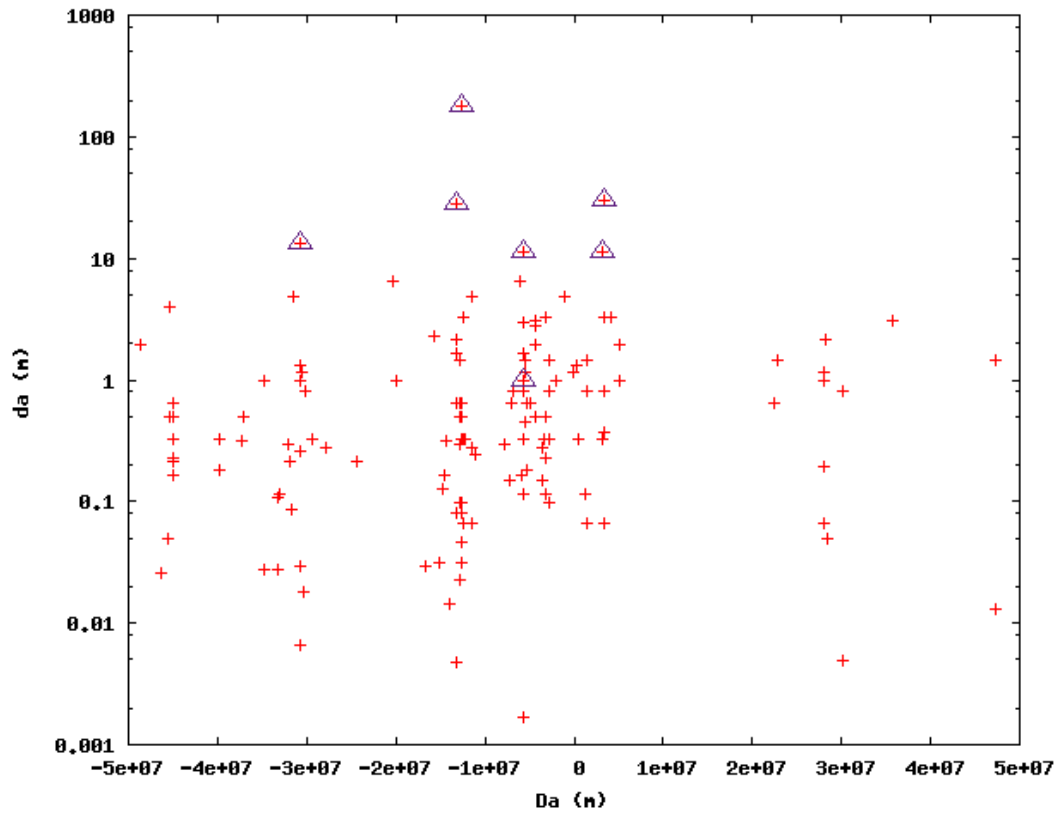


Рис. 14: Размер щелей астероида 2015 RN35, первый этап наблюдений, полный список.

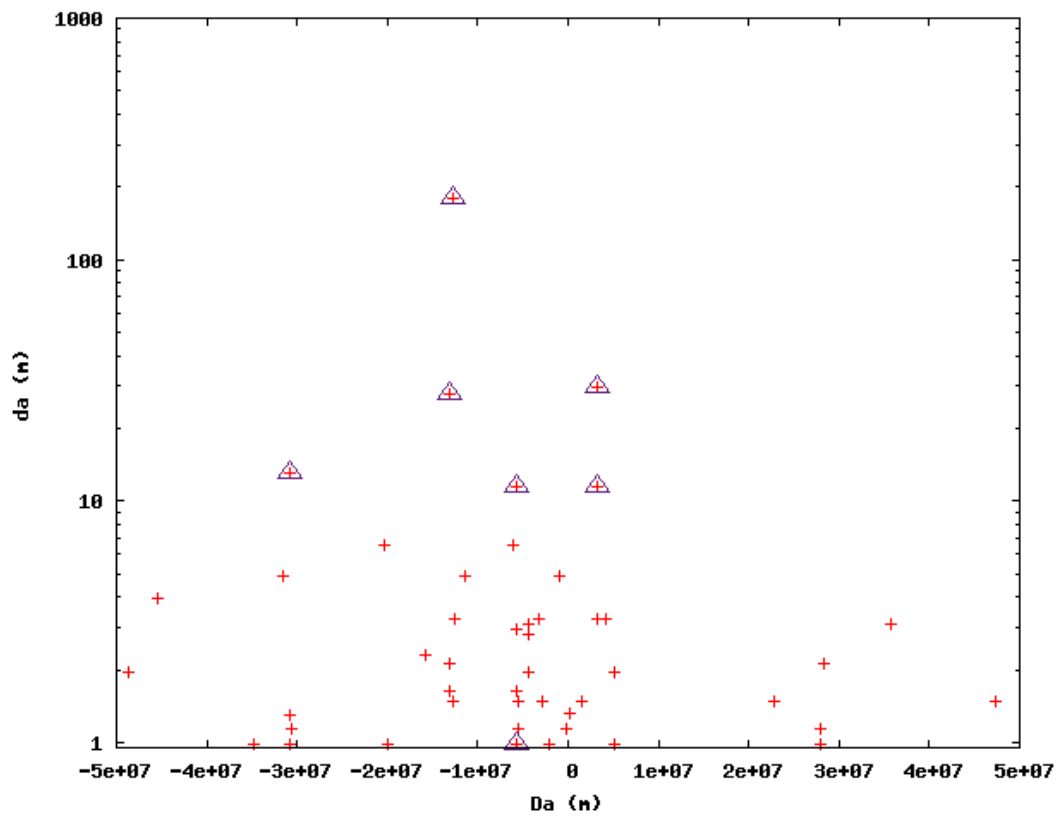


Рис. 15: Размер щелей (больше 1 метра) астероида 2015 RN35, первый этап наблюдений, полный список.

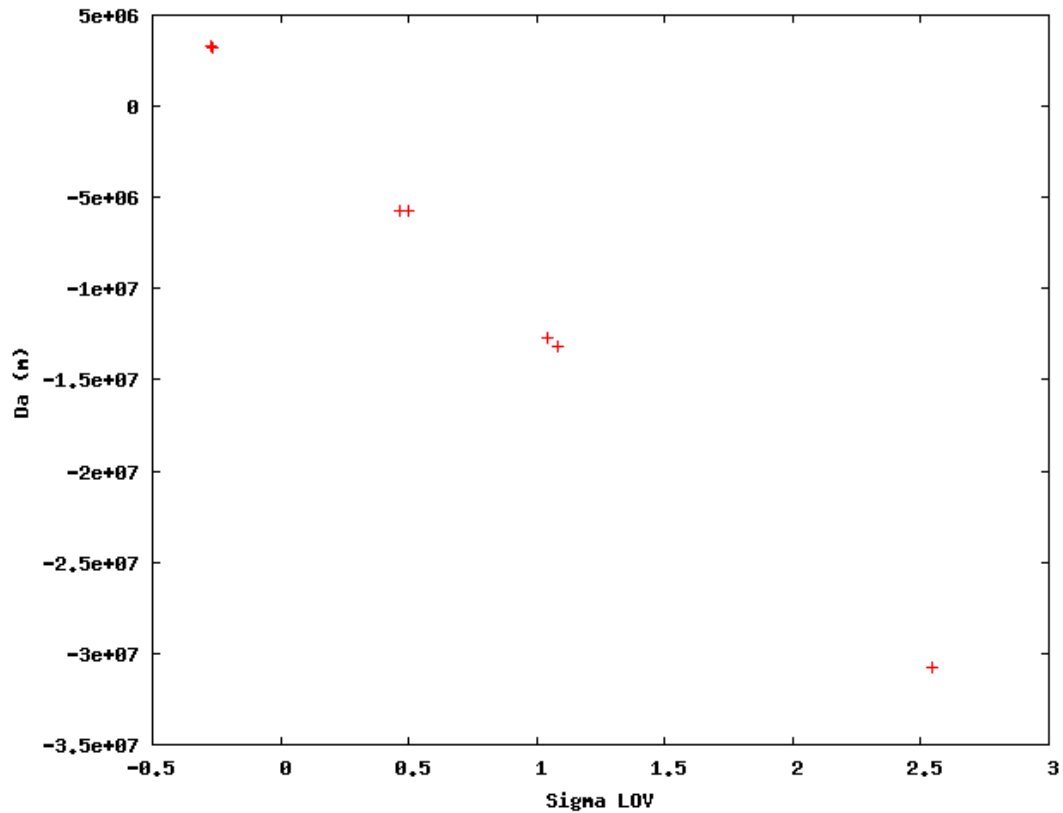


Рис. 16: Сравнение положений орбит соударений относительно номинальной орбиты на сайте НАСА и в данной работе, первый этап наблюдений.

### 5.3 Сравнение положений возможных орбит соударений на сайте НАСА и наших результатов

На рис 16 показано сравнение данных об орбитах соударений на сайте НАСА (7 орбит) и наших результатов по параметру - положение относительно номинальной орбиты (Sigma LOV и Da). Как видно из рис 16 согласие очень хорошее, т.к. точки (крестики) ложатся на прямую  $Da = k * (\text{Sigma LOV})$ , где  $k = -1.212 * 10^7 m = -8.102 * 10^{-5} au$ . Напомним, что  $1\sigma = 8.94 * 10^{-5} au = 1.337 * 10^7 m$  (для большой полуоси a).

### 5.4 Предварительные выводы по 2015 RN35

Из 154 вычисленных нами возможных орбит соударений астероида 2015 RN35 с Землей на интервале времени 2043-2099 годов для решения 30 ноября 2015 года, соответствующего первому этапу наблюдений 7 орбит по нескольким параметрам довольно хорошо совпадают с орбитами на сайте НАСА. Несколько других орбит, найденных нами, также имеют размеры щелей близкие к сравниваемым и заслуживают внимания.

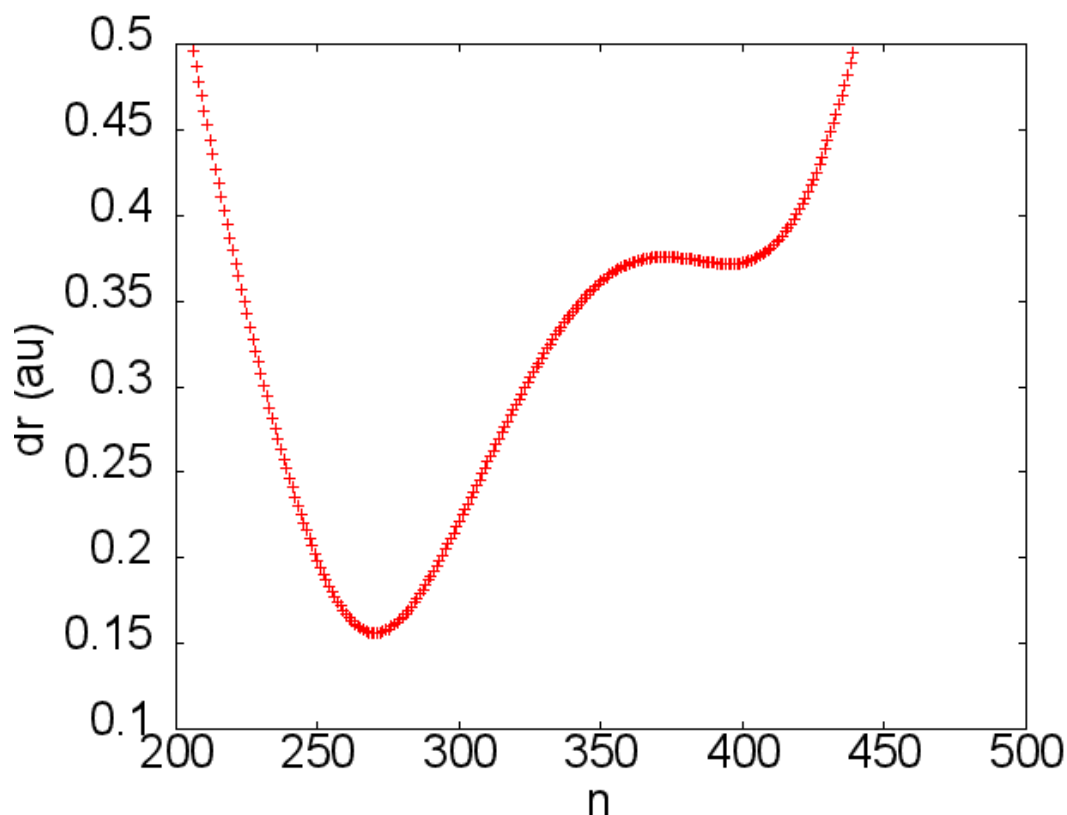


Рис. 17: Расстояние астероида от Земли на интервале времени с 18 июля 2015 года по 13 мая 2016 года, по оси абсцисс отложено относительное время в сутках

## 5.5 Новые данные об астероиде 2015 RN35 на сайте NASA после второго этапа наблюдений

Предварительно было проведено исследование второго этапа сближения астероида с Землей и возможных наблюдений с целью улучшения его орбиты. Для этого нами по программе на сайте NEODyS-2 были вычислены эфемериды для исследуемого астероида, из которых были взяты данные о расстоянии астероида от Земли и видимая звездная величина в окрестности двух сближений. Эти данные приведены на рис. 17 и рис. 18. На рис. 17 приведен график расстояния астероида от Земли на интервале времени с 18 июля 2015 года по 13 мая 2016 года, по оси абсцисс отложено относительное время в сутках (номера строк таблицы, из которой взяты данные). По оси ординат отложено расстояние в астрономических единицах.

На рис. 18 приведены значения видимой звездной величины астероида по времени, по оси абсцисс отложено относительное время в сутках. По оси ординат отложена видимая звездная величина. На рис 18 видно, что при наблюдениях до видимой звездной величины 23.0 m интервал времени будет приблизительно с 19 января по 14 марта 2016 года. Оказалось, что на втором этапе наблюдения проводились на интервале времени с 19 января

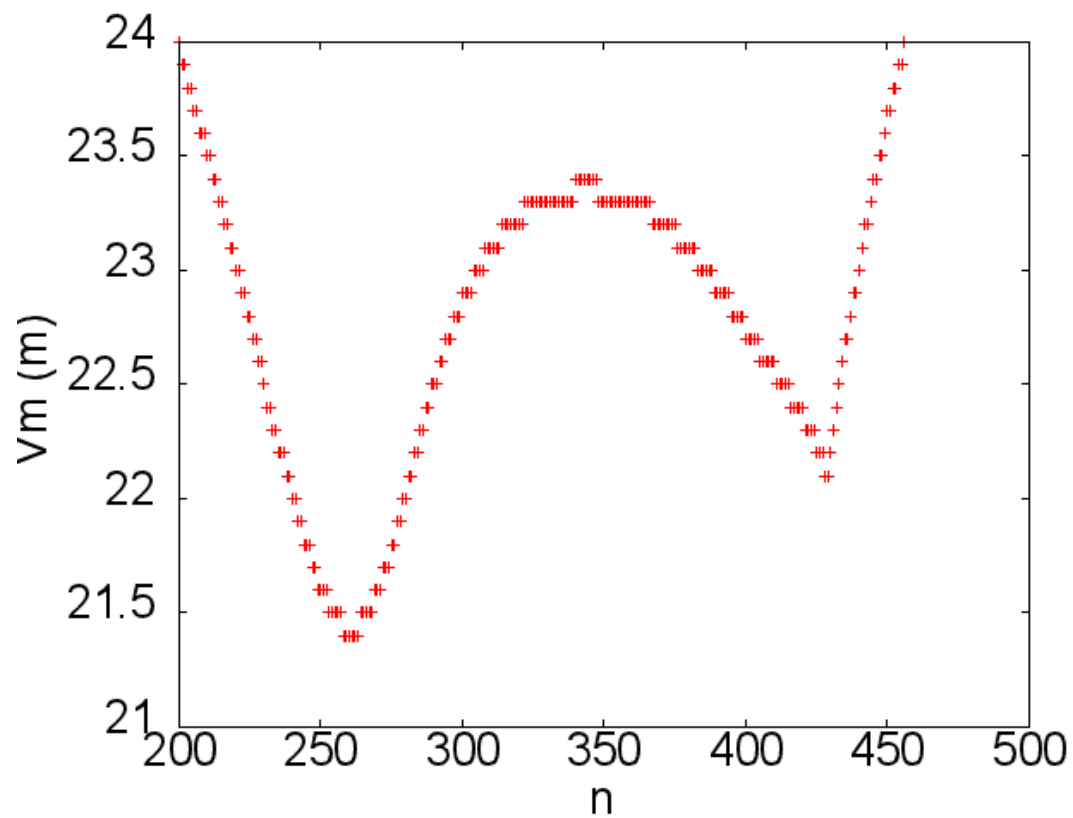


Рис. 18: Видимая звездная величина астероида по времени, по оси абсцисс отложено относительное время в сутках

Таблица 10: Соударения астероида 2015 RN35 с Землей на сайте НАСА (второй этап наблюдений, номинал 07.03.2016)

| Date          | Distance | Width    | Sigma LOV | Impact Probability | Palermo Scale | Torino Scale |
|---------------|----------|----------|-----------|--------------------|---------------|--------------|
| yyyy-mm-dd.dd | (rEarth) | (rEarth) | (rEarth)  |                    |               |              |
| 2065-12-13.09 | 0.90     | < 1.e-04 | 1.90855   | 7.9e-08            | -6.32         | 0            |
| 2074-12-12.66 | 0.78     | 5.87e-03 | 0.69154   | 7.2e-06            | -4.43         | 0            |
| 2079-12-16.04 | 0.42     | 7.86e-03 | -0.53127  | 4.6e-07            | -5.66         | 0            |
| 2081-12-14.92 | 0.29     | 1.11e-02 | 1.93573   | 3.8e-08            | -6.76         | 0            |
| 2086-12-16.27 | 0.76     | 8.83e-03 | 0.75132   | 2.6e-06            | -4.95         | 0            |
| 2090-12-13.73 | 0.98     | 1.39e-03 | 2.71927   | 1.1e-08            | -7.35         | 0            |
| 2092-12-11.30 | 0.42     | 5.89e-03 | 0.68679   | 1.1e-06            | -5.38         | 0            |
| 2105-12-11.22 | 0.11     | 6.19e-02 | -2.26256  | 2.7e-08            | -7.03         | 0            |
| 2111-12-17.85 | 0.83     | 2.12e-02 | -0.29988  | 4.0e-07            | -5.90         | 0            |

по 7 марта 2016 года. Таким образом решение для орбиты астероида 7 марта 2016 года на сайте НАСА можно считать практически окончательным.

## 5.6 Начальные данные для астероида 2015 RN35 (второй этап наблюдений, номинал 07.03.2016)

Напомним, что на первом этапе наблюдений было получено 33 наблюдения на дуге 55 суток (2015-Sep-09.52 to 2015-Nov-03.64). На втором этапе было получено 23 наблюдения на дуге 49 суток (2016-Jan-19.46 to 2016-Mar-07.32). Всего на двух этапах наблюдений было получено 56 наблюдений на дуге 180 суток (2015-Sep-09.52 to 2016-Mar-07.32). После обработки наблюдений и улучшения орбиты на сайте NASA было опубликовано новое решение, полученное 7 марта 2016 года, которое легло в основу наших дальнейших исследований. В таблице 10 приведены основные данные, необходимые для исследования и сравнения с нашими результатами.

## 5.7 Сравнение данных на сайте НАСА и результатов численного интегрирования программным комплексом v19

Была выполнена проверка (сравнение) тесных сближений астероида с Землей, полученных методом численного интегрирования программным комплексом v19 по выбранным начальным данным, и сближений, представленных на сайте НАСА.

Минимальный набор данных о сближениях с сайта НАСА приведен в таблице 11. Минимальный набор данных о сближениях, полученных численным интегрированием выбранных начальных координат и скоростей программным комплексом v19, приведен в таблице 12. Как показывает сравнение таблицы 11 и таблицы 12, отличие по времени достигает

Таблица 11: Минимальный набор данных о сближениях астероида с Землей на сайте НАСА (второй этап наблюдений, номинал 07.03.2016)

| Date (au)   | Time (TDB) | JD (TDB)    | Nom Dist |
|-------------|------------|-------------|----------|
| 1955-Sep-16 | 12:31      | 2435367.021 | 0.310885 |
| 1970-Jan-15 | 15:32      | 2440602.147 | 0.336467 |
| 1978-Sep-06 | 14:52      | 2443758.120 | 0.483321 |
| 1985-Oct-09 | 18:27      | 2446348.269 | 0.036098 |
| 1992-Dec-30 | 12:55      | 2448987.038 | 0.095190 |
| 2000-Jan-22 | 17:17      | 2451566.220 | 0.448952 |
| 2015-Sep-27 | 01:01      | 2457292.543 | 0.156211 |
| 2016-Jan-30 | 00:12      | 2457417.508 | 0.371682 |
| 2022-Dec-15 | 04:15      | 2459928.677 | 0.004307 |
| 2031-Sep-28 | 01:58      | 2463137.582 | 0.164427 |

Таблица 12: Минимальный набор данных о сближениях астероида с Землей, полученных программным комплексом v19 (второй этап наблюдений, номинал 07.03.2016)

| Дата       | Время (сут.) | Юл. день    | Мин. раст. км | Мин. раст. а.е. | Сравнение |
|------------|--------------|-------------|---------------|-----------------|-----------|
| 1955 09 16 | 13 02        | 2435367.043 | 46453618.75   | 0.310523        | -0.000362 |
| 1956 02 18 | 03 57        | 2435521.666 | 71331743.21   | 0.476823        |           |
| 1962 11 01 | 21 05        | 2437970.379 | 3202245.36    | 0.021406        |           |
| 1970 01 15 | 15 24        | 2440602.142 | 50320405.54   | 0.336371        | -0.000096 |
| 1978 09 06 | 14 49        | 2443758.118 | 72309169.11   | 0.483357        | 0.000036  |
| 1985 10 09 | 18 29        | 2446348.271 | 5398838.50    | 0.036089        | -0.000009 |
| 1992 12 30 | 12 57        | 2448987.040 | 14242907.51   | 0.095208        | 0.000018  |
| 2000 01 22 | 17 18        | 2451566.221 | 67164273.75   | 0.448965        | 0.000013  |
| 2015 09 27 | 01 01        | 2457292.543 | 23368891.06   | 0.156211        | 0.000000  |
| 2016 01 30 | 00 11        | 2457417.508 | 55602880.57   | 0.371682        | 0.000000  |
| 2022 12 15 | 04 12        | 2459928.676 | 643960.46     | 0.004305        | -0.000002 |
| 2031 09 28 | 01 07        | 2463137.547 | 24663822.02   | 0.164867        | 0.000440  |

31 минуту на одном конце интервала и 51 минуту на другом конце интервала. Аналогично различие по расстоянию достигает 0.000362 а.е. на одном конце интервала и 0.000440 а.е. на другом конце интервала, что вполне приемлемо.

Неясно, почему данные о сближениях астероида с Землей в 1956 году (0.477 а.е. или 71.4 млн. км) и в 1962 году 0.021 а.е. или 3.2 млн. км), полученные нами, не приводятся на сайте НАСА. Особенно интересно сближение 1962 года, когда видимая звездная величина астероида по оценке могла уменьшиться до  $18^m$ , что могло способствовать наблюдениям и открытию астероида еще раньше. Если бы удалось поискать в архиве наблюдений астероидов на сайте MPC [3], возможно, могли бы найтись в октябре - ноябре 1962 года старые наблюдения исследуемого астероида 2015 RN35, что могло бы привести к увеличению числа наблюдений, существенному увеличению дуги наблюдений и как следствие существенному улучшению наших знаний об орбите астероида, а также о возможных орбитах соударений этого астероида с Землей.

## 5.8 Результаты работы программного комплекса v19 (второй этап наблюдений, номинал 07.03.2016)

Далее программным комплексом v19 были проведены различные вычисления и их обработка с новым набором начальных данных согласно алгоритму исследования, описанному выше. Результаты этих действий представлены ниже. На первом этапе (stage 1) программный комплекс v19 с файлами начальных данных config.ini, integrator.ini и planet.ini получает выходной файл arch\_out, в который выводятся различные параметры всех тесных сближений астероида с Землей (расстояния сближений меньше заданного) и другими планетами в заданной области на заданном интервале времени методом численного интегрирования в некоторой удобной форме.

На втором этапе (stage 2) программный комплекс v19 с файлами начальных данных config.ini, integrator.ini, planet.ini и daterange\_in.txt получает выходные файлы edges\_out и final\_out. Во входном файле daterange\_in.txt были записаны последовательно 7 предполагаемых моментов (годов) сближений астероида с Землей в середине декабря, а интервал времени около месяца относительно этих моментов.

Результатом работы программы v19 (stage1, stage2) и программы обработки pgrwbac явился каталог виртуальных орбит соударений астероида 2015 RN35 с Землей на интервале времени 2065-2092 годов (7 моментов), состоящий из 9 орбит в окрестности  $\pm 3 \sigma$  от номинальной орбиты.

На основе результатов 2-ой части каталога орбит соударений получены рис 19, рис 20 и рис 21 На этих рисунках по оси абсцисс отложено расстояние от номинальной орбиты  $D_a$  в метрах, а по оси ординат для рис 19 – момент соударения астероида с Землей,



Таблица 13: Соударения астероида 2015 RN35 с Землей, второй этап наблюдений, краткий список.

| n | Da (m)       | Date            | Date        | dJD (d)    | dr (km) | da (m)  | dx (m) |
|---|--------------|-----------------|-------------|------------|---------|---------|--------|
| 1 | -3097207.479 | 2065 12 13.0966 | 2065.952256 | 18328.0966 | 5356.13 | 1.1717  | 0.2992 |
| 2 | -1109642.170 | 2074 12 12.6589 | 2074.949518 | 21614.6589 | 4223.54 | 29.2917 | 7.4799 |
| 3 | 887534.032   | 2079 12 16.0353 | 2079.960469 | 23444.0353 | 1314.76 | 1.1716  | 0.2992 |
| 4 | -3141597.081 | 2081 12 14.9165 | 2081.954993 | 24173.9165 | 633.54  | 0.7616  | 0.1945 |
| 5 | -1108584.587 | 2081 12 12.2021 | 2081.949518 | 24171.2021 | 717.05  | 0.2343  | 0.0598 |
| 6 | -1207273.546 | 2086 12 16.2729 | 2086.960469 | 26001.2729 | 4055.03 | 11.7166 | 2.9920 |
| 7 | -4421410.536 | 2090 12 13.7281 | 2090.952256 | 27459.7281 | 6133.29 | 1.1715  | 0.2992 |
| 8 | -1107551.269 | 2090 12 12.7238 | 2090.949518 | 27458.7238 | 184.82  | 0.2929  | 0.0748 |
| 9 | -1101880.649 | 2092 12 11.2985 | 2092.946781 | 28188.2985 | 1353.66 | 5.2726  | 1.3464 |

для рис 20 – минимальное расстояние траектории от центра Земли в момент соударения (встречи),

для рис 21 – начальная ширина (размер) щели орбиты соударения,

Треугольниками показаны орбиты соударений, представленные на сайте НАСА (7 орбит).

Как следует из данных раздела Close Approach на сайте НАСА, астероид 2015 RN35 будет сближаться с Землей в декабре 2022 года. В момент сближения  $T = \text{JD } 2459928.676 - 2022.12.15, 04:15 \text{ TDB}$  расстояние до Земли будет равно 0.004307 а.е. (644300 км, внутри сферы действия). Такое тесное сближение приведет к процессу рассеяния орбит, в результате чего точность начальных данных ухудшится на 2 десятичных порядка, а параметры орбит соударений (расстояние от номинала и ширина «щели») на столько же увеличатся. Поэтому для более детального исследования этой ситуации на 3-ем этапе работы программы v19 (stage3) выбран следующий момент переноса начальных данных  $T = \text{JD } 2460065.5 - 2023.05.01.0 \text{ TDB}$  для борьбы с потерей точности. Результатом работы программного комплекса v19 (stage1, stage2, stage3) и программы обработки pgrw6bas явился каталог виртуальных орбит соударений астероида 2015 RN35 с Землей на интервале времени 2065-2092 годов (7 моментов), состоящий из 9 орбит в окрестности  $\pm 3 \sigma$  от номинальной орбиты.

На основе результатов 2-ой части каталога возможных орбит соударений получены рисунки.

На рис 22, рис 23 и рис 24 по оси абсцисс отложено расстояние от номинальной орбиты Da в метрах, а по оси ординат

для рис 22 – момент соударения астероида с Землей,

для рис 23 – минимальное расстояние траектории от центра Земли в момент соударения (встречи),

для рис 24 – начальная ширина (размер) щели орбиты соударения,

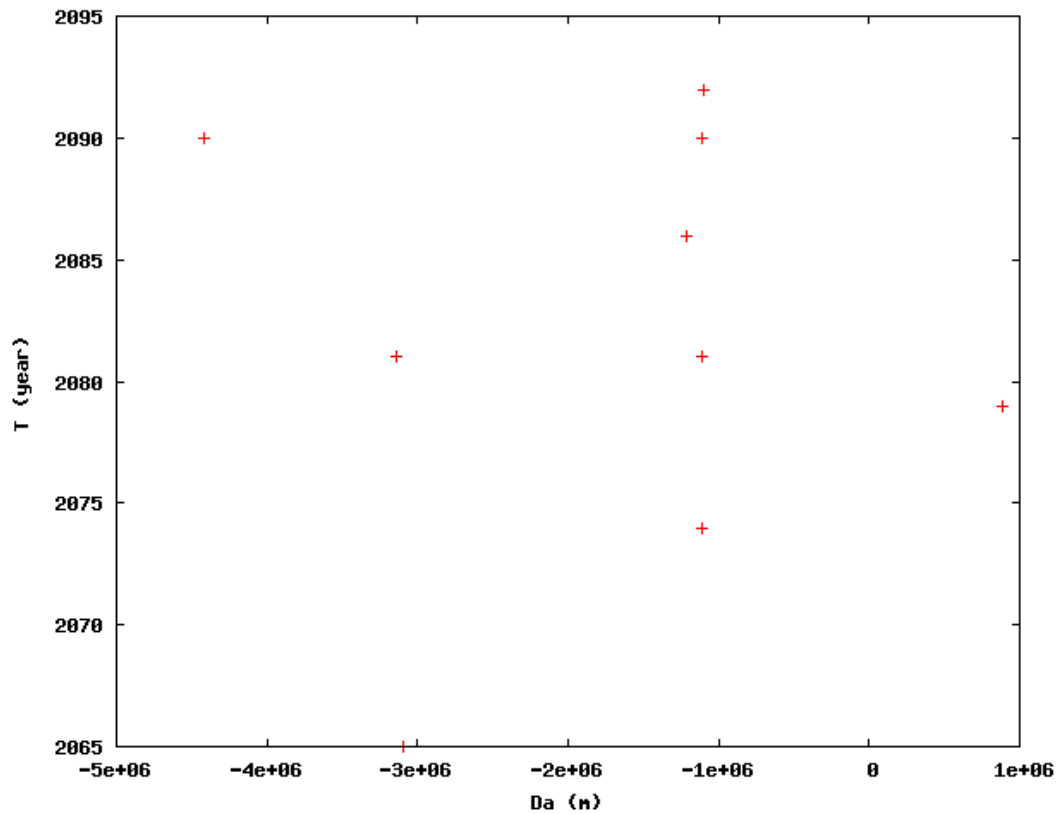


Рис. 19: Моменты соударения астероида 2015 RN35 с Землей, второй этап наблюдений, краткий список.

Таблица 14: Соударения астероида 2015 RN35 с Землей из 2023 г., второй этап наблюдений, краткий список.

| n | Da (m)         | Date            | Date        | dJD (d)    | dr (km) | da (m)    | dx (m)    |
|---|----------------|-----------------|-------------|------------|---------|-----------|-----------|
| 1 | -274893561.233 | 2065 12 13.0967 | 2065.952256 | 18328.0967 | 5356.10 | 200.4578  | 119.6783  |
| 2 | -76966111.523  | 2074 12 12.6589 | 2074.949518 | 21614.6589 | 4223.54 | 3010.5471 | 1795.1744 |
| 3 | 46414951.913   | 2079 12 16.0350 | 2079.960469 | 23444.0350 | 1314.16 | 50.2178   | 29.9196   |
| 4 | -280267810.999 | 2081 12 14.9162 | 2081.954993 | 24173.9162 | 632.94  | 100.2257  | 59.8392   |
| 5 | -76881990.326  | 2081 12 12.2015 | 2081.949518 | 24171.2015 | 715.27  | 10.0352   | 5.9839    |
| 6 | -84824145.823  | 2086 12 16.2729 | 2086.960469 | 26001.2729 | 4055.02 | 1003.4652 | 598.3915  |
| 7 | -454125168.490 | 2090 12 13.7281 | 2090.952256 | 27459.7281 | 6133.29 | 250.3068  | 149.5978  |
| 8 | -76799816.176  | 2090 12 25.0049 | 2090.985107 | 27471.0049 | 80.70   | 25.0879   | 14.9598   |
| 9 | -76349230.155  | 2092 12 11.2985 | 2092.946781 | 28188.2985 | 1353.66 | 401.4079  | 239.3566  |

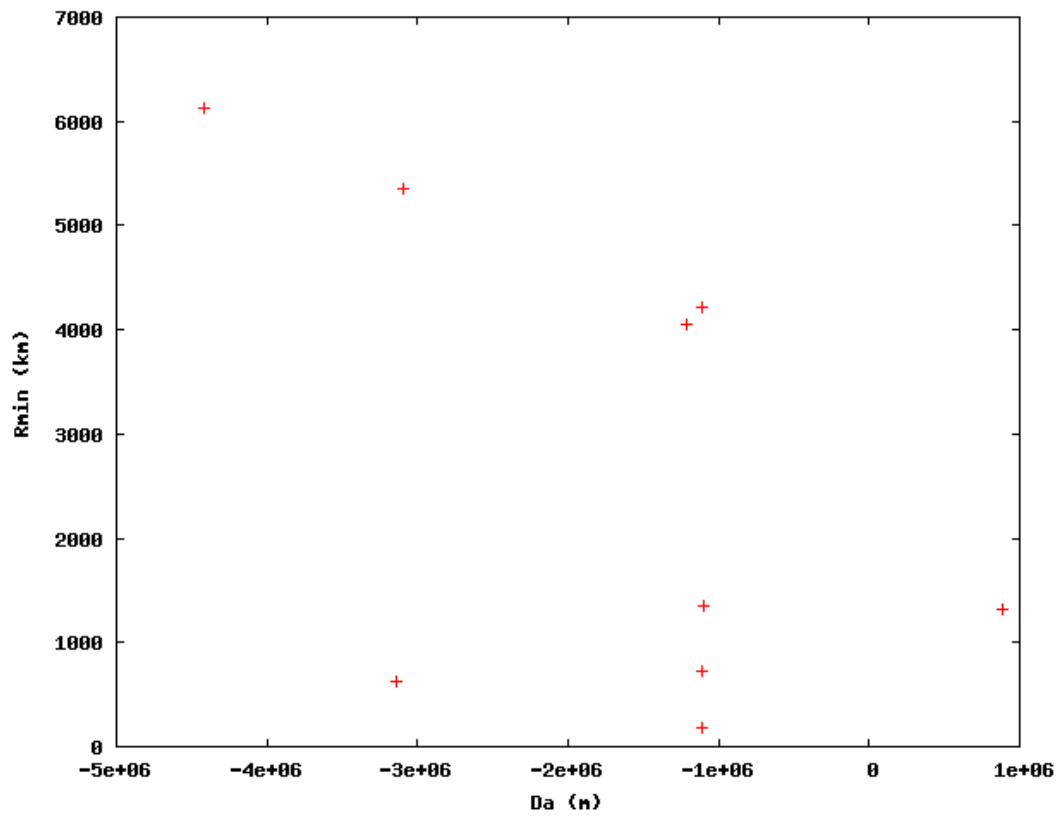


Рис. 20: Минимальное геоцентрические расстояние астероида 2015 RN35, второй этап наблюдений, краткий список.

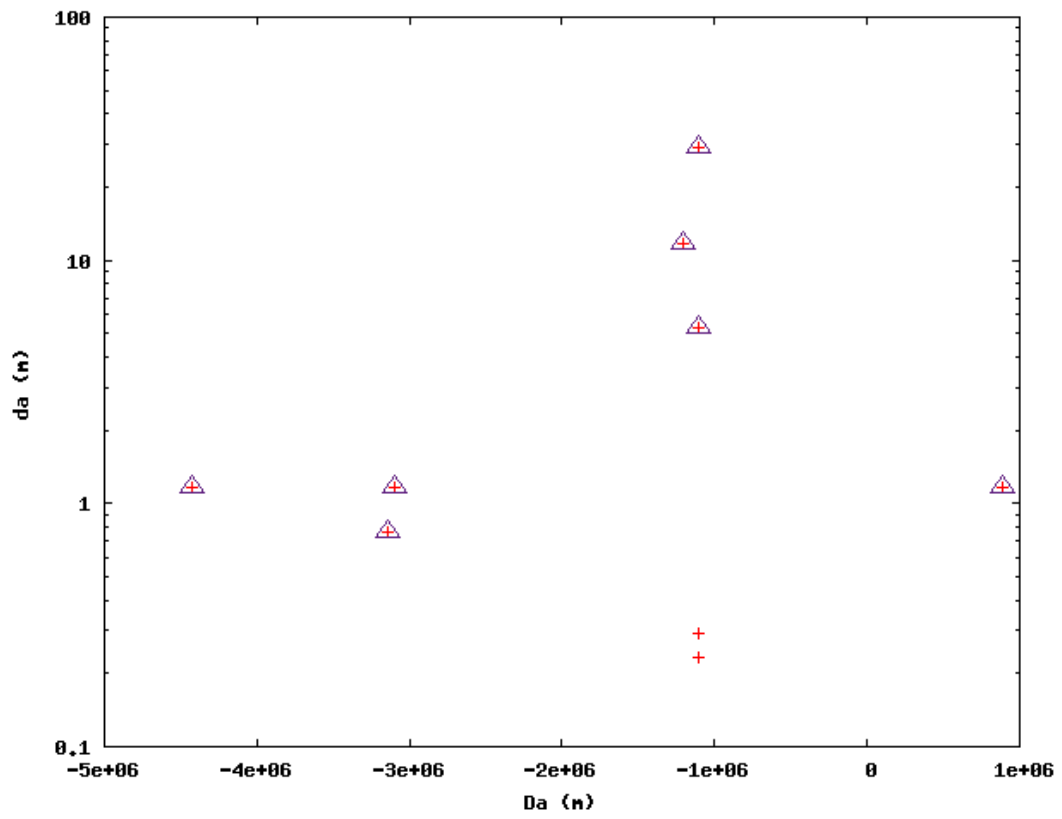


Рис. 21: Размер щелей астероида 2015 RN35, второй этап наблюдений, краткий список.

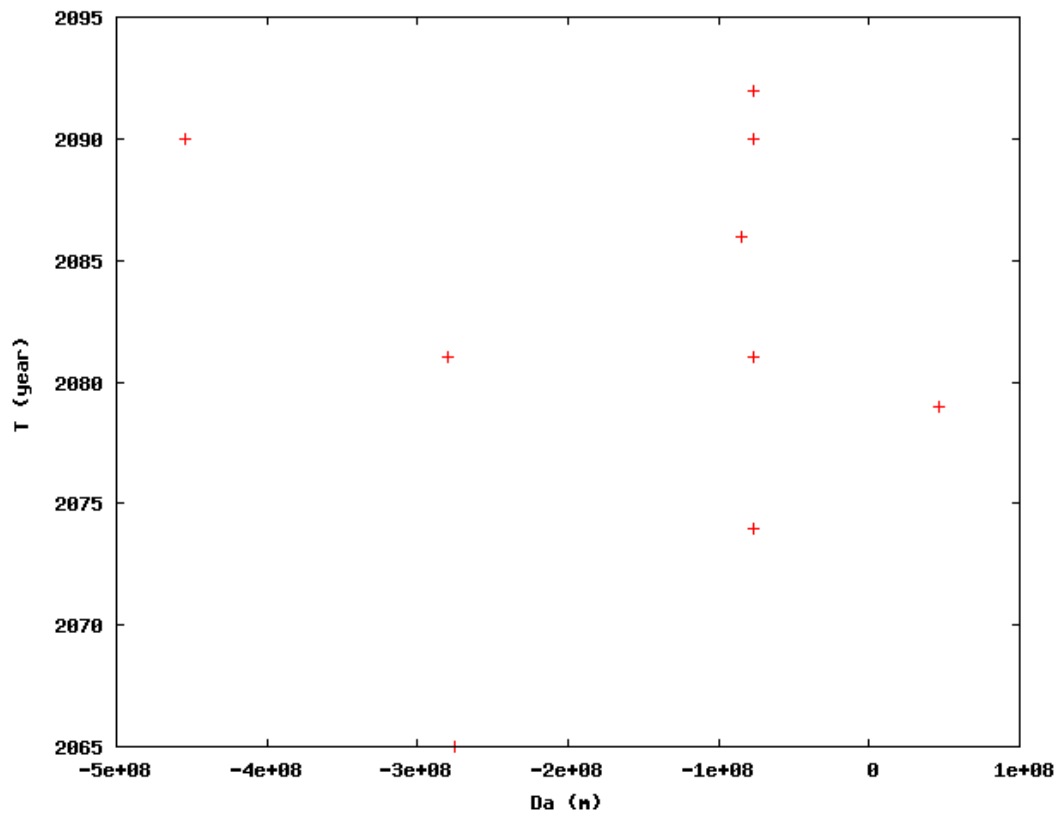


Рис. 22: Моменты соударения астероида 2015 RN35 с Землей из 2023 г., второй этап наблюдений, краткий список.

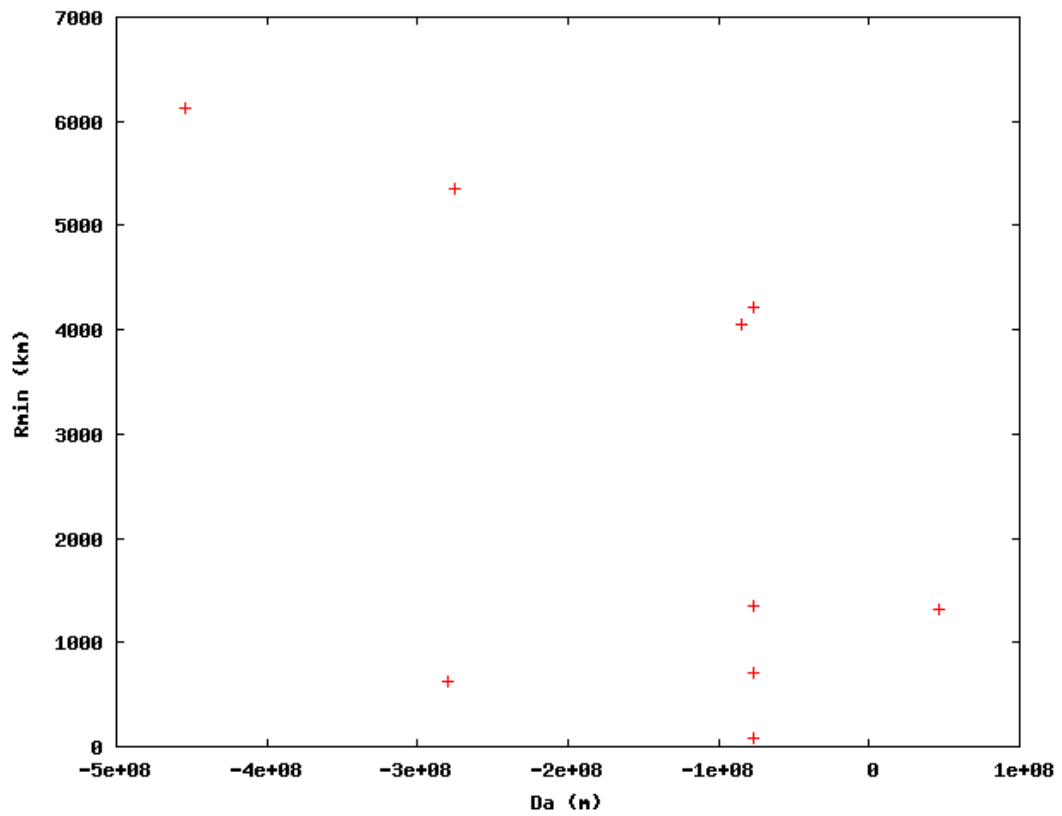


Рис. 23: Минимальное геоцентрическое расстояние астероида 2015 RN35 из 2023 г., второй этап наблюдений, краткий список.

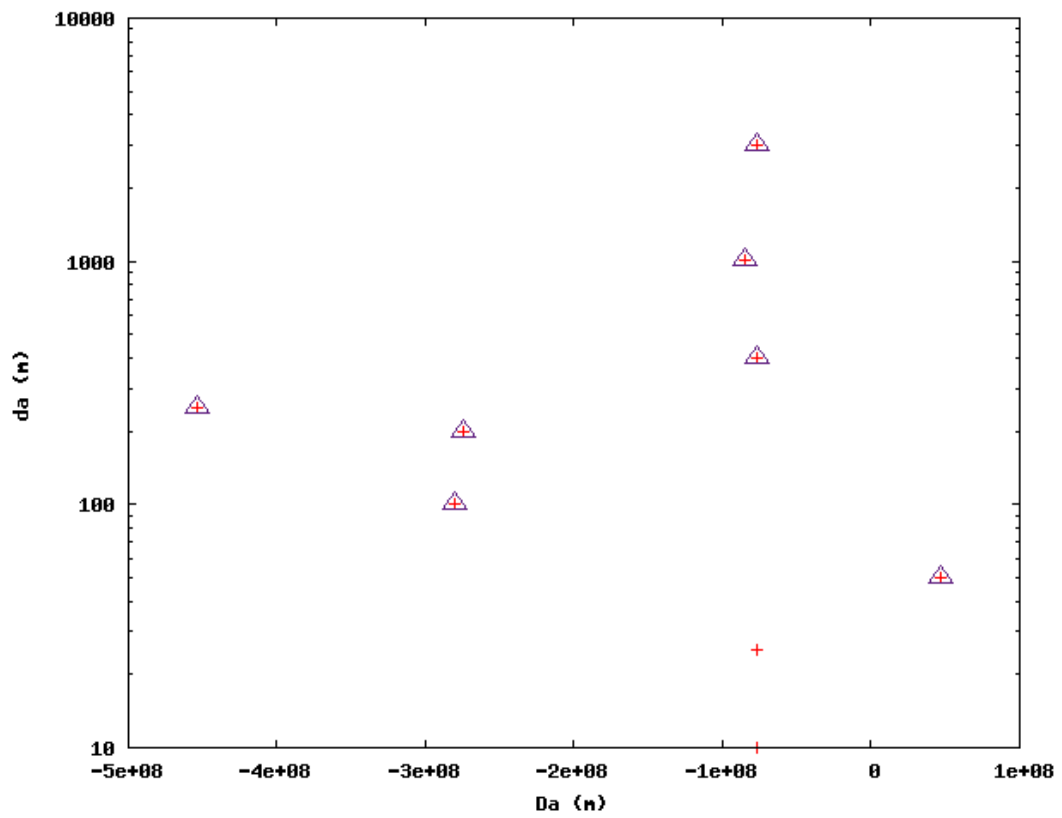


Рис. 24: Размер щелей астероида 2015 RN35 из 2023 г., второй этап наблюдений, краткий список.

Таблица 15: Соударения астероида 2015 RN35 с Землей, второй этап наблюдений, полный список.

| n  | Da (m)       | Date             | Date        | dJD (d)    | dr (km) | da (m)  | dx (m) |
|----|--------------|------------------|-------------|------------|---------|---------|--------|
| 1  | -3097207.479 | 2065 12 13.0966  | 2065.952256 | 18328.0966 | 5356.13 | 1.1717  | 0.2992 |
| 2  | -1109642.170 | 2074 12 12.6589  | 2074.949518 | 21614.6589 | 4223.54 | 29.2917 | 7.4799 |
| 3  | 887534.032   | 2079 12 16.0353  | 2079.960469 | 23444.0353 | 1314.76 | 1.1716  | 0.2992 |
| 4  | -3141597.081 | 2081 12 14.9165  | 2081.954993 | 24173.9165 | 633.54  | 0.7616  | 0.1945 |
| 5  | -1108584.587 | 2081 12 12.2021  | 2081.949518 | 24171.2021 | 717.05  | 0.2343  | 0.0598 |
| 6  | -1099469.484 | 2083 12 12.3679  | 2083.949518 | 24901.3679 | 2298.50 | 0.8787  | 0.2244 |
| 7  | -1109503.310 | 2084 12 11.9229  | 2084.946781 | 25266.9229 | 5203.11 | 0.0000  | 0.0015 |
| 8  | -1207273.546 | 2086 12 16.2729  | 2086.960469 | 26001.2729 | 4055.03 | 11.7166 | 2.9920 |
| 9  | -4839735.577 | 2088 12 13.4983  | 2088.952256 | 26729.4983 | 4464.32 | 1.1717  | 0.2992 |
| 10 | -4421410.536 | 2090 12 13.7281  | 2090.952256 | 27459.7281 | 6133.29 | 1.1715  | 0.2992 |
| 11 | -1107551.269 | 2090 12 12.7238  | 2090.949518 | 27458.7238 | 184.82  | 0.2929  | 0.0748 |
| 12 | -1101880.649 | 2092 12 11.2985  | 2092.946781 | 28188.2985 | 1353.66 | 5.2726  | 1.3464 |
| 13 | -1208450.715 | 2093 12 15.9302  | 2093.957731 | 28557.9302 | 518.03  | 0.5273  | 0.1346 |
| 14 | -3295003.519 | 2094 12 14.5596  | 2094.954993 | 28921.5596 | 3686.08 | 0.1110  | 0.0284 |
| 15 | -1099426.524 | 2094 12 11.9851  | 2094.946781 | 28918.9851 | 5837.59 | 0.0000  | 0.0015 |
| 16 | 845783.179   | 2095 12 16.0680  | 2095.960469 | 29288.0680 | 201.44  | 0.9373  | 0.2394 |
| 17 | -1108038.202 | 2097 12 12.4217  | 2097.949518 | 30015.4217 | 314.52  | 0.1756  | 0.0449 |
| 18 | -4152543.019 | 2099 12 13.0676  | 2099.952256 | 30746.0676 | 4733.33 | 0.2930  | 0.0748 |
| 19 | -1106724.422 | 2099 12 12.9533  | 2099.949518 | 30745.9533 | 1206.01 | 0.4686  | 0.1197 |
| 20 | -1101771.666 | 2099 12 11.9239  | 2099.946781 | 30744.9239 | 1390.44 | 0.0469  | 0.0120 |
| 21 | -258335.058  | 2099 12 13.15087 | 2099.952256 | 30746.1508 | 5696.88 | 3.5150  | 0.8976 |

Треугольниками показаны орбиты соударений, представленные на сайте НАСА (7 орбит).

Для расширенного варианта работы программного комплекса v19 (stage2) во входном файле daterange\_in.txt были записаны последовательно 86 предполагаемых моментов (2015-2100 годы) сближений астероида с Землей в середине декабря, а интервал времени около месяца относительно этих моментов.

Результатом работы программного комплекса v19 (stage1, stage2) и программы обработки prgw6bas явился каталог виртуальных орбит соударений астероида 2015 RN35 с Землей на интервале времени 2065-2099 годов (15 моментов), состоящий из 21 орбиты в окрестности  $\pm 3 \sigma$  от номинальной орбиты.

Пример этого каталога орбит соударений, который состоит из 2-х частей:

На основе результатов 2-ой части каталога возможных орбит соударений получены рис 25, рис 26 и рис 27. На этих рисунках по оси абсцисс отложено расстояние от номинальной орбиты Da в метрах, а по оси ординат

для рис 25 – момент соударения астероида с Землей,

для рис 26 – минимальное расстояние траектории от центра Земли в момент соударения (встречи),

для рис 27 – начальная ширина (размер) щели орбиты соударения,



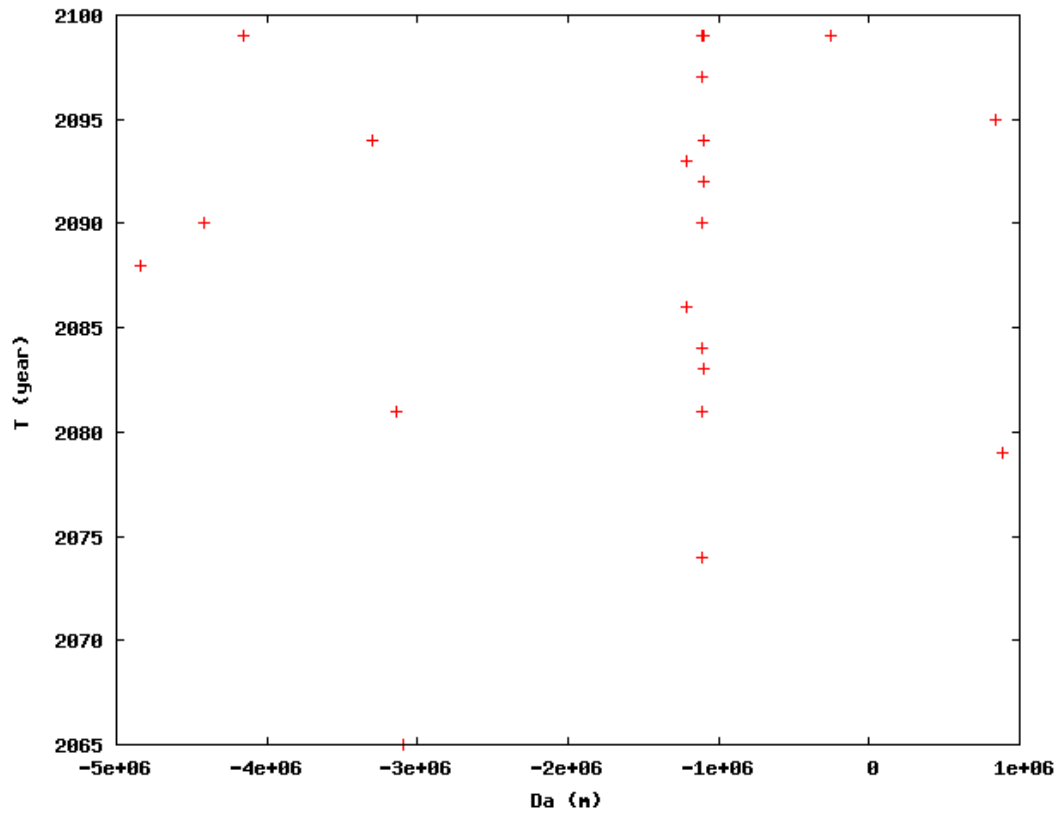


Рис. 25: Моменты соударения астероида 2015 RN35 с Землей, второй этап наблюдений, полный список.

Треугольниками показаны орбиты соударений, представленные на сайте НАСА (7 орбит).

## 5.9 Сравнение положений возможных орбит соударений на сайте НАСА и наших результатов

На рис 28 показано сравнение данных об орбитах соударений на сайте НАСА (7 орбит) и наших результатов по параметру - положение относительно номинальной орбиты (Sigma LOV и Da). Как видно из рис 28 согласие очень хорошее, т.к. точки (крестики) ложатся на прямую  $Da = k * (\text{Sigma LOV})$ , где  $k = -1.212 * 10^7 m = -8.102 * 10^{-5} au$ . Напомним, что  $1\sigma = 8.94 * 10^{-5} au = 1.337 * 10^7 m$  (для большой полуоси a).

## 5.10 Окончательные выводы по 2015 RN35

Проведено исследование окрестностей номинальной орбиты астероида 2015 RN35 на основе решения НАСА 30.11.2015 (1-ый этап наблюдений) и решения НАСА 07.03.2016 (2-ой этап наблюдений). Получены каталоги возможных орбит соударений астероида с Землей в этом столетии. В этих каталогах кроме возможных орбит соударений астероида с Землей, пред-

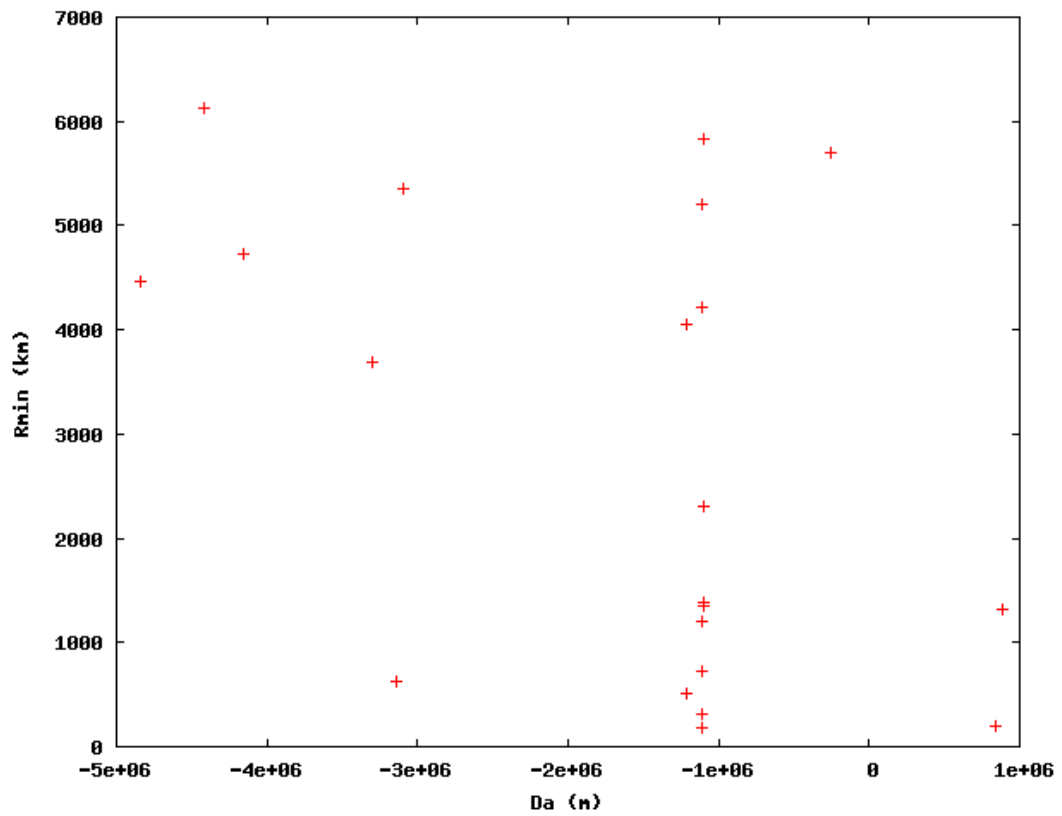


Рис. 26: Минимальное геоцентрическое расстояние астероида 2015 RN35, второй этап наблюдений, полный список.

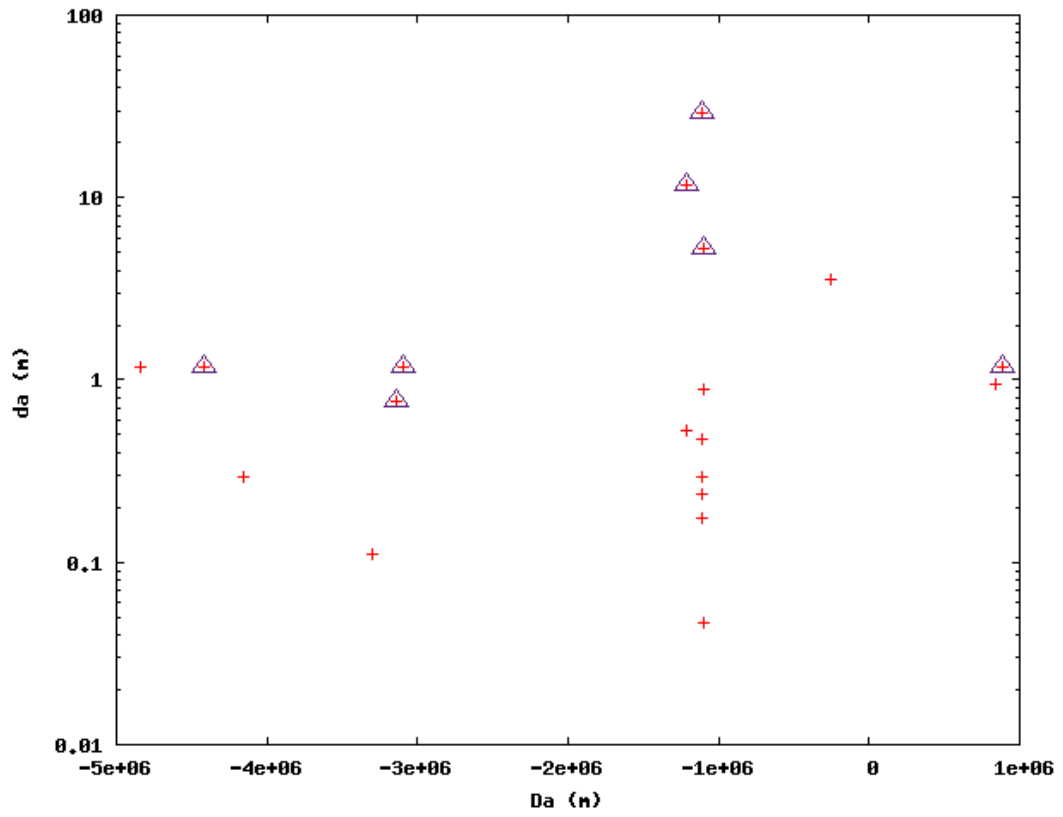


Рис. 27: Размер щелей астероида 2015 RN35, второй этап наблюдений, полный список.

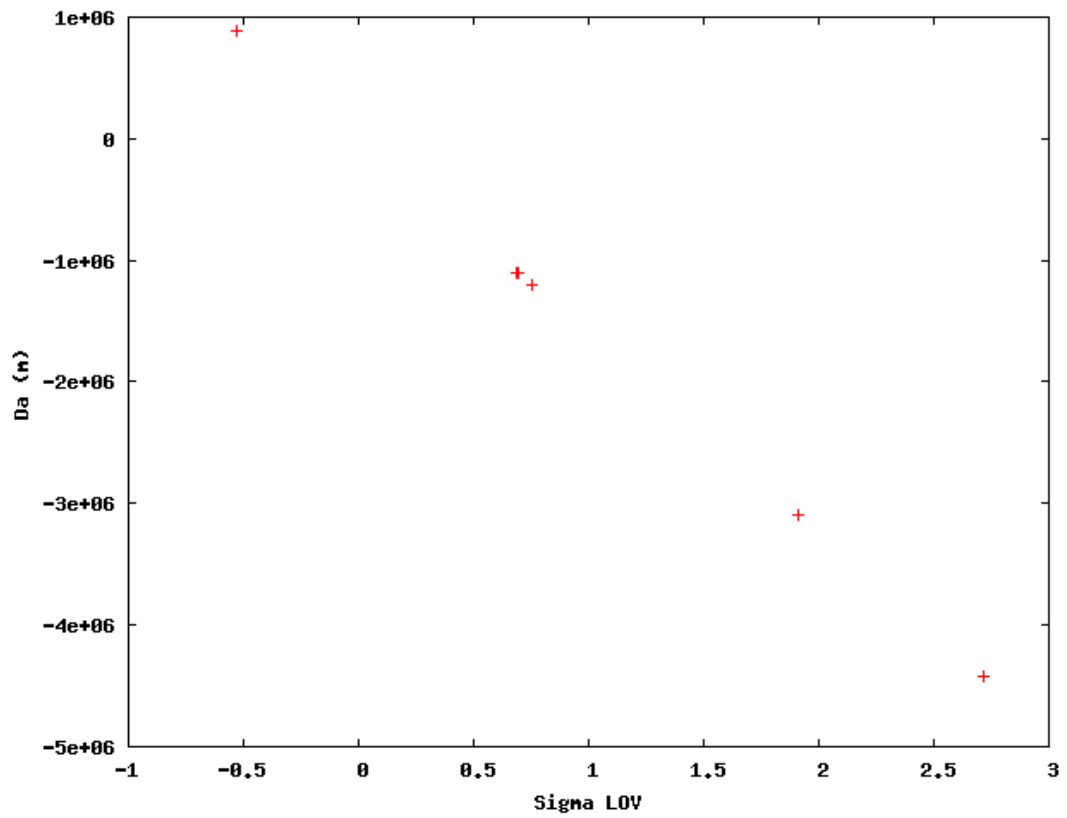


Рис. 28: Сравнение положений орбит соударений относительно номинальной орбиты на сайте НАСА и в данной работе

ставленных на сайте НАСА, получены дополнительные орбиты возможных соударений, в том числе близкие по размерам щелей к орбитам, указанным на этом сайте. Получено также подтверждение, что в результате тесного сближения астероида с Землей 15 декабря 2022 года (0.004307 а.е. или 644300 км внутри сферы действия) из-за рассеяния расстояния возможных орбит соударений относительно номинальной орбиты и размеры щелей увеличатся приблизительно на 2 десятичных порядка. Показано также сохранение структуры (фрактальность) возможных орбит соударений при уточнении номинальной орбиты в результате новых наблюдений, а также после тесного сближения с Землей 15 декабря 2022 года.

## 6 Заключение

Разработан оригинальный метод выделения возможных соударений астероидов с Землей. Этот метод применен для астероида Апофис и 2015 RN35, найдено множество возможных соударений этих астероидов с Землей, большинство из них были ранее неизвестны. Получены основные характеристики и свойства соответствующих траекторий. Правильность полученных результатов подтверждается, в частности, сравнением с аналогичными результатами, полученными американскими коллегами и публикуемыми на сайте НАСА [http: // neo.jpl.nasa.gov /risk /](http://neo.jpl.nasa.gov/risk/).

Полученные результаты свидетельствуют о возможности и необходимости более подробного исследования множеств возможных соударений опасных астероидов с Землей. Это необходимо для планирования и реализации мероприятий по обеспечению астероидной безопасности.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Быкова Л.Е., Галушина Т.Ю.* Эволюция вероятной области движения астероида 99942 Apophis // Околосемная астрономия 2007. Материалы международной конференции 3-7 сентября 2007 г. п. Терскол. Ред. Л.В. Рыхлова, В.К. Тарадий. Нальчик, 2008. С. 48–54.
- Вавилов Д.Е.* Оценка вероятности столкновения с Землей вновь открытого небесного тела // Кандидатская диссертация, Санкт-Петербург, 2015.
- Виноградова Т.А., Кочетова О.М., Чернетенко Ю.А., Шор В.А. и Ягудина Э.И.* Орбита астероида (99942) Апофис, определенная из оптических и радарных наблюдений // Астрон. вестн. 2008. Т. 42. N 4. С. 291–300.
- Елькин А.В., Соколов Л.Л., Титов В.Б., Шмыров А.С.* Квазислучайные движения в гравитационном поле N планет // Тр. астрон. обсерв. СПбГУ. 2003. Т. XLV. С. 73–114.
- Ивашкин В.В., Стихно К.А.* О проблеме коррекции орбиты сближающегося с Землей астероида (99942) Апофис // Доклады Академии Наук, 2008, том 419, N 5, с. 624–627.
- Кочетова О.М., Чернетенко Ю.А., Шор В.А.* Насколько точна орбита астероида (99942) Апофис и какова вероятность столкновения с ним в 2036–2037 гг. // Астрон. вестн. 2009. Т. 43. N 4. С. 338–347.
- Петров Н.А., Васильев А.А.* Использование компьютерного кластера СПбГУ для выделения траекторий возможных столкновений астероидов с Землей // Научная конференция "Астрономия в эпоху информационного взрыва: результаты и проблемы". Сборник резюме докладов. ГАИШ, МГУ, Москва, 28.05-01.06.2012. Изд. ГАИШ МГУ, 2012, 67 с., с. 57.
- Рыхлова Л.В., Шустов Б.М., Поль В.Г., Суханов К.Г.* Насущные проблемы астероидной опасности // Околосемная астрономия 2007. Материалы международной конференции 3-7 сентября 2007 г. п. Терскол. Ред. Л.В. Рыхлова, В.К. Тарадий. Нальчик, 2008. С. 25–33.
- Соколов Л.Л.* Траектории гравитационного рассеяния и их астрономические приложения // Докторская диссертация, Санкт-Петербург, 2007.
- Соколов Л.Л., Башаков А.А., Питъев Н.П.* Особенности движения астероида 99942 Apophis // Астрон. вестн. 2008. Т. 42. N 1. С. 20–29.
- Соколов Л.Л., Башаков А.А., Питъев Н.П.* Резонансные орбиты астероидов, сближающихся с Землей // Астрон. вестн. 2009. Т. 43. N 4. С. 333–337.
- Соколов Л.Л., Башаков А.А., Борисова Т.П., Петров Н.А., Питъев Н.П., Шайдуллин В.Ш.* Траектории соударения астероида Апофис с Землей в XXI веке // Астрон. вестн. 2012. Т. 46. N 4. С. 311–320.
- Соколов Л.Л., Борисова Т.П., Васильев А.А., Петров Н.А.* Свойства траекторий соударения астероидов с Землей // Астрон. вестн. 2013. Т. 47. N 5. С. 441–447.
- Хьюбнер У.Ф. и др.* Широкомасштабная программа защиты от потенциально опасных

- объектов// *Астрон. вестн.* 2009. Т. 43. N 4. С. 348–356.
- Шор В.А., Чернетенко Ю.А., Кочетова О.М., Железнов Н.Б. О влиянии эффекта Ярковского на орбиту Апофиса// *Астрон. вестн.* 2012. Т. 46. N 2. С. 131–142.
- Chesley Steven R. Potential impact detection for Near-Earth asteroids: the case of 99942 Apophis (2004 MN<sub>4</sub>) // *Asteroids, Comets, Meteors. Proc. IAU Symp. No. 229.* 2005. Cambridge University Press. 2006. P. 215–228.
- Chesley Steven R. Asteroid Impact Hazard Assessment With Yarkovsky Effect// 2011 IAA Planetary Defense Conference: From Threat to Action 9-12 May 2011, Bucharest, Romania.
- Everhart E. Implicit single-sequence methods for integrating orbits// *Celest. Mech.* 1974. V. 10. P. 35–55.
- Farnocccchia D. et al. Yarkovsky-driven impact risk analysis for asteroid (99942) Apophis// arXiv: 1301.1607v1 [astro-ph.EP] 8 Jan 2013.
- Farnocccchia D. et al. Yarkovsky-driven impact risk analysis for asteroid (99942) Apophis// arXiv: 1301.1607v2 [astro-ph.EP] 19 Feb 2013.
- Standish E.M. JPL Planetary and Lunar ephemerides, DE405/LE405 / Interoffice Memorandum, 1998. 312.F-98-048. 18 p.
- Yeomans D.K. et al. Deflecting a Hazardous Near-Earth Object 1 IAA Planetary Defense Conference: Protecting Earth from Asteroids, 27-30 April 2009, Granada, Spain.
- Sokolov L.L., Pitjev N.P., Shaidulin V.Sh. About Zones of Resonant Returns of Asteroid Apophis/ Proceedings of the International Conference "Asteroid-Comet Hazard-2009 Ed. A.M. Finkelstein, W.F. Huebner, V.A. Shor. Saint-Petersburg, "Nauka 2010. Pp. 279-283.
- Caŭm HACA [http: // neo.jpl.nasa.gov /risk /](http://neo.jpl.nasa.gov/risk/)
- Caŭm NEODyS [http: // newton.dm.unipi.it /neodys2 /index.php?pc=1.0](http://newton.dm.unipi.it /neodys2 /index.php?pc=1.0)