

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский
Томский государственный университет»

На правах рукописи

Галушина Татьяна Юрьевна

**Исследование орбитальной динамики избранных групп астероидов,
сближающихся с Землей**

Специальность 1.3.1 – Физика космоса, астрономия

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Научный консультант:
Доктор физико-математических наук, профессор
Бордовицына Татьяна Валентиновна

Томск – 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	8
В.1 Актуальность работы	8
В.2 Степень разработанности	10
В.3 Цели и задачи	14
В.4 Научная новизна работы	15
В.5 Научная и практическая значимость работы	16
В.6 Методология и методы исследования	17
В.7 Положения, выносимые на защиту	18
В.8 Степень достоверности и апробация результатов	20
В.9 Краткое содержание диссертационной работы	32
В.10 Благодарности	35
ГЛАВА 1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ АСТЕРОИДАХ, СБЛИЖАЮЩИХСЯ С ЗЕМЛЕЙ	36
1.1 Вводные замечания	36
1.2 Популяция астероидов, сближающихся с Землей	37
1.2.1 Общие сведения о популяции АСЗ	37
1.2.2 Классификация астероидов, сближающихся с Землей	41
1.3 Астероидная опасность	45
1.3.1 Опасные астероиды	45
1.3.2 Астроблемы	48
1.3.3 Метеориты	50
1.3.4 Пути решения проблемы астероидной опасности	52
1.4 Проблемы и методы изучения динамики АСЗ	53
1.4.1 Получение наблюдений	53
1.4.2 Ошибки численного моделирования	55

1.4.3 Модель сил	55
1.4.4 Эффект Ярковского	59
1.4.5 Методы интегрирования	65
1.4.6 Начальная орбитальная неопределенность	66
1.4.7 Нелинейные методы	67
1.4.8 Способы заполнения доверительных областей	69
1.4.9 Характеристики хаотичности	70
1.4.10 Орбитальные и вековые резонансы	71
1.4.11 Методы оценки вероятности столкновения астероида с Землей	72
1.5 Выводы по главе 1	77
ГЛАВА 2 МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ОРБИТАЛЬНОЙ ДИНАМИКИ	
АСТЕРОИДОВ	79
2.1 Вводные замечания	79
2.2 Дифференциальные уравнения движения. Модель сил	79
2.3 Методы интегрирования	83
2.4 Алгоритмы построения начального облака неопределенности	85
2.5 Алгоритм выявления тесных сближений астероида с планетами	88
2.6 Вычисление резонансных характеристик	89
2.6.1 Орбитальные резонансы	89
2.6.2 Вековые резонансы	91
2.7 Вычисление характеристик хаотичности движения	93
2.8 Методика исследования структуры возмущений	96
2.9 Метод быстрого численного оценивания вероятности столкновения астероида с планетой	99
2.10 Выводы по главе 2	102
ГЛАВА 3 ПРОГРАММНАЯ СИСТЕМА ИДА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ	
ДИНАМИКИ АСТЕРОИДОВ	104

3.1 Обзор стороннего программного обеспечения для исследования динамики астероидов.....	104
3.2 Задачи, решаемые программной системой ИДА	108
3.3 Структура программного комплекса ИДА	109
3.4 Подсистема «Ассоль»	110
3.5 Подсистема «Наблюдения».....	119
3.6 Подсистема «Distribution»	121
3.7 Подсистема «Ансамбль частиц».....	122
3.8 Подсистема «Evolution»	122
3.9 Подсистема «OMEGNO».....	125
3.10 Подсистема «Вековые резонансы».....	125
3.11 Подсистема «Эллипсоид»	126
3.12 Подсистема «Covar_coll»	127
3.13 Автоматизация некоторых процессов при построении орбитальной эволюции астероидов.....	128
3.14 Выводы по главе 3.....	132
ГЛАВА 4 ОПТИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ АСЗ НА ТЕРСКОЛЬСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ ИНАСАН.....	133
4.1 Методика проведения позиционных наблюдений астероидов	133
4.2 Алгоритм построения поисковых эфемерид астероидов.....	136
4.3 Статистика наблюдений	138
4.4 Наблюдения 2020-го года.....	140
4.5 Наблюдения 2021 года.....	143
4.5.1 Наблюдения астероидов с малыми перигелийными расстояниями	143
4.5.2 Наблюдения астероидов с использованием поисковых эфемерид на основе доверительных областей	145
4.6 Наблюдения 2022 года.....	150

4.6.1 Наблюдения астероидов с малыми перигелийными расстояниями	150
4.6.2 Наблюдения астероидов с использованием поисковых эфемерид на основе доверительных областей	157
4.6.3 Наблюдения астероида (65803) Didymos	160
4.7 Наблюдения 2023 года.....	162
4.7.1 Наблюдения астероидов с малыми перигелийными расстояниями	162
4.7.2 Наблюдения астероидов с использованием поисковых эфемерид на основе доверительных областей	165
4.7.3 Наблюдения астероида 2023 BU	168
4.8 Выводы по главе 4.....	170
ГЛАВА 5 ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ГРУППЫ АСТЕРОИДОВ С МАЛЫМИ ПЕРИГЕЛИЙНЫМИ РАССТОЯНИЯМИ	172
5.1 Популяция астероидов с малыми перигелийными расстояниями	172
5.2 Структура возмущений астероидов с малыми перигелийными расстояниями	179
5.3 Исследование эффекта Ярковского.....	190
5.3.1 Сравнение двух методик определения параметра эффекта Ярковского .	190
5.3.2 Определение значения параметра эффекта Ярковского для всех астероидов с малыми перигелийными расстояниями.....	197
5.3.3 Сравнение полученных значений параметра Ярковского со значениями из других источников.....	200
5.3.4 Влияние отбраковки наблюдений на полученное значение параметра эффекта Ярковского	202
5.3.5 Оценка точности определения значения параметра эффекта Ярковского на основе реальных и модельных наблюдений астероидов	204
5.3.6 Выводы	210
5.4 Исследование нелинейности задачи оценивания начальных параметров	211

5.5 Исследование динамики астероидов с малыми перигелийными расстояниями в окрестностях орбитальных и вековых резонансов	214
5.5.1 Вводные замечания.....	214
5.5.2 Поиск орбитальных резонансов в движении астероидов с малыми перигелийными расстояниями	216
5.5.3 Оценка влияния эффекта Ярковского на орбитальные резонансы астероидов с малыми перигелийными расстояниями.....	219
5.5.4 Оценка влияния светового давления на орбитальные и вековые резонансы астероидов с малыми перигелийными расстояниями.....	222
5.5.5 Выводы	230
5.6 Исследование вероятностной орбитальной эволюции некоторых астероидов с малыми перигелийными расстояниями	232
5.6.1 Вводные замечания.....	232
5.6.2 Вероятностная орбитальная эволюция астероидов с разной степенью нелинейности задачи оценивания	233
5.6.3 Вероятностная орбитальная эволюция астероида 2008 MG1	243
5.6.4 Оценка влияния эффекта Ярковского на вероятностную орбитальную эволюцию ряда астероидов.....	245
5.6.5 Выводы	265
ГЛАВА 6 АПРОБАЦИЯ МЕТОДИК ОЦЕНКИ ВЕРОЯТНОСТИ СТОЛКНОВЕНИЯ И ЕГО ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ	267
6.1 Вводные замечания.....	267
6.2 Тестирование методики быстрой оценки вероятности столкновения.....	267
6.3 Метод предотвращения столкновения астероида с Землей, основанный на превентивном разрушении опасного объекта	277
6.3.1 Вводные замечания.....	277
6.3.2 Разрушение опасного астероида	278
6.3.3 Область начальных данных	282

6.4 Тестирование методики предотвращения столкновения астероида с Землей.....	288
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	298
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	302
ПРИЛОЖЕНИЕ А (Справочное) Материалы наблюдений астероидов, сближающихся с Землей, на Терскольской обсерватории в 2022 году	324

ВВЕДЕНИЕ

В.1 Актуальность работы

Астероиды представляют собой наиболее обширный класс объектов Солнечной системы. По данным каталога Э. Боуэлла (Bowell et al., 1994) на 7 сентября 2023 года известно 1303580 астероидов, в том числе 32587 сближающихся с Землей. Орбитальное движение рассматриваемых объектов отличается большой сложностью и разнообразием, что создает определенные трудности в построении алгоритмов численного моделирования их динамики. Кроме того, астероиды могут представлять угрозу деятельности человека на Земле и в космосе.

Усиливающийся в последнее время интерес к исследованию движения малых тел Солнечной системы объясняется рядом причин. Основной из них является осознание того, что представления о динамической эволюции этих объектов необходимы для понимания эволюции Солнечной системы в целом. Такое пристальное внимание специалистов к исследованию эволюции орбит астероидов также обусловлено недавними яркими событиями. Например, разрушением прародителя Челябинского метеорита в результате торможения в атмосфере, произошедшего 15 февраля 2013 года (Petrova et al., 2013), или падением 2 января 2014 года астероида 2014 AA диаметром примерно 2–4 метра (Farnocchia et al., 2016).

В частности, особую актуальность исследованиям динамики астероида (3200) Phaethon придает недавнее сближение с Землей в декабре 2017 года (Ye, 2017; Jewitt, 2017), которое поспособствовало уточнению орбиты и физических параметров объекта (Hanuš et al., 2016). На 2024 год запланирована миссия DESTINY+, в рамках которой космический аппарат должен пролететь над данным объектом (Krüger et al., 2019; Masiero et al., 2019).

В контексте астероидной опасности нельзя не упомянуть астероид (99942) Apophis, тесное сближение с которым ожидается в 2029 году. С момента открытия в 2004 году данный опасный объект по сути является «тренажером» для отработки методов численного моделирования движения и предотвращения столкновения и мотиватором для разработки новых (Виноградова и др., 2008; Поль и др., 2008; Кочетова и др., 2009; Шор и др., 2012; Ивашкин и др., 2020; Соколов и др., 2021;

Chesley, 2006; Delbo et al., 2007; Giorgini et al., 2008; Thuillot et al., 2015; Farnocchia et al., 2013a; Wlodarczyk, 2017; Brozovic et al., 2018; Perez-Hernandez, Benet, 2022).

Моделирование движения играет особую роль в изучении динамических свойств объектов Солнечной системы, а также в защите Земли от потенциально опасных астероидов (ПОА). В частности, необходимо выбрать оптимальную модель возмущающих факторов, влияющих на движение астероида, для исследования эволюции орбиты, прогнозирования тесных сближений и столкновений. Использование наиболее полной модели не всегда оправдано. Для некоторых объектов физические параметры и орбитальные элементы известны с хорошей точностью, в то время как для других небольшое количество наблюдений распределено по малой дуге, и физические параметры плохо определены. Поэтому анализ силовой функции должен быть первым шагом в изучении эволюции орбиты астероида.

Прогноз реального положения астероида в пространстве всегда основывается на наблюдениях, более того – точность прогнозирования в существенной степени определяется точностью начальных данных, которая зависит от числа имеющихся измерений. По этой причине представляется очень важным регулярный мониторинг малых небесных тел, особенно ПОА.

Исследование эволюции орбит астероидов на большом интервале времени имеет ряд особенностей. Использование аналитических методов проблематично при исследовании движения таких объектов из-за тесных сближений с большими планетами. Поэтому, как правило, для изучения долговременной орбитальной эволюции малых тел применяются численные методы интегрирования дифференциальных уравнений движения. Многократные сближения с большими планетами, орбитальные и вековые резонансные взаимодействия значительно влияют на динамику исследуемых объектов и способны приводить к проявлению хаотичности в их движении. В этой связи создаваемые численные модели движения астероидов должны иметь в своей структуре алгоритмы выявления хаотичности.

При исследовании ПОА также большое значение имеет возможность быстро оценить вероятность столкновения с Землей и при необходимости предотвратить его. Научные результаты исследования орбитальной эволюции некоторых астероидов с различными особенностями движения могут быть использованы для

решения актуальных задач астероидной опасности, а также интересны для различных групп исследователей, приоткрывая новые пути для пилотируемых миссий к астероидам.

В данной работе рассматриваются объекты, которые вызывают всеобщий интерес мирового научного сообщества, и знание динамики которых позволяет пролить свет на понимание орбитальной эволюции объектов самой обширной фракции малых тел Солнечной системы. Большое внимание уделено астероидам с малыми перигелийными расстояниями, под которыми понимаются астероиды с перигелийными расстояниями $q \leq 0.15$ а.е. Особенностью орбит рассматриваемых небесных тел являются большие эксцентриситеты и наклонения, а прохождение рядом с Солнцем накладывает особые требования на модель сил и затрудняет получение новых наблюдений.

Перечисленные факторы позволяют сделать вывод об актуальности задач, результаты исследования которых представлены в настоящей диссертации.

В.2 Степень разработанности

В связи с актуальностью проблемы, описанной выше, остро встают задачи построения как краткосрочной, так и долговременной орбитальной эволюции астероидов, а также исследования перечисленных выше особенностей в их движении. В настоящее время опубликовано большое количество работ, посвященных исследованию динамики астероидов, сближающихся с Землей (AC3) (Milani et al., 2000a; Michel et al., 2005; Заботин, Медведев, 2008, Jenniskens et al., 2009; Железнов, 2010; Aleshkina et al., 2011; Емельяненко, 2017; Емельяненко, Нароенков, 2018; Qi, de Ruiter, 2019; Kaplan, Cengiz, 2020; de la Fuente Marcos C., de la Fuente Marcos R., 2021; Carbognani et al., 2022; Fenucci et al., 2022; Pokorny, Kuchner, 2021; Sheppard et al., 2022 и др.), а также некоторым потенциально опасным астероидам, например, (3200) Phaethon (Krüger et al., 2017; Ye, 2017; Jewitt, 2017; Ryabova et al., 2019; Kareta et al., 2021, MacLennan et al., 2021) или (99942) Apophis (Chesley, 2006; Giorgini et al., 2008; Соколов и др., 2021; Виноградова и др., 2008; Кочетова и др., 2009, 2013; Ивашкин и др., 2020; Perez-Hernandez, Benet, 2022 и др.). В книге «Астероидно-кометная опасность: вчера, сегодня, завтра» под ред. Б.М. Шустова, Л.В. Рыхловой (2010), изложены проблемы астероидной, кометной и метеороидной опасности и обзор

соответствующих работ. Следует отметить, что класс известных астероидов, сближающихся с Землей, постоянно пополняется новыми объектами, поэтому задача наблюдения и исследования особенностей их динамики требует все более точных решений.

При исследовании динамики малых тел Солнечной системы существуют некоторые проблемы в построении их орбитальной эволюции на длительных интервалах времени. Исследование движения астероидов представляет собой многоцелевую задачу, решение которой в первую очередь опирается на построение начального облака неопределенности положения объекта. Облако неопределенности определяют как множество возможных значений параметров орбиты астероида, ограниченное поверхностью, накрывающей с заданной в линейном приближении вероятностью истинные, неизвестные нам, значения параметров орбиты объекта. На погрешность, с которой может быть построено облако неопределенности, влияет множество факторов, таких как грубые и систематические ошибки в исходной выборке наблюдений, выбор весовых матриц для разнородных наблюдений, использование недостаточно точной модели сил в уравнениях движения астероида, применение линейного подхода в случае, когда задача существенно не линейна, и т.д. Все эти факторы приводят к увеличению размеров облака неопределенности и его смещению относительно неизвестных истинных параметров орбиты астероида. В работах (Sitarski, 1998; Черницов и др., 1998; Sitarski, 1999; Sitarski, 2006; Черницов и др., 2007; Заботин, Медведев, 2008; Авдюшев, 2009; Сюсина и др., 2009; Armelin et al., 2010; Железнов, 2010; Авдюшев и др., 2021; Milani, 1999; Muinonen et al., 2006; Virtanen et al., 2001; Efron, 1979; Press et al., 1987; Avdyushev, 2011; Сюсина и др., 2012 и др.) представлены методы статистического моделирования облаков неопределенности орбитальных параметров и его отображения во времени в задачах динамики астероидов. Несмотря на обилие проведенных исследований, еще остается открытым вопрос о применимости тех или иных методов, и при исследовании особых астероидов его приходится решать индивидуально.

В движении астероидов весьма распространены резонансные явления. Исследованию резонансов в движении астероидов посвящено много работ, но в большинстве статей рассматривается динамика астероидов Главного пояса, или

некоторых конкретных АСЗ, или отдельных групп АСЗ, движущихся в окрестности некоторых резонансов с большими планетами. В качестве примера можно привести работы (Christou, Asher, 2021; de la Fuente Marcos C., de la Fuente Marcos R., 2019; Qi, de Ruiter, 2019; Fenucci et al., 2022; Li et al., 2019; Pokorny, Kuchner, 2021; Kaplan, Cengiz, 2020). Первые исследования влияния вековых резонансов были сделаны почти одновременно для искусственных спутников Земли (ИСЗ) М.Л. Лидовым (Лидов, 1961) и для астероидов Ё. Козаи (Kozai, 1962) в рамках двукратно осредненной задачи и в предположении, что влияние третьего тела ограничивается задачей Хилла. Влияние вековых резонансов на динамику объектов главного пояса, движущихся по почти круговым орбитам, исследовано достаточно детально. Динамика объектов, имеющих большие эксцентриситеты орбит и тесные сближения с планетами, и в то же время подверженных действию вековых резонансов, менее исследована (de la Fuente Marcos C., de la Fuente Marcos R., 2015, 2016, 2019, 2020; Greenstreet, 2020; Froeschle et al., 1995; Michel, Froeschle, 1997; Емельяненко В.В., Емельяненко Н.Ю., 2018). В монографии А. Морбиделли «Современная небесная механика. Аспекты динамики Солнечной системы» (Morbidelli, 2002) приведен обзор результатов, полученных по исследованию влияния вековых резонансов на движение астероидов. В связи с тем, что регулярно открываются новые астероиды и уточняются орбиты открытых ранее, задача выявления и изучения орбитальных и вековых резонансов не может считаться решенной. Кроме того, открытым является вопрос о влиянии различных возмущающих факторов, например, эффекта Ярковского (ЭЯ), на резонансные соотношения.

В настоящее время большое внимание уделяется исследованию эффекта Ярковского, поскольку он оказывает значительное влияние на долговременную орбитальную эволюцию астероидов (например, (Bottke et al., 2006), (Perez-Hernandez, Benet, 2022) и др.). При этом самым распространенным методом учета параметра эффекта является предположение об обратной пропорциональности ускорения квадрату расстояния до Солнца (Farnocchia et al., 2013a) и включение коэффициента пропорциональности в число оцениваемых параметров (Панасенко, Чернетенко, 2014). Данным способом можно определить значение параметра эффекта для небольшого числа объектов с хорошо определенной орбитой. Кроме

того, возникает вопрос, как влияет число и точность наблюдений на точность оценки данного параметра.

Динамический хаос в движении астероидов (Мюррей, Дермотт, 2009; Morbidelli, 2002; Шевченко и др., 2003) явление весьма распространенное. Изучение резонансных движений и проявлений динамического хаоса в движении небесных тел несомненно является актуальной задачей. Динамический хаос может проявляться в окрестности резонансов (Чириков, 1977; Шевченко, 2007). Существует несколько сценариев проявления хаотичности в орбитальном движении, например, можно отметить переход к хаотичности при движении в окрестности резонансов, наличии вторичных резонансов, или вековых резонансов внутри резонансов по среднему движению (перекрытие резонансов), или многократных сближений астероидов с планетами. При исследовании реальных объектов переход к хаосу может быть вызван разными причинами и требует отдельного исследования.

В настоящей работе для изучения хаоса в орбитальном движении астероидов и метеороидов используется усредненный параметр OMEGNO (Orthogonal Mean Exponential Growth factor of Nearby Orbit) (Шефер, Коксин, 2013), который является модификацией широко известного показателя MEGNO (Mean Exponential Growth factor of Nearby Orbit) (Cincotta et al, 2003; Valk et al., 2009). Этот параметр относится к так называемым быстрым ляпуновским индикаторам, которые позволяют исследовать динамику астероидов на предмет проявления хаотичности на относительно коротких интервалах времени (Шефер, 2011).

К текущему моменту разработано большое число методов оценки вероятности столкновений, начиная от классического метода Монте-Карло (например, Железнов, 2010), заканчивая различными приближенными методами (Milani et al., 2000a; Ивашкин, Стихно, 2009; Chesley, 2006; Соколов и др., 2008; Sitarski, 2006; Батурин, 2011 и др.). Однако остается нерешенной задача разработки точного и быстрого метода. Предотвращение столкновения находится в основном на стадии теоретического моделирования за исключением единичных космических миссий, из которых отдельного упоминания заслуживает DART (Lolachi et al., 2023). Обзор некоторых методов защиты от астероидной опасности приведен в монографии (Пучков, 2015). Однако в целом разработка надежной стратегии предотвращения столкновения – еще нерешенная задача.

Как упоминалось выше, в настоящее время опубликовано множество работ, посвященных исследованию динамики конкретных астероидов. Среди астероидов с малыми перигелийными расстояниями самым хорошо изученным является (3200) Phaethon (Hui, 2023; Kiselev et al., 2022; Ye et al., 2021; Devogèle et al., 2020; Ryabova et al., 2019; Галушина, Самбаров, 2019; Hanuš et al., 2018; Victorino, Kawakatsu, 2017; Hui, 2017; Ye, 2017; Hanuš et al., 2016 и др.). Среди статей, посвященных всей совокупности рассматриваемых объектов, следует отметить (Емельяненко, 2017), а в работах (Urakawa et al., 2014; Carbognani et al., 2017; Carbognani et al., 2022; Sheppard et al., 2022; Sheppard, 2022; de la Fuente Marcos C., de la Fuente Marcos R., 2021; Nugent et al., 2012b) изучается динамика отдельных представителей семейства астероидов. Большое внимание уделяется наблюдениям астероидов (Devyatkin et al., 2022; Mommert, 2020; Reddy et al., 2007), на сайте Центра малых планет (<https://minorplanetcenter.net/>) действует регулярно пополняемая база позиционных наблюдений. Наблюдения являются по сути базисом для прогнозирования движения астероидов, поэтому необходимо регулярно наблюдать астероиды, особенно недавно открытые, орбиты которых плохо определены.

Таким образом, несмотря на обилие исследований в области динамики астероидов, существуют ещё нерешенные задачи, как в сфере уточнения методик, так и в исследовании динамики конкретных объектов.

В.3 Цели и задачи

Целью работы является выявление и изучение особенностей орбитальной динамики избранных групп АСЗ. В данной работе рассматриваются особенности динамики астероидов с малыми перигелийными расстояниями, а также изучается динамика ПОА на предмет оперативного определения вероятности столкновения и превентивного воздействия на астероид с целью предотвращения столкновения.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- разработана и протестирована на реальных наблюдениях методика построения обзорных эфемерид;
- создано программно-алгоритмическое обеспечение, которое дает возможность проводить исследование динамики астероидов, сближающихся с Землей, в том числе позволяет оценивать влияние возмущающих факторов,

выявлять сближения и возможные столкновения с большими планетами, оценивать вероятность столкновения, обнаруживать вековые и орбитальные резонансы, определять время предсказуемости движения;

- построена методика исследования структуры возмущений в движении астероидов и исследовано влияние различных слабых возмущающих факторов на вероятностную орбитальную динамику астероидов с малыми перигелийными расстояниями;

- получены значения параметра эффекта Ярковского для астероидов с малыми перигелийными расстояниями и оценки точности определения параметра на основе реальных и модельных наблюдений;

- выявлены все орбитальные резонансы низких порядков в движении астероидов с малыми перигелийными расстояниями, оценено влияние эффекта Ярковского и светового давления на резонансные соотношения и аргументы;

- исследована вероятностная орбитальная эволюция ряда астероидов с малыми перигелийными расстояниями, оценено влияние на моделирование их динамики способа построения начального облака неопределенности, эффекта Ярковского и наблюдений, полученных на Терскольской обсерватории;

- реализован и протестирован метод численного оценивания вероятности столкновения астероида с планетой;

- обоснована принципиальная реализуемость метода предотвращения столкновения астероида с Землей, основанного на превентивном разрушении опасного объекта.

В.4 Научная новизна работы

Научная новизна работы состоит в следующем:

- разработана оригинальная методика изучения структуры возмущений, которая показала, что при изучении движения астероидов с малыми перигелийными расстояниями необходимо учитывать влияния планет, Луны, сжатия Солнца и релятивистских эффектов от Солнца, а для объектов с хорошо определенной орбитой и эффект Ярковского;

- получены оценки параметра эффекта Ярковского для всей совокупности известных астероидов с малыми перигелийными расстояниями,

продемонстрировано, что для повышения точности определения параметра необходимо не только увеличение мерного интервала, но и улучшение точности наблюдений;

- впервые показано, что среди 60 исследованных астероидов с малыми перигелийными расстояниями 33 движутся в окрестности орбитальных резонансов с одной или несколькими планетами одновременно; всего было выявлено 50 соизмеримостей, 16 из которых являются устойчивыми; эффект Ярковского оказывает заметное влияние на неустойчивые резонансные соотношения;

- исследована вероятностная орбитальная эволюция 14 астероидов с малыми перигелийными расстояниями; показано, что эффект Ярковского оказывает существенное влияние на большую полуось орбит астероидов, что приводит к изменениям в числе и расстоянии сближений; кроме того, учет эффекта Ярковского приводит к уменьшению неопределенности положения астероидов;

- численным моделированием показано, что новый метод предотвращения столкновения, основанный на превентивном разрушении астероида, обеспечивает защиту от падения самого объекта и его осколков.

В.5 Научная и практическая значимость работы

Научная значимость работы состоит в следующем:

- предложена вероятностная методика исследования структуры возмущений, которая дает возможность проводить детальный анализ влияния различных возмущающих факторов на движение объекта;

- разработан и исследован эффективный метод оценивания вероятности столкновения астероида с Землей;

- изучена динамика группы из 60-ти астероидов с малыми перигелийными расстояниями, выявлены резонансные структуры в орбитальном движении этих объектов, исследована вероятностная орбитальная эволюция 14-ти из них.

Практическая значимость работы состоит в следующем:

- показана практическая возможность наблюдения на телескопе Zeiss-2000 Центра коллективного пользования Института астрономии РАН (ИНАСАН) астероидов до 22^м, получены наблюдения объектов с малыми перигелийными

расстояниями, которые уменьшили неопределенность в векторе положения рассмотренных объектов;

- разработана численная модель движения астероидов с учетом необходимых действующих на них сил и реализована в виде программно-алгоритмического комплекса «ИДА» (Исследование Динамики Астероидов) (Galushina et al., 2019). Комплекс «ИДА» позволяет прогнозировать движение астероида на заданный момент времени, строить вероятностную орбитальную эволюцию, проводить OMEGNO-анализ динамики астероида, исследовать некоторые особенности его движения, такие как тесные сближения, орбитальные и вековые резонансы с планетами, Плутоном и Луной;

- представленные в работе алгоритмы, а также построенное на их основе программное обеспечение могут быть использованы для исследования динамической эволюции широкого класса астероидов;

- приведенные в диссертации результаты численного моделирования показывают надежную применимость методов оценивания вероятности столкновения астероида с Землей и его предотвращения.

В.6 Методология и методы исследования

Методология исследования динамики астероидов основана на законах небесной механики и решении соответствующих дифференциальных уравнений движения. При исследовании орбитальной эволюции АСЗ численное интегрирование уравнений движения небесных объектов осуществляется эффективными методами Гаусса-Эверхарта (Авдюшев, 2010) и Lobbie (Авдюшев, 2022). Выбор сил, которые необходимо учитывать при численном моделировании, выполняется с помощью методики, предложенной в (Galushina et al., 2015), которая основана на оценке начальной неопределенности и эволюции номинальной орбиты. Определение начальных параметров орбиты (в том числе параметра эффекта Яковскового) производится в рамках метода наименьших квадратов (МНК), для обращения матриц используется метод сингулярного разложения SVD (Singular Value Decomposition). При построении начального облака неопределенностей для получения коэффициентов нелинейности применяется метод, предложенный Черницовым А.М. (Черницов и др., 2006; Сюсина и др., 2013а). В случае сильной и

средней нелинейности используется метод возмущенных наблюдений (Авдюшев, 2009), а при слабой нелинейности облако неопределенности представляется в виде эллипсоида в шестимерном пространстве координат и компонент скорости.

Выявление и исследование орбитальных резонансов в движении АСЗ осуществляется на основе численного анализа поведения резонансных характеристик: критического (резонансного) аргумента (Мюррей, Дермотт, 2009), определяющего долготу соединения астероида и планеты, и его производной по времени, называемой резонансной «щелью» (Гребеников, Рябов, 1978). Для исследования регулярности или хаотичности движения в окрестности границ резонансных областей нами используется индикатор OMEGNO (Шефер, Коксин, 2013). Выявление сближений астероида с планетами производится путем интерполяции квадратов расстояний до планеты, полученных в процессе численного интегрирования (Шефер, 1986).

Для оценки вероятности столкновения астероида с Землей используется традиционный метод численного интегрирования уравнений движения тестовых частиц и реализованный в данной работе метод, основанный на линейных отображениях. Для предотвращения столкновения предлагается метод на основе превентивного разрушения во время предыдущего тесного сближения.

Наблюдения астероидов на телескопе Zeiss-2000 выполняются в двух режимах в зависимости от звездной величины и скорости астероида: с часовым ведением и с движением телескопа со скоростью смещения астероида по небесной сфере. Для калибровки снимков используется программа MaximDL (<https://diffractionlimited.com/help/maximdl/MaxIm-DL.htm>), обработка снимков осуществляется в программных пакетах IzmCCD (Измайлов и др., 2010), Astrometrica (<http://www.astrometrica.at/>) и Апекс-II (Девяткин и др., 2010).

В.7 Положения, выносимые на защиту

1. Разработанная методика исследования структуры возмущений позволила оценить, что на динамику астероидов с малыми перигелийными расстояниями помимо больших планет оказывают значительное влияние релятивистские эффекты от Солнца, эффект Ярковского и сжатие Солнца; при текущем уровне точности

возмущениями от светового давления, Плутона, релятивистскими эффектами от других тел Солнечной системы можно пренебречь.

2. Изучение резонансной динамики показало, что среди 60-ти астероидов с малыми перигелийными расстояниями 33 движутся в окрестности орбитальных резонансов с одной или несколькими планетами одновременно; 16 соизмеримостей из 50-ти являются устойчивыми; эффект Ярковского оказывает заметное влияние на неустойчивые резонансные соотношения.

3. Исследования вероятностной орбитальной эволюции астероидов с малыми перигелийными расстояниями продемонстрировали, что эффект Ярковского оказывает существенное влияние на вероятностное значение большой полуоси орбит астероидов с малыми перигелийными расстояниями, что приводит к изменениям в числе и расстоянии сближений; кроме того, в большинстве случаев его учет приводит к уменьшению неопределенности в векторе положения астероидов.

4. Оценки на основе реальных и модельных наблюдений показали, что для астероидов с хорошо определенной орбитой точность определения параметра эффекта Ярковского практически линейно зависит от интервала наблюдений, причем для каждого астероида есть предельный мерный интервал, при достижении которого точность определения параметра перестает улучшаться без увеличения точности наблюдений.

5. Разработан метод быстрого оценивания вероятности столкновения, который дает тот же результат, что и численное интегрирование орбит тестовых частиц, но требует на порядки меньших временных затрат.

6. Модельная оценка последствий превентивного разрушения астероида демонстрирует, что предложенный метод предотвращения столкновения обеспечивает защиту от падения на Землю самого объекта и его осколков.

7. Созданное программно-алгоритмическое обеспечение дает возможность проводить детальное исследование динамики астероидов, сближающихся с Землей.

8. Разработанная и опробованная на реальных наблюдениях методика построения обзорных эфемерид показала высокую эффективность при работе с астероидами с плохо определенными орбитами.

В.8 Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность полученных результатов подтверждается данными наблюдений АСЗ, представленными на сайте Центра малых планет MPC (Minor Planet Center) (<http://www.minorplanetcenter.net>). Используемое в процессе исследований программное обеспечение протестировано на объектах с заведомо известными особенностями и характером движения. Кроме того, достоверность полученных результатов подтверждается сравнением некоторых из них с результатами других авторов (например, Ye, 2017; Jewitt, 2017) и с результатами, представленными на сайте Национального управления по аэронавтике и исследованию космического пространства (англ. National Aeronautics and Space Administration, сокр. NASA).

Результаты исследований докладывались на семинарах Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета, Института прикладной астрономии Российской академии наук, Института астрономии Российской академии наук, кафедры небесной механики Санкт-Петербургского государственного университета, Главной (Пулковской) астрономической обсерватории Российской академии наук, а также на 40 научных конференциях:

«Актуальные проблемы российской космонавтики» (Москва, 2007), 36-я международная студенческая научная конференция «Физика космоса» (Екатеринбург, 2007), Международная конференция «Астрономия и астрофизика начала XXI века» (Москва, 2008), 41-я международная студенческая научная конференция «Физика космоса» (Екатеринбург, 2012), Всероссийская астрометрическая конференция «Пулково–2012» (Санкт-Петербург, 2012), 42-я международная студенческая научная конференция «Физика космоса» (Екатеринбург, 2013), Всероссийская конференция по математике и механике, посвященная 135-летию Томского государственного университета и 65-летию механико-математического факультета (Томск, 2013), Международная научная конференция «Околоземная астрономия–2013» (Краснодар, 2013), 43-я международная студенческая научная конференция «Физика космоса» (Екатеринбург, 2014), V Пулковская молодежная астрономическая конференция (Санкт-Петербург, 2014), «Asteroids, Comets, Meteors» (Хельсинки,

Финляндия, 2014), III научно-практическая конференция молодых специалистов ОАО «ИСС» «Разработка, производство, испытания и эксплуатация космических аппаратов и систем» (Железногорск, 2014), «JOURNEES 2014. Systemes de reference spatio-temporels. Recent developments and prospects in ground-based and space astrometry» (Санкт-Петербург, 2014), 44-я международная студенческая научная конференция «Физика космоса» (Екатеринбург, 2015), III международная конференция «Метеориты, астероиды, кометы» (Челябинск, 2015), IX Международная конференция «Околоземная астрономия» (Терскол, 2015), Международная конференция «Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики» (Томск, 2015), 45-я международная студенческая научная конференция «Физика космоса» (Екатеринбург, 2016), IX всероссийская научная конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики» (Томск, 2016), Международная молодежная научная конференция «Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики» (Томск, 2016), конференция «Разработка, производство, испытания и эксплуатация космических аппаратов и систем» (Железногорск, 2017), X международная конференция «Околоземная астрономия» (Краснодар, 2017), 47-я международная студенческая научная конференция «Физика космоса» (Екатеринбург, 2018), Расширенный научный семинар «Управление движением естественных небесных тел» (Таруса, 2018), Всероссийская молодежная научная конференция «Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики» (Томск, 2018), XI Международная научная конференция «Околоземная астрономия и космическое наследие» (Казань, 2019), 49-я международная студенческая научная конференция «Физика космоса» (Екатеринбург, 2020), The Eleventh Moscow Solar System Symposium (Moscow, 2020), Всероссийская молодежная научная конференция «Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики» (Томск, 2019), X Всероссийская научная конференция с международным участием «Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики – 2020» (Томск, 2020), Всероссийская с международным участием научная конференция студентов и молодых ученых, посвященная памяти Полины Евгеньевны Захаровой «Астрономия и исследование космического пространства» (Екатеринбург, 2021),

XLV Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых–пионеров освоения космического пространства (Москва, 2021), Всероссийская астрономическая конференция ВАК-2021 «Астрономия в эпоху многоканальных исследований» (Москва, 2021), The Twelfth Moscow Solar System Symposium 12M-S3 (Москва, 2021), Всероссийская с международным участием научная конференция студентов и молодых ученых «Астрономия и исследование космического пространства» (Екатеринбург, 2022), Научно-практическая конференция с международным участием «Околоземная астрономия – 2022» (Москва, 2022), The Thirteenth Moscow Solar System Symposium 13M-S3 (Москва, 2022), XII Всероссийская научная конференция «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики», посвящённая 55-летию НИИ ПММ ТГУ и 145-летию Томского государственного университета (Томск, 2023), International Conference «Non-Stable Phenomena in the Universe» dedicated to the 115th anniversary of V.A. Ambartsumian (Бюракан, Армения, 2023), The Fourteenth Moscow Solar System Symposium 14M-S3 (Москва, 2023).

По результатам исследования опубликовано 30 работ. Из них 18 статей в журналах, включенных в международные базы данных научного цитирования Scopus/Web of Science:

1. Авдюшев В.А., Галушина Т.Ю. Быстрое численное оценивание вероятности столкновения астероида с планетой // Астрономический вестник. – 2014. – Т. 48. № 4. – С. 309–317. Переводная версия: Avdyushev V. A.; Galushina T. Yu. Quick numerical evaluation of the probability that an asteroid will collide with a planet // Solar System Research. – 2014. – Vol. 48. Is. 4. – P. 287-294. (DOI: 10.1134/S0038094614040017)
2. Galushina T.Yu., Ryabova G.O., Skripnichenko P.V. The force model for asteroid (3200) Phaethon // Planetary and Space Science. – 2015. Vol. 118. – P. 296–301 (DOI 10.1016/j.pss.2015.06.014)
3. Александрова А.Г., Галушина Т.Ю., Прищепенко А.Б., Холшевников К.В., Чечеткин В.М. О превентивном разрушении опасного астероида // Астрономический журнал. – 2016. – Т. 93. № 6. – С. 595–602. Переводная версия: Aleksandrova A.G., Galushina T.Yu., Prishchepenko A.B., Kholshchevnikov K.V.,

Chechetkin V.M. The Preventive Destruction of a Hazardous Asteroid // *Astronomy Reports*. – 2016. – Vol. 60. No. 6. – P. 611–619. (DOI: 10.1134/S1063772916040016)

4. Галушина Т.Ю., Самбаров Г.Е. Исследование динамики астероида 3200 Phaethon под влиянием наложения различных резонансов // *Астрономический вестник*. – 2019. – Т. 53. № 3. – С. 231–239. Переводная версия: Galushina T.Yu., Sambarov G.E. Dynamics of Asteroid 3200 Phaethon Under Overlap of Different Resonances // *Solar System Research*. – 2019. – Vol. 53. No. 3. – P. 215–223. (DOI 10.1134/S0038094619030018)

5. Galushina T., Bykova L., Letner O., Baturin A. IDA software for investigating asteroid dynamics and its application to studying the motion of 2012 MF7 // *Astronomy and Computing*. – 2019. – Vol. 29. – article id. 100301 (DOI: 10.1016/j.ascom.2019.100301)

6. Александрова А.Г., Галушина Т.Ю., Прищепенко А.Б., Холшевников К.В., Чечеткин В.М. О возможности безопасного разрушения угрожающего Земле астероида // *Астрономический журнал*. – 2019. – Т. 96. № 9. – С. 1–7. Переводная версия: Aleksandrova A.G., Galushina T.Yu., Prishchepenko A.B., Kholshchevnikov K.V., Chechetkin V.M. The Possibility of Harmless Destruction of an Asteroid Threatening the Earth // *Astronomy Reports*. – 2019. – Vol. 63. Is. 9. – P. 786–793.

7. Aleksandrova A.G., Galushina T.Yu., Kholshchevnikov K.V. Comparison of different methods for preventive destruction of a hazardous asteroid // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2019. – Vol. 1214. – article id. 012007.

8. Галушина Т.Ю., Летнер О.Н. Исследование влияния эффекта Ярковского на движение астероидов с малыми перигелийными расстояниями // *Изв. Вузов. Физика*. 2020. Т. 63. № 1. С. 63–70. Переводная версия: Galushina T.Yu., Letner O.N. Influence of the Yarkovsky effect on motion of asteroids with small perihelion distance // *Russian Physics Journal*. – 2020. – Vol. 63. Is. 1. – P. 71–78. (DOI 10.1007/s11182-020-02004-8)

9. Галушина Т.Ю., Сюсина О.М. Сравнительный анализ методик получения параметра эффекта Ярковского из наблюдений // *Изв. Вузов. Физика*. – 2020. – Т. 63. № 3. – С. 65–69. Переводная версия: Galushina T.Yu., Syusina O.M. Comparative analysis of methods for obtaining the Yarkovsky effect parameter from observations //

Russian Physics Journal. – 2020. – Vol. 63. № 3. – P. 420–425. (DOI 10.1007/s11182-020-02052-0)

10. Letner O.N., Galushina T.Yu. Motion features of the asteroid 137924 2000 BD19 // Planetary and Space Science. – 2020. – Vol. 181. – article id. 104818.

11. Сюсина О.М., Галушина Т.Ю. Определение значения эффекта Ярковского для астероидов с малыми перигелийными расстояниями // Изв. Вузов. Физика. – 2021. – Т. 64. № 7 (764). – С. 151–156. Переводная версия: Syusina O.M., Galushina T.Yu. Determination of the Yarkovsky effect parameter for asteroids with small perihelion distances // Russian Physics Journal. – 2021. – Vol. 64. № 7. – P. 1351–1357. (DOI 10.1007/s11182-021-02460-w)

12. Галушина Т.Ю., Летнер О.Н., Сюсина О.М. Оценка точности определения значения параметра эффекта Ярковского на основе реальных и модельных наблюдений астероидов // Изв. Вузов. Физика. – 2021. – Т. 64. № 9 (766). – С. 170–174. Переводная версия: Galushina T.Yu., Letner O.N., Syusina O.M. Estimation of the precision of determining the Yarkovsky effect parameter based on real and model observations of asteroids // Russian Physics Journal. – 2022. – Vol. 64. Is. 9. – P. 1774–1779. (DOI: 10.1007/s11182-022-02518-3)

13. Galushina T.Yu., Letner O.N., Niganova E.N. Notes on force models for near-Sun asteroids // Planetary and Space Science. – 2021. – Vol. 202. – article id. 105232.

14. Galushina T.Yu., Letner O.N. Modified version of IDA software and its application to the study of the motion of asteroid 2007 PR10 // Astronomical and Astrophysical Transactions. – 2021. – Vol. 32. Is. 4. – P. 355–370.

15. Галушина Т.Ю., Летнер О.Н., Сюсина О.М., Ниганова Е.Н. Влияние эффекта Ярковского на орбитальные резонансы астероидов с малыми перигелийными расстояниями // Изв. Вузов. Физика. – 2022. – Т. 65. № 5. – С. 105 – 112. (DOI: 10.17223/00213411/65/5/105). Переводная версия: Galushina T.Yu., Letner O.N., Syusina O.M., Niganova E.N. Influence of the Yarkovsky effect on the mean motion resonances of asteroids with small perihelion distances // Russian Physics Journal. – 2022. – Vol. 65. Is. 5. – P. 878–885.

16. Летнер О.Н., Галушина Т.Ю., Гурьянов С.А. К вопросу о нелинейности задачи оценивания орбитальных параметров астероидов с малыми перигелийными

расстояниями // Изв. Вузов. Физика. – 2022. – Т. 65. № 3. – С. 72–80. (DOI: 10.17223/00213411/65/3/72). Переводная версия: Letner O.N., Galushina T.Yu., Gur`yanov S.A. About the Nonlinearity of the Problem of Estimating the Parameters of Asteroids with Small Perihelion Distances // Russian Physics Journal. – 2022. – Vol. 65. Is. 3. – P. 472–480. DOI: 10.1007/s11182-022-02657-7

17. Галушина Т.Ю., Авдюшев В.А., Левкина П.А. Прогресс и проблемы в методах прогнозирования движения астероидов, сближающихся с Землей // Астрономический вестник. – 2023. – Т. 57. № 6. – С. 1–14. Переводная версия: Galushina T.Yu., Avdyushev V.A., and Levkina P.A. Advancements and Challenges in Methods for Near-Earth Asteroid Prediction // Solar System Research. – 2023. – Vol. 57. No. 6. – P. 636–647.

18. Galushina T.Yu., Letner O.N., Shein A.V., Bakanas E.S., Levkina P.A. Observations and study of the orbital dynamics of some near-Sun asteroids // Planetary and Space Science. – 2024. – Vol. 240. – article id. 105814. (<https://doi.org/10.1016/j.pss.2023.105814>)

19. Быкова Л.Е., Галушина Т.Ю., Батурин А.П. Построение поисковых эфемерид астероидов на основе областей их возможных движений. I. Алгоритм // Изв. Вузов. Физика. Приложение. Небесная механика и прикладная астрономия. – 2007. – Т. 50. № 12/2. – С. 5–12.

20. Быкова Л.Е., Галушина Т.Ю., Батурин А.П. Построение поисковых эфемерид астероидов на основе областей их возможных движений. II. Программная система // Изв. Вузов. Физика. Приложение. Небесная механика и прикладная астрономия. – 2007. – Т. 50. № 12/2. – С. 13–19.

21. Быкова Л.Е., Галушина Т.Ю. Алгоритмическое и программное обеспечение решения задач динамики астероидов, сближающихся с Землей, в среде параллельного программирования // Изв. Вузов. Физика. – 2009. – Т. 52. № 10/2. – С. 12–19.

22. Быкова Л.Е., Галушина Т.Ю., Батурин А.П. Прикладной программный комплекс «ИДА» для исследования динамики астероидов // Изв. Вузов. Физика. – 2012. – Т. 55. № 10/2. – С. 89 – 96.

23. Скрипниченко П.В., Галушина Т.Ю., Кайзер Г.Т. К вопросу о методике оценки точности позиционных наблюдений астероидов на основе получения их

высокоточных расчетных положений // Изв. Вузов. Физика. – 2012. Т. 55. – № 10/2. – С. 97–105.

24. Авдюшев В.А., Галушина Т.Ю. Линейные отображения для быстрого численного оценивания вероятности столкновения астероида с Землей // Изв. Вузов. Физика. – 2013. – Т. 56. № 6/3. – С. 182–184.

25. Галушина Т.Ю. К вопросу о терминологии в области астероидной опасности // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. – 2013. – № 4. Т. 3. – С. 53–56.

26. Галушина Т.Ю., Скрипниченко П.В. Апробация методики отбраковки наблюдений астероидов, выполненных на СБГ АО УрФУ // Изв. Вузов. Физика. – 2013. – Т. 56. № 10/2. – С. 51–56.

27. Скрипниченко П.В., Галушина Т.Ю., Шагабутдинов А.А. Исследование структуры возмущений некоторых АСЗ с малыми перигелийными расстояниями // Изв. Вузов. Физика. – 2014. – Т. 57. Вып. 10/2. – С. 21 – 29.

28. Галушина Т.Ю. Популяция астероидов, сближающихся с Землей // Вестник СибГАУ. – 2014. – № 4 (56). – С. 33–40.

29. Александрова А.Г., Галушина Т.Ю. Численное моделирование процесса формирования потоков частиц, образовавшихся в результате распада на орбите космических объектов // Изв. Вузов. Физика. – 2015. – Т. 58. № 10/2. – С. 47–53.

30. Басхаев Д.Л., Галушина Т.Ю. Исследование эффективности интеграторов Гаусса – Эверхарта и Lobbie в задачах астероидной динамики // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2023. – Т. 66. № 1. – С. 109–116. (DOI: 10.17223/00213411/66/1/109)

Кроме того, 32 работы опубликовано в материалах конференций:

1. Быкова Л.Е., Галушина Т.Ю., Батурин А.П. Разработка программной системы для построения поисковых эфемерид астероидов // Томск: Изд-во Том. ун-та, Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики: Док. всерос. науч. конф. – 2006. – С. 426–427.

2. Быкова Л.Е., Галушина Т.Ю., Батурин А.П. Алгоритмы построения поисковых эфемерид астероидов // Актуальные проблемы российской космонавтики: Труды XXXI Академических чтений по космонавтике. Москва:

Комиссия РАН по разработке научного наследия пионеров освоения космического пространства. – 2007. – С. 103–104.

3. Быкова Л.Е., Галушина Т.Ю., Батулин А.П. О программной системе построения поисковых эфемерид астероидов // Физика космоса: Труды 36-й международной студенческой научной конференции. – Екатеринбург. – 2007. – С. 229.

4. Galushina T., Bykova L. Applied program system for study of motion and orbital evolution of asteroids. In "Resonances, stabilization, and stable chaos in hierarchical triple systems". Eds. V.V. Orlov, A.V. Rubinov. St. Petersburg University. – 2008. – P. 5–11.

5. Быкова Л.Е., Батулин А.П., Галушина Т.Ю. Алгоритм и комплекс программ для выявления в области возможных движений АСЗ опасных для Земли траекторий // Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики: сборник материалов конференции. – Томск: Томский государственный университет. – 2008. – С. 417–418

6. Быкова Л.Е., Галушина Т.Ю. Опасные для Земли траектории в области возможных движений астероида 99942 Апофис // Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики: сборник материалов конференции. – Томск: Томский государственный университет. – 2008. – С. 419–420.

7. Галушина Т.Ю. Методы прогнозирования движения опасных для Земли астероидов и оценки вероятности столкновения // Физика космоса: Труды 41-й международной студенческой научной конференции. 30 янв. – 3 февр. 2012 г. – Екатеринбург 2012: Изд-во Урал. Ун-та. – 2012. – С. 57 – 70.

8. Галушина Т.Ю., Раздымакина О.Н. К вопросу о хаотичности движения астероидов, сближающихся с Землей // Физика космоса: Труды 42-й международной студенческой научной конференции. 28 янв. – 1 февр. 2013 г. – Екатеринбург 2013: Изд-во Урал. Ун-та. – 2013. – С. 19–33.

9. Скрипниченко П.В., Галушина Т.Ю. Оценка влияния различных возмущающих факторов на движение АСЗ // Физика космоса: Труды 42-й международной студенческой научной конференции. 28 янв. – 1 февр. 2013 г. – Екатеринбург 2013: Изд-во Урал. Ун-та. – 2013. – С. 166.

10. Галушина Т.Ю., Скрипниченко П.В. Астероидная опасность – от первых представлений до наших дней // Физика космоса: Труды 43-й международной студенческой научной конференции. 3 – 7 февр. 2014 г. – Екатеринбург 2014: Изд-во Урал. Ун-та. – 2014. – С. 237–248.

11. Галушина Т.Ю. Популяция астероидов, сближающихся с Землёй // Материалы III научно-практической конференции молодых специалистов ОАО «ИСС» «Разработка, производство, испытания и эксплуатация космических аппаратов и систем». – Железногорск. – 2014. – С. 206 – 207.

12. Галушина Т.Ю., Скрипниченко П.В. Обзор популяции астероидов, сближающихся с Землей // Физика космоса: Труды 44-й международной студенческой научной конференции. 2 – 6 февр. 2015 г. – Екатеринбург 2015: Изд-во Урал. Ун-та. – 2015. – С. 25–36.

13. Скрипниченко П.В., Галушина Т.Ю. Построение поисковых эфемерид ряда нумерованных АСЗ // Физика космоса: Труды 44-й международной студенческой научной конференции. 2 – 6 февр. 2015 г. – Екатеринбург 2015: Изд-во Урал. Ун-та. – 2015. – С. 197.

14. Скрипниченко П.В., Галушина Т.Ю., Шагабутдинов А.А. Исследование динамических свойств астероидов, сближающихся с Землей, с малыми перигелийными расстояниями // Метеориты, астероиды, кометы. Материалы III международной конференции «Метеориты, астероиды, кометы» и школы молодых ученых «Чебаркуль 2015». – Челябинск: ТЕТА. – 2015. – С. 22–25.

15. Галушина Т.Ю. Динамика резонансных астероидов // Физика космоса: Труды 45-й международной студенческой научной конференции. 1 – 5 февр. 2016 г. – Екатеринбург 2016: Изд-во Урал. Ун-та. – 2016. – С. 43 – 58.

16. Скрипниченко П.В., Галушина Т.Ю. Исследование динамики АСЗ с большими эксцентриситетами из сферической подсистемы Солнечной системы // Физика космоса: Труды 45-й международной студенческой научной конференции, 1 – 5 февр. 2016 г. – Екатеринбург 2016: Изд-во Урал. Ун-та. – 2016. – С. 230.

17. Галушина Т.Ю., Александрова А.Г. Исследование динамической эволюции потоков частиц, образовавшихся в результате распада астероидов, сближающихся с Землей // Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики (ФППСМ-2016): Сборник трудов IX всероссийской научной

конференции. 21-25 сентября 2016 года. г. Томск. – Томск: Томский государственный университет. – 2016. – С. 339–341.

18. Александрова А.Г., Галушина Т.Ю., Холшевников К.В. Сравнение различных способов превентивного разрушения опасного астероида // Международная молодежная научная конференция «Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики» 16–18 ноября 2016 г.: Материалы конференции / под ред. М.Ю. Орлова. – Томск. – 2016. – С. 93–94.

19. Летнер О.Н., Галушина Т.Ю. Резонанс Лидова-Козаи в динамике астероидов, сближающихся с Землей // Физика космоса: тр. 47-й Международ. студ. науч. конф. (Екатеринбург, 29 янв. – 02 февр. 2018 г.) – Екатеринбург: Изд-во Урал. Ун-та. – 2018. – С. 170–171.

20. Галушина Т.Ю., Быкова Л.Е., Летнер О.Н. Прикладной программный комплекс «ИДА», предназначенный для изучения движения астероидов // Физика космоса: тр. 47-й Международ. студ. науч. конф. (Екатеринбург, 29 янв. – 02 февр. 2018 г.) – Екатеринбург: Изд-во Урал. Ун-та. – 2018. – С. 198–199.

21. Галушина Т.Ю. Исследование динамики астероидов с малыми перигелийными расстояниями в окрестности орбитальных и вековых резонансов // Расширенный научный семинар управление движением естественных небесных тел. Россия. Г. Таруса (Калужская обл.) 21–23 марта 2018 г.

22. Летнер О.Н., Галушина Т.Ю. Исследование динамики астероида 137924 2000 BD19, имеющего малое перигелийное расстояние // Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики – 2018: VIII Всероссийская молодежная конференция, г. Томск, 26-28 ноября 2018 г. – Томск: Изд-во ТГУ. – 2019. – С. 185–189.

23. Галушина Т.Ю. Орбитальные и вековые резонансы в движении астероидов, сближающихся с Землей // Физика космоса: тр. 49-й Международ. студ. науч. конф. Екатеринбург. Россия. 27 – 31 янв. 2020 г. – Екатеринбург: Изд-во Урал. Ун-та. – 2020. – С. 6–18.

24. Летнер О. Н., Галушина Т. Ю. Оценка влияния эффекта Ярковского на динамику астероидов с малыми перигелийными расстояниями // Физика космоса: тр. 49-й Международ. студ. науч. конф. Екатеринбург. Россия. 27 – 31 янв. 2020 г. – Екатеринбург: Изд-во Урал. Ун-та. – 2020. – С. 176–177.

25. Сюсина О.М., Галушина Т.Ю. Программно-математическое обеспечение для учета эффекта Ярковского и светового давления в задачах динамики астероидов // Физика космоса: тр. 49-й Международ. студ. науч. конф. Екатеринбург. Россия. 27 – 31 янв. 2020 г. – Екатеринбург: Изд-во Урал. Ун-та. – 2020. – С. 214–215.

26. Летнер О.Н., Галушина Т.Ю., Сюсина О.М., Авдюшев В.А. К вопросу о нелинейности задачи оценивания параметров астероидов с малыми перигелийными расстояниями // X Всероссийская научная конференция с международным участием «Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики – 2020». 18–20 ноября 2020 г.: Материалы конференции / под ред. М.Ю. Орлова. – Томск: Изд-во «Красное знамя». – 2021. – С. 225–228.

27. Галушина Т.Ю., Левкина П.А., Шеин А.В. Результаты наблюдений избранных астероидов на Терскольской обсерватории в сентябре 2020 года // X Всероссийская научная конференция с международным участием «Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики – 2020», 18 – 20 ноября 2020 г.: Материалы конференции / под ред. М.Ю. Орлова. – Томск: Изд-во «Красное знамя». – 2021. – С. 200–204.

28. Сюсина О.М., Галушина Т.Ю. Влияние состава наблюдений на определение параметра эффекта Ярковского // Астрономия и исследование космического пространства: тр. Всероссийской с международным участием научной конференции студентов и молодых ученых, Екатеринбург. 1 —5 февраля 2021 г. Екатеринбург: Изд-во Урал. Ун-та. – 2021. – С. 198–199.

29. Галушина Т.Ю., Левкина П.А., Летнер О.Н. Точность определения орбит избранных АСЗ по данным позиционных наблюдений на Терскольской обсерватории // Астрономия и исследование космического пространства: тр. всероссийской с международным участием науч. конф. студентов и молодых ученых, посвященной памяти Полины Евгеньевны Захаровой (Екатеринбург, 1 февр. – 05 февр. 2021 г.) – Екатеринбург: Изд-во Урал. Ун-та им. первого Президента России Б.Н. Ельцина. – 2021. – С. 101–102.

30. Galushina T.Yu., Letner O.N., Guryanov S.A. Study of the nonlinearity problem for the near-Sun asteroids // The Twelfth Moscow Solar System symposium 12M-S3 (5-9 october 2021, Moscow). – 2021. – P. 284–286.

31. Галушина Т.Ю., Летнер О.Н. О влиянии эффекта Ярковского на резонансное движение астероидов с малыми перигелийными расстояниями // *Астрономия и исследование космического пространства: Всероссийская с международным участием научная конференция студентов и молодых ученых (Екатеринбург, Россия, 31 января – 4 февраля 2022 г.): сборник научных трудов. Екатеринбург. УрФУ. – 2022. – С. 95–96.*

32. Galushina T.Yu., Shein A.V., Bakanas E.S., Levkina P.A. Modification of technique of asteroid observations on Terskol observatory // *The Thirteenth Moscow Solar System symposium 13M-S3 (10-14 october 2022, Moscow).* – 2022. – P. 269–270.

Исследования проведены при поддержке 6 НИР: грант фонда им. Д.И. Менделеева № 8.1.54.2015–16 «Исследование динамики малых космических объектов, представляющих опасность для Земли и деятельности Человека в космосе», грант фонда им. Д.И. Менделеева № 8.1.28.2017 «Исследование динамики малых объектов Солнечной системы в условиях сложного наложения резонансов различной природы», грант фонда им. Д.И. Менделеева № 8.1.14.2018 «Исследование актуальных проблем динамики малых объектов Солнечной системы, связанных с реализацией существующих и планируемых космических миссий», грант РНФ №19-72-10022 «Исследование сложных задач динамики околоземных объектов методами компьютерного моделирования и машинного анализа данных» 2019–2024 гг., государственное задание Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № FSWM-2020-0049 по теме «Численное моделирование движения малых тел Солнечной системы на основе позиционных наблюдений» 2020–2023 гг., государственное задание Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № FSWM-2024-0005 по теме «Исследование структуры и динамики околоземных популяций малых тел Солнечной системы на основе наблюдений» 2024–2026 гг.

Соискателем самостоятельно определены цель и задачи исследования. Во всех исследованиях соискатель принимала непосредственное участие в постановке задачи и анализе полученных результатов, соискателем лично получена значительная часть результатов по численному моделированию динамики астероидов. Кроме того, соискателю принадлежит существенный вклад в разработку

программного обеспечения и проведение наблюдений. Научный консультант соискателя Бордовицына Т.В. принимала участие в постановке задачи и обсуждении результатов. Соавторы соискателя в основном внесли свой вклад в получение результатов численного моделирования динамики астероидов.

В совместных работах с В.А. Авдюшевым последнему принадлежит идея метода быстрого численного оценивания вероятности столкновения астероида с планетой и разработка интегратора. В работе с Г.О. Рябовой последней принадлежат оценки влияния эффекта Ярковского и реактивного эффекта на динамику астероида (3200) Phaethon. В работах со П.В. Скрипниченко последний участвовал в проведении и обработке наблюдений и выполнении численных расчетов. В работах с А.Г. Александровой, А.Б. Прищепенко, К.В. Холшевниковым и В.М. Чечеткиным соискателю принадлежит оценка вероятности выпадения осколков астероида на Землю. В работе с Г.Е. Самбаровым последний участвовал в разработке программного модуля для вычисления вековых резонансов, в численных расчетах и обсуждении результатов. В совместных работах с Л.Е. Быковой последняя принимала участие в постановке задачи и обсуждении результатов. В совместных работах с О.Н. Летнер последняя принимала участие в постановке задачи, обсуждении результатов и выполнении численного моделирования движения астероидов. В совместных работах с А.П. Батуриным последнему принадлежит программно-алгоритмическая реализация некоторых модулей. В работах с О.М. Сюсиной последняя принимала участие в численном моделировании движения астероидов и обсуждении полученных результатов. В совместных работах с Е.Н. Нигановой, С.А. Гурьяновым, А.А. Шагабутдиновым, Д.Л. Басхаевым последние принимали участие в получении численных результатов. В совместных работах с Г.Т. Кайзер, П.А. Левкиной и Шеиным А.В. последним принадлежит получение наблюдений. В работе с Баканас Е.С. последняя принимала участие в обработке наблюдений.

В.9 Краткое содержание диссертационной работы

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка использованных источников (244 наименования) и одного приложения, содержит 89 рисунков и 61 таблицу. Общий объем работы составляет 326 страниц.

Во введении дано обоснование актуальности проблемы, сформулированы цель и практическая значимость исследований, приведены положения, выносимые на защиту, список публикаций и данные об апробации работы, описана структура диссертации.

Первая глава является обзорной, в ней описана популяция астероидов, сближающихся с Землей, представлены основные методы исследования их динамики, освещена проблема астероидной опасности.

Вторая глава посвящена методам исследования динамики астероидов, используемым в данной работе. В ней дается описание численной модели движения малых тел Солнечной системы, рассматриваются уравнения движения и математическая модель возмущающих сил, включающая влияние всех больших планет, Плутона, Луны, Цереры, Паллады, Весты; сжатия Земли, Солнца и Юпитера; релятивистских эффектов от Солнца, планет, Плутона и Луны; эффекта Ярковского и светового давления, описываются возмущающие силы, приведены алгоритмы вычисления их влияния. В главе также излагаются вопросы, связанные с определением оценок начальных параметров орбит, приводится краткий обзор методов построения начального облака неопределенности параметров орбит астероидов. Представлена численно-аналитическая методика выявления орбитальных и вековых резонансов, выписаны 20 апсидально-нодальных резонансных соотношений низких порядков, описан метод оценки времени предсказуемости движения с помощью параметра OMEGNO и способ выявления тесных сближений. Отдельное внимание уделено методике исследования структуры возмущений и методу быстрого оценивания вероятности столкновения астероида с планетами.

В третьей главе представляется программный комплекс ИДА, разработанный для изучения движения астероидов, с помощью которого выполнено большинство исследований в настоящей работе. Программный комплекс состоит из ряда подсистем, которые позволяют решать следующие задачи: построение численной модели движения астероида с учетом заданных возмущающих факторов, улучшение орбиты астероида по данным позиционных наблюдений, исследование структуры возмущений, построение начального облака неопределенности линейными и нелинейными методами, исследование орбитальной эволюции начального облака

неопределенности, выявление сближений и столкновений исследуемого астероида с большими планетами, Луной и Плутоном, оценка вероятности столкновения астероида с большими планетами и Луной, выявление соизмеримостей средних движений астероида и больших планет, выявление и исследование вековых резонансов, исследование хаотичности и оценка времени предсказуемости движения с помощью параметра OMEGNO, демонстрация движения астероида и планет на экране компьютера в различных системах координат. Для реализации программного комплекса использовался язык программирования Fortran и среда разработки Delphi. Отдельно следует отметить возможность работы в режиме автоматизации, который облегчает использование программного комплекса.

Четвертая глава посвящена описанию методов и результатов наблюдения астероидов на телескопе Zeiss-2000 Центра коллективного пользования «Терскольская обсерватория». В течение семи сеансов с 2020 года по 2023 год были проведены наблюдения десяти астероидов с малыми перигелийными расстояниями и девяти астероидов с плохо определёнными орбитами. Кроме того, в первом тестовом сеансе наблюдался астероид (3753) Cruithne, и особое внимание было уделено объектам 2023 BU во время тесного сближения с Землей в январе 2023 года и (65803) Didymos после столкновения космического аппарата DART с его спутником. В процессе наблюдений тестировалось две методики: наблюдения слабых астероидов с движением телескопа со скоростью движения астероида и поиск объекта на небесной сфере с использованием обзорных эфемерид.

В пятой главе приводятся результаты исследования динамики астероидов с малыми перигелийными расстояниями, в частности описывается структура возмущений, даются оценки нелинейности задачи оценивания начальных параметров. Особое внимание уделяется эффекту Ярковского, который оценивается для всех исследуемых объектов на основе реальных и модельных наблюдений, делается вывод о требуемой точности наблюдений. В данной главе также рассматриваются результаты вероятностной орбитальной эволюции ряда объектов с малыми перигелийными расстояниями, приводится информация о выявленных орбитальных резонансах и оценки влияния светового давления и эффекта Ярковского на резонансные соотношения и аргументы.

В шестой главе описываются результаты тестирования метода быстрого оценивания вероятности столкновения астероида и Землей, а также представлен метод предотвращения столкновения, основанного на превентивном разрушении, и результаты его тестирования. Метод оценивания вероятности столкновения основан на линейных отображениях облака неопределенности в окрестности целевой орбиты, первым приближением для которой является номинальная орбита, полученная в результате улучшения. Тестирование метода на примере нескольких потенциально опасных астероидов показало, что он дает те же результаты, что и численное интегрирование орбит тестовых частиц, но за существенно меньшее время. Метод предотвращения столкновения основан на разрушении объекта во время предшествующего тесного сближения. Рассматриваются различные варианты взрыва для выбора оптимального.

В заключении перечислены основные результаты, представленные в диссертационной работе и сделаны соответствующие выводы.

В.10 Благодарности

Автор диссертационной работы считает своим долгом выразить глубокую благодарность своему научному консультанту, доктору физико-математических наук Бордовицкой Татьяне Валентиновне за регулярные консультации, обсуждение полученных результатов и поддержку на протяжении всех этапов работы; кандидату физико-математических наук Летнер Оксане Никитичне за многолетнее плодотворное сотрудничество; доктору физико-математических наук Авдюшеву Виктору Анатольевичу за интересные идеи, а также всему коллективу отдела небесной механики и астрометрии за ценные замечания и полезные дискуссии. Кроме того, автор благодарен Институту астрономии Российской академии наук за возможность проводить наблюдения на телескопе Zeiss-2000.

ГЛАВА 1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ АСТЕРОИДАХ, СБЛИЖАЮЩИХСЯ С ЗЕМЛЕЙ

1.1 Вводные замечания

Исследование движения астероидов, сближающихся с Землей, (АСЗ) является актуальной задачей по целому ряду причин, основной из которых является проблема астероидной опасности. К данной популяции относят объекты, перигелийное расстояние q которых не превышает 1.3 а.е. (Шустов и др., 2010). Первый астероид вблизи Земли был открыт 13 августа 1898 г. Густавом Виттом на обсерватории Урания в Берлине. Это был (433) Эрос, астероид размером менее 25 км. В год открытия он прошел на расстоянии 22 млн км от Земли (Галушина, Скрипниченко, 2014).

Однако долгое время численность популяции известных АСЗ была весьма незначительна. Например, к 1983 году число таких объектов едва достигало 80 (Симоненко, 1985). Ситуация существенно изменилась в конце XX века, когда благодаря развитию наблюдательной техники и новым астрономическим научным программам число открываемых АСЗ существенно увеличилось.

Прогнозирование движения АСЗ является важной задачей как с практической, так и с теоретической точек зрения. Точный прогноз движения необходим для предсказания сближений и столкновений астероидов с Землей. С другой стороны – изучение динамики популяции АСЗ помогает лучше понять эволюцию всей Солнечной системы. Обзор популяция АСЗ приведен в разделе 1.2.

В последние десятилетия развитие вычислительной техники и численных методов способствовало значительному прогрессу в решении рассматриваемой задачи. Не претендуя на полноту охвата, в разделе 1.3 рассматриваются основные методы, используемые на разных этапах исследования, обсуждаются их достоинства и встречающиеся проблемы.

В численном моделировании движения астероидов можно выделить следующие этапы:

1. получение и обработка позиционных наблюдений;
2. стохастическое моделирование начальной орбитальной неопределенности;

3. отображение начальной орбитальной неопределенности на заданный момент времени;

4. исследование различных особенностей движения:

- орбитальные и вековые резонансы,
- сближения и возможные столкновения с планетами,
- хаотичность.

Следует отметить, что в этом веке самым популярным объектом орбитальных исследований является астероид (99942) Apophis (например, Соколов и др., 2021; Ивашкин и др., 2020; Wlodarczyk, 2017; Vokrouhlický et al., 2015; Thuillot et al., 2015; Быкова, Галушина, 2010 и т.д.), что связано с его тесным прохождением около Земли в 2029 году, которое приведет к резкому изменению орбиты и возможным столкновениям в последующие десятилетия. По этой причине часть описываемых методов будет проиллюстрирована на примере данного космического тела.

В разделе 1.4 описывается проблема астероидной опасности в историческом аспекте, кратко рассмотрены основные шаги на пути ее решения.

1.2 Популяция астероидов, сближающихся с Землей

1.2.1 Общие сведения о популяции АСЗ

В настоящее время созданы и постоянно обновляются различные каталоги астероидов. Одна из наиболее полных и широко используемых во многих работах электронная версия каталога всех известных астероидов принадлежит Э. Боуэллу (Bowell et al., 1994). Каталог содержит высокоточные оскулирующие элементы орбит, данные об интервалах и количестве наблюдений, использованных при улучшении орбит, а также возможные эфемеридные неопределенности. На 9 октября 2022 г. каталог содержал данные о 1241132 астероидах, в том числе 30065 АСЗ. Для сравнения, до начала 90-х годов число известных АСЗ едва достигало 150, в 1995 г. их уже было известно 350, в мае 1998 г. – 502 (Muinonen, 1999). Отдельного упоминания заслуживают регулярно обновляющиеся каталоги Центра малых планет (<https://minorplanetcenter.net/>) и Лаборатории реактивного движения NASA (<https://ssd.jpl.nasa.gov/>), однако в данной работе в основном использовался каталог Э. Боуэлла.

Большие полуоси орбит a почти всех известных к настоящему времени АСЗ заключены в интервале от 0.46 (2021 PH27) до 317.10 а.е. (2017 UR52), при этом большие полуоси орбит 99.8% астероидов расположены в пределах от 0.46 до 3.60 а.е. (рисунок 1.1а). При этом 48 АСЗ имеют большие полуоси больше 3.6 а.е., из них 11 – больше 10 а.е., и два объекта (2019 EJ3 и 2017 UR52) обладают большой полуосью, превышающей 100 а.е. Интересно отметить, что орбиты 2019 EJ3 и 2017 UR52 характеризуются обратным движением и экстремально большими эксцентриситетами (0.989 и 0.996, соответственно). Оба астероида наблюдались на интервале времени около месяца и в настоящий момент стремительно удаляются на окраину Солнечной системы, т.е. фактически могут считаться потерянными.

Распределение АСЗ по эксцентриситету e и наклонению i приведено на рисунках 1.1б и 1.2а соответственно. Эксцентриситеты АСЗ заключены в интервале от 0.002 (2020 AP2) до 0.996 (2017 UR52). Максимум в распределении эксцентриситетов наблюдается в промежутке от 0.4 до 0.6: такие эксцентриситеты орбит имеют 42% АСЗ.

Наклоны АСЗ расположены в пределах от 0.006 (2021 UA1) до 165.550° (2020 BZ12) (рисунок 1.2а). При этом 53% АСЗ принадлежат к сферической подсистеме ($i > 8^\circ$), из них 6 имеют наклоны более 90°, т.е. движутся в обратную сторону по отношению к Земле и другим объектам Солнечной системы.

Абсолютные звездные величины H известных АСЗ заключены в пределах от 9.23 ((1036) Ganimed)) до 33.24 (2008 TS26) (рисунок 1.2б). Кроме того, для четырех астероидов в каталоге Э. Боуэлла и на сайте Центра малых планет приведено значение 99.99, что, по-видимому, показывает невозможность определить звездную величину по имеющемуся скудному составу наблюдений. Следует отметить, что благодаря развитию наблюдательной техники максимум в распределении АСЗ по звездным величинам со временем смещается в сторону более слабых объектов: на диаграмме, приведенной в работе (Галушина, 2014), максимальное число астероидов соответствует величине 19–20, а на рисунке 1.2б – величине 24–25.

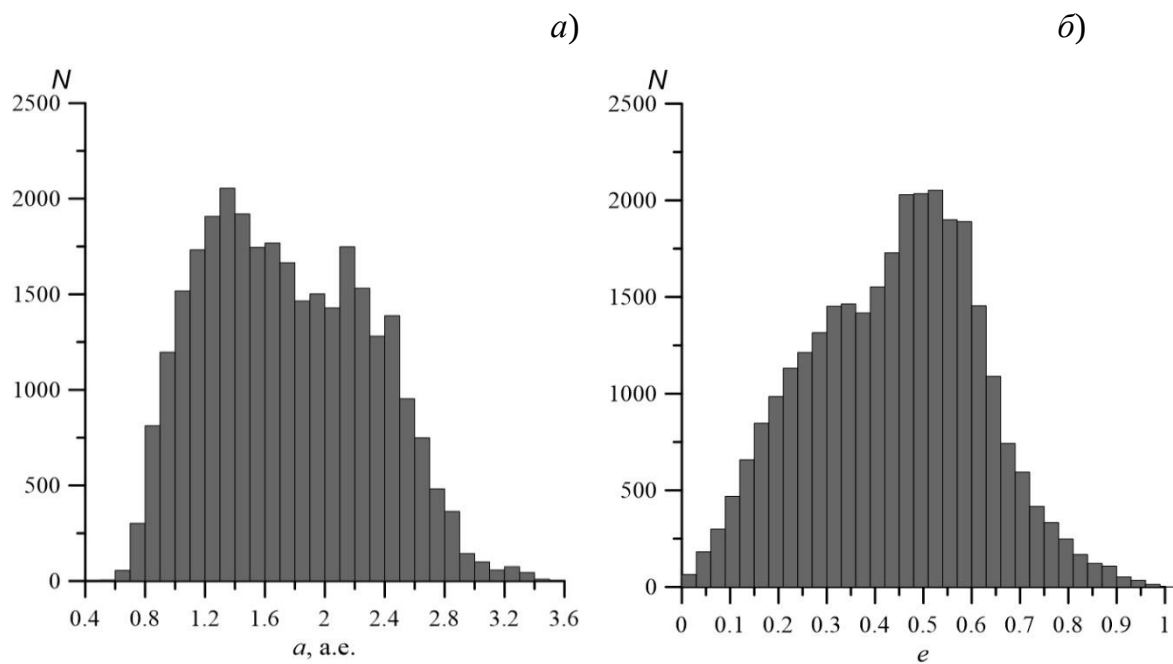


Рисунок 1.1 — Распределение АСЗ по большой полуоси a (*a*) и эксцентриситету e (*б*). N – число астероидов

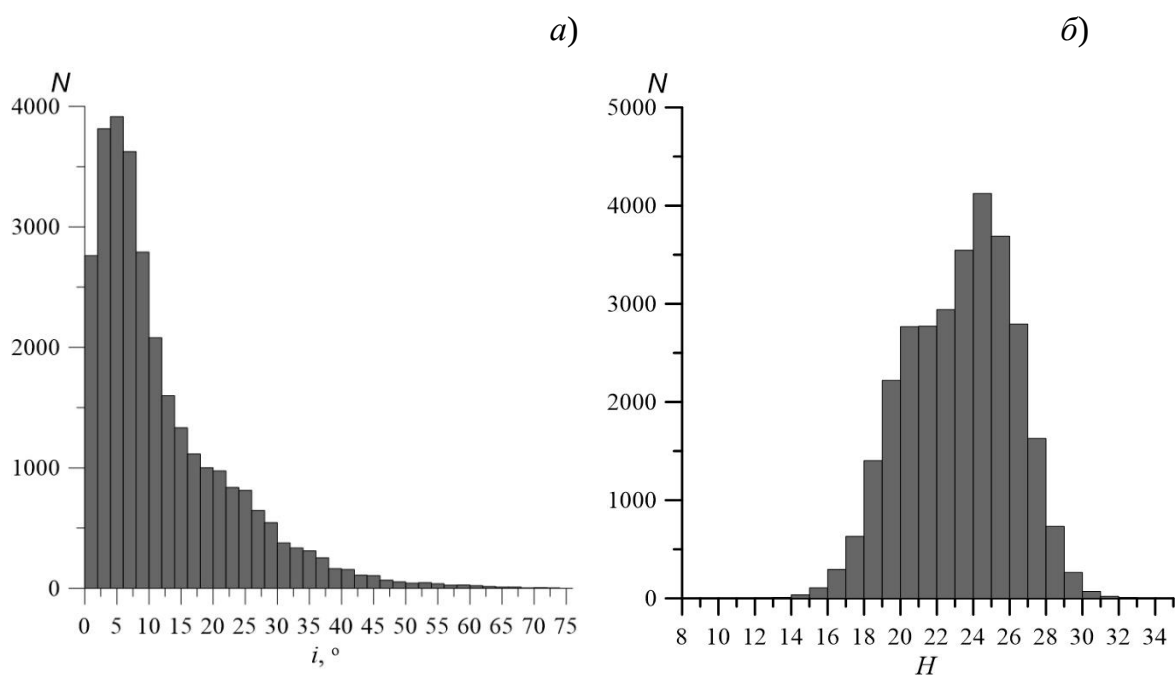


Рисунок 1.2 — Распределение АСЗ по наклону i (*a*) и абсолютной звездной величине H (*б*). N – число астероидов

Самым крупным из известных АСЗ является (1036) Ganymed диаметром 37.7 км. Немного ему уступает первый открытый объект этого класса (433) Eros с размерами $34.4 \times 11.2 \times 11.2$ км. Согласно данным сайта NASA (<https://cneos.jpl.nasa.gov/stats/totals.html>) по состоянию на 18 октября 2022 года известно 857 АСЗ с диаметром больше 1 км. Определить нижнюю границу размеров известных АСЗ гораздо сложнее, так как характеристики слабых объектов известны плохо. Для получения примерных оценок воспользуемся формулой, приведенной в работе (Pravec, Harris, 2007):

$$D = \frac{1329 \cdot 10^{-0.2H}}{\sqrt{p_v}} \quad (1.1)$$

где p_v – альbedo астероида, D – диаметр в км. Предполагая среднее альbedo 0.14 для популяции АСЗ (Mainzer et al., 2011) получим, что диаметр самых слабых известных объектов составляет порядка 1 м. Однако следует понимать, что данная граница обусловлена возможностями современной наблюдательной техники, более того такие объекты открываются только во время сближения с Землей. С другой стороны, возникает терминологический вопрос – к какому классу относить настолько мелкие объекты: к астероидам или метеороидам. Согласно принятому в 2017 году Международным астрономическим союзом определению, тела меньше 1 м считаются метеороидами (https://www.iau.org/static/science/scientific_bodies/commissions/f1/meteordefinitions_approved.pdf).

На рисунке 1.3 показана проекция на плоскость эклиптики положения всех известных АСЗ, расположенных в пределах орбиты Сатурна, по состоянию на 17 ноября 2022 года. Из рисунка 1.3 видно плотное заполнение пространства в окрестности Земли астероидами, что, по-видимому, связано с эффектом наблюдательной селекции.

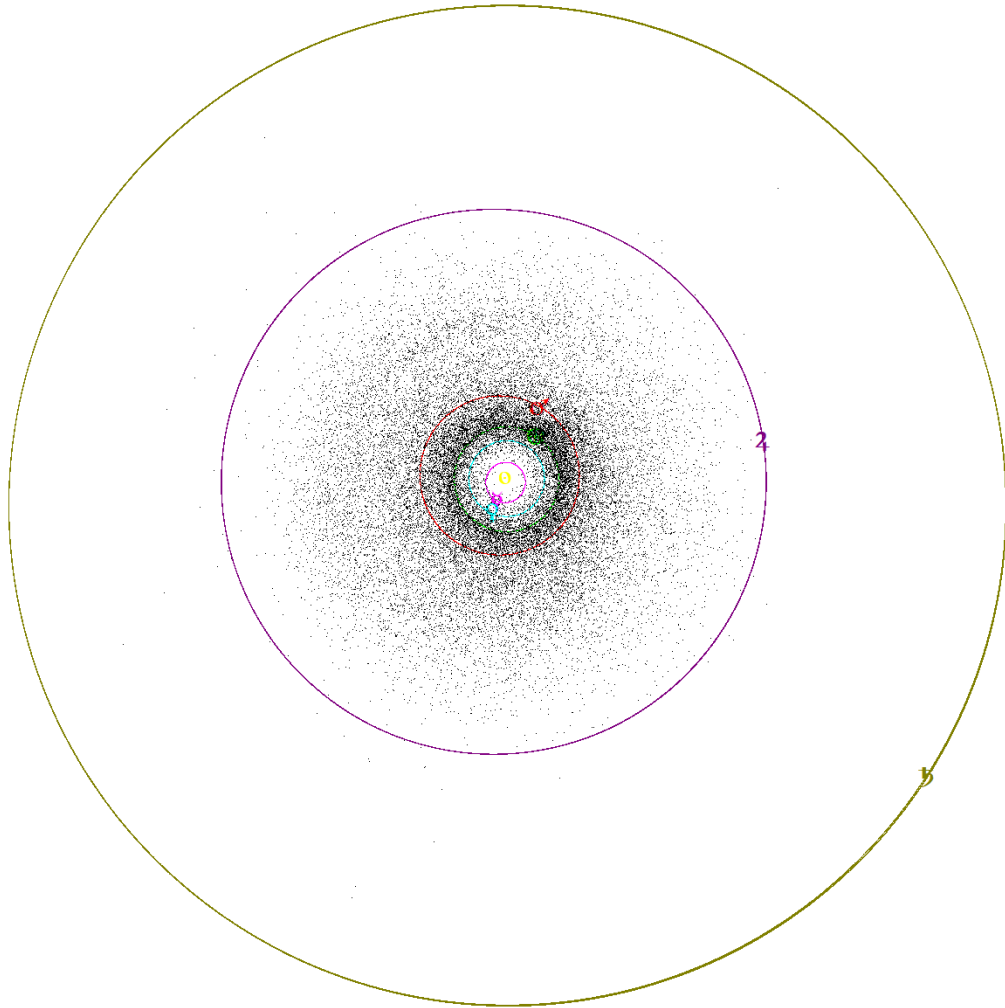


Рисунок 1.3 — Положение всех известных АСЗ в проекции на плоскость эклиптики
на 17.11.2022

1.2.2 Классификация астероидов, сближающихся с Землей

По типу орбит популяция АСЗ традиционно делится на четыре класса, которые названы по имени своих наиболее ярких представителей:

- группа Амура, для которой $1.0167 \text{ а.е.} < q \leq 1.3 \text{ а.е.}$, астероиды этой группы всегда находятся за пределами орбиты Земли;
- группа Аполлона, для которой $a > 1 \text{ а.е.}$, $q \leq 1.0167 \text{ а.е.}$, орбиты этих астероидов в проекции на плоскость эклиптики пересекают орбиту Земли;
- группа Атона, для которой $a < 1 \text{ а.е.}$, афелийное расстояние $Q \geq 0.983 \text{ а.е.}$, такие астероиды выходят за орбиту Земли только в окрестности афелия своей орбиты;

– группа Атиры, для которой $Q < 0.983$ а.е., эти астероиды постоянно находятся внутри орбиты Земли.

На рисунке 1.4 показаны проекции орбит типичных представителей данных классов на плоскость эклиптики, орбита астероида показана жирной линией, серым цветом даны орбиты астероида и планет ниже плоскости эклиптики. В таблице 1.1 приведены некоторые статистические данные о популяции АСЗ на октябрь 2022 года (верхняя строка) и на сентябрь 2014 года (нижняя строка), выбранные из каталога Боуэлла. Из таблицы видно, что число известных АСЗ за 8 лет увеличилось почти в 3 раза, т.е. в среднем за это время каждый день обнаруживалось по 6 новых объектов. Однако, с сожалением следует отметить, что число нумерованных АСЗ (с хорошо определенной орбитой) увеличился всего в два раза и составляет около 10% от общего числа.

Кроме того, таблица 1.1 показывает, что наибольшее число астероидов принадлежит классу Аполлона, наименьшее – Атиры. Скорее всего, этот факт связан не столько с реальным размером соответствующих популяций, сколько с наблюдательными возможностями. Наблюдения объектов типа Атиры возможны только в окрестности элонгаций, т.е. на небольшом интервале времени. Первый объект этого класса (163693) Atira был открыт только в 2003 году.

По размерам и степени опасности АСЗ можно условно разделить на три класса:

- крупные объекты, диаметр которых превышает 1 км; встреча Земли с таким объектом может вызвать глобальную катастрофу;
- астероиды средних размеров; к этому классу относятся объекты с диаметром от 100 м до 1 км; эти объекты способны вызвать катастрофы регионального масштаба;
- мелкие астероиды размером 10 – 100 м, столкновение с которыми приводит к локальным разрушениям.

Данная классификация позволяет сделать неутешительный вывод, что в настоящее время нам известны даже далеко не все астероиды, способные вызвать региональную катастрофу, не говоря уже о локальной. Челябинское событие 2013 года (Емельяненко и др., 2013) наглядно продемонстрировало этот факт. Согласно оценкам, приведенным в работе (Harris, 2013), популяция АСЗ размером порядка 100 метров насчитывает около 20 тысяч объектов, а АСЗ размером порядка 20 метров

(т.е. соизмеримых с прародителем челябинского метеорита) – несколько миллионов. Следует отметить, что в истории человечества было всего около десяти случаев заранее предсказанного столкновения небесного тела с Землей, первый из которых произошел в октябре 2008 года, когда с Землей столкнулся астероид 2008 TC₃ (Jenniskens et al., 2009; Алешкина и др., 2011).

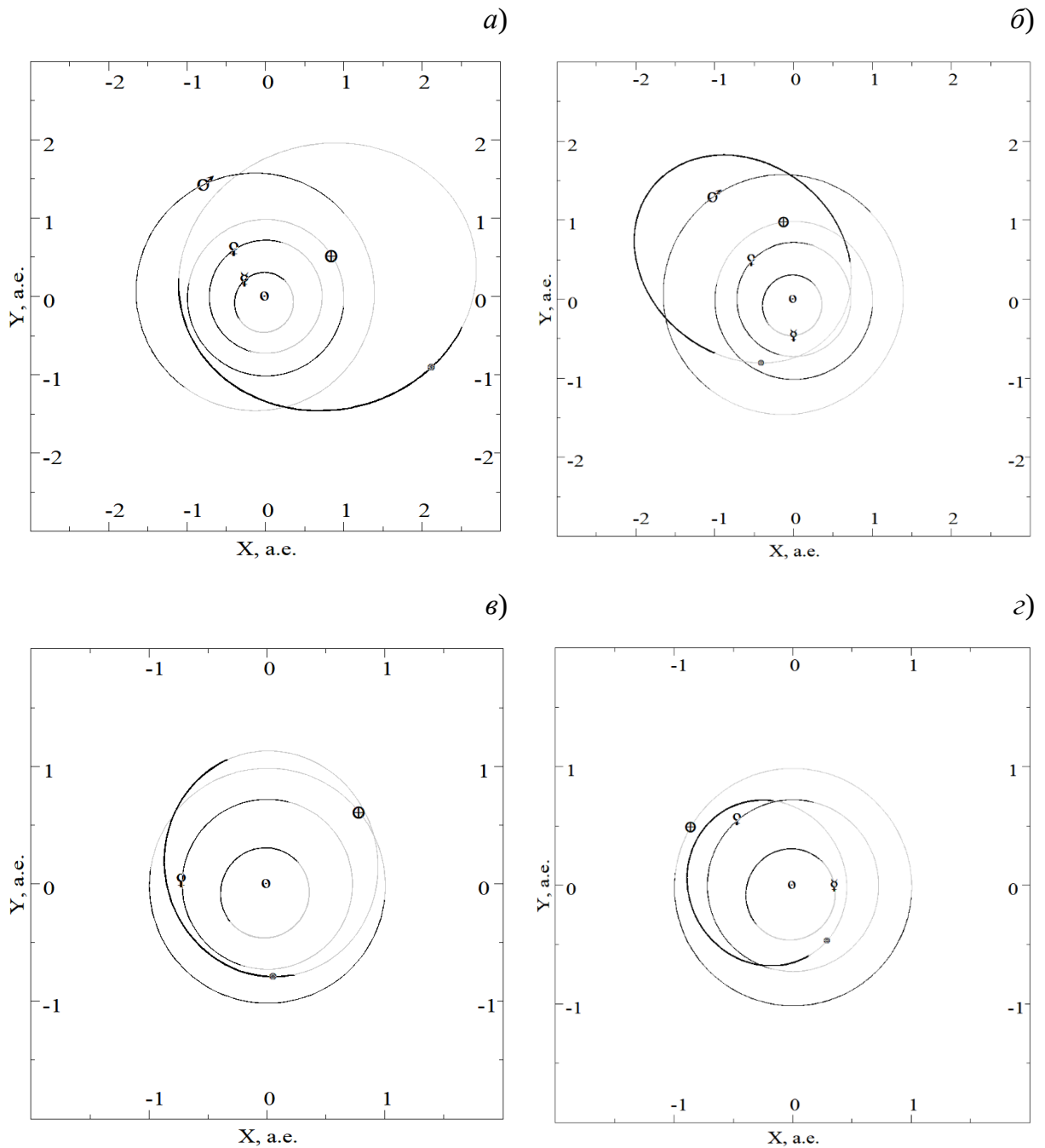


Рисунок 1.4 — Проекция орбит астероидов (1221) Amor (a), (1862) Apollo (б), (2062) Aten (в), (163693) Atira (г) и внутренних планет на плоскость эклиптики

Таблица 1.1 — Данные о популяции АСЗ

	Класс				Всего
	Амур	Аполлон	Атон	Атира	
Общее число	10951	16741	2345	28	30065
	4408	6132	864	14	11418
Нумерованные	1275	1569	256	8	3108
	657	878	141	2	1678

Из АСЗ выделяется группа потенциально опасных для Земли астероидов (ПОА). В эту группу включают АСЗ, абсолютная звездная величина которых не больше 22^m и минимальное расстояние между орбитами объекта и Земли не превышает 0.05 а.е. Первым потенциально опасным астероидом стал (4179) Toutatis, который был открыт 4 января 1989 года французским астрономом Кристианом Поля. На 2 ноября 2022 года по сведениям NASA известно 2304 потенциально опасных астероидов (<https://cneos.jpl.nasa.gov/stats/totals.html>), порядка 153 из них имеют диаметр больше 1 км, т.е. при столкновении способны вызвать глобальную катастрофу. Следует отметить, что общее число ПОА за последние 8 лет выросло в полтора раза, в то время как число объектов размером более 1 км только на 9%, что косвенным образом подтверждает оптимистичный вывод о том, что нам известны почти все крупные астероиды.

Самым крупным из известных потенциально опасных астероидов является (3122) Florence, размером около 4.9 км. Следующее сближение с Землей данного объекта произойдет только в 2057 году, когда он пройдет на расстоянии 0.05 а.е. (7.5 млн км) от центра Земли. Что касается нижней границы, то, как видно из приведенной выше формулы (1.1), звездная величина 22^m примерно соответствует диаметру 130 м, что приводит к недооцениванию опасности, исходящей от меньших объектов (Емельяненко и др., 2013).

1.3 Астероидная опасность

1.3.1 Опасные астероиды

Первым важным событием в истории астероидно-кометной опасности (АКО) стало открытие первого АСЗ – это был (433) Eros, принадлежащий группе Амура, впервые замеченный немецким астрономом Карлом Виттом в 1898 году. Исследование элементов орбиты астероида выявило практически невероятную по тем временам вещь – в проекции на плоскость эклиптики астероид пересекал орбиту Марса и на достаточно близкое расстояние приближался к орбите Земли. Правда, справедливости ради, стоит отметить, что данный объект в XIX веке практически не рассматривался как потенциальная угроза для Земли, а измерения его параллакса использовались для уточнения расстояний до Земли и Солнца.

Совершенствование наблюдательной техники и методик обработки результатов наблюдений способствовало открытию все новых и новых АСЗ. Следующий яркий представитель АСЗ, астероид (1566) Icarus (Gehrels et al., 1970), характеризующийся крайне вытянутой орбитой и отнесенный в дальнейшем к группе Аполлона, был открыт практически через полвека после Эроса Вальтером Бааде. Особенностью движения группы Аполлона стало фактическое скрещивание орбит астероидов с орбитой Земли, что само по себе привлекало внимание астрономов-наблюдателей к этим объектам. Открытие Икара в 1949 году внесло имя Паломарской обсерватории США в летопись астероидно-кометной опасности, и дальнейшие события продемонстрировали, что это произошло не случайно.

Наблюдения, проведенные Элеанорой Хелин в Паломарской обсерватории в 1976 году, позволили совершить следующий шаг в понимании проблемы астероидной опасности, а именно – заставили искать опасные для Земли объекты в другой области пространства. Открытие астероида (2062) Aton убедило астрономов-наблюдателей того времени взглянуть внутрь орбиты Земли. Данный астероид, возглавивший впоследствии группу Атонов, продемонстрировал возможность сближения астероидов с Землей из внутренней области космического пространства. Стоит упомянуть, что наблюдения таких объектов усложнены по сравнению с наблюдениями астероидов с перигелийными расстояниями большими, чем 1 а.е.

Открытия все большего числа АСЗ, безусловно, формировало некоторые представления о возможном столкновении Земли с различного рода космическими объектами, но по-настоящему тень катастрофы коснулась планеты 4 января 1989 года, когда французский астроном Кристиан Полля обнаружил астероид (4179) Toutatis (Sitarski, 1998; Hudson et al., 2003), который открыл класс потенциально опасных для Земли объектов. Любопытным историческим фактом, а также важным компонентом в исследованиях в области астероидо-кометной опасности (АКО), является тот факт, что астероид Тутатис первоначально был обнаружен в 1934 году, но впоследствии оказался потерян, что показывает необходимым регулярного мониторинга опасных тел.

Невозможно говорить об истории АКО и ничего не сказать про астероид (99942) Apophis, открытый в 2004 году в обсерватории Китт-Пик. Данный объект приобрел чрезвычайную популярность в среде мирового сообщества, как научного, так и светского, в связи с ненулевой и относительно высокой вероятностью столкновения астероида с Землей в 2036 году, причем столкновение это должно было оказаться следствием тесного сближения Апофиса и Земли в 2029 году (Апофис первоначально получил отметку 4 по Туринской шкале). По современным оценкам столкновение в 2036 году полностью исключено, причем в основе текущего анализа лежат наблюдения, полученные в 2013 году (Wlodarczyk, 2013). Это значит, что с 2004 года по 2013 год Апофис являлся чуть ли не ключевой фигурой в проблематике АКО, и неудивительно, что именно этот объект оказался своего рода «подопытным кроликом» для многочисленных астрометрических и небесно-механических исследований (Delbo et al., 2007; Соколов и др., 2012; Быкова, Галушина, 2010).

Апофис в числе лидеров по количеству позиционных, фотометрических, спектрометрических и радиолокационных наблюдений среди АСЗ. Изучение теории движения Апофиса позволило выявить тонкие структуры в наборе возмущающих факторов в движении астероида, такие как влияние сжатия Солнца и Юпитера, необходимость учета светового давления и эффекта Ярковского, потребность в записи уравнений движения в релятивистской форме (Farnocchia et al., 2013a; Шор и др., 2012; Скрипниченко, Галушина, 2013). Различными научными группами во всем мире разработаны сценарии десятков космических миссий

(Ивашкин и др., 2013; Поль и др., 2008), целью которых является Апофис: часть из них ориентирована на предотвращение возможной катастрофы, часть – на изучение физических свойств и параметров движения астероида, часть – на тестирование потенциально возможных систем противодействия АКО. История изучения Апофиса оказала колоссальное влияние на становление проблематики АКО в целом.

В период всеобщего увлечения Апофисом одно важное событие осталось почти незамеченным общественностью – это падение астероида 2008 TC₃ в районе северного Судана 7 октября 2008 года (Jenniskens et al., 2009). Учитывая размеры объекта (порядка 4 м) данное столкновение можно было бы счесть вполне заурядным явлением, если бы не одно обстоятельство – впервые в истории изучения проблемы астероидной опасности падение небесного тела было предсказано заранее. Астероид 2008 TC₃ открыт в обсерватории Маунт Леммон (Аризона, США) за 19 часов до столкновения с нашей планетой, последующие наблюдения подтвердили первоначальные расчёты и позволили определить район падения, что существенно облегчило последующие поиски. Экспедиции Хартумского университета, отправленной в суданскую пустыню, удалось найти несколько обломков метеорита, общей массой около 4 кг. Особо хочется отметить роль российских ученых – около трети наблюдений этого интересного объекта было выполнено в Главной (Пулковской) астрономической обсерватории РАН (Алешкина и др., 2011). Как отмечалось выше, к настоящему времени удалось предсказать около десяти столкновений астероидов с Землей.

Еще одним примером заблаговременно предсказанного события является необычайно тесное сближение с Землей астероида (367943) Duende (Wlodarczyk, 2012; Заусаев и др., 2012; Devyatkin et al., 2016; Benson et al., 2020; Moskovitz et al., 2020) – 15 февраля 2013 года он прошел на расстоянии 27700 км от геоцентра (ближе, чем орбита геостационарных спутников). Данный объект был открыт 23 февраля 2012 года на обсерватории Ла-Сагра и, благодаря сближению 2013 года, сыграл роль своего рода индикатора готовности человечества к решению проблем астероидно-кометной опасности. Тесное сближение с объектом диаметром порядка 30 метров само по себе событие нетривиальное, и, случись оно на заре осознания проблематики АКО, вызвало бы серьезный интерес со стороны широких масс населения. В данном же случае астероид не представлял угрозы столкновения, но интерес был проявлен

научным сообществом, так как подобное прохождение объекта вблизи Земли – отличный тренажер для тестирования систем наблюдения и противодействия для последующих, возможно более впечатляющих, случаев. Если говорить кратко, анализ данных, полученных на интервале времени вблизи тесного сближения, выявил ряд недостатков текущих методик наблюдения подобных явлений, а также некоторые особенности при изучении элементов орбит объекта и его орбитальной эволюции.

В заключении данного подраздела необходимо упомянуть о совсем недавнем событии, а именно об открытии астероида 2022 UE28 17 октября 2022 года. На середину ноября 2022 года этот объект имел отметку 1 по Туринской шкале – это единственная на тот момент ненулевая оценка. Учитывая абсолютную звездную величину ($M = 21.38$), можно оценить диаметр $D \approx 180$ м, т.е. данный астероид относится к потенциально опасным, и столкновение может привести к региональной катастрофе.

Таким образом, ни один из известных сейчас астероидов не представляет серьезной угрозы для Земли. Однако, как показывает опыт, наиболее опасные для Земли небесные тела – те, которые еще не открыты. Истории падений таких объектов и будут посвящены следующие два подраздела.

1.3.2 Астроблемы

На поверхности Земли, как и на других телах Солнечной системы, обнаружено множество кратеров различного размера, чье происхождение связано с падением космических тел. Подобные деформации поверхности названы астроблемами. Особенности климатического устройства Земли и наличие на ней биосферы, а также большого объема воды в жидкой форме значительно сглаживают астроблемы (в первую очередь, изменение поверхности вследствие эрозии почвы от воды и ветров), что усложняет их обнаружение. Только падение относительно крупного объекта формирует ударный кратер, исследование которого позволяет оценить энергию столкновения, а значит физические параметры упавшего космического тела. Стоит упомянуть, что изучение мест падения метеоритов важно, как для проблематики астероидной опасности, так и для понимания картины происхождения и эволюции Солнечной системы.

Кратеры метеоритного происхождения практически полностью покрывают тела Солнечной системы, лишённые атмосферы. К примеру, астроблемы на Луне сохраняются в течение миллиардов лет, но поверхность небесного тела снова и снова деформируется из-за падения новых объектов. Это говорит лишь о том, что столкновение различных тел в Солнечной системе – явление рядовое, причем подобные столкновения играли значительную роль в процессе формирования планет и их спутников. С течением времени вероятность столкновения Земли и планет с астероидами и кометами несколько снижается, в то время как на этапе формирования Солнечной системы большая часть вещества на поверхность планеты была притянута именно таким образом. Около 80% железа на Земле и большая часть воды – космического происхождения (Robert, 2001). Можно сказать, что человечеству повезло развиваться в относительно спокойную с точки зрения космических угроз эпоху.

Такое явление как массовое вымирание биоты на Земле связывают с падением крупных астероидов. Например, массовое вымирание, произошедшее 65 млн лет назад и означавшее финал эры динозавров, по одной из версий связывают с падением объекта диаметром порядка 10 км. На возможность столкновения указывают так называемые иридиевые аномалии в слоях породы, соответствующих той эпохе. Стоит упомянуть, что иридий сам по себе – редкоземельный элемент, зато в составе некоторых астероидов его содержание в 300 раз превышает среднее содержание этого вещества в коре Земли. Открытие кратера Чиксулуб в Мексиканском заливе, который по времени происхождения соответствует эпохе 65 млн лет назад, является сильным аргументом в пользу подобной теории. На данный момент известно, что падение столь крупных объектов в нашу эпоху происходит не чаще, чем раз в 100 млн лет (Perna et al., 2013). Если посмотреть на эту статистику с другой стороны, можно предположить, что каждые 100 млн лет на поверхности Земли происходит практически повсеместное вымирание биосферы, и это событие связано с метеоритной угрозой.

Одним из самых известных кратеров на Земле является кратер Бэррингера в Аризоне (<http://barringercrater.com/>) диаметром 1200 метров и глубиной 180 метров. Кратер образован падением небесного тела порядка 50 метров в диаметре около 50 тыс. лет назад. Следует отметить, что размер столкнувшегося

с Землей астероида был намного меньше Апофиса и незначительно превышал размер (367943) Duende.

1.3.3 Метеориты

Вполне разумным кажется то, что на становление проблематики АКО повлияло еще и обнаружение значительного числа различных метеоритов – продуктов столкновения астероидов с Землей. Находки крупных фрагментов метеоритов говорят о том, что столкновения с опасными телами случались и ранее, причем последствия их варьировались от незначительных до глобально-катастрофических.

Порядка 80 тыс. лет назад в атмосферу Земли вошел космический объект, вещество которого выпало в районе юго-западной Африки. Данное столкновение не вызвало серьезных разрушений или катастрофических последствий, не образовался сколько-нибудь значительный ударный кратер. Метеорит, найденный впоследствии на месте падения этого объекта, на 84% состоял из железа, обладал массой более 66 тонн, и объемом более 9 куб. м. Метеорит Гоба – крупнейший из ныне известных метеоритов, являющийся в дополнение самым большим куском железа природного происхождения на планете. Несмотря на большие размеры, метеорит был найден случайно, при распашке земли на одной из ферм в Намибии.

Другой пример выпадения большого количества метеоритного вещества произошел в поселке Царев Волгоградской области в 1922 году. С территории порядка 15 кв. км собрано более полтонны метеоритного вещества, наиболее крупный кусок в данном случае обладал массой чуть меньше 300 кг. Физические свойства этого метеорита значительно отличались от тех, что были свойственны Гобе – вблизи поселка Царев пролился метеоритный дождь преимущественно хондритной природы.

Наиболее обильный метеоритный дождь XX-го века также выпал над территорией России – это произошло 12 февраля 1947 года в горах Сихотэ-Алинь на Дальнем Востоке. Всего было найдено около 300 осколков общей массой порядка 30 тонн. Площадь поражения составила 35 кв. км, глубина самой большой воронки достигала 6 м.

Нельзя не упомянуть знаменитое Тунгусское событие (Васильев, 2004), до сих пор вызывающее споры в кругах экспертов по проблематике АКО. 30 июня 1908 года на территории России, близ местечка Ванавара, в районе реки Подкаменная Тунгуска, космическое тело, вероятно, кометного происхождения, стало причиной мощного взрыва, изуродовавшего лес на территории свыше 2000 кв. км. Мощность взрыва в 1000 раз превосходила мощность бомбы, сброшенной на Хиросиму во время Второй мировой войны, а ударная волна от взрыва несколько раз обогнула Землю. Об этом событии в различных источниках может содержаться прямо противоположная информация, но на текущий момент наиболее справедливо приписать этот феномен к проблематике АКО. Вполне очевидно, что это событие вызвало бы более заметный резонанс, если бы произошло не на краю России, а вблизи крупного города или иного населенного пункта. Данный довод привносит очередную идею в проблематику АКО – с ростом численности населения городов и расширением границ агломераций уровень опасности от астероидно-кометной угрозы лишь возрастает. В современных городах все больше технически сложных и опасных объектов, любая нештатная ситуация на которых может привести к техногенной катастрофе. Даже небольшой по своим размерам объект при условии падения вблизи городской агломерации может причинить серьезный ущерб в виде материальных потерь и человеческих жертв.

Событие, произошедшее 15 февраля 2013 года над городом Челябинск (Емельяненко и др., 2013), значительно уступает по силе взрыва Тунгусскому феномену, но даже это явление привело к экономическому ущербу в 1 млрд рублей и к ранениям более 1500 человек. Данное событие является знаменательным для проблематики АКО в целом по следующим причинам:

- явление фиксировалось с множества камер наружного видеонаблюдения и автомобильных видеорегистраторов, что позволило оценить силу взрыва и направление распространения осколков;

- большинство пострадавших получили ранения не в результате поражения осколками метеорита или от жара, излучаемого объектами при взрыве в атмосфере, а от последствий ударной волны, разрушившей уязвимые элементы инфраструктуры зданий: оконные стекла, плохо укрепленные стены, двери и прочее;

– данное событие, несмотря на развернутую систему слежения, созданную в западных странах, не было предсказано. Астероид, упавший на Челябинск, оказался полной неожиданностью для мировой астрономии, несмотря на кажущуюся степень готовности к противостоянию угрозам АКО.

1.3.4 Пути решения проблемы астероидной опасности

Решение данной проблемы можно условно разделить на три этапа:

1. выявление, каталогизация и наблюдения потенциально опасных для Земли астероидов;
2. исследование движения известных объектов и оценка вероятности столкновения;
3. предотвращение столкновения в случае необходимости.

Реализация первого этапа связана с проведением как позиционных, так и фотометрических и спектрографических наблюдений потенциально опасных астероидов. Однако, несмотря на развитую сеть наземных и космических обсерваторий, еще открыты далеко не все опасные объекты, а для многих обнаруженных плохо известны не только физические параметры, но и положения в пространстве. Для максимально тщательного слежения за всей совокупностью ПОА требуется участие как наземных, так и космических обсерваторий, введение в строй новых автоматизированных и роботизированных программных комплексов. Кроме того, большое значение имеет развитие методик наблюдений и обработки снимков, в том числе разработка программного обеспечения, эффективно решающего эти задачи. В данной работе в числе прочего приводятся результаты наблюдений астероидов, выполненные с использованием оборудования центра коллективного пользования «Терскольская обсерватория» как непосредственно автором, так и под его руководством.

В решении второй проблемы на помощь приходит небесная механика, в которой достигнуты существенные успехи. В настоящее время разработаны многочисленные методы определения орбиты по позиционным наблюдениям, изучения вероятностной орбитальной эволюции и оценки вероятности столкновения. Основная часть данной диссертационной работы посвящена подобным исследованиям.

Однако реальные возможности предсказания столкновения ограничены оперативностью и полнотой получения наблюдений астероидов, поэтому в истории было всего около десяти случаев предсказанного падения небесного тела. Это были объекты небольшого размера, упавшие в малонаселенные районы, вследствие этого меры предотвращения не потребовались, т.е. решение данной задачи на текущий момент остается только теоретическим. В настоящий момент разработано большое число методов предотвращения столкновения (один из них с участием автора данной работы), практическое же применение ограничено рядом космических миссий к астероидам, из которых отдельного упоминания заслуживает столкновение американского зонда DART (Double Asteroid Redirection Test) с астероидом Диморф (Lolachi et al., 2023). В ходе миссии DART было проведено тестирование метода изменения орбиты путем столкновения космического аппарата с астероидом Диморф. Согласно расчетам, планировалось изменение периода обращения астероида-спутника Диморф вокруг главного компонента Дидима на 73 секунды. Однако результирующее изменение составило 32 ± 2 мин, т.е. примерно в 27 раз больше. Несмотря на данную неточность, апробация признана успешной.

Таким образом, в настоящее время разработаны основные принципы решения проблемы астероидной опасности, но для их реализации требуются существенные ресурсы.

1.4 Проблемы и методы изучения динамики АСЗ

1.4.1 Получение наблюдений

При прогнозировании движения астероидов наибольшую значимость представляют астрометрические наблюдения, причем для точного определения орбиты они должны занимать значительную дугу, по возможности сопоставимую с орбитальным периодом. Все увеличивающееся число известных АСЗ требует все большего количества наблюдательных станций, более-менее равномерно покрывающих земной шар. На рисунке 1.5 представлено расположение обсерваторий на Земле, цвет круга соответствует логарифму числа наблюдений АСЗ, представленных на сайте Центра малых планет (<https://minorplanetcenter.net>).

Из рисунка 1.5 видно, что большинство обсерваторий сконцентрировано в Европе и США.

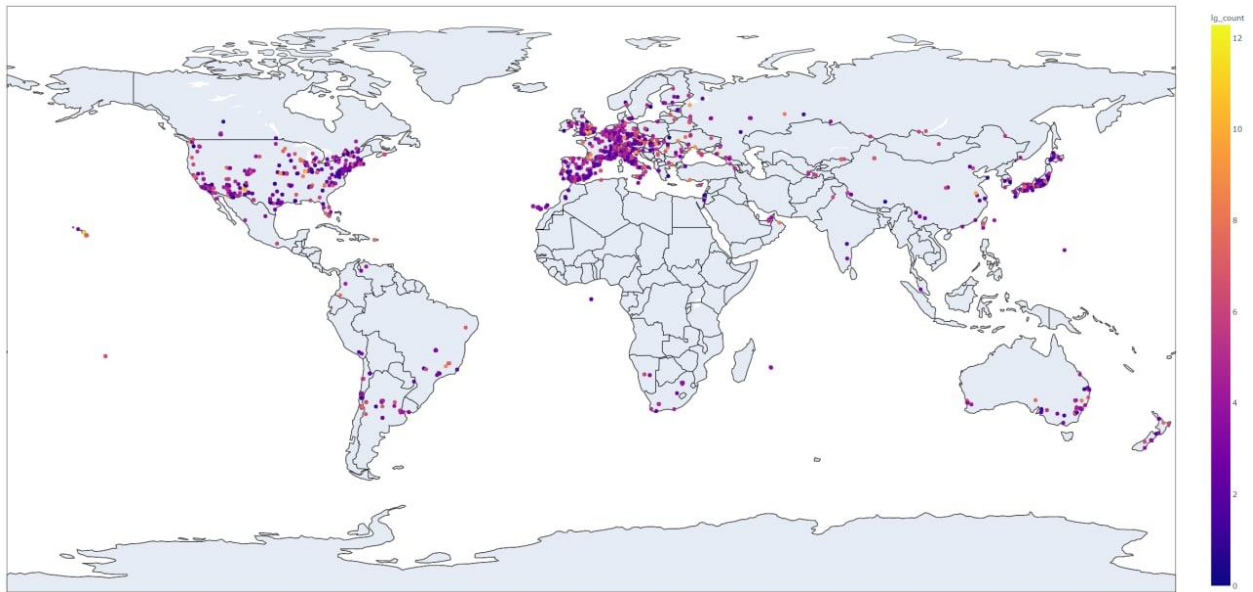


Рисунок 1.5 — Расположение обсерваторий, наблюдающих АСЗ

Кроме количества важно и качество получаемого наблюдательного материала, причем большую роль здесь играют не только прогресс в телескопостроении, но и совершенствование методик наблюдений и обработки снимков. В частности, следует обратить внимание на астрометрические каталоги, используемые при отождествлении кадров и обработке измерений, которые в настоящее время обновляются и дополняются, в значительной степени благодаря миссии Gaia (<https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/earlydr3>). Важное значение также имеет методика обработки полученных снимков и используемое в этом процессе программное обеспечение. В настоящее время существует относительно большой выбор программ, реализующих астрометрическую обработку ПЗС-изображений, среди них IZMCCD (Izmailov et al., 2010), Astrometrica (<http://www.astrometrica.at/>), Апекс-II (Девяткин и др., 2010), SAOImage DS9 (<http://hea-www.harvard.edu/RD/ds9/>). Каждая из них обладает своими достоинствами и недостатками, поэтому выбор осуществляется индивидуально.

Высокоточные наблюдения АСЗ, получаемые на разных обсерваториях мира, участвуют в пополнении международных баз данных о движении малых тел Солнечной системы и являются источником эфемерид (например, сервис эфемерид

Центра малых планет <https://minorplanetcenter.net/iau/MPEph/MPEph.html> и служба вычисления эфемерид JPL Horizons NASA <https://ssd.jpl.nasa.gov/horizons/>).

1.4.2 Ошибки численного моделирования

Поскольку прогнозирование движения астероидов, сближающихся с Землей, возможно только численными методами, то каждый этап исследования подвержен ряду различных погрешностей, среди которых можно выделить следующие:

- параметрические;
- модельные;
- методические;
- вычислительные.

Вычислительная погрешность связана с ошибками округления, определяется размером используемой разрядной сетки и числом шагов интегрирования, может быть уменьшена переходом на большую разрядную сетку и оптимизацией вычислений. Методические ошибки зависят от используемого интегратора (Авдюшев, 2015). Модельные ошибки обусловлены выбором модели сил, точнее величиной неучтенных возмущающих факторов. Параметрическая погрешность связана с ошибками начальных параметров модели – координатами, компонентами скорости и физическими параметрами. Следует отметить, что из всех видов ошибок в большинстве случаев параметрическая самая большая и самая трудно устранимая, поскольку для ее уменьшения необходимо получение новых наблюдений.

1.4.3 Модель сил

Традиционно движение астероидов рассматривается в рамках возмущенной задачи двух тел в гелиоцентрической системе координат (Дубошин, 1968), отнесенной к эклиптике или экватору эпохи 2000.0. Важным вопросом является выбор модели сил, влияние которых будет учитываться при интегрировании дифференциальных уравнений движения. Набор возмущающих факторов зависит от особенностей орбиты исследуемого объекта (наличия сближений с планетами, перигелийного расстояния и т.д.) и требуемой точности. Использование самой полной модели не всегда является разумным как минимум по двум причинам: во-первых, дополнительные вычисления увеличивают ошибку округления,

во-вторых, неточное знание параметров модели может привести к ухудшению точности прогноза.

Рассмотрим различные модели сил на примере астероида Апофис. Одна из самых полных моделей разработана и используется в Институте прикладной астрономии Российской академии наук. Авторы работы (Кочетова и др., 2009) учитывают следующие возмущающие факторы: влияние больших планет, Плутона, Луны, Цереры, Паллады, Весты, сжатия Земли и Солнца, светового давления, релятивистских эффектов (РЭ) от Солнца и Юпитера и эффекта Ярковского. Следует отметить, что тесное сближение с Землей в 2029 году существенно изменит орбиту астероида, что приведет к изменению в структуре возмущений.

На рисунке 1.6 представлены результаты исследования структуры возмущений рассматриваемого астероида, выполненного с помощью программного комплекса ИДА (Galushina, Letner, 2021). Здесь Δr означает разницу между положениями, полученными с полной моделью сил и с исключением одного возмущающего фактора. Силы на графике расположены в порядке убывания Δr . Значения на рисунке 1.6а соответствуют промежутку от момента наилучшей обусловленности (2017 год) до тесного сближения в апреле 2029 года, на рисунке 1.6б представлены результаты исследования эволюции на 100 лет. Необходимый набор сил зависит от требуемой точности, например, как видно из рисунка 1.6а, для достижения точности 10^{-7} а.е. нужно учитывать влияние больших планет, Луны, Цереры, релятивистских эффектов от Солнца и эффекта Ярковского. Рисунок 1.6б показывает, что на столетнем интервале влияние этих сил превышает 1 а.е., что является следствием существенного изменения орбиты при тесном сближении. При получении рисунков 1.6 и 1.7 использованы наблюдения с сайта Центра малых планет, в том числе выполненные на Терскольской обсерватории.

Особое внимание исследователей в последнее время привлекает эффект Ярковского, связанный с переизлучением тепловой энергии вращающимся телом (например, (Bottke et al., 2006), (Perez-Hernandez, Benet, 2022) и др.). Эффект Ярковского зависит от ряда физических свойств астероида (Greenberg et al., 2020), в частности параметров вращения, которые известны для очень малого числа астероидов. В этой ситуации единственным выходом является предположение о зависимости рассматриваемой силы от гелиоцентрического расстояния и попытки

найти коэффициент путем включения его в число оцениваемых параметров в процессе улучшения орбиты (Del Vigna et al., 2018). Обычно предполагается, что величина эффекта Ярковского обратно пропорциональна квадрату расстояния до Солнца. Однако для получения более-менее адекватных оценок необходимо, чтобы объект наблюдался на интервале больше одного оборота, но в любом случае точность определения параметра эффекта Ярковского ограничена точностью современных наблюдений (Галушина и др., 2021). В следующем подразделе эффект Ярковского описан более подробно.

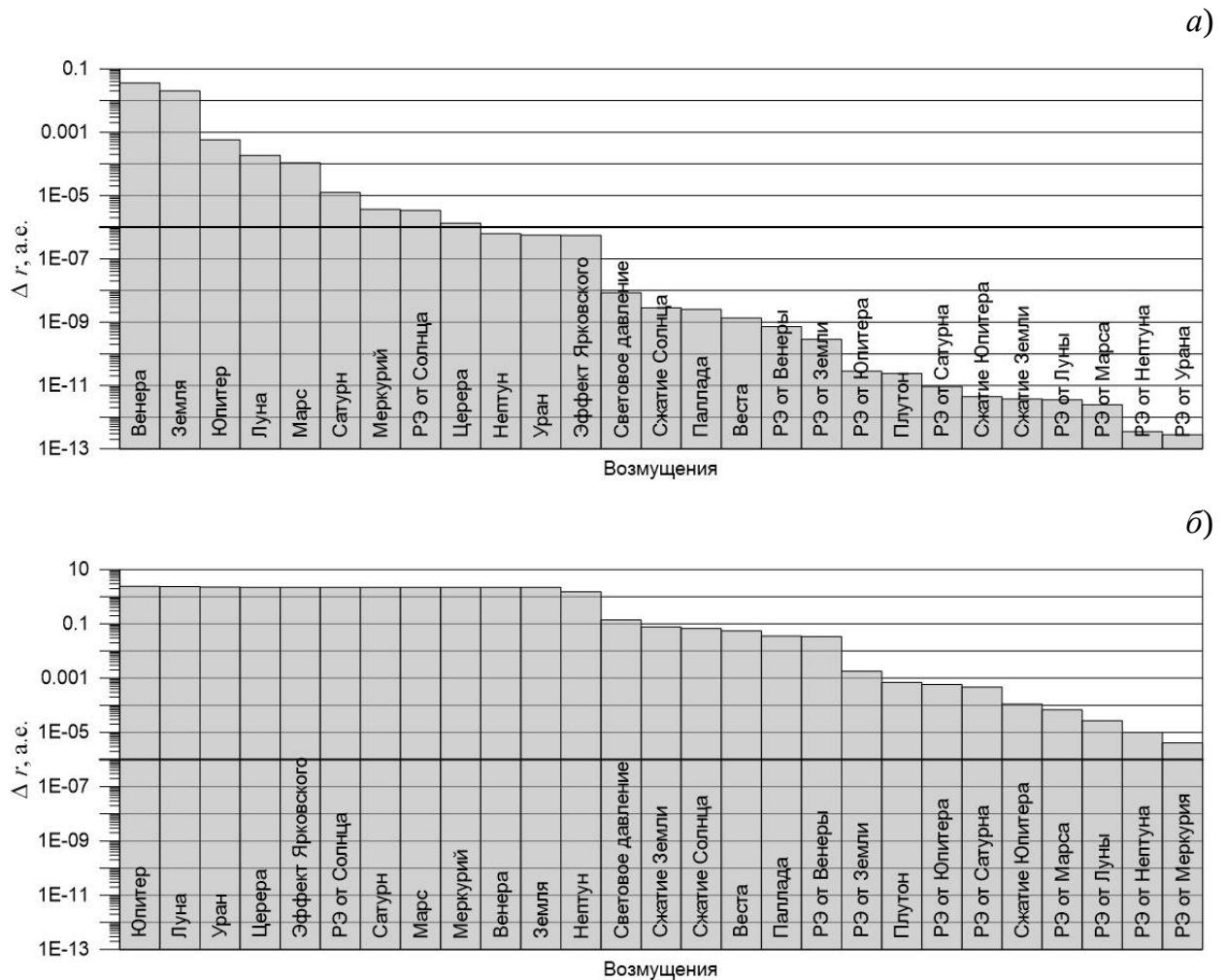


Рисунок 1.6 — Структура возмущений астероида (99942) Apophis до 2029 года (a) и до 2115 года (б)

Аналогичные проблемы возникают при попытке учесть световое давление — диаметр, масса и альbedo для большинства астероидов или неизвестны, или известны с большой погрешностью. Например, в работе (Brozovic et al., 2018) приведены значения диаметра и геометрического альbedo для Апофиса:

$D = 0.34 \pm 0.04$ км, $p_V = 0.35 \pm 0.10$. Мы оценили, как влияют неопределенности в значениях альбедо и диаметра на прогнозируемое положение астероида. На рисунке 1.7 представлено расстояние между положениями Апофиса, полученными на один и тот же момент времени с граничными значениями альбедо (0.34 и 0.36) и диаметра (300 и 380 м). Результаты показывают, что если до сближения в 2029 году влияние незначительно и не превышает ошибки начальных данных, то после резкого изменения орбиты в апреле 2029 года небольшие отклонения увеличиваются на несколько порядков и составляют миллионы километров.

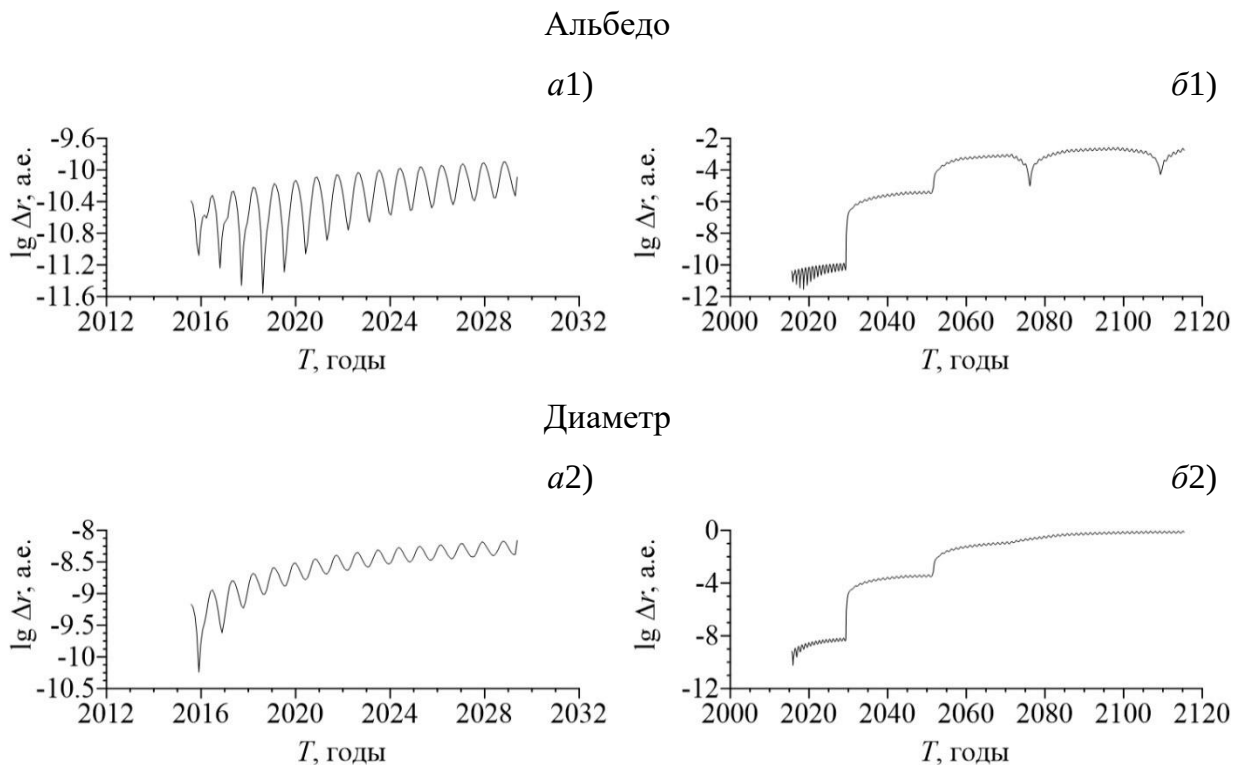


Рисунок 1.7 — Влияние на движение астероида (99942) Аporphis неопределенности значений альбедо ($a1$, $b1$) и диаметра ($a2$, $b2$) до 2029 года (a) и до 2115 года (b)

Как упоминалось выше, наибольшее возмущающее воздействие на движение астероидов оказывают большие планеты, поэтому очень важно знать их положение с хорошей точностью. В настоящее время создано несколько вариантов эфемерид планет Солнечной системы (Folkner et al., 2014; Питьева и др., 2019) и разрабатываются новые. В работе (Соколов и др., 2008) проведено сравнение расчета эволюции астероида (99942) Аporphis с использованием эфемерид DE403, DE405 и EPM2004, получены моменты сближений 2029 и 2036 годов и расстояния до геоцентра. Если в 2029 году расстояния, полученные с использованием

различных эфемерид, отличаются на десятки километров, а моменты времени совпадают до сотых долей секунды, то к 2036 году отличия достигают часов и миллионов километров.

1.4.4 Эффект Ярковского

Эффект Ярковского описывает небольшую, но важную силу, которая влияет на орбитальное движение метеороидов и астероидов диаметром менее 20 км. Причиной этого является солнечный свет: когда эти тела нагреваются на Солнце, они в конечном итоге переизлучают энергию в тепловом диапазоне волн, что, в свою очередь, создает малую тягу. Это ускорение отдачи намного слабее, чем гравитационные силы, но оно может вызывать измеримые орбитальные изменения в течение десятилетий и существенные орбитальные эффекты в течение миллионов или миллиардов лет. Данное физическое явление также создает тепловой крутящий момент, который в дополнение к крутящему моменту, создаваемому рассеянным солнечным светом, может изменять скорости вращения и наклоны небольших тел. Такой ротационный вариант был назван эффектом Ярковского-О'Киф-Радзиевского-Паддака (YORP).

Первое упоминание эффекта относится к 1901 г., когда Ярковский И.О. в брошюре «Плотность светового эфира и оказываемое им сопротивление движению» (Ярковский, 1901; Beekman, 2006) написал, что нагреваемая солнечным теплом вращающаяся в прямом направлении планета должна испытывать трансверсальное ускорение. Работа не вызвала отклика в научных кругах и только в 1951 г. Э. Эпик (Orlik, 1951) обратил внимание на возможную важность эффекта Ярковского в процессе перемещения метеороидов в Солнечной системе. Почти одновременно в 1952 г. В.В. Радзиевский (Радзиевский, 1952) рассматривал влияние светового давления на движение вращающегося тела, имеющего неоднородную поверхность, участки поверхности тела различались значениями альбедо. Далее в 1969 – 1976 гг. С. Пэддэк (Paddack, 1969) и Дж. О'Киф рассмотрели тело нерегулярной формы и показали, что под действием солнечного излучения возможно изменение скорости осевого вращения тела. И только в 2000 г. Д. Рабинкэм (Rubincam, 2000) окончательно сформулировал задачу, установил терминологию и предложил название «эффект Ярковского–О'Кифа–Радзиевского–

Пэдэка (YORP-эффект). В настоящее время рассматриваемым эффектам посвящено большое число исследований, основные сведения об их природе описаны, в частности, в работах (Bottke et al., 2006; Vokrouhlicky, 2015).

Можно выделить суточную и сезонную составляющую эффекта Ярковского. Основная идея, лежащая в основе суточного эффекта, представлена на рисунке 1.8, на котором показан сферический астероид на круговой орбите вокруг Солнца.

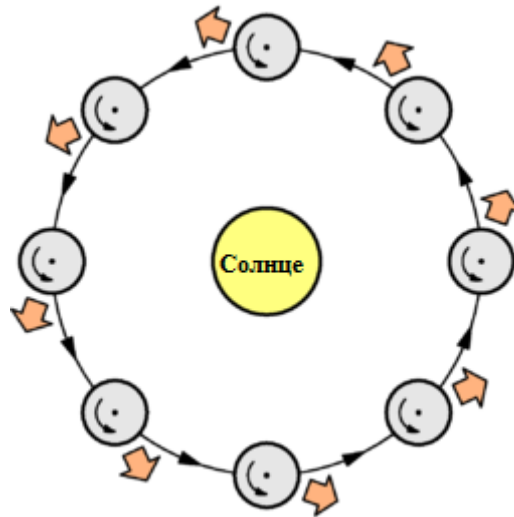


Рисунок 1.8 — Суточный эффект Ярковского с осью вращения астероида, перпендикулярной плоскости орбиты

Для простоты ось вращения астероида считается нормальной к плоскости орбиты. Солнечная сторона нагревается под воздействием Солнца, а тепло астероидом перераспределяется в космос (обычно в инфракрасной части спектра, если только астероид не расположен очень близко к Солнцу). Инфракрасный фотон уносит импульс, когда покидает астероид, в соответствии с соотношением $p_h = E/c$, где p_h — импульс фотона, E — его энергия, а c — скорость света. Поскольку больше энергии и, следовательно, больше импульса отходит от более горячей части астероида, чем от более холодной, астероид получает толчок в направлении от более горячей части.

Если бы у астероида не было тепловой инерции, то распределение температуры было бы симметричным относительно подсолнечной точки, и астероид испытал бы толчок радиально наружу от Солнца. Единственным последствием этой силы будет ослабление влияния Солнца на астероид. Тем не менее, все тела имеют

тепловую инерцию, которая вызывает задержку, так что самая горячая часть астероида находится во второй половине дня, а не в подсолнечной точке. Это похоже на Землю, где после полудня самое теплое время суток. В результате сила, действующая на астероид, имеет не только радиальную, но и трансверсальную составляющую.

Трансверсальная составляющая вдоль пути вызывает вековое увеличение большой полуоси (и, в меньшей степени, эксцентриситета) для прямого вращения, показанного на рисунке 1.8, так что со временем малая сила Ярковского может существенно изменить орбиту. Знак суточного эффекта Ярковского зависит от направления вращения. Если бы у астероида, показанного на рисунке 1.8, вращение было ретроградным, то орбита сжималась бы вместо расширения, тогда как если бы ось вращения находилась в плоскости орбиты, суточный эффект Ярковского бы полностью отсутствовал. Величина суточного эффекта также зависит от того, насколько близко тело находится к Солнцу, от наклона оси вращения тела относительно плоскости орбиты и от физических характеристик тела (т.е. размера, формы, температурных свойств и скорости вращения). Взаимодействие этих факторов означает, что существует оптимальный размер для максимизации суточного эффекта Ярковского для данной скорости вращения и тепловой структуры. Очень большой объект будет иметь очень малое отношение площади к массе, например, эффект незначителен для большого тела, такого как Земля. С другой стороны, чем меньше тело, тем больше отношение площади к массе, но в какой-то момент радиус становится настолько малым, что тепловая волна проникает через все тело, уменьшая разницу температур между ночной и дневной сторонами и ослабляя эффект, например, медленно вращающаяся частица пыли. Оптимальным размером будет астероид размером не более пары километров, поскольку крупные астероиды имеют большой момент инерции и их раскрутить значительно сложнее, к тому же они чаще имеют форму, близкую к сферической. На объекты, имеющие нулевую или высокую скорость вращения, суточная составляющая эффекта Ярковского не оказывает влияния (Bottke et al., 2006).

Спустя почти столетие после того, как Ярковский написал свою брошюру, появился второй вариант эффекта Ярковского. При поиске причины векового распада орбиты спутника LAGEOS было выявлено, что должен существовать сезонный

эффект (Rubincam, 1987, 1988, 1990) в дополнение к первоначальному суточному эффекту Ярковского. Сезонный эффект распространяется не только на спутники Земли, такие как LAGEOS, но и на объекты, вращающиеся вокруг Солнца.

Сезонный эффект Ярковского показан на рисунке 1.9. Как и на рисунке 1.8, предполагается, что сферический астероид находится на круговой орбите вокруг Солнца, но в этом случае ось вращения лежит в плоскости орбиты. Именно составляющая силы, лежащая вдоль оси вращения, вызывает сезонный эффект.

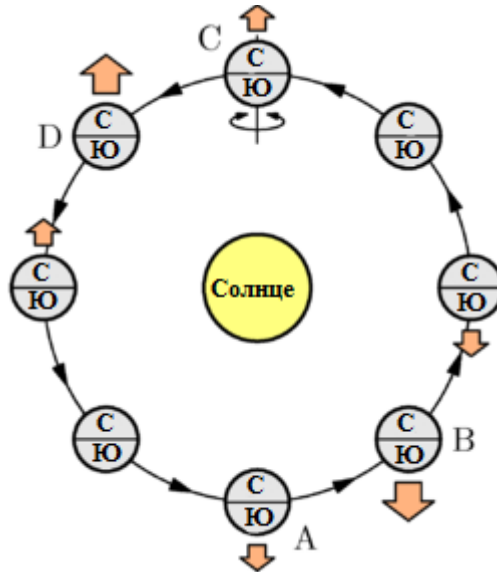


Рисунок 1.9 — Сезонный эффект Ярковского с осью вращения астероида в плоскости орбиты

Когда метеороид или астероид находится в точке А (внизу рисунка 1.9), Солнце наиболее ярко светит в его северном полушарии. Как и в случае суточного эффекта, из-за тепловой инерции происходит задержка, поэтому северное полушарие является самым горячим в точке В. Аналогично, Солнце наиболее ярко светит в южном полушарии в точке С, но это полушарие становится самым горячим в точке D. Хотя радиационная реакция силы симметрична на рисунке 1.9, изменяющийся вектор скорости гарантирует, что суммарный эффект сокращает орбиту. Однако для тела без тепловой инерции продольная сила усредняется до нуля при интегрировании за один оборот вокруг Солнца.

Для малых орбитальных эксцентриситетов средняя сила вдоль пути всегда противодействует движению метеороида или астероида. Следовательно, в режиме малого эксцентриситета сезонная сила всегда действует как сопротивление и

вызывает орбитальный распад; по этой причине сезонный эффект Ярковского был первоначально назван «тепловым сопротивлением» (Rubincam, 1987). В отличие от суточного эффекта Ярковского, сезонный эффект Ярковского не зависит от направления вращения астероида; изменение направления вращения не меняет знак эффекта. Кроме того, соответствующим периодом времени для сезонного эффекта является период обращения метеороида или астероида, а не гораздо более быстрый период вращения, связанный с суточным эффектом. Сезонный эффект зависит от близости тела к Солнцу и наклона оси вращения относительно орбиты; он исчезает, когда ось вращения нормальна к плоскости орбиты. Как и в суточном случае, существует оптимальный размер для максимизации эффекта. Для базальтовых тел на круговых орбитах во внутреннем основном поясе объекты $D \sim 10$ м будут испытывать наибольшие эффекты (Farinella, 1998; Rubincam, 1998). Сезонная сила Ярковского также влияет на другие орбитальные элементы в дополнение к большой полуоси.

Рассмотрим модель силы Ярковского, описанную в (Greenberg et al., 2020), где величина и направление теплового ускорения $\ddot{\mathbf{x}}$ вычисляются и применяются на каждом шаге интегрирования динамической модели. Ускорение вычисляется как

$$\ddot{\mathbf{x}} = \zeta_{\text{Yar}} \frac{1}{8\pi} \frac{1}{D\rho} \frac{L_S}{c} \frac{\mathbf{X}_{\hat{\mathbf{h}}}(\theta_{\text{Yar}}) \mathbf{x}(t)}{r^3}, \quad (1.2)$$

где $\mathbf{x}(t)$ – гелиоцентрический радиальный вектор для объекта в момент времени t , $\hat{\mathbf{h}}$ – единичный вектор оси вращения, θ_{Yar} – фазовая задержка, L_S – яркость Солнца, $\mathbf{X}_{\hat{\mathbf{h}}}(\theta_{\text{Yar}})$ – матрица вращения вокруг $\hat{\mathbf{h}}$, ρ – плотность объекта, ζ_{Yar} – множитель эффективности. Фазовая задержка θ_{Yar} описывает долготу на поверхности, с которой фотоны переизлучаются относительно подсолнечной долготы. В выражении (1.2) предполагается идеальное поглощение, т.е. нулевое альбедо.

К сожалению, для большинства объектов значения для θ и $\hat{\mathbf{h}}$ неизвестны. Со знанием большой полуоси орбиты a и эксцентриситета e осредненное по орбите смещение в большой полуоси $\langle da/dt \rangle$ можно определить из модели ускорения, как

$$\langle da / dt \rangle = \pm \xi_{\text{Yar}} \frac{3}{4\pi} \frac{1}{\sqrt{a}} \frac{1}{1-e^2} \frac{L_S}{ck} \frac{1}{D\rho}, \quad (1.3)$$

где ξ_{Yar} – коэффициент Ярковского, который зависит от ζ_{Yar} , наклона оси вращения (т.е. угла между вектором оси вращения $\hat{h}$ и вектором нормали к орбите), и фазовой задержки θ , k – постоянная Гаусса. Любое некорректное предположение об альбедо, диаметре, наклоне и фазовой задержке влияет на этот коэффициент таким образом, что величина $\langle da/dt \rangle$, которая определяется из астрометрии, не соответствует предположениям.

Таким образом, ускорение Ярковского зависит от нескольких физических величин, таких как положение оси вращения, размер, масса, форма и тепловые свойства (Vokrouhlicky, 1999). Кроме того, в (Rozitis, Green, 2012) показано, что шероховатость поверхности также играет важную роль, усиливая дрейф большой полуоси, связанный с эффектом Ярковского, больше, чем на десять процентов. Хотя обычно нет полной физической характеристики для расчета ускорения Ярковского, основанного на теплофизической модели, орбитальный дрейф может быть обнаружен из набора астрометрических данных. Фактически, чисто гравитационная динамика может привести к неудовлетворительному соответствию данным наблюдений. Это особенно важно, когда доступны чрезвычайно точные наблюдения, например, радиолокационные наблюдения, или когда набор данных наблюдений охватывает большой интервал времени, позволяя, таким образом, орбитальному дрейфу накапливаться и становиться обнаруживаемым.

Эффект Ярковского зависит от обычно неизвестных физических величин. Поскольку основным проявлением является дрейф большой полуоси, то обычно ищут формулировку, зависящую от одного параметра, который должен быть определен в результате орбитальной подгонки. Чтобы обойти необходимость физической характеристики, часто используют модель, подобную кометной (Marsden et al., 1973) для ускорения $a = Ag(r)$, где g – подходящая функция гелиоцентрического расстояния r в а.е., а A – коэффициент эффекта Ярковского, разделяемый на радиальную, трансверсальную и нормальную составляющие A_1 , A_2 , A_3 , которые выражаются в правой декартовой ортогональной системе координат, связанной с исследуемым телом. При современной точности наблюдений лучше всего определяется самая значительная составляющая ускорения – трансверсальная. Поэтому далее будем рассматривать только коэффициент трансверсального

ускорения A_2 . Для определения A_2 обычно используют 7-мерный дифференциальный корректор: начиная с набора данных наблюдений, одновременно определяют наилучшее подходящее решение как для орбитальных элементов, так и для A_2 (Farnocchia et al., 2013b).

Обычно предполагают, что $g(r) = (r_0/r)^d$, где $r_0 = 1$ а.е. нормализующий параметр. Правильное значение d нелегко определить. Однако, оказывается, что большинство АСЗ, чей период вращения не слишком велик, а поверхностная тепловая инерция не слишком мала или велика, обычно имеют значения d в диапазоне 2–3. В качестве примера, в (Chesley et al., 2012b) показано, что для 1999 RQ36 наилучшее совпадение с возмущением Ярковского, рассчитанным с использованием линейной модели диффузии тепла, составляет $d = 2.75$.

Важно то, что da/dt не зависит критически от выбранного значения d (Farnocchia et al., 2013b). Например, для (101955) Bennu получено значение $da/dt = (-18.99 \pm 0.10) \times 10^{-4}$ а.е./млн лет для $d = 2$ и $da/dt = (-19.02 \pm 0.10) \times 10^{-4}$ а.е. / млн лет для $d = 3$. Другим показательным примером является (6489) Golevka, для которого $da/dt = (-6.62 \pm 0.64) \times 10^{-4}$ а.е./млн лет для $d = 2$ и $da/dt = (-6.87 \pm 0.66) \times 10^{-4}$ а.е./млн лет для $d = 3$. В обоих случаях разница в da/dt из-за различных значений, принятых для d , находится в пределах одного стандартного отклонения.

Чтобы последовательно обнаруживать эффект Ярковского, нужно учесть другие ускорения вплоть до того же порядка. Для субкилометрового астероида, сближающегося с Землей, типичные значения находятся в диапазоне от 10^{-15} до 10^{-13} а.е./сут².

1.4.5 Методы интегрирования

Эффективность численного моделирования орбитального движения зависит также от выбора интегратора, который составляет ядро любой численной орбитальной модели. В небесной механике хорошо зарекомендовал себя интегратор Эверхарта (Everhart, 1985) и некоторые его современные модификации (Авдюшев, 2010, 2022). Использование интеграторов высоких порядков позволяет свести ошибку численного интегрирования к значениям, существенно меньшим, чем ошибки модели и, тем более, ошибки начальных данных. Отдельного упоминания заслуживает возможность использования расширенной разрядной сетки (до 128 бит)

в современных компиляторах, в частности Intel Fortran, что дает возможность замедлить проникновение ошибки округления в значащие разряды (Быкова, Галушина, 2010). Однако, применяя расширенную разрядную сетку, необходимо учитывать, что эфемериды больших планет обычно реализованы на 64-х битной разрядной сетке, что приводит к потерям точности. Одним из способов решения данной проблемы является использование сглаженных эфемерид (Батурин, 2012).

1.4.6 Начальная орбитальная неопределенность

Для формирования начального облака неопределенности обычно используется ковариационная матрица параметрических ошибок, которая всегда имеется в распоряжении после определения орбитальных параметров из наблюдений. Фактически она несет в себе информацию о вероятностном распределении параметрических ошибок линеаризованной обратной задачи и описывает, таким образом, в параметрическом пространстве эллипсоидальное облако неопределенности с нормально распределенной плотностью. Если нелинейность обратной задачи слабая, то ковариационная матрица вполне может быть пригодна для вероятностного оценивания космических угроз, при сильной нелинейности стохастическое моделирование будет давать неадекватные оценки.

Все обратные задачи орбитальной динамики — нелинейны. Однако проблема сильной нелинейности возникает только в тех задачах, где облако неопределенности принимает протяженные размеры, т.е. когда орбита определяется плохо вследствие скудной наблюдательной информации о движении небесного тела. Масштабное распределение виртуальных объектов (в особенности периферийных) очень сильно подвержено влиянию нелинейности, так что облако неопределенности может значительно отличаться от эллипсоидального. Поэтому, если вероятность столкновения астероида с Землей будет определяться из стохастического моделирования на основе ковариационной матрицы, то она может быть как недооценена, так и переоценена.

Для оценивания нелинейности служат показатели нелинейности. Все они, по сути, являются мерой смещения параметрических оценок за нелинейность относительно ожидаемых линейных аналогов. Показатели нелинейности — безразмерные величины, и совершенно очевидно, что, если какой-либо из них

превышает, скажем, единичное значение, уверенно можно утверждать, что обратная задача — сильно нелинейна. Однако остается вопрос: каким же должно быть пороговое значение показателя, меньше которого он сигнализировал бы о слабой нелинейности? Один из вариантов ответа на этот вопрос дан в работе (Авдюшев и др., 2021), авторы которой вводят оригинальные показатели внутренней и параметрической нелинейности.

Параметрическая нелинейность проявляется, главным образом, в неравномерном изменении модельного отклика на равномерное изменение параметров модели, а также в тангенциальной (геодезической) кривизне параметрических линий в подпространстве оценок. Теоретически существуют такие (нелинейные) преобразования параметров, которые сводят параметрическую нелинейность к нулю. Однако представить их в аналитической форме практически невозможно. Внутренняя нелинейность обусловлена непосредственно нормальной кривизной подпространства оценок и не зависит от преобразования параметров. Поэтому она неустранима и, следовательно, определяет предельный уровень минимальной нелинейности, которая может быть достигнута в результате преобразований параметров.

В работе (Авдюшев и др., 2021) также показано, что, если на отдалении от эклиптики астероид наблюдается на дуге в несколько градусов и более, уверенно можно ожидать, что обратная задача будет слабо нелинейной, тогда для моделирования орбитальной неопределенности в задачах вероятностного оценивания могут применяться линейные стохастические методы. При дугах меньше одного градуса задача становится сильно нелинейной. Однако, если наблюдения охватывают несколько ночей и более, внутренняя нелинейность оказывается еще достаточно слабой и поэтому для стохастического моделирования вполне применимы линейные методы.

1.4.7 Нелинейные методы

Для определения вероятностных оценок в сильно нелинейном случае применяются нелинейные стохастические методы. Они дают более адекватные оценки, нежели линейные методы, хотя не всегда практически обоснованы. Рассмотрим некоторые популярные нелинейные методы.

Метод линии вариаций (line-of-variation method; LoV method)

При использовании малочисленных позиционных наблюдений на короткой дуге область неопределенности в фазовом пространстве (собственно, как и в физическом) обычно весьма протяженная и вытягивается вдоль некоторой кривой, которая соответствует наименьшей скорости изменения целевой функции. В линейном случае это — прямая, направленная вдоль наибольшей полуоси доверительного эллипсоида. Учитывая эту особенность, А. Милани (Milani, 1999) предложил моделировать распределение виртуальных динамических состояний в фазовом пространстве непосредственно на этой кривой.

Метод объема вариаций (volume-of-variation method; VoV method)

Обобщая одномерный подход Милани, Муинонен с коллегами (Muinonen et al., 2006) разработали многомерный метод на основе однопараметрического пятимерного отображения. Суть метода состоит в том, что 1) для каждого виртуального состояния на линии вариации определяется линейная локальная аппроксимация внутри пятимерного подпространства, ортогонального к линии вариации; 2) затем для этого подпространства вычисляется ковариационная матрица пятого порядка, и 3) на ее основе (линейно) моделируется пятимерное множество виртуальных динамических состояний. В итоге получается шестимерное (нелинейное) распределение виртуальных состояний.

Статистическое ранжирование (statistical orbital ranging)

Интересный подход для стохастического моделирования орбитальных неопределенностей предложен в работе (Virtanen et al., 2001). Он реализуется поэтапно: 1) из всей выборки угловых наблюдений случайным образом выбираются два наблюдения; 2) в них и в соответствующие им модельные топоцентрические расстояния вносятся случайные величины, которые отвечают ошибкам наблюдений; 3) из сферических топоцентрических координат получают два топоцентрических вектора положения; 4) и по этим двум положениям методом предварительного определения орбиты (например, методом Гаусса) вычисляется вектор динамического состояния на один из двух моментов времени. Выполнив

последовательность этапов многократно, получают облако виртуальных динамических состояний.

Бутстрэп-метод

Данный метод заключается в многократном улучшении орбиты по разным наборам наблюдений, полученным с использованием выборки с возвращением (Efron, 1979; Десмарс, Арлот, 2010). Недостатком данного метода является то, что он теоретически не обоснован.

Метод возмущенных наблюдений

Метод реализуется как многократное решение задачи наименьших квадратов при различных выборках наблюдений, получаемых из реальных наблюдений путем подмешивания в них нормального шума (Press et al., 1987; Avdyushev, 2011). В итоге множество получаемых решений будет представлять облако неопределенности.

Метод кусочного переноса

Данный метод (Авдюшев и др., 2021) в некотором роде является многомерным обобщением метода Милани. В.А. Авдюшев вводит дифференциальное уравнение, которое описывает в параметрическом пространстве траектории от оценки динамического состояния, полученного из наблюдений, до виртуальных динамических состояний. Это уравнение многократно интегрируется численно при различных начальных и конечных условиях, формируемых стохастически, и в итоге получается облако виртуальных динамических состояний.

1.4.8 Способы заполнения доверительных областей

Можно выделить два способа заполнения начальной доверительной области: 1) случайные точки плотно заполняют весь объем эллипсоида, 2) случайные точки заполняют только граничную поверхность эллипсоида (Сюсина и др., 2012). Второй способ является более экономичным и позволяет исследовать большее число тестовых частиц, хотя потенциально способен упустить самые вероятные решения.

1.4.9 Характеристики хаотичности

Как близко бы не располагались точки в начальном облаке неопределенности, со временем они расходятся в фазовом пространстве координат и компонент скорости. Пока это расхождение линейно, возможен достоверный прогноз движения, но как только частицы начинают разбегаться экспоненциально, размеры облака неопределенности стремительно увеличиваются, и вскоре прогнозирование становится невозможным.

Для определения времени предсказуемости движения служат показатели хаотичности, классическим из которых является ляпуновское время (Мюррей, Дермотт, 2009). Однако данный показатель непросто применять для исследования движения АСЗ, поскольку он требует интегрирования на значительные интервалы времени. Кроме того, в ряде случаев затруднена интерпретация полученных результатов.

Решение указанных проблем принесла разработка так называемых быстрых показателей хаотичности, первым из которых стал MEGNO (Cincotta et al., 2003). Если осреднённый параметр MEGNO линейно растёт, то можно говорить об экспоненциальном расхождении близких орбит, т.е. о проявлении хаотичности. В работе (Шефер, Коксин, 2013) предложен ряд модификаций параметра MEGNO, в частности ортогональный MEGNO (OMEGNO), преимуществом которого является возможность разделять устойчивые и неустойчивые квазипериодические орбиты.

На рисунке 1.10 в качестве примера показана эволюция параметров MEGNO (черным цветом) и OMEGNO (серым цветом) для астероида (3200) Phaethon. Данный объект испытывает многочисленные тесные сближения с планетами земной группы, что приводит к линейному росту изучаемых параметров и переходу через значение 2 в окрестности 5000 года, что свидетельствует о хаотичности орбиты.

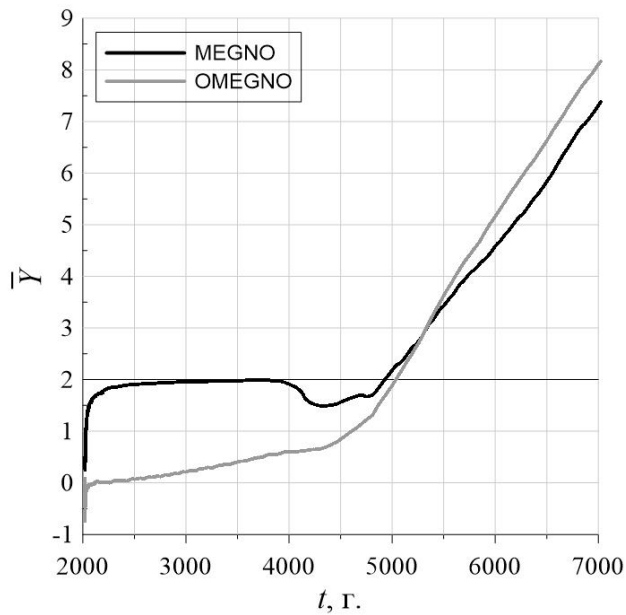


Рисунок 1.10 — Эволюция параметров MEGNO и OMEGNO для астероида (3200) Phaethon

1.4.10 Орбитальные и вековые резонансы

Резонансы средних движений давно являются предметом пристального внимания небесных механиков (Гребеников, Рябов, 1978; Мюррей, Дермотт, 2009), в этой области достигнуты существенные успехи (например, de la Fuente Marcos C., de la Fuente Marcos R., 2019; Qi, de Ruiter, 2019; Fenucci et al., 2022; Li et al., 2019; Pokorný, Kuchner, 2021; Kaplan, Cengiz, 2020), в том числе сделаны попытки автоматической классификации резонансов (Carruba et al., 2022).

Иначе обстоит дело с вековыми резонансами: несмотря на то, что теория была разработана еще в прошлом веке (Kozai, 1962; Williams, 1969; Froeschle, Scholl, 1989), практические исследования применительно к движению AC3 весьма немногочисленны (Froeschle et al., 1995; Michel, Froeschle, 1997; de la Fuente Marcos C., de la Fuente Marcos R., 2016; Емельяненко В.В., Емельяненко Н.Ю., 2018; Галушина, Самбаров, 2019). По-видимому, данный факт обусловлен тем, что к рассматриваемым объектам неприменимы аналитические методы, а использование численных приводит к быстрому накоплению ошибок округления в окрестности тесных сближений. В результате интервал исследования в лучшем случае охватывает один-два периода либрации резонансного аргумента, часто этого недостаточно для объективных выводов о резонансном поведении.

1.4.11 Методы оценки вероятности столкновения астероида с Землей

В данном подразделе приводится обзор методов поиска в доверительной области траекторий, приводящих к столкновению с Землей, и оценки вероятности столкновений.

Метод статистических испытаний или метод Монте-Карло

Наиболее простым способом выявления траекторий, приводящих к столкновениям, и оценки вероятности столкновения является способ, основанный на методе Монте-Карло. Метод заключается в том, что в рамках начальной доверительной области выбирается большое число тестовых частиц и исследуется их эволюция со временем. В процессе исследования отслеживается расстояние до Земли и регистрируются столкновения. Отношение числа столкнувшихся частиц к общему числу может рассматриваться как вероятность столкновения. Данным способом, в частности, оценивается вероятность столкновения Апофиса с Землей во многих работах (например, (Быкова, Галушина, 2010; Железнов, 2010)). Недостатком метода является необходимость исследования орбитальной эволюции очень большого числа тестовых частиц, что, даже при использовании многопроцессорных вычислительных систем, не всегда возможно. В следующих рассматриваемых методах сделана попытка решить эту проблему.

Метод линии вариации

В работах А. Милани с соавторами (Milani et al., 2000a; Milani et al., 2000b) применяется упрощенный подход к выявлению столкновительных орбит в начальной доверительной области, основанный на одномерном поиске таких орбит вдоль одного из главных направлений эллипсоида ошибок, а именно, вдоль его наибольшей оси. Такой подход правомерен в случаях, когда размеры эллипсоида ошибок по другим главным направлениям, т.е. направлениям других его осей, на несколько порядков меньше размера вдоль наибольшей оси. Фактически такой подход означает, что начальная доверительная область заменяется в шестимерном фазовом пространстве отрезком прямой линии, совпадающим с наибольшей осью эллипсоида. Далее, вдоль этого отрезка с мелким шагом перебираются все точки фазового пространства, и для них вычисляются обстоятельства рассматриваемого сближения с Землей. Если для

какой-либо точки минимальное расстояние до центра Земли во время сближения меньше радиуса Земли (с учетом атмосферы), то это и есть найденная столкновительная орбита.

Кроме того, в работах А. Милани (Milani et al., 2000a; Milani et al., 2000b) вводится понятие «плоскости цели», под которой понимается плоскость, перпендикулярная геоцентрической скорости астероида на номинальной орбите в момент столкновения с Землей. Она используется как плоскость, на которую производится отображение начального эллипсоида ошибок с помощью упрощенной линеаризованной формулы, включающей в себя изохронные производные.

Недостатком рассматриваемого метода является возможность «упустить» столкновительные траектории, не лежащие на главной оси эллипсоида ошибок. Для устранения этого недостатка вводится второй этап, который заключается в поиске столкновительных орбит в окрестности найденной на первом этапе. Однако, даже если точка минимума на главной оси эллипсоида имеет расстояние до центра Земли, превышающее ее радиус, то столкновительная область все равно может существовать. Такое возможно, когда ширина доверительного эллипса в плоскости цели значительна. Основным решением в этом случае является линеаризация отображения начальной области возможных движений на целевую плоскость. Тогда начальный доверительный эллипсоид переходит в эллипс, и, если этот эллипс пересекает сечение Земли, то полученное сечение является областью столкновительных орбит.

Следует заметить, что главная ось эллипсоида ошибок обычно связана с одним из элементов орбиты. В частности, для орбиты, найденной по короткой дуге, таким элементом является среднее движение астероида. В этом случае возможен поиск столкновительных траекторий путем исследования эволюции большого числа тестовых частиц с различными значениями среднего движения (Кочетова и др., 2009). После нахождения частицы, проходящей на минимальном расстоянии от центра Земли, на втором этапе фиксируется найденное значение среднего движения и улучшаются остальные параметры орбиты.

Достоинством данного метода является простота оценки вероятности столкновения, которая определяется следующей формулой:

$$P_{\oplus} = \frac{2R_{\oplus}}{\Gamma_{MTP}} P_d(\sigma_n), \quad (1.4)$$

где Γ_{MTP} – отношение наибольшей оси эллипса на плоскости цели к среднеквадратической ошибке в среднем движении σ_n ; $P_d(\sigma)$ – принятая функция плотности вероятности, $R_{\oplus}$ – радиус Земли.

Метод минимизации перигейного расстояния как функции от начальных координат и скоростей

В работах В.В. Ивашкина и К.А. Стихно (Ивашкин, Стихно, 2009; Стихно, 2011) предложен метод поиска столкновительных орбит, который заключается в минимизации перигейного расстояния как функции от начальных координат и скоростей.

Исходными данными в методе являются заданный на начальный момент вектор номинальных параметров и соответствующая ему ковариационная матрица. Последующее отображение начальной области на моменты сближений астероида с Землей осуществляется нелинейным способом (в виде ансамбля траекторий, выходящих из начальной области). На первом этапе осуществляется поиск сближений для номинальной орбиты и некоторого небольшого числа тестовых частиц (около 1000). На втором этапе из всего множества траекторий выделяются «опасные» траектории, для которых перигейные расстояния меньше некоторого заданного значения (например, 1 000 000 км). На третьем этапе, который является наиболее сложным, определяются итерационным методом градиентного спуска локальные минимумы функции перигейных расстояний на множестве возможных начальных параметров движения астероида. В качестве начальных приближений в градиентном методе используются значения начальных параметров «опасных» траекторий.

Следует заметить, что метод нахождения столкновительных орбит в работах (Ивашкин, Стихно, 2009; Стихно, 2011) проще методов, применяемых А. Милани, но имеет также свои недостатки. В частности, итерационный процесс в методе градиентного спуска может быть в ряде случаев расходящимся, а начальная область возможных движений не покрывать с заданной вероятностью истинную начальную точку траектории объекта.

Резонансный возврат к тесным сближениям

В работе С. Чесли (Chesley, 2006) для выявления потенциальных столкновений астероида Апофис с Землей используется идея так называемого «резонансного возврата». Термин «резонансный возврат» определяет тесное сближение или столкновение небесных тел, которое в некотором смысле порождается предшествующим тесным сближением. Это происходит, когда первое сближение меняет орбиту астероида таким образом, что его период становится соизмеримым с периодом Земли. Орбитальный резонанс, как известно, сохраняет геометрическую конфигурацию «малое тело – планета». Если периоды обращения планеты и астероида соизмеримы, то есть их отношение примерно равно отношению целых чисел k_1/k_2 , то после k_2 периодов астероида и k_1 периодов планеты оба тела вернутся снова к тому же самому геометрическому положению, как и в предыдущем сближении. Например, если вследствие сближения 2029 года Апофис войдет во внешний резонанс с Землей $7/6$ с периодом 426 дней, то он вернется через 6 оборотов и 7 лет примерно в ту же точку, в которой будет Земля. Таким образом, произойдет резонансный возврат в 2036 году. Если резонанс не является точным, но близким к нему (что обычно имеет место в орбитальных резонансах), то последующее сближение может иметь место, но сближение с планетой будет несколько раньше или позже, чем это было в предыдущий раз.

Аналитическая теория резонансного возврата изложена в работе (Valsecchi et al., 2003). Авторы этой работы развили известную теорию Эпика (Öpik, 1951) планетных тесных сближений, и, используя идею резонансного возврата, вывели соотношения, позволяющие вычислять начальные условия для каждого последующего сближения как функцию от результатов предыдущего сближения. Полученные аналитические формулы не являются заменой точного численного интегрирования, однако позволяют вычислять в плоскости цели местоположение, форму и размеры так называемой замочной скважины. «Замочная скважина» – еще один термин данной теории, который определяет маленькую область на плоскости цели предшествующего сближения, через которую астероид должен пройти, чтобы произошел резонансный возврат. Другими словами, «замочная скважина» – это область столкновительных орбит в плоскости цели предыдущего сближения.

Метод точечных гравитационных сфер

Данный метод (Елькин и др., 2003; Соколов и др., 2008) заключается в том, что гравитационная сфера планеты стягивается в точку и исследуемая траектория астероида аппроксимируется последовательностью кеплеровых гелиоцентрических орбит соударения с планетами. В момент соударения происходит преобразование скорости – вектор планетоцентрической скорости поворачивается на угол между асимптотами планетоцентрической гиперболы, модуль планетоцентрической скорости при этом остается неизменным. Угол поворота зависит от прицельного расстояния, при этом перицентрическое расстояние не должно быть больше радиуса планеты. Рассматривая множество траекторий, составленных из резонансных орбит соударения Апофиса с Землей, авторам метода удалось получить столкновительные орбиты в различные годы от 2036 до 2052 включительно.

Метод наименьших квадратов с ограничениями

В работах Г. Ситарского (Sitarski, 2006) для нахождения траекторий орбит используется метод наименьших квадратов с ограничениями. В результате определяются орбиты, на которых астероид может столкнуться с Землей, а также минимальное значение среднеквадратического остатка для такой столкновительной орбиты. Последнее значение может служить мерой вероятности столкновения. Задача ставится следующим образом.

Известна орбита астероида с начальными значениями прямоугольных координат и компонент скорости, хорошо представляющая наблюдения. Интегрированием уравнений движения находится момент тесного сближения астероида с Землей. Нужно найти такие поправки к начальным параметрам, чтобы новая орбита хорошо представляла наблюдения, и чтобы в данный момент астероид ударился о земную поверхность. Решение ищется методом наименьших квадратов с ограничениями, из которого находятся поправки к координатам.

Метод выявления столкновительных орбит с помощью минимизации произведения двух целевых функций

Задача поиска столкновительных орбит заключается в одновременной минимизации двух целевых функций – среднеквадратической ошибки

представления наблюдений и расстояния до Земли в момент сближения (Батурин, 2011).

Возможны различные варианты – минимизация суммы и произведения этих целевых функций. Недостатком первого способа является необходимость введения весовых коэффициентов, которые можно определить только приблизительно. Второй способ свободен от этого недостатка. Рассмотрим его более подробно.

Поиск столкновительных траекторий производится в 3 этапа. На первом этапе выявляются тесные сближения астероида с Землей по номинальной орбите. На втором этапе производится минимизация произведения двух целевых функций. При этом расстояние до Земли определяется на момент найденного тесного сближения. Необходимость третьего этапа обусловлена тем, что в окрестности этого момента сближение может быть еще более тесным. Поэтому на третьем этапе производится исправление момента сближения путем минимизации квадрата расстояния до Земли в функции только времени при найденных на втором этапе и зафиксированных начальных условиях. Второй и третий этап повторяются итерационно, пока расстояние до центра Земли не перестанет убывать.

Недостатком рассматриваемого метода является не единственность решения, так как минимум произведения двух величин в общем случае не совпадает с минимумами каждой из величин по отдельности.

Линейные отображения для быстрого численного оценивания вероятности столкновения

Метод основан на линейных отображениях начального облака виртуальных астероидов относительно столкновительной орбиты на моменты ожидаемого сближения астероида с планетой и регистрировании столкновений виртуальных объектов с массивным телом (Авдюшев, Галушина, 2013, 2014). Алгоритм подробно описан в подразделе 2.9.

1.5 Выводы по главе 1

Таким образом, можно сделать вывод, что особый интерес из самой многочисленной и разнообразной группы тел Солнечной системы представляют астероиды, сближающиеся с Землей, поскольку изучение их динамики оказывается

важным не только с фундаментальной точки зрения, но и с практической – для решения проблемы астероидной опасности. В настоящее время разработано множество методов исследования движения АСЗ, однако остается еще ряд нерешенных задач. Кроме того, практическое применение многих методов осложняется недостаточными количеством и качеством наблюдений.

ГЛАВА 2 МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ОРБИТАЛЬНОЙ ДИНАМИКИ АСТЕРОИДОВ

2.1 Вводные замечания

Численное моделирование движения астероидов, сближающихся с Землей, представляет собой сложную задачу, что обусловлено рядом особенностей их движения. Среди этих особенностей следует отметить наличие больших эксцентриситетов и тесных сближений с планетами. Тесные сближения с планетами приводят к быстрому росту ошибки округления и неопределенности положения и скорости, обусловленных ошибками начальных данных. Причем чем теснее сближение, тем быстрее растут эти ошибки. С другой стороны, наличие очень тесных сближений приводит к необходимости точного прогноза движения для оценки возможности столкновения. Кроме того, увеличение точности наблюдений требует соответствующего повышения точности прогноза и уточнения модели движения. Отдельного внимания заслуживает задача выявления орбитальных резонансов, оценка вероятности столкновения с Землей и проблема хаотичности движения.

Как обсуждалось в подразделе 1.4, в настоящее время разработано большое число различных методов численного моделирования динамики астероидов. В главе 2 будут подробно описаны те из них, которые использовались в данной работе, в том числе разработанные с участием автора.

2.2 Дифференциальные уравнения движения. Модель сил

Движение астероидов рассматривается в рамках возмущенной задачи двух тел в прямоугольной гелиоцентрической системе координат, отнесенной к эклиптике и равноденствию 2000.0. Дифференциальные уравнения движения имеют следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = \dot{x}, \\ \frac{d\dot{x}}{dt} = f(x, \dot{x}, t), \end{cases} \quad (2.1)$$

где

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}, t) = \mathbf{F}_K + \mathbf{P}_{pl} + \mathbf{P}_{ob} + \mathbf{P}_S + \mathbf{P}_R + \mathbf{P}_{Rpl} + \mathbf{P}_{Yar}. \quad (2.2)$$

Здесь $\mathbf{F}_K = -\mu\mathbf{x}/r^3$ – кеплеровские члены; $\mathbf{P}_{pl}$ – возмущающее ускорение, обусловленное притяжением планет, Плутона, Луны и трех наиболее массивных астероидов (Цереры, Паллады и Весты), $\mathbf{P}_{ob}$ обусловлено несферичностью Земли, Солнца и Юпитера, $\mathbf{P}_S$ связано с солнечным давлением, $\mathbf{P}_R$ – возмущающее ускорение, обусловленное релятивистскими эффектами от Солнца, а $\mathbf{P}_{Rpl}$ – релятивистскими эффектами от планет и $\mathbf{P}_{Yar}$ связано с эффектом Ярковского; $\mathbf{x}(x_1, x_2, x_3)$, $\dot{\mathbf{x}}(\dot{x}_1, \dot{x}_2, \dot{x}_3)$ – векторы положения и скорости исследуемого астероида, $r^2 = \sum_{i=1}^3 x_i^2$, $\mu = k_2 M_0$, $M_0 = 1$ – масса Солнца, $k = 0.01720209895$ а.е.^{3/2}·сут.⁻¹· $M_0^{-1/2}$ – постоянная Гаусса, t – время в средних солнечных сутках.

В зависимости от орбиты исследуемого объекта некоторые возмущения могут не учитываться. Рассмотрим возмущающие ускорения более подробно.

Ускорение, обусловленное влиянием больших планет, Плутона, Луны, Цереры, Паллады и Весты имеет следующий вид

$$\mathbf{P}_{pl} = k^2 \sum_m M_m \left(\frac{\mathbf{x}_m - \mathbf{x}}{\Delta_m^3} - \frac{\mathbf{x}_m}{r_m^3} \right), \quad (2.3)$$

где $\mathbf{x}_m(x_{m1}, x_{m2}, x_{m3})$ и M_m – соответственно вектор положения и масса возмущающего тела, $r_m^2 = \sum_{i=1}^3 x_{mi}^2$, $\Delta_m^2 = \sum_{i=1}^3 (x_{mi} - x_i)^2$. Координаты больших планет, Плутона, Луны определяются из эфемерид DE431 (Folkner et al., 2014) или DE432 (в зависимости от интервала исследования и требуемой точности). Координаты трех самых массивных астероидов вычисляются путем совместного интегрирования уравнений их движения, начальные координаты определяются из каталога Э. Боуэлла (Bowell et al., 1994).

Возмущающая функция, обусловленная второй зональной гармоникой потенциала притяжения Земли, вычисляется по формулам (Аксенов, 1977):

$$\mathbf{P}_{ob} = \frac{\partial R}{\partial \mathbf{x}}, \quad R = -J_2 \frac{k^2 M_3 r_0^2}{r'^3} \left(\frac{3}{2} \sin^2 \gamma_{\oplus} - \frac{1}{2} \right), \quad (2.4)$$

где J_2 – коэффициент при второй зональной гармонике, M_3 и r_0 – масса и средний экваториальный радиус Земли, r' и $\gamma_{\oplus}$ – геоцентрический радиус-вектор и широта

астероида относительно экватора Земли, $\sin \gamma_{\oplus} = z'/r'$. Вторая зональная гармоника от Солнца и Юпитера вычисляется по аналогичным формулам. Коэффициент при второй зональной гармонике Юпитера принимается равным $1.4736 \cdot 10^{-2}$, а для Земли и Солнца используются данные, представленные в соответствующем фонде координат больших планет.

Для определения светового давления введем следующие предположения: мощность потока солнечной радиации постоянна, сила светового давления всегда направлена по линии астероид – Солнце, астероид имеет сферическую форму. При этих условиях сила прямого светового давления Солнца на астероид может быть задана следующим образом:

$$\mathbf{P}_S = (1 + p_V) q_S s' \frac{\mathbf{x}}{r^3}, \quad (2.5)$$

где $q_S = 4.65 \cdot 10^{-5}$ дин/см² – солнечная постоянная; s' – площадь эффективного поперечного сечения астероида, представляющая собой отношение площади поперечного сечения астероида к его массе (Бордовицына, Авдюшев, 2007).

Релятивистские шварцшильдовские члены, обусловленные действием Солнца, определяются формулой (Брумберг, 1972):

$$\mathbf{P}_R = \frac{\mu}{c^2 r^3} \left[\left(-\dot{r}^2 + \frac{4\mu}{r} \right) \mathbf{x} + 4(\mathbf{x} \cdot \dot{\mathbf{x}}) \dot{\mathbf{x}} \right]. \quad (2.6)$$

Формула для вычисления релятивистских возмущающих членов, обусловленных действием m -й планеты, выглядит следующим образом:

$$\mathbf{P}_{Rpl} = \frac{k^2 M_m}{c^2} \left[A_{r0} \mathbf{x} + B_{r0} \dot{\mathbf{x}} + A_{r1} (\mathbf{x} - \mathbf{x}_m) + B_{r1} (\dot{\mathbf{x}} - \dot{\mathbf{x}}_m) + A_{r2} \mathbf{x}_m + B_{r2} \dot{\mathbf{x}}_m \right], \quad (2.7)$$

где коэффициенты A_{r0} , B_{r0} , A_{r1} , B_{r1} , A_{r2} , B_{r2} имеют вид

$$A_{r0} = -2 \frac{(\dot{\mathbf{x}} \cdot \dot{\mathbf{x}}_m)}{r^3} + k^2 \left[\frac{1}{r^3 r_m} + \frac{7}{2r r_m^3} + \frac{(\mathbf{x} \cdot \mathbf{x}_m)}{2r^3 r_m^3} + \frac{4}{r^3 \Delta_m} - \frac{7}{2r^3 \Delta} \right],$$

$$B_{r0} = -\frac{(\mathbf{x} \cdot \dot{\mathbf{x}})}{r^3},$$

$$A_{r1} = \frac{1}{\Delta^3} \left[4(\dot{\mathbf{x}} \cdot \dot{\mathbf{x}}_m) - \dot{\mathbf{x}}^2 - 2\dot{\mathbf{x}}_m^2 + \frac{3}{2\Delta^2} ((\mathbf{x}_m - \mathbf{x}) \cdot \dot{\mathbf{x}}_m)^2 + \frac{4k^2}{r} + \frac{k^2}{r_m} - \frac{k^2}{2r_m^3} ((\mathbf{x}_m - \mathbf{x}) \cdot \mathbf{x}) \right] + \\ + \frac{k^2}{r_m^3} \left(\frac{4}{\Delta_m} - \frac{7}{2r} \right),$$

$$B_{r1} = \frac{1}{\Delta^3} \left[4((\mathbf{x}_m - \mathbf{x}) \cdot (\dot{\mathbf{x}}_m - \dot{\mathbf{x}})) + ((\mathbf{x}_m - \mathbf{x}) \cdot \dot{\mathbf{x}}_m) \right],$$

$$A_{r2} = \frac{1}{r_m^3} \left[-2\dot{\mathbf{x}}_m^2 + \frac{3}{2r_m^2} (\mathbf{x}_m \cdot \dot{\mathbf{x}}_m)^2 + \frac{5k^2}{r_m} \right], \quad B_{r2} = \frac{3}{r_m^3} (\mathbf{x}_m \cdot \dot{\mathbf{x}}_m).$$

Выражения для коэффициентов A_{r0} , B_{r0} , A_{r1} , B_{r1} , A_{r2} , B_{r2} выведены Кочетовой О.М. (Кочетова, 2004) из формул работы (Брумберг, 1972) в предположении, что массой астероида можно пренебречь.

Учет эффекта Ярковского основан на предположении, что действие от данного эффекта обратно пропорционально квадрату расстояния от астероида до Солнца (Farnocchia et al., 2013b). В этом случае в правую часть дифференциальных уравнений движения добавляется член вида:

$$\mathbf{P}_{Yar} = \frac{A}{r^2}, \quad (2.8)$$

где A – коэффициент эффекта Ярковского. К сожалению, при современной точности наблюдений в результате подбора удастся найти в лучшем случае самую значительную составляющую ускорения – трансверсальную (Панасенко, Чернетенко, 2014), обычно обозначаемую A_2 . Следует отметить, что, строго говоря, при определении коэффициента эффекта Ярковского из наблюдений, получаемое значение отражает вклад не только самого рассматриваемого эффекта, но и других негравитационных сил, не учитываемых в модели. Однако данный факт делает модель даже более точной. В дальнейшем изложении под эффектом Ярковского будем понимать ускорение, определяемое формулой (2.8).

Для проверки адекватности значений A_2 , получаемых в результате улучшения орбит, можно воспользоваться оценками скорости изменения большой полуоси под влиянием эффекта Ярковского по формуле, приведенной в ряде работ (например, Greenberg et al., 2020; Nugent et al., 2012a):

$$\langle da / dt \rangle = \pm 1.44 \left(\frac{\xi_{\text{Yar}}}{0.01} \right) \sqrt{\frac{1 \text{ а.е.}}{a}} \left(\frac{1}{1-e^2} \right) \left(\frac{1 \text{ км}}{D} \right) \left(\frac{1000 \text{ кг м}^{-3}}{\rho} \right) \left(\frac{10^{-4} \text{ а.е.}}{\text{млн лет}} \right). \quad (2.9)$$

Коэффициент ξ_{Yar} представляет собой коэффициент эффективности Ярковского, зависящий от вращательных свойств астероида. Авторы работы (Greenberg et al., 2020) оценили распределение этого коэффициента и определили медианную эффективность Ярковского: $\xi_{\text{Yar}} = 0.12$ в допустимом диапазоне (0.06, 0.28). Плотность астероида оценивается по спектральному типу объекта. Оценки плотности в зависимости от таксонометрического типа в системе SMASSII можно взять из работы (Carry, 2012).

Ранее нами была оценена эффективность использования регуляризирующих и стабилизирующих преобразований уравнений движения астероидов, сближающихся с Землей (Бордовицына, Галушина, Авдюшев, 2003). Проведенные исследования показали, что подобные преобразования не позволяют существенно увеличить точность и быстродействие при наличии тесных сближений с планетами. Поэтому для улучшения точности в данной работе использовалась расширенная разрядная сетка (34 десятичных разряда), а для решения проблемы быстродействия – многопроцессорная вычислительная система СКИФ Cyberia (Быкова, Галушина, 2009).

2.3 Методы интегрирования

Как уже упоминалось в подразделе 1.4.5, наилучшим образом в небесной механике себя зарекомендовал метод Эверхарта (Everhart, 1974) и некоторые его модификации, например, интегратор Гаусса–Эверхарта (Авдюшев, 2010). Классический (RA15), а также модифицированный (RADAU_27) программный код Эверхарта значительно ограничивают возможности интегратора, поэтому у В.А. Авдюшева возникла идея подвергнуть дальнейшей модификации метод Эверхарта. Благодаря программной реализации на языке Fortran программный код стал меньше, читабельнее и проще для понимания. Были исключены константы, связанные с порядком метода, а также исправлен алгоритм выбора переменного шага, теперь его величина определяется порядком интегратора. Кроме того, в новой версии откорректирован выбор начального шага, теперь он осуществляется

по оценкам интегрирующей схемы второго порядка с учетом поведения правых частей уравнений, появилась возможность вести интегрирование на шаге до полной сходимости итерационного процесса, введены некоторые другие модификации.

В качестве примера приведем результаты сравнения эффективности использования интегратора Гаусса-Эверхарта и Грэгга-Булиша-Штера (Авдюшев, 2015) на примере исследования движения потенциально опасного астероида 2012 MF7. Точность Δr_{acc} оценивалась путем сравнения результатов прямого и обратного интегрирования, а в качестве меры быстродействия использовалось число обращений к функции правых частей nf .

Рисунок 2.1 показывает значения параметров Δr_{acc} и nf , полученные путем вариации параметров интеграторов Гаусса-Эверхарта («•») и Грэгга-Булиша-Штера («°»). Интервал интегрирования во всех случаях составил 50 лет, за которые астероид претерпевает несколько тесных сближений с Землей и Марсом. Результаты показывают, что для достижения той же точности методу Гаусса-Эверхарта требуется существенно меньше времени, чем методу Грэгга-Булиша-Штера. С другой стороны, метод Гаусса-Эверхарта позволяет получить значительно лучшую точность, чем метод Грэгга-Булиша-Штера за то же время. Таким образом, метод Гаусса-Эверхарта демонстрирует лучшую эффективность и в большинстве случаев применяется для исследования эволюции астероидов в данной работе.

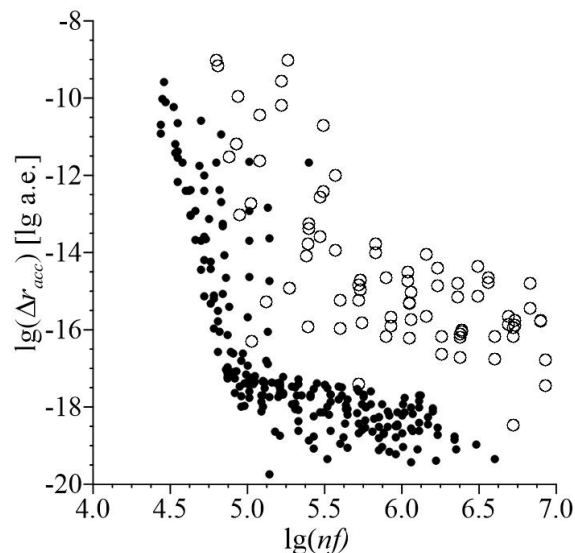


Рисунок 2.1 — Диаграмма «точность–быстродействие» для метода Гаусса-Эверхарта («•») и Грэгга-Булиша-Штера («°»)

Еще одной новой модификацией метода Эверхарта является интегратор Lobbie, основанный на разбиении Лобатто и предназначенный для численного решения смешанных систем первого и второго порядков. Примечательной особенностью коллокационных интеграторов является то, что их теоретическая основа, как и программная реализация, универсальна для любого порядка (Авдюшев, 2015). Практически порядок определяется разбиением на шаге, а именно количеством и спецификой распределения узловых значений, через которые выражаются все остальные константы интегратора. Кроме того, на разбиениях гауссовых квадратур Лежандра и Лобатто коллокационные интеграторы становятся геометрическими (Hairer et al., 2002): симметричными и орбитально устойчивыми, а на разбиении Лежандра еще и симплектическими. Следует также отметить, что, в отличие от других интеграторов, коллокационные позволяют на каждом шаге легко конструировать приближенное аналитическое решение, чем удобно пользоваться для частого вывода результатов на плотной временной сетке. Алгоритм интегратора Lobbie подробно описан в работе (Авдюшев, 2022).

На рисунке 2.2 представлены диаграммы «точность-быстродействие» для астероидов (394130) 2006 HY51 (а) и (137924) 2000 BD19 (б), полученные с использованием интегратора Гаусса-Эверхарта (сплошная линия) и Lobbie (пунктирная линия). Рассматривались интервалы времени (2011, –4200) и (2010, 5500) соответственно. Порядок метода во всех случаях составил 18, число итераций на шаге 2. Точность оценивалась путем сравнения с решением, полученным с меньшим значением параметра внутренней точности. В качестве меры быстродействия использовалось число перевычислений функций правых частей.

Из представленных на рисунке 2.2 результатов видно, что даже при таком небольшом порядке замечен выигрыш в эффективности нового интегратора Lobbie. Его использование в ряде случаев позволило увеличить интервал интегрирования и исследовать резонансное поведение рассматриваемых объектов более детально.

2.4 Алгоритмы построения начального облака неопределенности

Распространенным способом учета ошибки начальных данных является рассмотрение вероятностной орбитальной эволюции. Задачу исследования

вероятностной эволюции можно разделить на две: построение начального облака неопределенности и исследование его эволюции со временем.

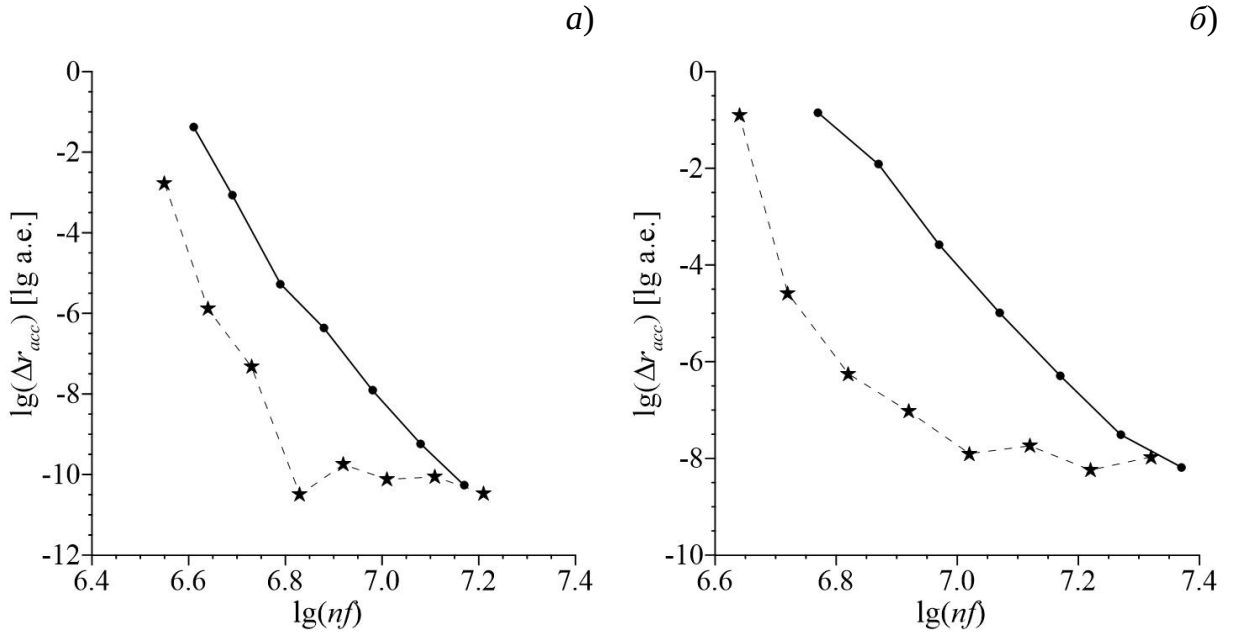


Рисунок 2.2 — Диаграммы «точность-быстродействие» для астероидов (394130) 2006 HY51 (а) и (137924) 2000 BD19 (б) с использованием интеграторов Гаусса-Эверхарта (сплошная линия) и Loblie (пунктирная линия)

Начальное облако неопределенности представляется в виде эллипсоида в шестимерном пространстве координат и компонент скорости:

$$(\mathbf{q} - \hat{\mathbf{q}})^T [R^T(\hat{\mathbf{q}}) \mathbf{W} R] (\mathbf{q} - \hat{\mathbf{q}}) = \hat{\varepsilon}, \quad (2.10)$$

где $\mathbf{q}$ — M -мерный вектор начальных параметров орбиты объекта; $\hat{\mathbf{q}}$ — оценка начальных параметров, определяемая из решения задачи наименьших квадратов; $\hat{\varepsilon} \cong \sigma_0^2 M F(M, N - M, \gamma)$; $\sigma_0 = \sqrt{\Phi(\hat{\mathbf{q}}) / (N - M)}$ — среднеквадратическая ошибка единицы веса; $R(\mathbf{q}) = \partial \mathbf{d}(\mathbf{q}) / \partial \mathbf{q}$ — матрица частных производных; $\mathbf{d}(\mathbf{q})$ — расчетная n -мерная функция измеряемых параметров (в нашем случае прямое восхождение α и склонение δ); $\mathbf{W}$ — весовая матрица; $F(M, N - M, \gamma)$ — верхняя квантиль для распределения Фишера; символ T означает операцию транспонирования.

Центром облака является номинальная орбита, определяемая в результате улучшения начальных параметров методом наименьших квадратов на основе имеющихся наблюдений

$$\Phi(\mathbf{q}) = [\mathbf{d}(\mathbf{q}) - \mathbf{d}^*]^T \mathbf{W} [\mathbf{d}(\mathbf{q}) - \mathbf{d}^*] = \min, \quad (2.11)$$

где $\mathbf{d}^*$ – N -мерный вектор измерений ($N > M$). Эллипсоид в данном случае определяется на основе ковариационной матрицы.

Однако такое построение облака неопределенности правомерно только при выполнении ряда условия. В частности, оно предполагает, что ошибки наблюдений случайны и независимо распределены по нормальному закону. Построение начального облака неопределенности в виде эллипсоида возможно, когда вероятностные вариации ошибок наблюдений связаны с соответствующими вариациями оценок параметров орбиты объекта линейным образом. Нелинейность задачи можно оценить по отклонениям граничной уровенной поверхности функции, минимизируемой в методе наименьших квадратов, от поверхности эллипсоида. Различные способы вычисления коэффициентов нелинейности представлены в работах (Сюсина и др., 2011; Сюсина и др., 2012).

Рассмотрим более подробно метод получения коэффициентов нелинейности (Черницов и др., 2006; Сюсина и др., 2013а), используемый в данной работе. Способ определения показателя χ основан на расчете и сравнении значений целевой функции $\Phi(\mathbf{q})$ в вершинах доверительного эллипсоида:

$$\chi = \frac{1}{2} \frac{\Phi_{\max} - \Phi_{\min}}{\Phi_{\min} - \Phi_0}, \quad (2.12)$$

где целевая функция $\Phi(\mathbf{q})$ задачи наименьших квадратов (НК) задается формулой (2.11), $\Phi_0 \equiv \Phi(\hat{\mathbf{q}})$. Максимальное и минимальное значения целевой функции в вершинах эллипсоида $\mathbf{q}^j$ представляются в виде

$$\Phi_{\max} = \max\{\Phi(\mathbf{q}^j)\}, \Phi_{\min} = \min\{\Phi(\mathbf{q}^j)\}. \quad (2.13)$$

С помощью показателя χ задачу оценивания можно классифицировать следующим образом. При $\chi < 0.01$ задача считается слабо нелинейной, для $0.01 \leq \chi < 0.1$ – умеренно нелинейной, а при $\chi \geq 0.1$ можно говорить о сильной нелинейности.

Для нелинейных случаев в данной работе использовался метод возмущенных наблюдений (Sitarski, 1998; Заботин, Медведев, 2008; Авдюшев, 2009), который состоит во внесении малых «возмущений» в наблюдения астероида и последующем

многократном решении задачи наименьших квадратов. Как в линейной, так и в нелинейной постановке облако неопределенности задается в виде точек, плотно заполняющих всю область.

Дифференциальные уравнения движения и уравнения относительно изохронных производных первого порядка интегрируются совместно методом Гаусса-Эверхарта (Авдюшев, 2010).

В процессе улучшения параметров методом наименьших квадратов можно получить не только координаты и компоненты скорости, но и некоторые физические параметры, например, параметр эффекта Ярковского. Нами были реализованы две методики, основанные на минимизации среднеквадратической ошибки представления наблюдений.

Первая методика заключается в варьировании параметра трансверсального ускорения A_2 (2.8) в пределах некоторого интервала с заданным шагом, при этом для каждого значения параметра решается задача наименьших квадратов и определяется среднеквадратическая ошибка представления наблюдений σ . За искомое значение параметра трансверсального ускорения A_2 берется такое, которое соответствует минимальному значению σ . При этом предварительно проводится отбраковка наблюдений по правилу «трех сигма» на модели без учета ЭЯ, и полученный набор наблюдений используется при дальнейшем варьировании параметра A_2 . Недостатком данного способа является то, что мы ограничены границами задаваемого интервала и дискретным шагом. Кроме того, многократное решение задачи наименьших квадратов приводит к существенным затратам времени.

Вторая методика заключается в определении параметра A_2 из совместного интегрирования уравнений движения, уравнения для параметра A_2 и уравнений в частных производных, при этом A_2 включается в число оцениваемых параметров наряду с координатами и компонентами скорости. Достоинством данного подхода является не только скорость определения параметра, но и получаемая погрешность величины.

2.5 Алгоритм выявления тесных сближений астероида с планетами

Минимальные расстояния от астероида до планеты вычисляются путем нахождения локального минимума квадрата функции расстояния, который

аппроксимируется интерполяционным многочленом Лагранжа третьей степени относительно времени. Полином Лагранжа строится по узлам таблицы интегрирования (Шефер, 1986).

Многочлен Лагранжа третьей степени по четырем узлам имеет вид

$$L_3(t) = \sum_{i=0}^3 \Delta_{mi}^2 \prod_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^3 \frac{t - t_j}{t_i - t_j}, \quad (2.14)$$

где Δ_{mi} – расстояние между астероидом и m -й планетой в момент времени t_i .

Чтобы определить минимум функции расстояния, вычислим производную многочлена Лагранжа (2.14) и приравняем ее к нулю.

$$\frac{dL_3(t)}{dt} = \sum_{i=0}^3 \Delta_{mi}^2 \frac{\sum_{j=0}^3 \prod_{\substack{k=0 \\ k \neq i, j}}^3 (t - t_k)}{\prod_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^3 (t_i - t_j)} = 0. \quad (2.15)$$

Решая полученное квадратное уравнение, получим момент сближения t_{min} . Затем, подставляя t_{min} в (2.14), получим минимальное расстояние до планеты $\Delta_{min} = \sqrt{L_3(t_{min})}$. Обращение к процедуре осуществляется на каждом шаге интегрирования.

2.6 Вычисление резонансных характеристик

2.6.1 Орбитальные резонансы

Для вывода резонансных характеристик орбитального резонанса рассмотрим задачу трех тел, следуя работе (Мюррей, Дермотт, 2009). Располагая центр системы в самом массивном теле, запишем разложение возмущающей функции для внутреннего тела в следующем общем виде:

$$P = \mu' \sum S(a, a', e, e', I, I') \cos \varphi. \quad (2.16)$$

Здесь $\mu' = k^2 M_m$, φ представляет собой линейную комбинацию угловых элементов орбит:

$$\varphi = k_1 \lambda' - k_2 \lambda + k_3 \varpi' + k_4 \varpi + k_5 \Omega' + k_6 \Omega, \quad (2.17)$$

где λ , ϖ , Ω – средняя долгота, долгота перицентра и долгота восходящего узла, соответственно, штрих относится к возмущающему телу, k_i ($i = 1, 2, \dots, 6$) – целые числа, для которых выполняется правило Даламбера

$$k_1 - k_2 + k_3 + k_4 + k_5 + k_6 = 0. \quad (2.18)$$

Расписывая функцию S в явном виде, получим

$$P = \frac{\mu'}{a'} \sum_{l=2}^{\infty} \alpha^l \sum_{s=0}^l (-1)^{l-s} \kappa_m \frac{(l-s)!}{(l+s)!} \sum_{p,p'}^l F_{lsp}(I) F_{lsp'}(I') \sum_{h,h'=-\infty}^{\infty} X_{l-2p+h}^{l,l-2h}(e) X_{l-2p'+h'}^{-l-1,l-2p'}(e') \times \quad (2.19)$$

$$\times \cos[(l-2p'+h')\lambda' - (l-2p+h)\lambda - h'\varpi' + h\varpi + (s-l+2h')\Omega' - (s-l+2h)\Omega],$$

где $\alpha^l = a/a'$, $\kappa_0 = 1$ и $\kappa_s = 2$ в случае $s \neq 0$, $X_{l-2p+h}^{l,l-2h}$ – коэффициенты Ганзена. Не будем останавливаться подробно на виде коэффициентов Ганзена и функций $F_{lsp}(I)$, поскольку в контексте орбитальных резонансов нас интересует аргумент φ .

Сравнивая выражения (2.17) и (2.19), получим значения коэффициентов:

$$k_1 = l - 2p' + h', \quad k_2 = l - 2p + h, \quad k_3 = -h',$$

$$k_4 = h, \quad k_5 = s - l + 2p', \quad k_6 = -s + l - 2p. \quad (2.20)$$

Из (2.20) можно сделать вывод, что $k_5 + k_6 = 2(p + p')$, т.е. сумма двух последних коэффициентов должна принимать четное положительное значение.

Резонанс возникает, когда $k_1 n' \approx k_2 n$, где n , n' – средние движения астероида и планеты. Для единственных k_1 и k_2 существует набор аргументов с разными значениями k_3 , k_4 , k_5 , k_6 , в каждом из которых присутствует член $(k_1 \lambda' - k_2 \lambda)$ – получаем так называемый мультиплет резонансов. Предположение о том, что возмущающее тело существенно массивнее исследуемого астероида, позволяет сделать вывод, что долгота перицентра и долгота восходящего узла планеты мало меняются, и эти члены практически не влияют на поведение резонансного (критического) аргумента φ , т.е. их можно отбросить. Учитывая также правило Даламбера (2.18), получим следующий вид основного критического аргумента:

$$\beta = k_0 \lambda_0 - k_j \lambda_j - (k_0 - k_j) \varpi_0, \quad (2.21)$$

где λ_0, λ_j – средние долготы астероида и планеты, ϖ_0 – долгота перицентра астероида, k_0, k_j – целые положительные числа. Конечно, для полноты картины необходимо исследовать поведение всего мультиплета, однако, в подавляющем большинстве случаев введение дополнительных членов в резонансный аргумент приводит только к смещению центра либрации, но не влияет на резонансное поведение, т.е. не может вызвать смену либрации на циркуляцию или наоборот.

В качестве еще одной резонансной характеристики используется производная критического аргумента, так называемая резонансная щель. При этом предполагается, что частота $\dot{\varpi}_0$ мала относительно $\dot{\lambda}_0$ и $\dot{\lambda}_j$. Согласно работе (Гребеников, Рябов, 1978), будем считать, что астероид движется в α -резонансе k_j/k_0 с j -ой планетой, если

$$\alpha = k_0 n_0 - k_j n_j \quad (2.22)$$

есть малая величина. Здесь n_0, n_j – средние движения соответственно астероида и j -ой планеты. Величину α будем называть резонансной полосой или «щелью». Под порядком резонанса традиционно понимают величину $k = k_0 + k_j$.

Будем считать, что астероид движется в орбитальном резонансе с планетой, если его критический аргумент либрирует с амплитудой, не превышающей 180° , а резонансная щель также совершает регулярные колебания около положения точного резонанса $\alpha = 0$. Если в процессе эволюции резонансный аргумент меняет поведение с циркуляции на либрацию и наоборот, то данный резонанс будем называть неустойчивым. При этом нахождение в устойчивом резонансе способствует сохранению геометрической конфигурации между астероидом и планетой, тем самым защищая астероид от тесных сближений. Расположение же в неустойчивом резонансе или в его окрестности может приводить к повторяющимся тесным сближениям и хаотичности движения.

2.6.2 Вековые резонансы

Рассмотрим численно-аналитическую методику выявления вековых резонансов (Бордовицына и др., 2012; Galushina et al., 2017). Рассматривая возмущающую функцию в виде (2.19), получим аргумент для однократно осредненной ограниченной задачи трех тел:

$$\underline{\varphi} = (l - 2p' + h')M' - (l - 2p)\omega + (l - 2p')\omega' - s(\Omega - \Omega'), \quad (2.23)$$

где M – средняя аномалия, ω – аргумент перицентра. Для двукратно осредненной задачи аргумент будет выглядеть следующим образом:

$$\underline{\underline{\varphi}} = -(l - 2p)\omega + (l - 2p')\omega' - s(\Omega - \Omega'). \quad (2.24)$$

Тогда условие возникновения резонанса можно представить в виде:

$$\dot{\underline{\underline{\varphi}}} \approx 0. \quad (2.25)$$

Явление, когда резонансное соотношение строго равно нулю, называется острым или точным резонансом. В качестве характеристик резонансного взаимодействия рассматриваются критический (резонансный) аргумент (2.24) и его первая производная по времени (так называемое резонансное соотношение) (2.25). По аналогии с орбитальным резонансом будем считать, что резонанс присутствует, если резонансное соотношение (2.25) близко к нулю и резонансный аргумент (2.24) колеблется около некоторого значения. Перебирая значения целых чисел l, p, p', i , получаем спектр значений резонансного аргумента и соответствующего ему резонансного соотношения (Таблица 2.1) (Александрова и др., 2014).

В таблицу 2.1 вошли резонансные соотношения нодальных и апсидальных вековых (Rosengren et al., 2015) частот астероида и возмущающих тел, а также геометрический резонанс собственных частот астероида, являющийся частным случаем апсидально-нодальных резонансов – резонанс Лидова–Козаи (Лидов, 1961; Kozai, 1962). Соотношения 1–16 описывают смешанный апсидально-нодальный вековой резонанс, соотношение 17 – чисто нодальный резонанс, соотношения 18 и 19 – чисто апсидальный резонанс. Соотношение 20 представляет собой резонанс типа Лидова-Козаи (Shevchenko, 2017), который по своей природе является геометрическим резонансом, так как зависит только от взаимного расположения объектов и не связан с частотами движения возмущающих тел. Введем обозначение $\underline{\underline{\psi}}_i = \underline{\underline{\varphi}}$, где i – номер соотношения из таблицы 2.1.

Таблица 2.1 — Типы резонансных соотношений низких порядков

№	Тип резонансного соотношения	№	Тип резонансного соотношения	№	Тип резонансного соотношения
1	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_j) + \dot{\omega} - \dot{\omega}'_j$	8	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_j) - 2\dot{\omega} - 2\dot{\omega}'_j$	15	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_j) - 2\dot{\omega}'_j$
2	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_j) - \dot{\omega} + \dot{\omega}'_j$	9	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_j) + 2\dot{\omega}$	16	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_j) + 2\dot{\omega}'_j$
3	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_j) + 2\dot{\omega} - 2\dot{\omega}'_j$	10	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_j) - 2\dot{\omega}$	17	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_j)$
4	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_j) - 2\dot{\omega} + 2\dot{\omega}'_j$	11	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_j) + \dot{\omega}$	18	$\dot{\omega} - \dot{\omega}'_j$
5	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_j) + \dot{\omega} + \dot{\omega}'_j$	12	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_j) - \dot{\omega}$	19	$\dot{\omega} + \dot{\omega}'_j$
6	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_j) - \dot{\omega} - \dot{\omega}'_j$	13	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_j) + \dot{\omega}'_j$	20	$\dot{\omega}$
7	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_j) + 2\dot{\omega} + 2\dot{\omega}'_j$	14	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_j) - \dot{\omega}'_j$		

Величины $\dot{\omega}$ и $\dot{\Omega}$ вычисляются в процессе численного интегрирования по формулам производной от многочлена Лагранжа степени n :

$$\omega(t) = \sum_{i=1}^n \omega_i g_i(t), \quad \Omega(t) = \sum_{i=1}^n \Omega_i g_i(t),$$

$$g_i(x) = \prod_{\substack{j=1, \\ j \neq i}}^n \frac{t - t_j}{t_i - t_j} = \frac{t - t_1}{t_i - t_1} \dots \frac{t - t_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} \frac{t - t_{i+1}}{t_i - t_{i+1}} \dots \frac{t - t_n}{t_i - t_n}, \quad (2.26)$$

$$\dot{\omega} = \sum_{i=1}^n \omega_i \prod_{\substack{j=1, \\ j \neq i}}^n \frac{1}{t_i - t_j} \sum_{j=1}^n \prod_{\substack{k=1, \\ k \neq i, k \neq j}}^n (t - t_k).$$

Понятия наличия или отсутствия резонанса, а также его устойчивость вводятся по аналогии с орбитальным резонансом.

2.7 Вычисление характеристик хаотичности движения

Как упоминалось в подразделе 1.4.8, ляпуновское время не всегда удобно использовать для оценки хаотичности движения АСЗ, поэтому в данной работе применяются такие показатели хаотичности как MEGNO и OMEGNO. Для их введения запишем уравнения движения в векторной форме:

$$\frac{d}{dt}\mathbf{q}(t) = \mathbf{f}(\mathbf{q}(t), t), \quad (2.27)$$

где $\mathbf{q} = \{\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}\}$ – вектор состояния исследуемого астероида, задающий траекторию в фазовом пространстве.

Обозначим начальное малое отклонение вектора состояния $\mathbf{q}$ через $\delta(t_0) = \delta_0$. Эволюцию этого вектора с точностью до бесконечно малых первого порядка можно описать вариационным уравнением следующего вида

$$\dot{\delta} = J(\mathbf{q})\delta(t), \quad J(\mathbf{q}) = \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{q}}(\mathbf{q}), \quad (2.28)$$

где $J(\mathbf{q})$ — матрица Якоби системы дифференциальных уравнений (2.27), а вектор δ будет содержать в себе вариации шести параметров решения $\mathbf{q} = \{\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}\}$ уравнений (2.26), $\delta = \{\delta x_1, \delta x_2, \delta x_3, \delta \dot{x}_1, \delta \dot{x}_2, \delta \dot{x}_3\}$.

Интегрируя совместно с уравнениями движения (2.25) и уравнениями в вариациях (2.28) уравнения вида (Goździewski et al., 2001; Valk et al., 2009):

$$\frac{d}{dt}y = \frac{\dot{\delta} \cdot \delta}{\delta \cdot \delta}t, \quad (2.29)$$

$$\frac{d}{dt}w = 2\frac{y}{t}, \quad (2.30)$$

получаем вспомогательные величины y и w . На начальный момент времени, при $t_0 = 0$, $y = 0$, $w = 0$. С помощью этих величин определяем параметр MEGNO и его усредненную величину как

$$Y(t) = 2y(t)/t, \quad \bar{Y}(t) = w(t)/t. \quad (2.31)$$

Эволюция $\bar{Y}(t)$ со временем позволяет уверенно разделить регулярный и хаотический режимы движения (Cincotta, Simo, 2000). Так, например, для хаотических орбит с экспоненциальным расхождением близких траекторий усредненный параметр MEGNO линейно растет и принимает значения $\bar{Y}(t) > 2$. Для квазипериодических (регулярных) орбит с линейным расхождением близких траекторий $\bar{Y}(t)$ осциллирует около 2. Более того, в работе (Cincotta, 2003) показано,

что для квазипериодических орбит усредненный параметр MEGNO всегда равен 2, а для устойчивых орбит типа гармонического осциллятора $\bar{Y}(t) = 0$. В работе (Valk et al., 2009) рекомендуется совместно интегрировать уравнения (2.27) – (2.29) в прямоугольных координатах и скоростях, что позволяет исследовать орбиты с любыми эксцентриситетами и наклонениями.

Далее рассмотрим алгоритм вычисления параметра OMEGNO, который является ортогональным показателем среднего экспоненциального расхождения близких орбит. Эта модификация параметра MEGNO представляет собой индикатор, позволяющий не только различить хаотические и регулярные орбиты, но и выявить и разделить периодические траектории в областях регулярного движения непрерывных динамических систем (Шефер, Коксин, 2016).

Пусть $\delta_{\perp}(t) \equiv \|\delta_{\perp}(t)\|$, $\|\cdot\|$ – евклидова норма, $\delta_{\perp}(t)$ – составляющая вектора $\delta(t)$, ортогональная к направлению фазового потока в точке $x(t)$. Определим $\delta_{\perp}(t)$ по формуле

$$\delta_{\perp}(t) = \sqrt{\|\delta\|^2 - (\delta \cdot f)^2 / \|f\|^2}. \quad (2.32)$$

Параметр OMEGNO характеризуется величиной (Шефер, Коксин, 2013; Шефер, Коксин, 2016)

$$\bar{Y}_{\perp}(t) = 2 \frac{\theta(t) - \zeta(t)}{t}, \quad (2.33)$$

где $\theta(t)$ и $\zeta(t)$ определяются путем интегрирования совместно с уравнениями (2.27) и (2.28) дифференциальных уравнений

$$\frac{d\theta}{dt} = \ln \delta_{\perp}(t), \quad \frac{d\zeta}{dt} = \frac{\theta(t)}{t}. \quad (2.34)$$

В начальный момент времени, при $t_0 = 0$, $\theta(0) = 0$, $\zeta(0) = 0$. При $t = 0$ правую часть второго уравнения в (2.34) необходимо задать равной нулю (Шефер, 2011).

Асимптотическое поведение OMEGNO можно описать с помощью формулы

$$\bar{Y}_{\perp}(t) \cong a_{\perp}t + b_{\perp}, \text{ при } t \rightarrow \infty, \quad (2.35)$$

где $a_{\perp}$ и $b_{\perp}$ – постоянные. При $a_{\perp} = 0$ и $b_{\perp} \cong 2$ движение будет устойчивым квазипериодическим, а для $0 < a_{\perp} < \infty$ и $b \cong 0$ – хаотическим. По отклонениям постоянной b от значения 2 можно определить, к устойчивой или неустойчивой периодической орбите близка исследуемая траектория. То есть если $b_{\perp} \lesssim 2$, то траектория близка к устойчивой периодической орбите, а если же $b_{\perp} \gtrsim 2$, то траектория близка к неустойчивой периодической орбите. И наконец, для периодической орбиты, описываемой уравнениями гармонического осциллятора, а также для любой устойчивой периодической орбиты, $a_{\perp} = 0$ и $b_{\perp} \cong 0$.

2.8 Методика исследования структуры возмущений

При изучении динамики астероидов возникает важный вопрос, какие силы необходимо учитывать. Игнорирование возмущающих факторов, оказывающих значительное влияние на движение, может привести к недостоверному прогнозу. С другой стороны, учет мелких незначительных возмущений будет способствовать более быстрому накоплению ошибки округления. Кроме того, для добавления некоторых возмущающих членов, например, светового давления или эффекта Ярковского, требуется знание ряда физических параметров астероида, ошибка в значениях которых может также оказать неблагоприятное влияние на точность прогноза.

Нами была разработана методика исследования структуры возмущений, основанная на оценке не только номинальной орбиты, но и размеров начальной доверительной области. Методика включает в себя пять различных методов (Скрипниченко и др., 2014; Galushina et al., 2015; Galushina et al., 2021) (в скобках приведены условные ключевые слова, которыми в дальнейшем для удобства будем обозначать методы):

- 1) на интервале наблюдений, полученных с сайта MPC, определяется момент среднего арифметического моментов наблюдений. На этот момент производится процедура улучшения элементов орбит с использованием полной модели сил. Далее рассчитывается орбитальная эволюция с варьированием модели (с попеременным отключением возмущающих факторов), в качестве исследуемого параметра

используется разность векторов положений при полной модели и без учета исследуемого фактора Δr_1 («эволюция без улучшения»);

2) как и в предыдущем методе определяется момент времени, но процедура улучшения орбит производится с отключением одного из возмущающих факторов. Расчет орбитальной эволюции производится при той же модели, что и при улучшении орбит, анализируется разность векторов положений при полной модели и без учета какого-либо возмущающего фактора Δr_2 («эволюция с улучшением»);

3) определяются максимальные значения мгновенного ускорения, создаваемые различными возмущающими факторами $\eta = |\ddot{x}|_{\max}$ («ускорение»);

4) вычисляются среднеквадратические ошибки (О-С) при улучшении с полной моделью σ_0 и с отключением какого-либо возмущающего фактора σ . Значение $\psi = \sigma^2 / \sigma_0^2$ для каждого возмущающего фактора сравнивается с критическим значением

$$\psi_{\text{крит}} = \frac{\chi_{N-M}^2}{N-M}, \quad (2.36)$$

где χ_{N-M}^2 – распределение Пирсона для ряда наблюдений, N и M – число наблюдений и оцениваемых параметров соответственно («сигма»);

5) градация набора возмущающих факторов осуществляется по взаимному расположению и размерам областей начальной неопределенности, полученных при полной модели F и с отключением исследуемого фактора F^* . Вычисляется значение

$$\varepsilon = |\hat{q}^* - \hat{q}| / |\bar{q} - \hat{q}|, \quad (2.37)$$

где $\hat{q}^*$ и $\hat{q}$ – оцениваемые орбитальные параметры $q = (q_1, \dots, q_M)$, определенные методом наименьших квадратов с использованием моделей сил F^* и F соответственно; $\bar{q}$ – значение, лежащее в пространстве параметров вдоль направления $(\hat{q}^* - \hat{q})$ на границе области неопределенности Φ_F (Сюсина и др., 2013b) («область»).

На рисунке 2.3 показано наглядное графическое представление пятого метода. Здесь жирной линией показана область неопределенности, полученная с использованием полной модели, штриховой – без учета оцениваемого

возмущающего фактора. Введены следующие обозначения: $\Delta d = |\hat{q}^* - \hat{q}|$, $\bar{d} = |\bar{q} - \hat{q}|$. На рисунке 2.3а показан вариант $\varepsilon > 1$, который соответствует значительному смещению областей, даже если номинальная частица, полученная с исключением возмущающего фактора, не попадает в область неопределенности, такой фактор нельзя игнорировать. На рисунке 2.3б данная номинальная частица находится в области неопределенности, соответственно, $\varepsilon < 1$. Однако в некоторых случаях, когда требуется повышенная точность, критическое значение ε может быть уменьшено до 0.1 или даже 0.01.

Исследование проводится с применением программного комплекса «ИДА» (Быкова и др., 2012; Galushina et al., 2019; Galushina, Letner, 2021). В первых трех методах («эволюция без улучшения», «эволюция с улучшением», «ускорение») изучение эволюции осуществлялось на интервале от среднего арифметического моментов наблюдений (который определялся индивидуально для каждого объекта) на 100 лет вперед (или на любой другой выбранный интервал времени). В четвертом («сигма») и пятом методе («область») выводы делаются на основе результатов улучшения орбиты на момент среднего арифметического моментов наблюдений.

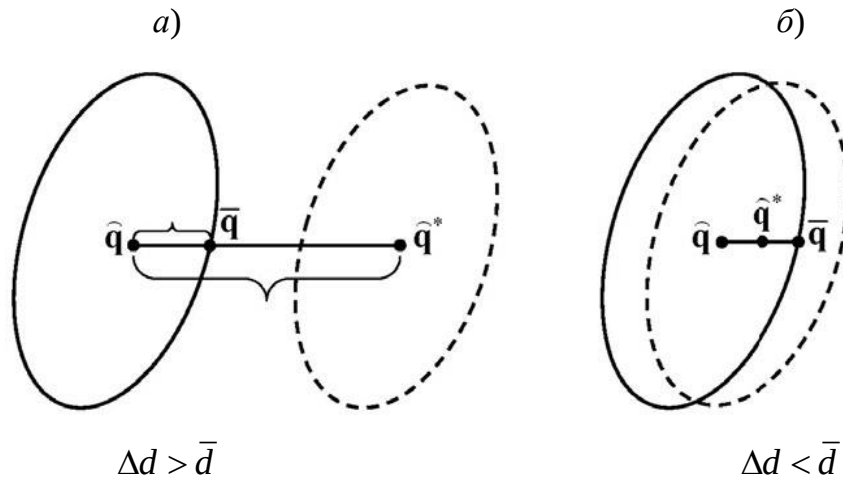


Рисунок 2.3 — Геометрическое изображение оценивания смещения областей неопределенности по показателю ε

2.9 Метод быстрого численного оценивания вероятности столкновения астероида с планетой

В данном подразделе описывается численный метод быстрого оценивания вероятности столкновения астероида с планетой (Авдюшев, Галушина, 2013; Авдюшев, Галушина, 2014). Метод основан на линейных отображениях начального облака виртуальных астероидов относительно столкновительной орбиты на моменты ожидаемого сближения астероида с планетой и регистрации столкновений виртуальных объектов с массивным телом.

Вследствие слабого приливного эффекта (до первого сближения астероида с планетой) облако неопределенности, каким бы оно ни было малым и как бы ни было ориентировано вначале, постепенно увеличивается, вытягиваясь вдоль орбиты, и из эллипсоидального превращается в бананообразное. Вблизи начальной эпохи t_0 , когда облако неопределенности еще подобно эллипсоиду, оно достаточно хорошо может описываться ковариационной матрицей C_p для текущего вектора динамического состояния $\hat{p} = p(t, \hat{q})$ на момент времени t

$$C_p = \left. \frac{\partial p}{\partial q} \right|_{t, \hat{q}} C_q \left. \frac{\partial p}{\partial q} \right|_{t, \hat{q}}^T, \quad (2.38)$$

получаемой путем временного переноса ковариационной матрицы C_q для начального вектора динамического состояния $\hat{q}$ на момент времени t_0 посредством матрицы перехода $\partial p / \partial q$. Здесь номинальный вектор $\hat{q}$ и ковариационная матрица C_q определяются из наблюдений, а динамическое состояние астероида задается его положением x и скоростью $\dot{x}$, т.е. $p = (x, \dot{x})^T$ и $q = (x_0, \dot{x}_0)^T$. Элементы матрицы перехода — это фактически изохронные производные, которые используются при определении орбиты. В этом случае для формирования облака неопределенности p на текущий момент времени t вполне можно использовать линейное преобразование

$$p = \hat{p} + \left. \frac{\partial p}{\partial q} \right|_{t, \hat{q}} (q - \hat{q}), \quad (2.39)$$

где $\mathbf{q}$ — вектор виртуального динамического состояния на начальный момент времени t_0 .

Вообще говоря, как бы сильна ни была нелинейность, и как бы существенно ни трансформировалось облако неопределенности, вблизи номинального положения $\hat{\mathbf{p}}$ линейное преобразование (2.39) достаточно хорошо описывает распределение виртуальных астероидов, и чем ближе к номинальному положению, тем лучше. Следовательно, если бы номинальная орбита оказалась столкновительной, то линейное преобразование (2.39) можно было бы применить для отображения начального облака неопределенности на моменты сближения с планетой и для сопутствующего выявления других соседних столкновительных орбит с целью оценивания вероятности столкновения астероида с массивным телом. Совершенно неважно, что будет происходить на периферии линейно и нелинейно отображенных облаков неопределенности. Важно, чтобы в малой окрестности планеты-мишени облака хорошо согласовывались. Даже если при сближении из-за сильной нелинейности, формально вызванной сингулярностью внутри планеты, согласованность слабая, можно прибегнуть к двойному последовательному временному отображению (Авдюшев, 2012): в преддверии сближения с планетой, за несколько часов до минимального планетоцентрического расстояния номинального астероида, сначала выполнить линейное отображение (2.39), а затем — нелинейное, основанное на формулах задачи двух тел, планета–астероид.

Как видно, такой подход позволяет избежать численного интегрирования виртуальных орбит. Однако это только в том случае, если номинальная орбита столкновительная, что, вообще говоря, исключительная редкость. Следовательно, в ином случае нужно найти из множества виртуальных орбит хотя бы одну столкновительную, относительно которой можно сконструировать линейное отображение вида (2.39). Будем называть такую орбиту целевой.

Существуют различные способы поиска столкновительных орбит (Sitarski, 1999; Milani et al., 2002; Ивашкин, Стихно, 2008), однако в контексте поставленной задачи, на наш взгляд, было бы вполне уместно воспользоваться уже реализованным линейным подходом, вместо того чтобы прибегать к предлагаемым другими авторами.

Поиск целевой орбиты можно выполнять следующим образом (Авдюшев, 2012). Моделируем начальное облако виртуальных астероидов и отображаем его линейно на момент, когда номинальный астероид достигнет наименьшего расстояния до планеты. В данном случае номинальная орбита выступает в качестве нулевого приближения целевой орбиты. Затем из начального облака выбираем тот виртуальный астероид, который при сближении, согласно линейному отображению (2.38), обеспечивает минимальное планетоцентрическое расстояние. Орбиту этого астероида принимаем за следующее приближение целевой орбиты. Теперь относительно нее строим линейное отображение, которое применяем к начальному облаку виртуальных астероидов, и так далее, пока на очередной итерации не получим ту же самую орбиту, как и на предыдущей итерации. Она и будет искомой целевой. Как показывает практика, для поиска целевой орбиты требуется всего лишь несколько итераций.

Программная реализация двойного отображения после нахождения целевой орбиты — это фактически: 1) вычисление на заданный момент времени (в преддверии сближения) матрицы изохронных производных $\partial p/\partial q$ посредством численного интегрирования так называемых дифференциальных уравнений в вариациях; 2) матричное преобразование массива векторов начальных динамических состояний; и 3) анализ перигейных расстояний кеплеровых орбит, определяемых полученными в результате матричного преобразования динамическими состояниями. Отношение числа орбит, чьи перигейные расстояния меньше экваториального радиуса Земли, к общему числу дает оценку вероятности столкновения астероида с планетой.

Таким образом, можно рекомендовать следующий алгоритм для программной реализации метода.

1. В пространстве орбитальных параметров статистическим методом формируем облако неопределенности.
2. Используя орбитальные параметры целевой орбиты (вначале в качестве нее выступает номинальная, полученная из наблюдений), выполняем численное интегрирование дифференциальных уравнений движения астероида совместно с дифференциальными уравнениями в вариациях до тех пор, пока вычисляемое положение объекта не достигнет минимального планетоцентрического расстояния.

3. Пользуясь матрицей перехода, отображаем линейно облако неопределенности на конечный момент интегрирования.

4. Из отображенных виртуальных положений объекта находим наиболее близкое к центру планеты (либо, используя формулы задачи двух тел, где в качестве центрального тела выступает планета, по отображенным виртуальным динамическим состояниям вычисляем перицентрические расстояния и среди них находим минимальное).

5. Для задания целевой орбиты из начального облака неопределенности выбираем виртуальное динамическое состояние астероида, соответствующее минимальному планетоцентрическому (либо перицентрическому) расстоянию.

6. Если целевая орбита изменилась, возвращаемся к п. 2, иначе анализируем распределение перицентрических расстояний астероида и определяем количество столкновительных орбит. Для уменьшения влияния нелинейности на распределения перицентрических расстояний при сближении с планетой линейное отображение начального облака неопределенности следует выполнять на момент времени в пределах суток до сближения.

7. Вычисляем вероятность столкновения астероида с планетой как отношение числа столкновительных орбит к общему числу виртуальных.

8. Следует заметить, что номинальный астероид может сближаться с планетой неоднократно, однако пользователь сам определяет, для какого сближения ему необходимо оценить вероятность столкновения малого объекта с массивным телом.

2.10 Выводы по главе 2

Таким образом, глава 2 содержит подробные описания методов и алгоритмов, применяемых в данной работе. Следует отметить, что все используемые методы являются высокоточными и находятся на переднем крае современной небесной механики. Например, интегратор *Lobbie* разработан совсем недавно (Авдюшев, 2022), но уже хорошо себя зарекомендовал в задачах динамики как астероидов, так и объектов космического мусора. В главе 2 также описана одна из наиболее полных моделей сил, используемых для моделирования движения астероидов, и представлена разработанная автором методика исследования структуры

возмущений (Galushina et al., 2015). Кроме того, рассмотрена методика построения начального облака неопределенности, причем в зависимости от полученных оценок нелинейности (Сюсина и др., 2012), применяются линейные или нелинейные методы (Авдюшев, 2015). Методы исследования вероятностной орбитальной эволюции позволяют выявлять такие особенности движения, как тесные сближения (Шефер, 1986), орбитальные и вековые резонансы с планетами (Галушина, 2020), оценивать время предсказуемости движения (Шефер, Коксин, 2016) и вероятность столкновения (Авдюшев, Галушина, 2014).

ГЛАВА 3 ПРОГРАММНАЯ СИСТЕМА ИДА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ АСТЕРОИДОВ

3.1 Обзор стороннего программного обеспечения для исследования динамики астероидов

Исследование движения астероидов, особенно сближающихся с Землей, представляет собой нетривиальную задачу, требующего специального программного обеспечения (ПО), которое позволяет не только предсказать положение объекта, но и выявить особенности его динамики, такие как сближения с планетами, резонансные соотношения, параметры хаотичности и т.д. Отдельного внимания заслуживает проблема сохранения точности численного интегрирования и приемлемого времени работы программы.

В настоящее время существует множество программных комплексов, которые в той или иной мере решают поставленные задачи. Однако не все из них имеют интуитивно понятный интерфейс, большинство распространяется без исходного кода и далеко не всегда понятно, какие модели используются. Кроме того, в связи с постоянно возрастающей точностью наблюдений и возможностями вычислительной техники требуется постоянно модифицировать программное обеспечение, что возможно только при разработке его своими силами. Данные соображения приводят большинство специалистов к необходимости создания собственного комплекса программ для исследования движения. В главе 3 кратко рассматриваются разработанные другими авторами программные комплексы, после чего подробно описывается программный комплекс ИДА, созданный под руководством и при непосредственном участии автора работы.

Отметим весьма популярную онлайн систему HORIZONS (<http://ssd.jpl.nasa.gov/horizons.cgi>), разработанную JPL NASA, которая позволяет с высокой точностью моделировать не только движение астероидов, но и других тел Солнечной системы (например, спутников планет) (рисунок 3.1). Пользователю предоставляется возможность выбрать центр системы координат, интервал интегрирования и шаг выдачи. В качестве выходных параметров система предлагает прямоугольные координаты, элементы орбиты или сферические экваториальные координаты. Среди достоинств программы следует отметить интуитивно понятный

интерфейс и возможность работать через веб-интерфейс без установки на компьютер, т.е. фактически с любого устройства. Однако последнее достоинство может оказаться и недостатком, например, при отсутствии связи. Кроме того, данное программное обеспечение не позволяет выбрать начальные данные и модель сил, не выдает информацию об особенностях движения, что затрудняет его применение для детального изучения динамики.

Horizons System

Home / Tools / Horizons System

About App Manual Tutorial Time Spans News

Horizons Web Application

Save/load Settings Set Defaults

1 Ephemeris Type: **Osculating Orbital Elements**

2 Edit Target Body: **3200 Phaethon (1983 TB)**

3 Edit Coordinate Center: **Sun (body center) [500@10]**

4 Edit Time Specification: Start=**2023-01-30** TDB , Stop=**2023-03-01**, Step=**1** (days)

5 Edit Table Settings: **custom**

After specifying settings above (items 1 to 5), generate an ephemeris by pressing the "Generate Ephemeris" button below. If you plan to use one of the "batch" modes to access Horizons, the batch-file corresponding to the settings above can be viewed by using this link.

Generate Ephemeris

Ephemeris Results Delete

Download Results

```
*****
JPL/HORIZONS      3200 Phaethon (1983 TB)      2023-Jan-29 23:03:22
Rec #:   3200 (+COV) Soln.date: 2022-Nov-01_00:23:55   # obs: 5620 (1983-2022)

IAU76/J2000 helio. ecliptic osc. elements (au, days, deg., period=Julian yrs):

EPOCH= 2459907.5 : 2022-Nov-24.00 (TDB)      Residual RMS= .1171
EC= .0898330876924800   QR= .140065415716083   TP= 2459714.6846794188
ON= 265.1940460090518   W= 322.1970361630931   IN= 22.26362506111724
A= 1.271383692093576   MA= 132.5655438873239   ADIST= 2.402702960847107
PER= 1.43358           N= .6875259889999999   ANGMOM= .008850281
DAN= .15542           DDM= .89147           L= 229.5183599
B= -13.4282074        MOID= .0194678           TP= 2022-May-15.1846794188
```

Рисунок 3.1 — Интерфейс системы HORIZONS

Между тем в России широко применяется система EPOS (рисунок 3.2) (Львов, Цекмейстер, 2012), разработанная в ГАО РАН. Изначально данный программный пакет (ПП) предназначался для подготовки к наблюдениям, однако в ходе развития его функционал расширился и в настоящее время он является эффективным инструментом в работах по исследованию объектов Солнечной системы. В частности, он предназначен для идентификации наблюдаемых небесных тел и выявления среди них потенциально опасных.



Рисунок 3.2 — Интерфейс ПП EPOS

В числе задач, решаемых с помощью ПП EPOS при изучении объектов Солнечной системы, нужно упомянуть следующие: планирование и эфемеридная поддержка наблюдений; контроль результатов наблюдений и оценка их точности; идентификация объектов в заданной области неба в определенный момент времени; визуализация видимого движения объектов на небесной сфере и их орбитального движения в пространстве; выявление потенциально опасных для Земли и планет астероидов и комет, вычисление обстоятельств реальных тесных сближений между ними; статистические исследования, выявление новых групп и семейств астероидов.

К основным особенностям ПП EPOS относятся: предоставление пользователю возможности самому адаптировать и обновлять все необходимые данные, которые имеются в свободном доступе; возможность изучения особенностей различных групп объектов, выбранных самим пользователем; сочетание таблиц, графиков и рисунков для более полного представления о предмете исследования.

В ходе исследования у пользователя есть возможность выбрать модель сил, однако из весьма скудного набора – влияние Солнца, планет, Луны, Плутона и четырех крупных астероидов. Богатство функций, предоставляемых данным программным пакетом, привело к нетривиальному интерфейсу, изучение которого требует отдельных усилий и времени. Несмотря на перечисленные достоинства,

данный программный пакет, как и обсуждаемый выше, остается в большей степени инструментом для наблюдателей, чем для исследователей.

Другой многоцелевой ПП для исследования малых тел – AMPLE (Железнов и др., 2010) (рисунок 3.3). В 1995 г. в ИПА РАН вышла первая версия пакета AMPLE, ныне существует AMPLE 3.

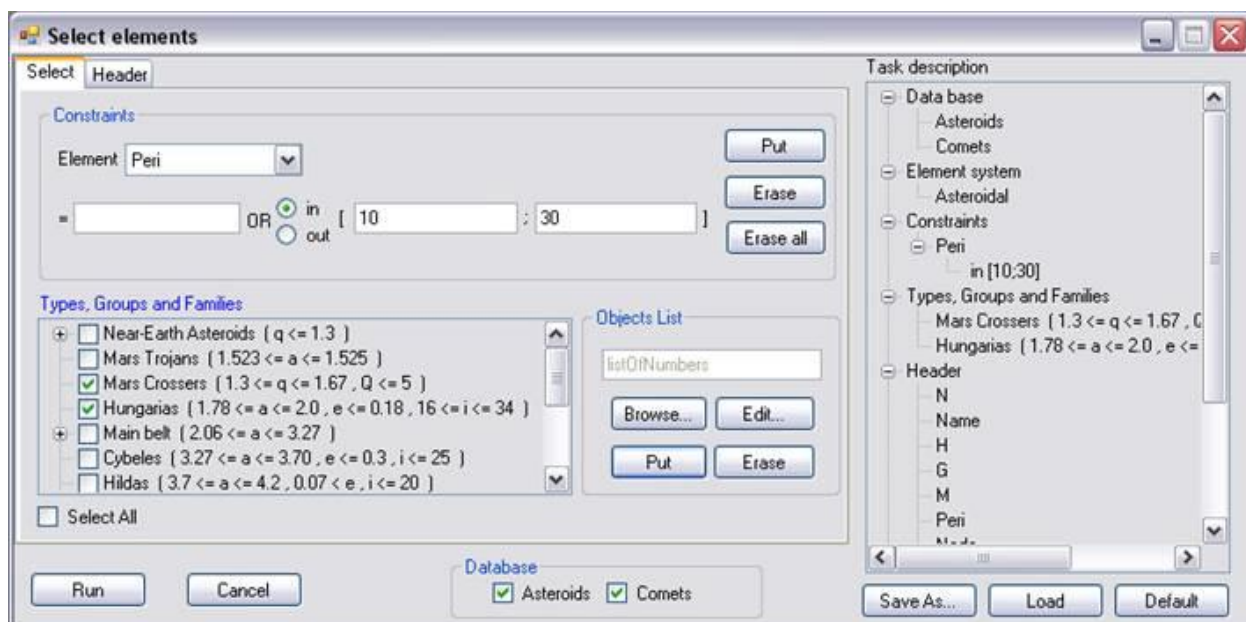


Рисунок 3.3 — Окно «Выбор элементов» ПП AMPLE

В число решаемых задач включаются следующие:

- получение выборки орбитальных элементов и/или фотометрических параметров астероидов в соответствии с наложенными на них ограничениями и их сортировка;
- получение графиков частотных распределений (гистограмм) и картины распределения астероидов в двух- или трехмерном пространстве их элементов для найденной выборки;
- вычисление эфемерид в различных координатных системах (сферической, прямоугольной) относительно разных основных плоскостей и центров;
- сравнение наблюдаемых положений с вычисленными (вычисление O–C);
- идентификация астероидов, то есть нахождение среди нумерованных астероидов такого (или таких), чьи вычисленные положения достаточно близки к положению неизвестного объекта;

- получение списка всех нумерованных астероидов, которые могут быть видны в заданный момент времени в выбранной области неба, и визуализация их взаимных положений;

- получение картины видимого движения астероидов на небесной сфере по отношению к неподвижным звездам;

- визуализация орбитального движения астероидов.

В настоящее время готовы три ветви пакета: работа с таблицами элементов орбит малых тел (выборка, сортировка, гистограммы, двух- и трехмерные распределения и т. д.), визуализация орбит и вычисление эфемерид. Пакет AMPLE разработан для операционных систем Windows и Linux.

Таким образом, можно отметить, что ни одно из рассмотренных программных средств не предоставляет полный функционал для детального исследования особенностей динамики астероидов, что и явилось основной причиной для разработки программного комплекса ИДА.

3.2 Задачи, решаемые программной системой ИДА

Исследование динамики астероидов (особенно сближающихся с большими планетами) представляет собой сложную задачу по ряду причин. Во-первых, начальные данные астероидов определяются из наблюдений и поэтому известны не точно. В связи с этим возможно только вероятностное представление орбитальной эволюции. Во-вторых, при численном интегрировании уравнений движения астероидов во время сближений с большими планетами может происходить значительное падение точности. При исследовании движения большое значение имеет выбор используемой модели сил. Все указанные и многие другие факторы необходимо учитывать при создании программного обеспечения для исследования движения астероидов.

Разработанное нами прикладное программное обеспечение состоит из ряда подсистем, которые позволяют решать следующие задачи:

- построение численной модели движения астероида с учетом заданных возмущающих факторов;

- улучшение орбиты астероида по данным позиционных наблюдений;

- исследование структуры возмущений;

- построение начального облака неопределенности линейными и нелинейными методами;
- исследование орбитальной эволюции начального облака неопределенности;
- выявление сближений и столкновений исследуемого астероида с большими планетами, Луной и Плутоном;
- оценка вероятности столкновения астероида с большими планетами и Луной;
- выявление соизмеримостей средних движений астероида и больших планет;
- выявление и исследование вековых резонансов;
- исследование хаотичности и оценка времени предсказуемости движения с помощью параметра OMEGNO;
- демонстрация движения астероида и планет на экране компьютера в различных системах координат.

3.3 Структура программного комплекса ИДА

В программный комплекс «ИДА» входят следующие подсистемы:

- подсистема «Ассоль», которая позволяет исследовать эволюцию номинальной орбиты и демонстрировать движение астероида и тестовых частиц на экране компьютера;
- подсистема «Наблюдения», предназначенная для улучшения орбиты астероида по данным позиционных наблюдений и построения начального облака неопределенности нелинейными методами;
- подсистема «Distribution», созданная для визуализации распределения наблюдений по орбите астероида;
- подсистема «Ансамбль частиц», которая позволяет получить начальное облако неопределенности в виде ансамбля тестовых частиц;
- подсистема «Evolution», созданная для исследования орбитальной эволюции ансамбля частиц;
- подсистема «OMEGNO», предназначенная для исследования хаотичности движения и оценки времени его предсказуемости;
- подсистема «Covar_coll», разработанная для оценки вероятности столкновения линейным методом.

Подсистемы «Ассоль», «Наблюдения» и «Distribution» разработаны в среде Delphi, подсистемы «Evolution» и «Covar_coll» написаны на языке Fortran. Подсистема «Ансамбль частиц» создана в двух вариантах – в среде Delphi и на языке Fortran.

3.4 Подсистема «Ассоль»

Подсистема предназначена для моделирования движения астероидов численными методами на заданных интервалах времени. Интервал задается пользователем. Он ограничен только используемым фондом эфемерид больших планет. Система имеет возможности работы в диалоговом и демонстрационном режимах. Диалоговый режим связан с настройкой задания пользователя, реализуемой до начала интегрирования. Демонстрационный режим позволяет с момента начала интегрирования выводить на экран траектории движения астероида и больших планет в выбранной системе координат, а также различные характеристики движения: сближения с большими планетами, резонансы, определяемые соизмеримостью средних движений астероида и планет.

Перед первым запуском подсистемы необходимо в файле data указать путь к файлам эфемерид DE405 и каталогу Боуэлла (Bowell et al., 1994). Кроме того, можно выбрать язык интерфейса – русский или английский. При входе в систему перед пользователем появляется диалоговое окно с несколькими вкладками:

- «Астероид»;
- «Параметры движения»;
- «Исследование»;
- «Авторы».

Первые три страницы предназначены для установки параметров процесса моделирования движения астероидов, а на последней странице представлена информация об авторах. Остановимся на каждой из страниц подробнее. На рисунке 3.4 представлен внешний вид страницы «Астероид». На этой странице требуется указать:

- путь к фонду координат больших планет DE405, DE406, DE431 (Folkner et al., 2014), DE432 (может использоваться любой из этих фондов по выбору пользователя);

- путь к каталогу астероидов Боуэлла;
- имя исследуемого астероида (для нумерованных астероидов номер, имя или и то, и другое, для нenumерованных – предварительное обозначение);
- начальный и конечный моменты интегрирования (календарная или юлианская дата).

Рисунок 3.4 — Диалоговое окно «Астероид»

Для подтверждения введенной информации необходимо нажать кнопку «Сохранить», в противном случае программа будет работать со старыми параметрами. При нажатии кнопки «Сохранить» происходит проверка наличия указанных файлов (фонд и каталог). Если фонд найден, то проверяется, находятся ли конечный и начальный моменты в пределах фонда. Далее происходит поиск указанного астероида в каталоге. Если указанного астероида нет в каталоге, пользователю предлагается ввести гелиоцентрические эллиптические элементы орбиты астероида – появляется диалоговое окно «Новый астероид». На рисунке 3.5 показан внешний вид этого окна. При нажатии кнопки «ОК» в данном окне введенные данные записываются в каталог астероидов. Следует отметить, что система предоставляет возможность работы как непосредственно с полным

каталогом Боуэлла, так и с любыми выборками из каталога. Кроме того, пользователь может добавлять любые другие объекты (в том числе изменять начальные параметры астероида, присваивая ему другое имя).

Рисунок 3.5 — Диалоговое окно «Новый астероид»

Если описанный процесс проходит успешно, то введенные параметры принимаются системой и кнопка «Сохранить» снова становится недоступной. При этом автоматически происходит перевод юлианской даты в календарную или наоборот.

Страница «Параметры движения» (рисунок 3.6) предназначена для указания различных параметров, которые будут использованы при демонстрации движения астероидов и больших планет. На этой странице пользователь может выбрать:

- систему координат;
- планеты, движение которых будет показано;
- цвет, размер и форму символов, обозначающих планеты, Солнце и астероид;
- масштаб изображения;
- скорость, с которой будет демонстрироваться движение;
- язык интерфейса;
- скорость демонстрации.

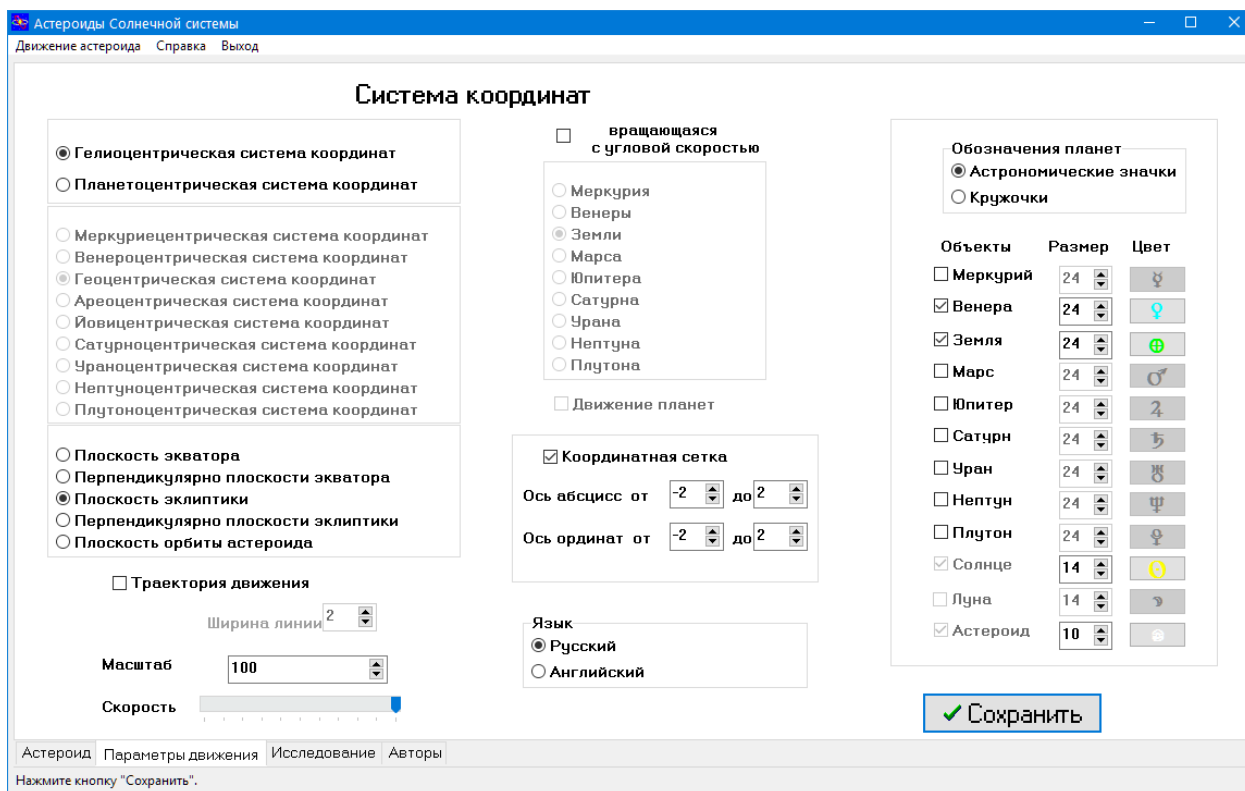


Рисунок 3.6 — Диалоговое окно «Параметры движения»

Кроме того, можно указать нужна ли координатная сетка и будут ли прорисовываться траектории движения объектов. Для подтверждения введенной информации также необходимо нажать кнопку «Сохранить».

Страница «Исследование» (рисунок 3.7) предназначена для выбора некоторых параметров, которые будут использованы при исследовании движения астероида. На этой странице следует указать:

- вид дифференциальных уравнений движения;
- порядок метода интегрирования и величину L , определяющую размер шага (параметр точности);
- нужна ли проверка точности интегрирования;
- нужно ли выявлять сближения;
- расстояния до больших планет, определяющие область сближения;
- нужно ли искать орбитальные резонансы;
- большие планеты, резонансы с которыми будут проверяться;
- максимальный порядок резонанса;
- допустимую величину резонансной щели;

- модель сил;
- физические параметры, которые необходимы для учета светового давления.

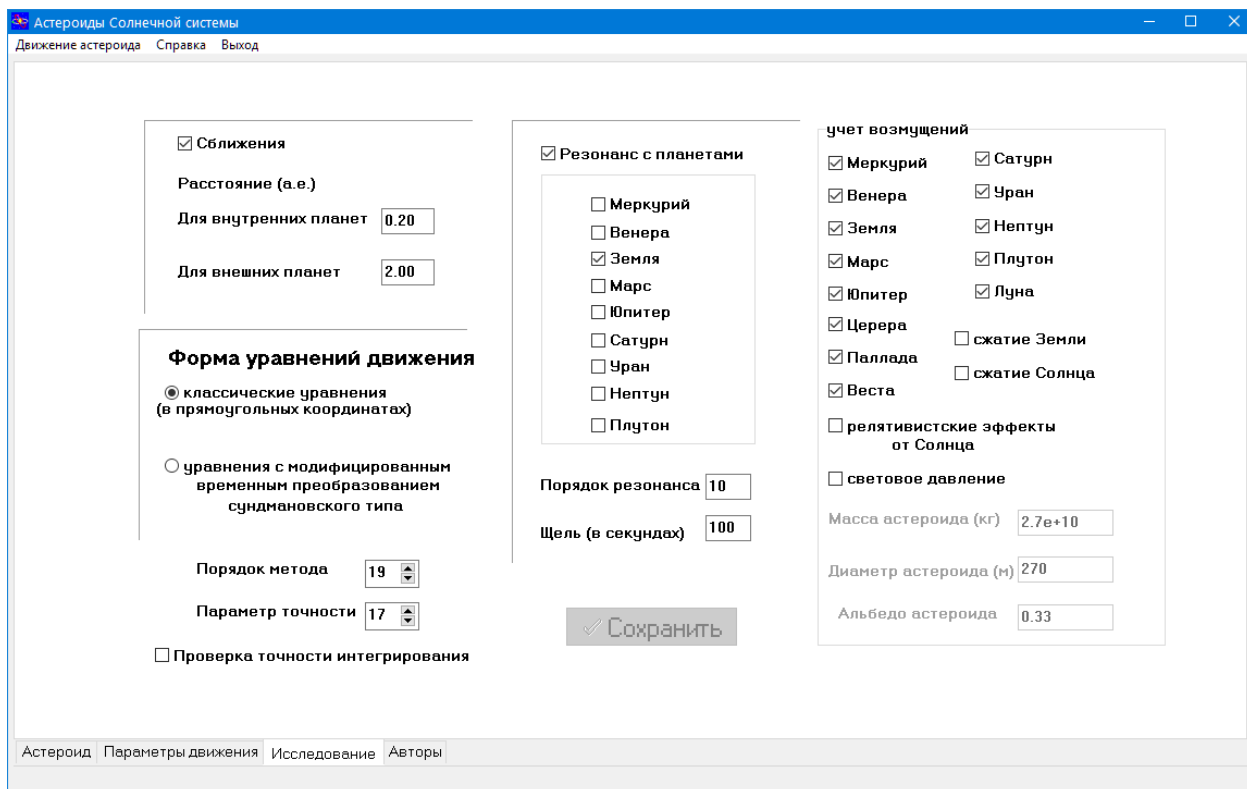


Рисунок 3.7 — Диалоговое окно «Исследование»

На данной странице также присутствует кнопка «Сохранить», которая должна быть использована для принятия введенных данных системой.

После того как введены все необходимые данные, можно перейти в демонстрационный режим системы, воспользовавшись пунктом меню «Движение астероида». Если начальный момент не соответствует эпохе, на которую даны элементы астероида в каталоге Боуэлла, то, прежде чем перейти в демонстрационный режим, будет происходить перенос эпохи, при этом будет выдано сообщение, представленное на рисунке 3.8.

При нажатии кнопки «Отмена» система вернется в диалоговый режим. Программа имеет встроенную систему помощи. Для того, чтобы использовать помощь в диалоговом режиме, необходимо выбрать пункт меню «Справка», подпункт «Помощь».

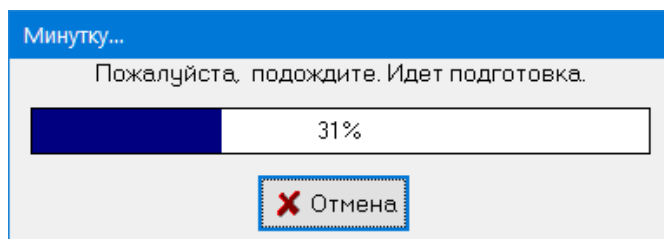


Рисунок 3.8 — Предупреждение об ожидании

При переходе в демонстрационный режим появляется окно «Движение астероида» (рисунок 3.9). В данном окне представлена следующая информация:

- выбранная система координат;
- начальный момент времени (календарная и юлианская даты);
- список объектов, движение которых будет показано.

При этом показано начальное положение выбранных объектов. Кроме того, в верхнем левом углу данного окна присутствуют пять кнопок (рисунок 3.10):

- «Старт»;
- «Пауза»;
- «Стоп»;
- «Помощь»;
- «Выход».

При входе в демонстрационный режим доступны кнопки «Старт», «Помощь» и «Выход». Кнопка «Выход» предназначена для выхода из демонстрационного режима и перехода обратно в диалоговый. При нажатии кнопки «Помощь» вызывается система помощи.

Для того чтобы исследовать движение астероида, необходимо нажать кнопку «Старт». После этого начинает работать программа численного интегрирования, и результаты ее работы выводятся на экран, что позволяет рассмотреть движение астероида и больших планет в выбранной системе координат. На экран также выдаются сообщения о сближениях и резонансах. Вид экрана во время работы программы представлен на рисунке 3.11. Внизу экрана выведена информация о сближении с Юпитером, в верхнем правом углу – об орбитальном резонансе с Венерой. Траектории астероида и планет выше эклиптики показаны различными цветами, ниже – серым.

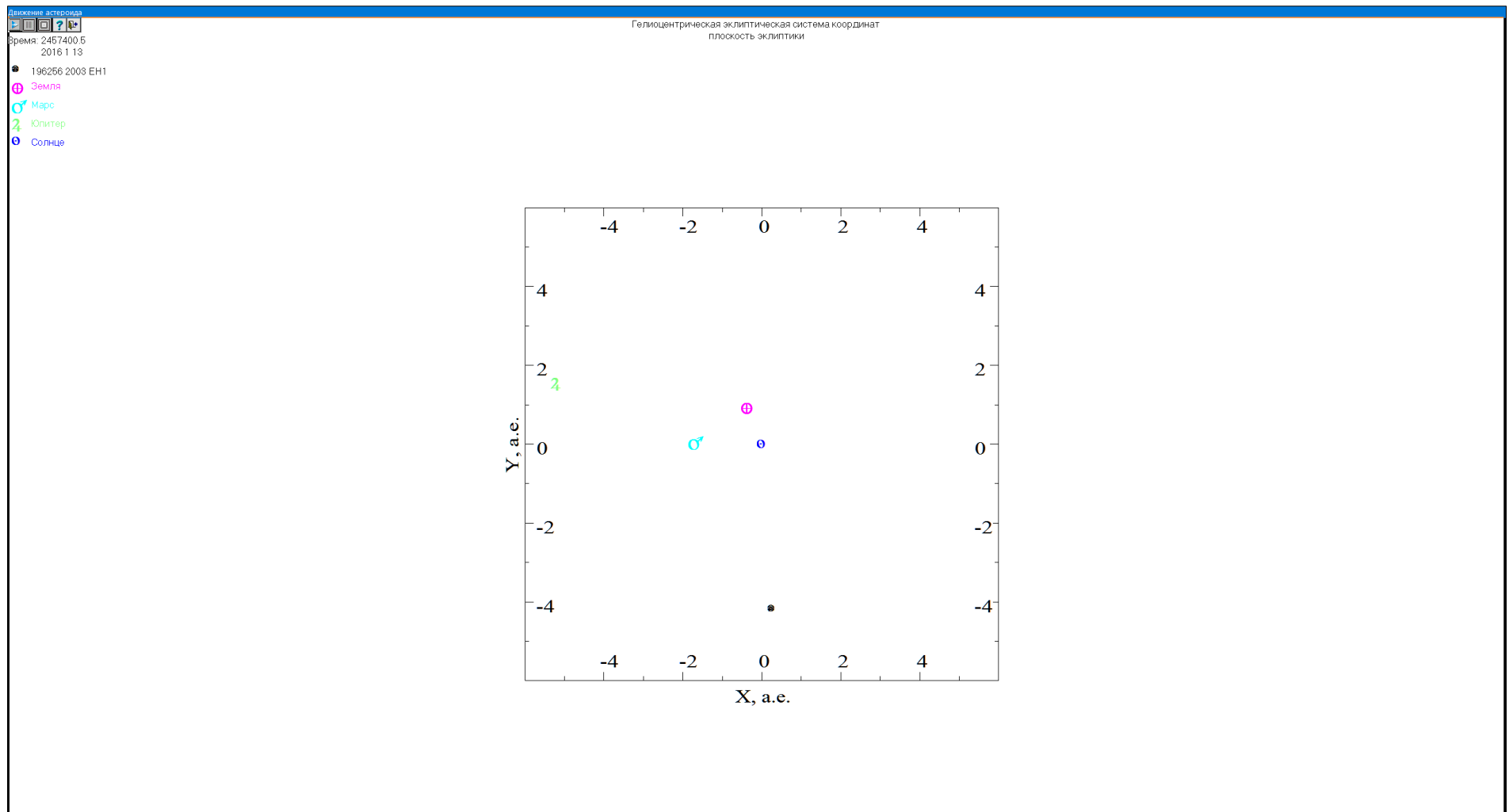


Рисунок 3.9 — Демонстрационный режим: начальное положение

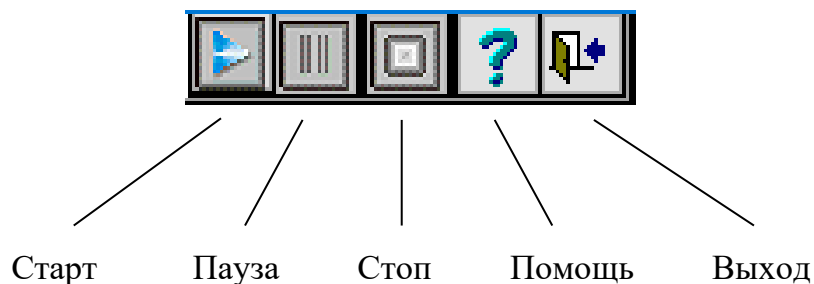


Рисунок 3.10 — Демонстрационный режим: описание кнопок

Во время работы программы доступны кнопки «Пауза» и «Стоп». Кнопка «Пауза» предназначена для временной остановки движения, после которой интегрирование может быть продолжено. При нажатии кнопки «Стоп» интегрирование прекращается. После этого можно перейти в диалоговый режим, воспользовавшись кнопкой «Выход», или посмотреть движение сначала при помощи кнопки «Старт».

Все полученные результаты заносятся в файлы, которые содержат информацию о координатах объекта, оценках точности, сближениях с большими планетами и Луной и орбитальных резонансах. В файлах с расширением out показаны данные о тесных сближениях, с расширением res – о резонансных соотношениях, dat – оценки точности интегрирования. Они могут быть использованы для построения графиков, исследования различных характеристик движения астероида, проверки устойчивости. Подсистема «Ассоль» идеально подходит для первоначального знакомства с астероидом, позволяет получить предварительные данные для дальнейшего изучения динамики. Выходные данные подсистемы могут использоваться в качестве входных для других подсистем. Кроме того, «Ассоль» полезна для подготовки научно-популярных лекций, работы со студентами и старшеклассниками.

Далее перейдем к рассмотрению остальных подсистем, которые позволяют осуществлять более детальное исследование динамики астероидов.

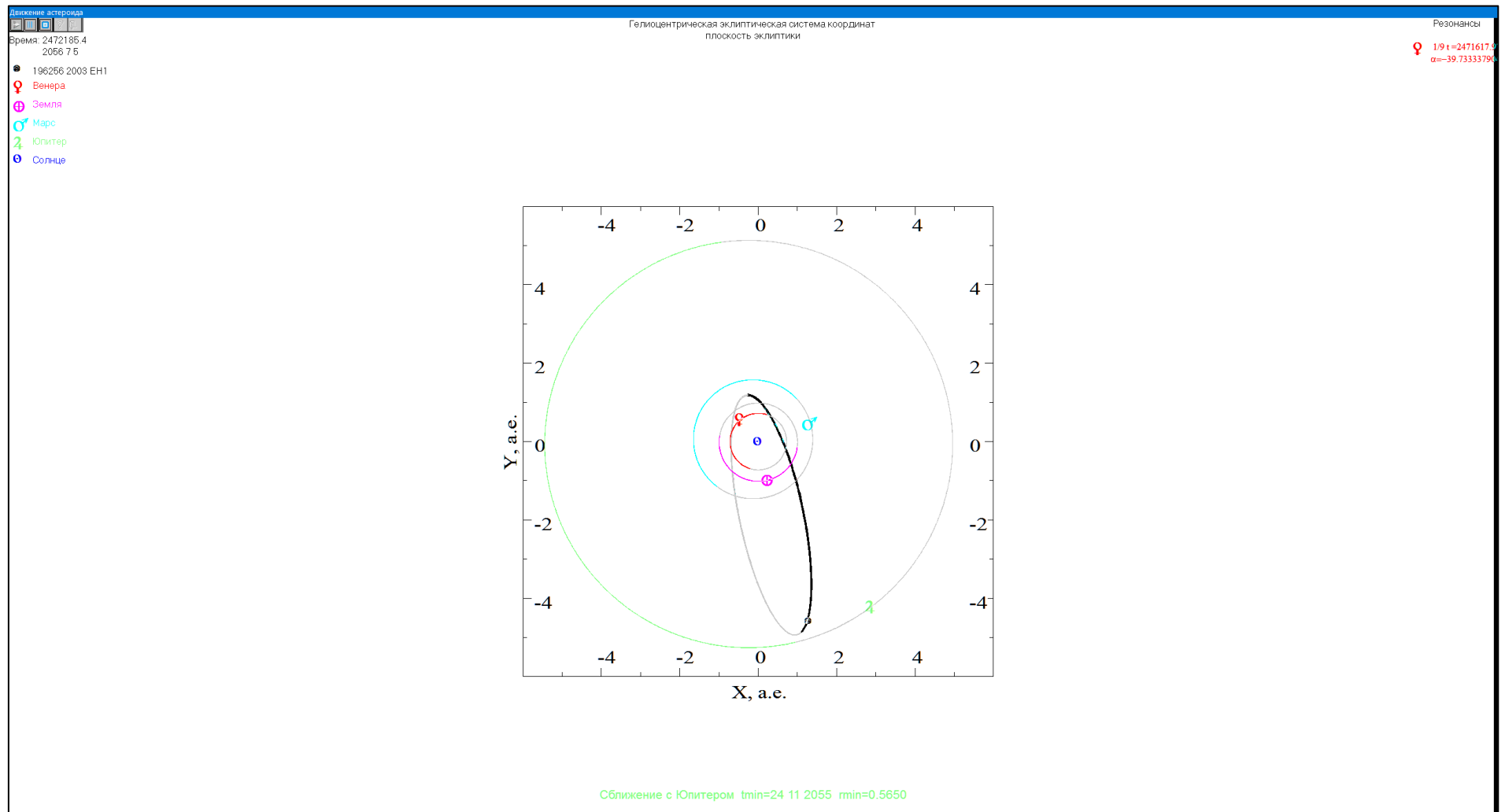


Рисунок 3.11 — Демонстрационный режим: стоп-кадр в процессе демонстрации движения астероида и планет

3.5 Подсистема «Наблюдения»

Подсистема «Наблюдения» предназначена для работы с позиционными оптическими наблюдениями астероидов, она позволяет осуществлять представление наземных и космических позиционных наблюдений, улучшать орбиту астероида, вычислять коэффициент нелинейности задачи оценивания начальных параметров и строить начальное облако неопределенности нелинейными методами. Интерфейс подсистемы представлен на рисунке 3.12.

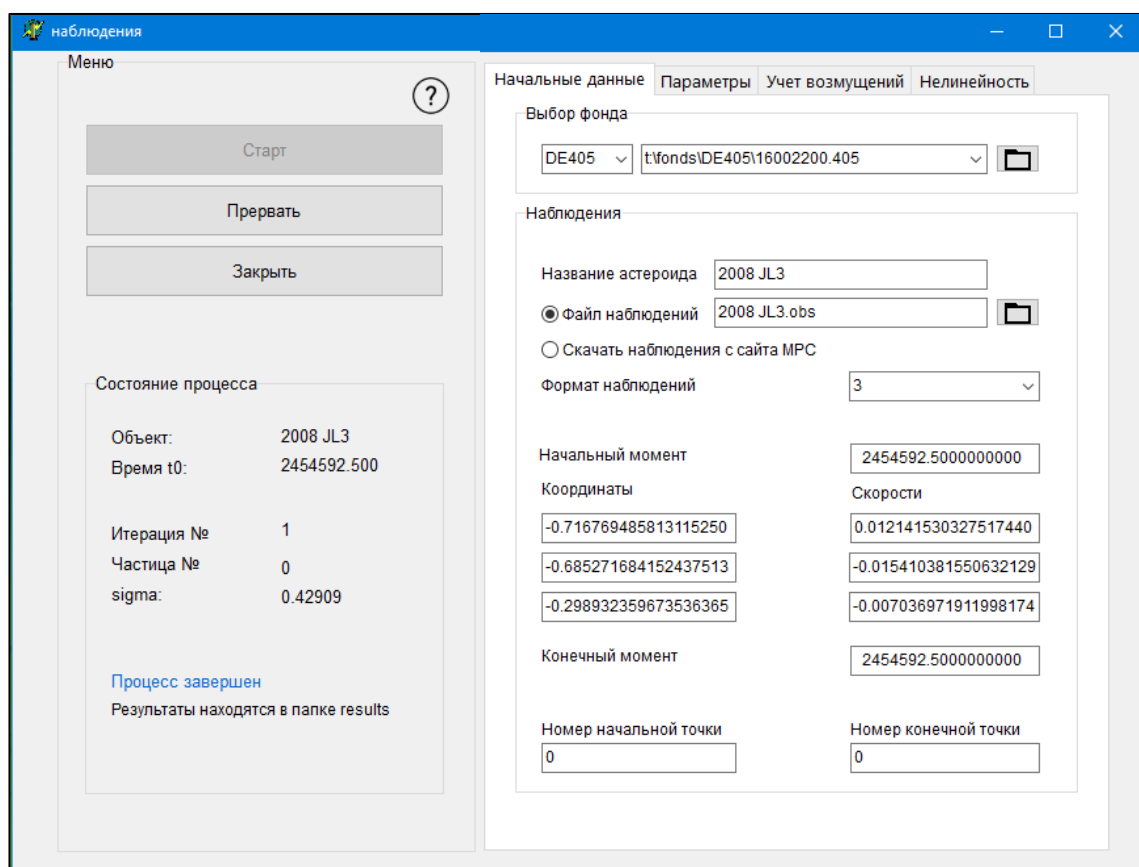


Рисунок 3.12 — Подсистема «Наблюдения»

Для работы подсистемы необходимо ввести следующую информацию:

- путь к фонду координат больших планет DE405, DE406, DE431 или DE432;
- имя астероида;
- файл наблюдений;
- номер начальной и конечной точки ансамбля частиц;
- начальный и конечный моменты времени;

- экваториальные координаты и компоненты скорости астероида на начальный момент времени;
- учитываемые возмущения;
- необходимо ли проводить улучшение орбиты и исключать наблюдения;
- нужно ли определять коэффициент нелинейности задачи оценивания начальных параметров;
- необходимо ли генерировать тестовые частицы нелинейным методом и каким именно (бутстрэп метод, метод возмущенных оценок или наблюдений).

В подсистеме реализована возможность скачивать наблюдения непосредственно с сайта Центра малых планет, для этого достаточно указать имя астероида. Кроме того, программа может работать последовательно с несколькими тестовыми частицами и осуществлять улучшение орбит на разные начальные эпохи с заданным шагом. В рассматриваемой подсистеме есть возможность подбора параметров эффекта Ярковского и светового давления из наблюдений, а также работы не только с реальными, но и с модельными наблюдениями, которые генерируются в пределах заданного значения среднеквадратической ошибки σ .

Следует отметить, что все входные данные можно вводить в файл `data`, тогда при запуске программы они отобразятся на форме, и их можно будет при необходимости подкорректировать. Начальные экваториальные координаты в этом случае заносятся в файл `pushok.out`. При необходимости подсистема может работать в консольном режиме, без демонстрации интерфейса, для этого в соответствующей строке файла `data` надо поставить 1.

После того как необходимые данные введены, можно нажать кнопку «ОК» и начнется процесс представления наблюдений, улучшения орбиты и генерирования тестовых частиц в зависимости от выбора пользователя. Результаты работы подсистемы заносятся в файлы `observ.res` и `obus.dat`, которые содержат следующую информацию:

- представление наблюдений;
- полученные в результате улучшения координаты, компоненты скорости, элементы орбиты и ковариационная матрица;
- число обусловленности Тодда;
- коэффициент нелинейности задачи оценивания начальной области.

Генерируемые нелинейным методом тестовые частицы записываются в файл `pucho1.out`.

3.6 Подсистема «Distribution»

Подсистема «Distribution» позволяет посмотреть, как распределены наблюдения по орбите астероида. Входные файлы подсистемы `coord.dat` и `data` содержат следующие данные:

- начальные эклиптические координаты и компоненты скорости астероида;
- путь к фонду координат больших планет и файлу наблюдений объекта;
- масштаб изображения;
- планеты, орбиты которых будут показаны;
- параметры координатной сетки.

В качестве примера работы подсистемы на рисунке 3.13 представлены орбиты астероида (196256) 2003 EH1 и планет земной группы в проекции на орбитальную плоскость. Кружочками на орбите астероида показаны наблюдения этого объекта.

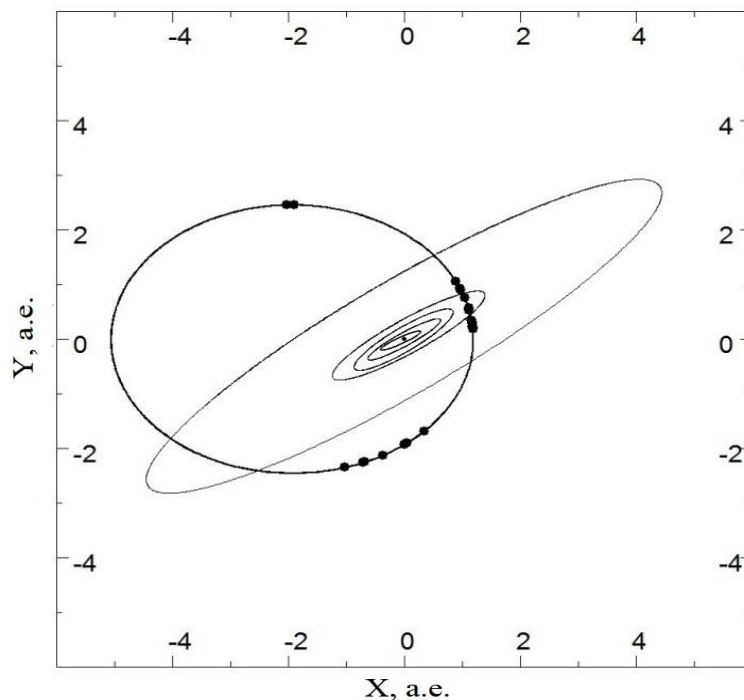


Рисунок 3.13 — Распределение наблюдений астероида (196256) 2003 EH1 по орбите

3.7 Подсистема «Ансамбль частиц»

Подсистема «Ансамбль частиц» предназначена для генерации ансамбля тестовых частиц с помощью алгоритма Холецкого на основе полученных в результате улучшения координат и компонент скорости номинальной частицы и ковариационной матрицы. Данная подсистема разработана в двух вариантах – в среде Delphi и на языке Fortran. Первый вариант отличается удобным интерфейсом (рисунок 3.14), второй – возможность работать с расширенной разрядной сеткой (128 бит). Входными данными в обоих случаях являются координаты и компоненты скорости номинальной частицы, полная или диагональная ковариационная матрица и количество необходимых тестовых частиц, выходными – координаты и компоненты скорости тестовых частиц.

Астероид: 3753 Cruithne Количество частиц: 1000

Время: 2451100.5 Коэффициент усиления: 1.0

Номинальная орбита

координаты	0.978973318458081720	0.685649026748876960	-0.14523870231359447
компоненты скорости	-0.01176324270293121	0.005951519891350560	0.004602428538694370

☐ Диагональная ковариационная матрица

ошибки координат и компонент скорости

☒ Полная ковариационная матрица

1.916903209E-0014	-4.974867041E-0015	8.237570020E-0015	1.297194769E-0016	-3.833582731E-0016	3.085134168E-0016
-4.974867042E-0015	1.641255670E-0013	-1.233821056E-0013	-6.382090523E-0016	-3.551026307E-0015	-1.707201949E-0015
8.237570020E-0015	-1.233821056E-0013	1.344010907E-0013	4.725287370E-0016	2.355854319E-0015	1.737887859E-0015
1.297194769E-0016	-6.382090523E-0016	4.725287370E-0016	1.677096646E-0017	2.778282235E-0017	2.103673372E-0017
-3.833582731E-0016	-3.551026307E-0015	2.355854319E-0015	2.778282235E-0017	1.405040170E-0016	6.075624228E-0018
3.085134168E-0016	-1.707201949E-0015	1.737887859E-0015	2.103673372E-0017	6.075624228E-0018	8.789073976E-0017

построить ансамбль

Рисунок 3.14 — Внешний вид подсистемы «Ансамбль частиц»

3.8 Подсистема «Evolution»

Программа «Evolution» предназначена для исследования орбитальной эволюции астероидов и тестовых частиц. Исследование проводится путем

численного интегрирования дифференциальных уравнений движения возмущенной задачи двух тел методом Эверхарта или Грэга-Булиша-Штера.

Для работы программы необходимо заполнить два входных файла `pushok.out` и `data`. Файл `pushok.out` содержит экваториальные координаты и компоненты скорости астероидов и (если нужно) тестовых частиц на начальный момент времени, указанный в файле `data`. Первые две строки содержат координаты и компоненты скорости для номинальной орбиты. Третья строка начинается с символа «0», после которого может следовать любая нужная пользователю информация. При исследовании ансамбля частиц эти три строки повторяются для всех тестовых частиц. В противном случае далее может присутствовать любая информация, которая не считывается программой.

В файле `data` необходимо указать:

- идентификатор используемого фонда координат больших планет (405 – для de405, 406 – de406, 431 – de431, 432 – de432);
- полный путь к фонду;
- имя исследуемого астероида, который используется только для выдачи в выходных файлах;
- используемый интегратор (0 – Эверхарта, 1 – Грэга-Булиша-Штера);
- юлианскую дату, на которую даны координаты в файле `pushok.out`;
- юлианскую дату, до которой будет производиться интегрирование (обе даты должны быть в пределах выбранного фонда координат больших планет);
- номер начальной и конечной частиц ансамбля;
- расстояние от центра планеты, подход на которое считается сближением (для внутренних и внешних планет).

При работе с резонансами реализованы 2 режима (поиск резонансов и выдача резонансных характеристик, соответствующих выбранному резонансу), которые могут комбинироваться произвольным образом. Для выбора каждого из режимов нужно поставить в первой позиции «1», для отключения – «0». Во всех режимах также нужно поставить «1» в первой позиции соответствующей планеты.

Кроме того, необходимо выбрать:

- в какой системе координат выдавать координаты и элементы орбит – эклиптической или экваториальной (расчеты в любом случае ведутся в экваториальной системе координат);
- интервал выдачи координат, элементов и резонансных характеристик в сутках;
- нужно ли проверять точность интегрирования путем сравнения результатов прямого и обратного интегрирования с начальными координатами;
- порядок интегратора и параметр точности ll (реализована возможность перебора различных параметров и работа с постоянным шагом);
- модель сил;
- диаметр, массу и альбедо (при учете светового давления);
- параметр эффекта Ярковского A_2 (при его учете).

Выходные файлы содержат следующую информацию:

- эволюцию ошибки интегрирования со временем (intr.dat);
- максимальную ошибку на всем интервале (acc.dat);
- информацию о сближениях (файлы ???s.dat, «???» – идентификатор планеты);
- информацию о прохождении через сферы Хилла, действия и тяготения Земли (earh.dat, eard.dat и eart.dat);
- эволюцию резонансной щели с заданным шагом (файлы «???r.dat»);
- эволюцию критического аргумента с заданным шагом (файлы «???b.dat»);
- результаты выявления резонансов (res.dat);
- эволюцию элементов орбиты с заданным шагом (elem.dat);
- координаты и компоненты скорости с заданным шагом (xyz.dat).

«Evolution» реализована в двух вариантах – для персонального компьютера и для многопроцессорной системы, что позволяет одновременно исследовать эволюцию большого набора тестовых частиц, что, в частности, необходимо для оценки вероятности столкновения. Кроме того, разработана модификация рассматриваемой системы Evol_Lob, которая решает аналогичные задачи, но с использованием новой версии интегратора Эверхарта – Lobbie (Авдюшев, 2022).

3.9 Подсистема «OMEGNO»

Подсистема «OMEGNO» представляет собой консольное приложение, реализованное на языке Fortran. Входные данные во многом аналогичны входным данным подсистемы «Evolution», поэтому не будем на них останавливаться. Основным выходным файлом является OMEGNO.dat, который содержит усредненный и не усреднённый параметр OMEGNO с заданным шагом. Кроме того, в файл tres.dat заносится информация о переходе критического значения 2.

3.10 Подсистема «Вековые резонансы»

На основе алгоритма поиска вековых резонансов в динамике астероидов в среде разработки Delphi была создана подсистема «Вековые резонансы», позволяющая строить эволюцию двадцати резонансных соотношений из таблицы 2.1 и соответствующих им критических аргументов на рассматриваемом интервале времени. Помимо основных характеристик векового резонанса в программе определяются значения интеграла Лидова-Козаи $c_1 = (1-e^2)\cos^2 i$ и соотношения Тиссерана для каждой из больших планет (Bonsor, Wyatt, 2012).

В качестве входных данных в программе используются файлы с кеплеровскими элементами или координатами и компонентами скорости и файл со значениями величин $\dot{\omega}$, $\dot{\Omega}$, записанными с определенным временным шагом. Эти данные являются результатом работы подсистемы «Evolution».

Перед началом работы с программой необходимо задать следующую информацию:

- фонд координат больших планет и путь к нему;
- систему координат, в которой представлены входные данные (экваториальная или эклиптическая);
- число астероидов, для которых будет производиться поиск вековых резонансов.

На выходе пользователь получает ряд файлов, содержащих следующую информацию:

- резонансные соотношения (20 вариантов из таблицы 2.1) при взаимодействии с каждой из больших планет и Плутоном;

- критические аргументы, соответствующие резонансным соотношениям из таблицы 2.1 при взаимодействии с каждой из больших планет и Плутоном;
- величины $e \cos \psi$ и $e \sin \psi$ для построения фазовых портретов при взаимодействии с каждой из больших планет и Плутоном;
- значения интеграла Лидова-Козаи;
- значения соотношения Тиссерана.

Результаты в выходные файлы записываются с тем же шагом, с которым дана входная информация.

3.11 Подсистема «Эллипсоид»

Подсистема «Эллипсоид» предназначена для проецирования построенного облака неопределенности на небесную сферу (Bykova, Galushina, Baturin, 2012). Внешний вид окна подсистемы представлен на рисунке 3.15. В этом окне нужно указать:

- число точек ансамбля;
- число сечений эллипсоида;
- файл данных;
- путь к фонду координат больших планет DE405;
- номер обсерватории, на которой будут производиться наблюдения астероида.

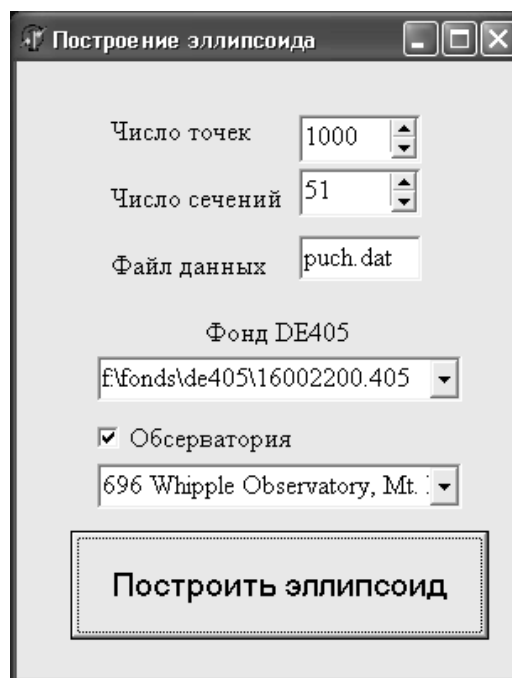


Рисунок 3.15 — Внешний вид подсистемы «Эллипсоид»

В файле данных содержатся момент времени, прямоугольные гелиоцентрические экваториальные координаты и компоненты скорости номинальной частицы и частиц ансамбля.

После введения исходных данных нажимается кнопка «Построить эллипсоид». Результаты работы программы записываются в два файла. В каждом из них содержатся моменты времени и видимые координаты α , δ . Один файл соответствует точному способу проецирования (Черницов и др., 1998), другой – приближенному (Батурин, 2001, 2002).

3.12 Подсистема «Covar_coll»

Подсистема «Covar_coll» разработана для оценки вероятности столкновения астероида с Землей методом линейного отображения. Для работы программы необходимо заполнить входные файлы `pushok.out`, `pushok1.out` и `data`. Файлы `pushok.out` и `pushok1.out` содержат экваториальные координаты и компоненты скорости астероида и тестовых частиц на начальный момент времени, указанный в файле `data`. Первые 2 строки содержат координаты и компоненты скорости для номинальной орбиты. Третья строка начинается с символа «0», после которого может следовать любая нужная пользователю информация. Эти три строки повторяются для всех тестовых частиц. Файл `pushok.out` является по сути подмножеством файла `pushok1.out` и предназначен для ускорения поиска близкой к столкновительной целевой орбиты по меньшему числу частиц. Оценка вероятности столкновения осуществляется по файлу `pushok1.out`, который может содержать начальные данные для большого числа тестовых частиц.

В файле `data` необходимо указать:

- идентификатор используемого фонда координат больших планет (405 – для de405, 406 – de406, 408 – de408);
- полный путь к фонду;
- имя исследуемого астероида;
- юлианскую дату, на которую даны координаты в файле `pushok.out`;
- юлианскую дату, до которой будет производиться интегрирование (обе даты должны быть в пределах выбранного фонда координат больших планет);
- номер начальной и конечной частиц ансамбля;

Кроме того, необходимо выбрать:

- порядок интегратора и параметр точности ll ;
- модель сил;
- диаметр, массу и альбедо (при учете светового давления).

Выходной файл `kepler.dat` содержит следующую информацию:

- момент сближения и расстояние до Земли для номинальной орбиты и всех тестовых частиц;
- время работы программы;
- число итераций;
- число выявленных столкновений;
- вычисленную вероятность столкновения.

3.13 Автоматизация некоторых процессов при построении орбитальной эволюции астероидов

В процессе работы с программным комплексом «ИДА» часто приходится повторять некоторые действия по несколько раз. Подобные задачи приводят к значительным временным затратам, особенно если действия совершаются для больших групп астероидов. Помимо этого, при постоянно повторяющихся однотипных процессах велика вероятность совершения пользователем той или иной ошибки. В подобной ситуации хорошим решением является автоматизация таких задач. Мы включили в программный комплекс автоматизацию следующих процессов:

- улучшение орбиты методом наименьших квадратов и построения ансамбля частиц («`ida_id`»);
- оценка влияния возмущающих факторов на динамику астероидов («`ida_p`»);
- подбор трансверсальной составляющей ускорения для учета эффекта Ярковского («`ida_A2`»);
- построение области неопределенности на небесной сфере («`ida_d`»);
- построение большого массива графиков.

Программы «`ida_id`», «`ida_p`», «`ida_A2`» и «`ida_d`» написаны на Delphi. Перед началом работы с каждой из них необходимо внести нужную информацию во входные файлы `input_id.txt`, `input_p.txt`, `input_yar.txt` и `input_d.txt` соответственно.

На рисунках 3.16–3.19 схематично представлены этапы работы программ. Построение большого массива графиков осуществляется с помощью скрипта, созданного в Golden Software Grapher.

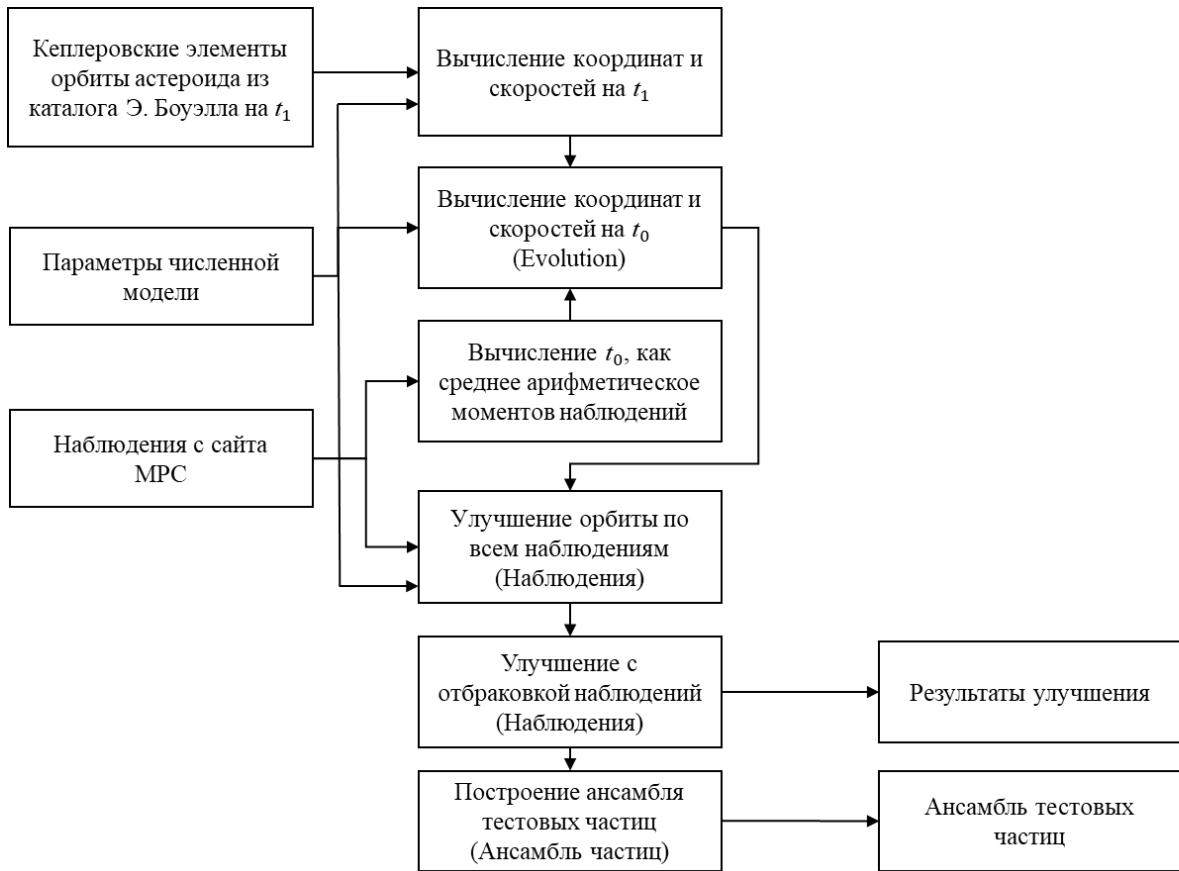


Рисунок 3.16 — Этапы процесса улучшения орбиты методом наименьших квадратов и построения ансамбля частиц

Этапы работы программы «ida_id» приведены на рисунке 3.16. В качестве входных данных используются наблюдения астероидов с сайта Центра малых планет (<https://minorplanetcenter.net/>) и кеплеровские элементы из каталога Э. Боуэлла (Bowell et al., 1994). В файле input_id.txt заполняется информация об используемом фонде координат больших планет, учете возмущающих факторов и приводится перечень астероидов. Важно, чтобы обозначения астероидов соответствовали названиям файлов в базе наблюдений. После запуска программы процесс автоматически повторяется для заданного числа астероидов. Используемый способ построения начального облака неопределенности положения астероида описан в работе (Syusina et al., 2012). На этой и последующих схемах в скобках записано название используемой подсистемы.

На рисунке 3.17 приведены этапы процесса оценки влияния возмущающих факторов на динамику астероидов с помощью программы «ida_r». Оценка возмущающих факторов осуществляется пятью методами: «Эволюция без улучшения», «Эволюция с улучшением», «Ускорение», «Сигма» и «Область». Описание методов приведено в разделе 2.8 и работах (Galushina et al., 2015; Galushina and Sambarov, 2017).

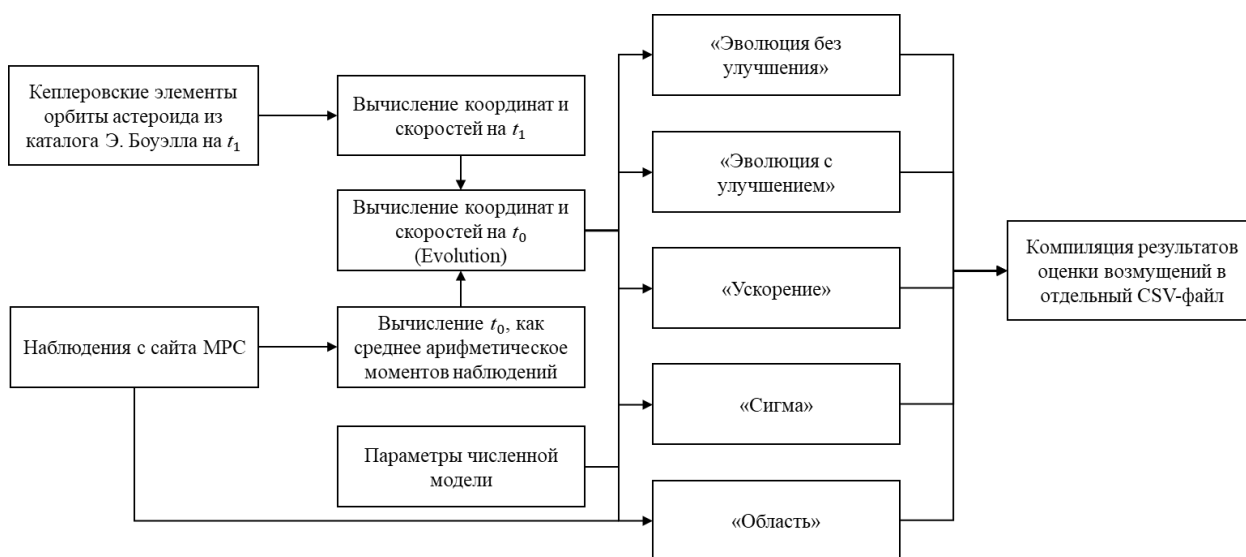


Рисунок 3.17 — Этапы процесса оценки влияния возмущающих факторов на динамику астероидов



Рисунок 3.18 — Этапы процесса подбора трансверсальной составляющей ускорения для учета эффекта Ярковского

Методика определения A_2 путем перебора значений из заданного интервала (раздел 2.2) реализована в программе «ida_A2». Корректируя параметры численной модели и задавая перечень астероидов в файле input_yar.txt, по схеме из рисунка 3.18 автоматически решается задача подбора параметра из условия минимума среднеквадратической ошибки представления наблюдений.

На рисунке 3.19 схематично представлены этапы работы программы «ida_d», которая реализует построение области неопределенности на небесной сфере.

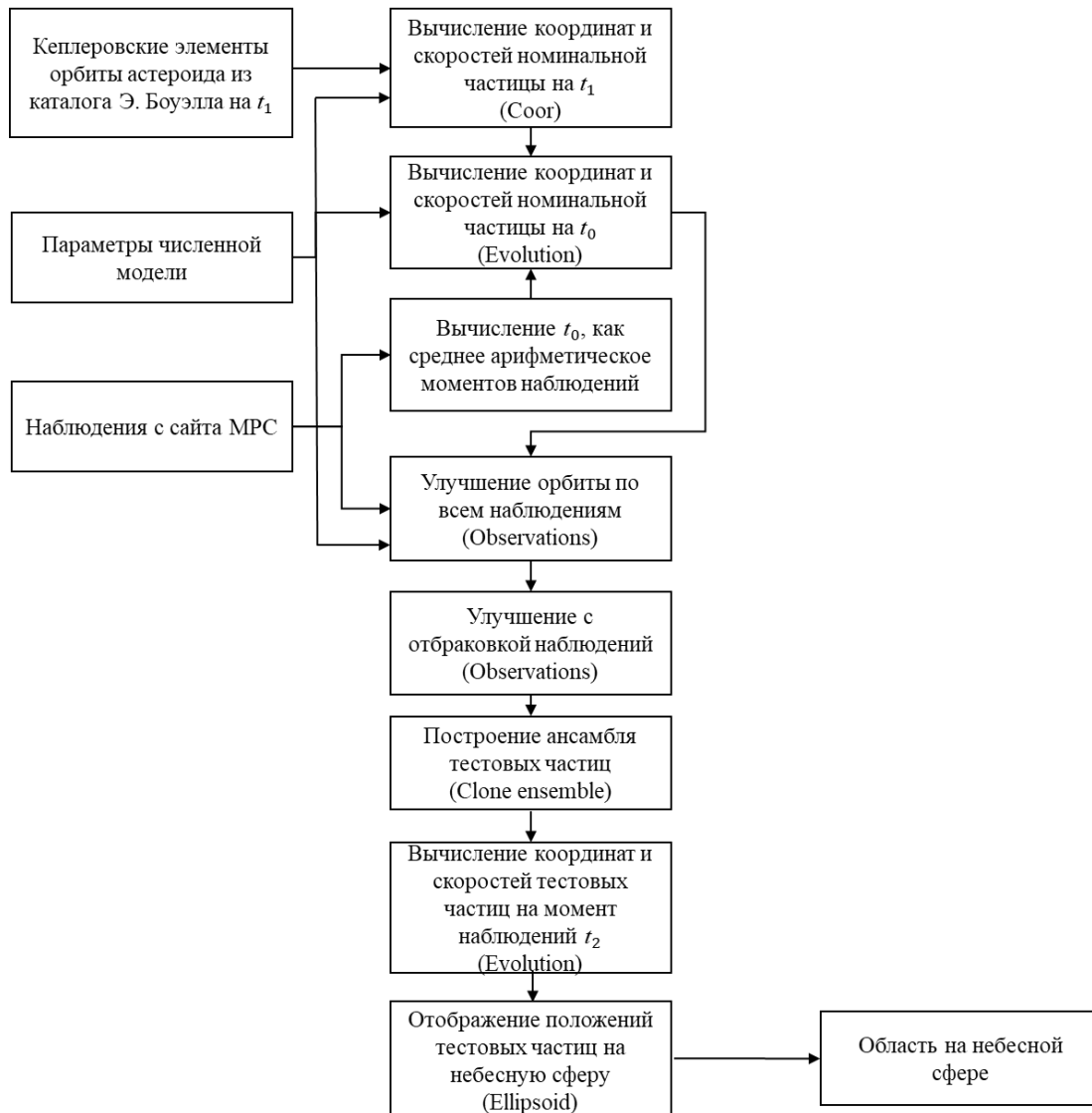


Рисунок 3.19 — Этапы процесса построения поисковых эфемерид

В качестве входных данных используются наблюдения астероидов с сайта Центра малых планет (<https://minorplanetcenter.net/>) и кеплеровские элементы из каталога Э. Боуэлла (Bowell, 1994). В файле input_d.txt заполняется информация

об используемом фонде координат больших планет и приводится перечень астероидов с указанием момента времени, на который строятся эфемериды. Важно, чтобы обозначения астероидов соответствовали именам файлов в базе наблюдений. После запуска программы процесс автоматически повторяется для заданного числа астероидов.

3.14 Выводы по главе 3

Таким образом, в главе 3 описан программный комплекс ИДА, предназначенный для изучения особенностей динамики астероидов, в частности, прогноза сближений и столкновений с планетами и Луной, оценки вероятности столкновения, выявления орбитальных и вековых резонансов и т.д. Комплекс состоит из ряда подсистем, каждая из которых решает свою подзадачу, но при этом подсистемы могут объединяться для решения различных задач, в том числе путем использования управляющих программ. Все подсистемы реализованы при непосредственном участии автора работы с частичным использованием некоторых процедур, например, интеграторов (Авдюшев, 2010, 2022). Большинство исследований в данной диссертационной работе проведены с применением рассматриваемого программного комплекса.

ГЛАВА 4 ОПТИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ АСЗ НА ТЕРСКОЛЬСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ ИНАСАН

4.1 Методика проведения позиционных наблюдений астероидов

При проведении позиционных наблюдений астероидов можно выделить три этапа:

- подготовка к наблюдениям;
- непосредственное получение снимков на телескопе;
- обработка полученных кадров.

Рассмотрим, как осуществляются эти процессы в Центре коллективного пользования «Терскольская обсерватория» (<http://www.inasan.ru/divisions/terskol/ckp/>) на телескопе Zeiss-2000, характеристики которого показаны в таблице 4.1, где используются следующие сокращения: ПЗС – прибор с зарядовой связью, пк – пиксель.

Таблица 4.1 — Параметры приемного оборудования

Вид камеры	ПЗС-камера FLI PL 4301 (фокус Кассегрена)
Апертура	2 м
Фокусное расстояние	16 м
Размеры матрицы	2084 × 2084 пк
Размер пиксела	24 × 24 мкм
Поле зрения	~ 11 × 11'
Время считывания	2 – 5 сек
Предельная проникающая	20 – 21 ^m 22 ^m (в фотометрическую ночь)

Планирование наблюдений осуществляется с помощью программного пакета ЭПОС (Львов, Цекмейстер, 2012). В качестве начальных данных используются каталог Боуэлла (Bowell et al., 1994) и каталог MPC (<https://minorplanetcenter.net/iau/MPCORB.html>). Для выбора доступных для наблюдений объектов применяются

следующие критерии: звездная величина не слабее 23^m и высота объекта над горизонтом не ниже 20° . Следует отметить, что объекты слабее 22^m доступны для наблюдений на телескопе Zeiss-2000 только в фотометрические ночи, но их имеет смысл принимать во внимание еще и по причине возможных неточностей в определении звездной величины. На основе полученных данных определяется оптимальное время наблюдений. Далее вычисляются эфемериды с использованием как пакета ЭПОС, так и сервисов NASA (<https://ssd.jpl.nasa.gov/?horizons>) и MPC, что дает возможность проконтролировать точность полученных результатов.

Для получения снимков используется программное обеспечение MaximDL (<https://diffractionlimited.com/help/maximdl/MaxIm-DL.htm>) или CameraControl. Для фотометрической редукиции полученных ПЗС-кадров производится съёмка калибровочных изображений. Калибровки снимаются при тех же условиях, при которых производились наблюдения (температура матрицы), непосредственно после или до начала наблюдательной ночи, чтобы вычесть соответствующие конкретным наблюдениям шумы.

Перед началом наблюдений, с вечера, после захода Солнца, проводится съёмка плоских полей (flat field). Плоские поля могут быть также получены после завершения ночного наблюдательного сеанса, по утреннему небу. Плоские поля снимаются во всех фотометрических фильтрах, которые использовались при наблюдениях. Подборка экспозиции во время съёмки плоских полей осуществляется исходя из интенсивности полученного на кадре сигнала. Максимальная интенсивность сигнала не должна превышать порогового значения (для указанной камеры это 55000 – 60000) и выбирается в пределах от 20000 до 40000.

Для удаления шумов камеры с рабочих кадров получают калибровочные снимки – темновые поля (dark fields) и байасы (bias). Темновые поля для удаления темновых токов приемника снимаются при закрытом куполе и закрытой трубе телескопа с экспозициями, с которыми получались рабочие кадры. Для получения калибровочных байасов на матрице выставляют минимально возможную экспозицию при закрытых куполе и трубе телескопа. В процессе фотометрической редукиции посредством вычитания байасов удаляются шумы считывания приёмника.

Фотометрическая редукция проводится в программном обеспечении, позволяющем вычестить калибровочные снимки из рабочих кадров, например, в пакете MaximDL.

Подбор экспозиций (от 30 до 240 с) осуществляется в зависимости от звёздной величины объекта исследований, известной из каталога орбит, его угловой скорости, отношения сигнал/шум на момент измерений, а также от текущих атмосферных условий. Использование фотометрического фильтра R улучшает точность определения звёздной величины и положения ярких объектов. Однако, поскольку он обрезает часть светового потока, то его применение делает невозможным наблюдение слабых астероидов, поэтому рекомендуется его использовать при съёмке объектов до 20-й величины.

После наведения телескопа на выбранный объект поле зрения отождествляется со звёздным каталогом для определения инструментальных поправок. В зависимости от угловых скоростей исследуемого объекта в кадре в эфемеридное положение центра кадра вводятся поправки. Если слабый (слабее 20-й звёздной величины) объект движется с большой угловой скоростью, наблюдения проводятся с выставлением скоростей телескопа вместе с часовым ведением. В таком случае звёзды вытягиваются в линии, а исследуемый объект отображается точечным.

Для уточнения орбит малых тел Солнечной системы необходимо получение непрерывных измерений как минимум в течение часа за ночь несколько ночей подряд. На рисунке 4.1 приведён пример астрометрических наблюдений астероида (3200) Phaethon с помощью телескопа Zeiss-2000 ЦКП ИНАСАН на ПЗС-камере FLI PL 4301 в фильтре R. Экспозиция составляет 30 секунд, биннинг 2×2 . Объект показан в чёрном круге.

Обработка рабочих кадров проводится с помощью программных пакетов Astrometrica, IzmCCD (Измайлов и др., 2010) и Апекс-II (Девяткин и др., 2010). Перед обработкой осуществляется калибровка с помощью калибровочных кадров. При первичной обработке полученного массива данных осуществляется отбраковка кадров с низким отношением сигнал/шум.

При обработке пакетом IzmCCD возможно применение автоматического режима, что позволяет существенно сократить затрачиваемое время, но может сказаться на качестве – не все снимки удастся обработать. Такие кадры приходится

обрабатывать вручную в программном пакете Astrometrica. Для привязки полученных кадров к каталогу малых тел Солнечной системы в IzmCCD используется каталог орбит Э. Боуэлла, а в Astrometrica – Центра малых планет. Универсальным средством является пакет Апекс-II, поскольку позволяет работать как в ручном, так и в автоматическом режиме. Однако среди его недостатков стоит отметить некоторые сложности с настройкой и управлением.

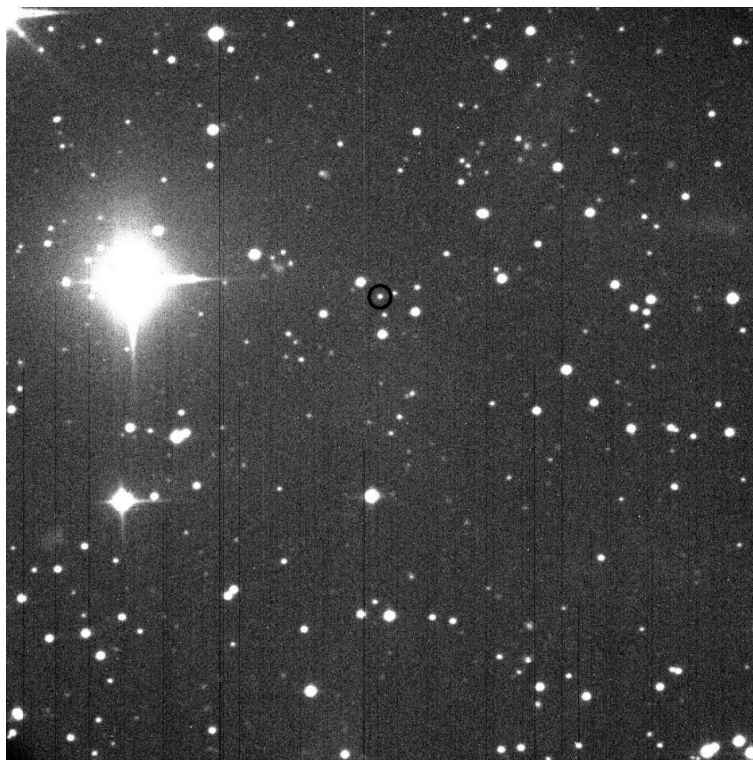


Рисунок 4.1 — Наблюдения астероида (3200) Phaethon, фильтр R, 16 сентября 2020 года

Таким образом, для ярких объектов с хорошо определенной орбитой можно порекомендовать IzmCCD, который позволяет быстро получить не только координаты, но и оценки точности. Однако, для слабых объектов с плохо определенной орбитой приходится прибегать к ручной обработке снимков в пакете Astrometrica. Альтернативой во всех случаях является использование Апекс-II.

4.2 Алгоритм построения поисковых эфемерид астероидов

В данном разделе предложена методика расчета поисковых (обзорных) эфемерид астероидов (Быкова и др., 2007а) для тех случаев, когда не удастся обнаружить объект по расчетной эфемериде, даваемой на основе некоторой

номинальной орбиты. Такая ситуация возникает обычно с нумерованными астероидами, когда объект наблюдался непродолжительное время и неопределенность в оценке параметров его орбиты слишком велика.

Отметим, что по состоянию на октябрь 2022 г. около 10% астероидов имеют номер, орбиты остальных недостаточно хорошо определены (таблица 1.1). В таких случаях необходимо оценить область неопределенности положения объекта на требуемом интервале времени. Поисковая эфемерида может быть представлена как проекция области возможных положений астероида на небесную сферу в заданный момент времени. Рассмотрим алгоритм расчета такой поисковой эфемериды.

Алгоритм расчета поисковой эфемериды астероида на основе области неопределенности его положения включает в себя следующие блоки:

- 1) построение численной модели движения астероида;
- 2) построение начального облака неопределенности астероида по результатам наблюдений;
- 3) построение облака неопределенности $\Theta(t)$ на момент t ;
- 4) проецирование облака $\Theta(t)$ на небесную сферу.

Построению численной модели движения астероида посвящен подраздел 2.2, методы построения начального облака неопределенности приводятся в подразделе 2.4, а в подразделе 2.3 описываются методы численного интегрирования, как способ построения облака на заданный момент времени. Поэтому здесь остановимся на последней задаче.

Задача проецирования облака неопределенности на небесную сферу имеет большое практическое значение при идентификации космических объектов (Milani, 1999), а также для построения поисковых эфемерид. В настоящее время существует ряд способов ее решения, среди которых можно выделить приближенные и точные. Точный способ проецирования является наиболее простым по своей реализации и заключается в вычислении видимых координат объекта для всех вычисленных точек облака. Однако при таком способе проекция облака на небесную сферу получается в виде множества точек без четко обозначенных границ, что затрудняет дальнейшее использование этого облака. Для получения видимой границы области

представляется более эффективным применение приближенных способов, использующих ее аппроксимацию с помощью эллипсоида в пространстве каких-либо переменных (Milani, 1999; Батурин, 2002). Выбор переменных определяется требованием наилучшей аппроксимации эллипсоидом формы области в пространстве. В частности, такие переменные должны учитывать основное свойство эволюции доверительных областей – растяжение вдоль опорной траектории, что сразу исключает из использования переменные, не учитывающие это свойство, например, прямоугольные координаты.

В приводимом здесь алгоритме используется аппроксимация области эллипсоидом в пространстве цилиндрических координат, введенных в работе (Батурин, 2002). При этом система координат строится на цилиндре, в основании которого лежит оскулирующая орбита опорной точки области возможных движений. Входными данными для построения эллипсоида ошибок на момент t в цилиндрических координатах служит множество точек области $\Theta(t)$ в прямоугольной гелиоцентрической экваториальной системе координат. На основе этих данных вычисляются элементы ковариационной матрицы $C_p(t)$ в пространстве цилиндрических координат и определяются собственные значения и соответствующие им собственные векторы матрицы. Далее вводится система координат, оси которой совпадают с собственными векторами матрицы $C_p(t)$. Проецирование полученного эллипсоида на небесную сферу производится соответствующим преобразованием к геоцентрическим сферическим экваториальным координатам (α, δ) с использованием способа сечений, описанного в работе (Батурин, 2001). Этот способ позволяет среди массива положений тестовых частиц найти 4 точки, имеющие экстремальные значения, которые и определяют искомые пределы изменения α и δ .

Чтобы получить видимые границы области, необходимо учесть поправки за прецессию, нутацию, рефракцию по известным формулам (Абалакин, 1979), а затем сделать переход к видимым координатам.

4.3 Статистика наблюдений

Позиционные наблюдения являются важным этапом в изучении динамики. С одной стороны, они позволяют получить начальные координаты и компоненты

скорости и их неопределенности для исследования вероятностной орбитальной эволюции. С другой стороны, являются важным верификационным инструментом для численных моделей движения астероидов. В частности, помогают достоверно определить, какие возмущающие факторы необходимо учитывать при исследовании динамики. Кроме того, в условиях недостатка информации позиционные наблюдения оказываются единственным способом оценить некоторые физические параметры астероида, например, коэффициент эффекта Ярковского.

Под руководством и частично при непосредственном участии автора работы в период с 2020 по 2023 год проведено 6 сеансов наблюдений на телескопе Zeiss-2000 (таблица 4.1) в Центре коллективного пользования «Терскольская обсерватория». В таблице 4.2 для каждого сеанса приведены даты, число наблюдательных ночей и число наблюденных астероидов. В основном рассматривались два класса объектов: с малыми перигелийными расстояниями и с плохо определенными орбитами. Причем период наблюдений выбирался из условий видимости наибольшего числа объектов первого класса. Исключением является первый сеанс, целью которого было освоение методики наблюдений астероидов на Терскольской обсерватории. В 2022 и 2023 годах также ставилась задача апробации и усовершенствования методики наблюдений слабых объектов, основанной на движении телескопа со скоростью смещения астероида по небесной сфере. Кроме того, в 2022 и 2023 годах проводились наблюдения двух особых астероидов – (65803) Didymos и 2023 BU. Последующие подразделы данного раздела посвящены наблюдениям 2020-го, 2021-го, 2022-го и 2023-го годам соответственно.

Таблица 4.2 — Общие данные о сеансах наблюдений

Даты	Число наблюдательных ночей	Число астероидов
14–16.09.2020	3	6
28.10–6.11.2021	4	8
28.06–9.07.2022	4	4
18.10–6.11.22	7	6
14–27.01.2023	7	10
2–20.12.2023	2	3

4.4 Наблюдения 2020-го года

Для исследования в 2020 году были выбраны шесть астероидов, сближающихся с Землёй, в том числе открытые в 2020 году. Для тестирования методики наблюдений и обработки снимков рассматривались два класса объектов: нумерованные с хорошо определенной орбитой и недавно открытые объекты, орбиты которых определены недостаточно точно. Для выбора доступных для наблюдения астероидов использовался программный комплекс ЭПОС (Львов, Цекмейстер, 2012). В качестве критерия наблюдаемости выбраны значения высоты объекта над горизонтом не менее 20 градусов и видимой звездной величины не более 20^m.

В таблице 4.3 приведены данные о числе и продолжительности полученных измерений. Здесь α – прямое восхождение, δ – склонение, R – фильтр. Интересующие нас объекты наблюдались на интервале примерно равном трём суткам, за исключением астероида 2020 PF7, наблюдения которого были получены в течение одной ночи. 15 сентября наблюдения не проводились по причине ухудшения погодных условий.

Измерения всех объектов получены в фотометрическом фильтре R, использовались следующие варианты экспозиций: 30 с, 60 с, 120 с, 180 с. В качестве источников эфемеридных данных для наблюдений малых тел Солнечной системы использовался веб-интерфейс системы HORIZONS Лаборатории реактивного движения NASA (<https://ssd.jpl.nasa.gov/?horizons>) и база данных Центра малых планет (<https://minorplanetcenter.net/>).

После наведения телескопа на выбранный объект поле зрения отождествляется со звёздным каталогом для определения инструментальных поправок. В зависимости от угловых скоростей исследуемого объекта в кадре в эфемеридное положение центра кадра вводятся поправки.

Для уточнения орбит малых тел Солнечной системы желательно получение нескольких точек за ночь несколько ночей подряд. На рисунке 4.1 приведён пример астрометрических наблюдений астероида (3200) Phaethon. Следует отметить, что (3200) Phaethon – единственный астероид с малым перигелийным расстоянием, который удалось отнаблюдать в заданный промежуток времени.

Таблица 4.3 — Данные о числе и распределении наблюдений 2020 года

Объект	Дуга, начало $\alpha,^{\text{h m s}}$ $\delta,^{\circ ' ''}$	Дуга, конец $\alpha,^{\text{h m s}}$ $\delta,^{\circ ' ''}$	Дуга, ч	Число измерений	Видимая звёздная величина, R
(3753) Cruithne	06 01 44.19 −06 51 44.71	06 13 41.90 −07 34 36.12	71.920	54	17.6
(3200) Phaethon	07 08 29.67 +28 41 26.07	07 16 09.81 +28 22 50.45	70.052	42	17.9
2020 QK6	03 21 31.89 +00 05 09.38	03 48 15.84 −07 41 19.92	72.539	48	19.5
2020 PR3	22 41 05.56 −03 16 46.24	22 51 23.74 −02 56 33.46	73.867	43	19.6
2020 PC5	23 57 23.55 +15 59 37.71	23 56 57.29 +15 00 39.27	74.068	63	19.2
2020 PF7	22 29 20.91 +48 10 43.65	22 28 36.95 +48 15 54.98	4.113	41	19.7

Обработка рабочих кадров проводилась с помощью программных пакетов Astrometrica и IzmCCD (Izmailov et al., 2010). Кроме запланированных для наблюдений АСЗ при обработке на снимках в автоматическом режиме были обнаружены некоторые объекты Главного пояса (в том числе (13128) Aleppo, (49385) 1998 XA12, (261906) 2006 JG30, (531245) 2012 JG33, 2005 QU58, 2007 RG27 и 2009 FV66).

При первичной обработке полученного массива данных осуществлялась отбраковка кадров с низким отношением сигнал/шум. Программным пакетом Astrometrica была проведена астрометрическая обработка всех кадров, поступивших в работу после отбраковки (данные по количеству измерений в таблице 4.3). Для привязки полученных кадров к каталогу малых тел Солнечной системы использовался каталог орбит Центра малых планет (<https://minorplanetcenter.net/iau/MPCORB.html>).

При обработке пакетом IzmCCD применялся автоматический режим, что позволило существенно сократить затрачиваемое время, но сказалось на качестве – не все снимки удалось обработать. Результаты представлены в таблице 4.4, где N – общее число полученных снимков, N_1 и N_2 – число снимков, обработанных пакетами Astrometrica и IzmCCD соответственно, $\sigma(\Delta)$ – среднеквадратическая разность измерений, полученных пакетами Astrometrica и IzmCCD, $\sigma(O - C)$ – среднеквадратическая ошибка представления наблюдений из IzmCCD.

Таблица 4.4 — Результаты обработки наблюдений 2020 года

Объект	Дата	N	N_1	N_2	$\sigma(\Delta), ''$	$\sigma(O - C), ''$
(3753) Cruithne	14.09.2020	18	18	18	0.114	0.159
(3753) Cruithne	16.09.2020	39	12	22	0.192	0.320
(3753) Cruithne	17.09.2020	23	23	3	2.471	8.399
(3200) Phaethon	14.09.2020	17	14	10	0.068	0.110
(3200) Phaethon	16.09.2020	14	11	11	0.081	0.083
(3200) Phaethon	17.09.2020	22	18	18	0.041	0.092
2020 PC5	14.09.2020	19	16	8	0.534	4.040
2020 PC5	16.09.2020	15	14	8	3.481	4.152
2020 PC5	17.09.2020	34	34	1	3.481	4.152
2020 PR3	14.09.2020	14	10	1	11.080	1.029
2020 PR3	17.09.2020	33	33	0	—	—
2020 QK6	14.09.2020	18	18	0	—	—
2020 QK6	16.09.2020	15	13	0	—	—
2020 QK6	17.09.2020	17	17	4	14.044	8.464
2020 PF7	17.09.2020	45	40	37	5.899	1.878

На рисунке 4.2 для примера представлена статистика наблюдений астероида (3200) Phaethon в одну из наблюдательных ночей. Показаны отличия результатов измерений, полученных с помощью пакетов Astrometrica и IzmCCD (серым цветом),

а также разница (O–C) для измерений, обработанных в IzmCCD (черным цветом). В большинстве случаев отличия результатов Astrometrica и IzmCCD не превышают (O–C) или одного порядка с ней.

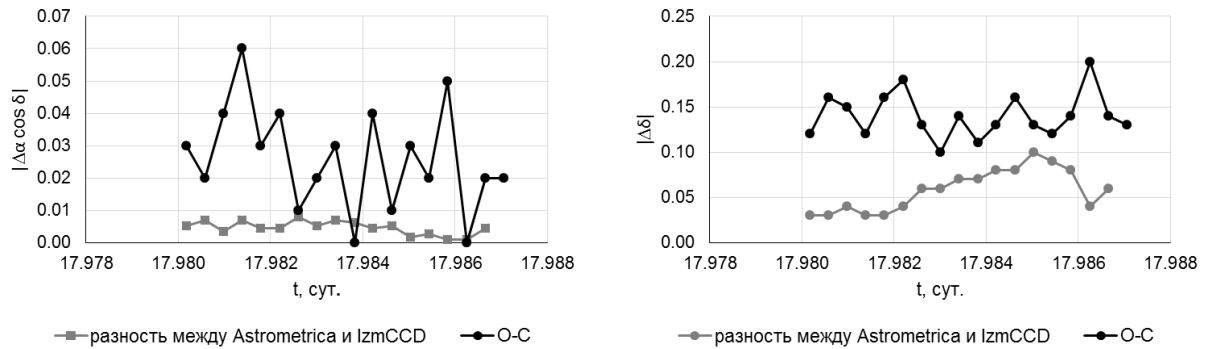


Рисунок 4.2 — Оценка точности наблюдений астероида (3200) Phaethon
в ночь 17/18.09.2020

Таким образом, для ярких объектов с хорошо определенной орбитой можно порекомендовать IzmCCD, который позволяет быстро получить не только координаты, но и оценки точности. Однако, для слабых объектов с плохо определенной орбитой приходится прибегать к ручной обработке снимков в пакете Astrometrica.

4.5 Наблюдения 2021 года

4.5.1 Наблюдения астероидов с малыми перигелийными расстояниями

По состоянию на июнь 2021 года были известны 52 астероида с перигелийными расстояниями не больше 0.15 а.е. Аналогично 2020-му году выбор оптимального времени наблюдений проводился с помощью программного пакета ЭПОС. В качестве начальных данных использовалась выборка астероидов с малыми перигелийными расстояниями из каталога Э. Боуэлла (Bowell et al., 1994) на эпоху 05.07.2021. Расчет выполнялся для Центра коллективного пользования «Терскольская обсерватория» ИНАСАН при следующих условиях: звездная величина до 22^m и высота объекта над горизонтом не ниже 20°.

В октябре-ноябре 2021 года на комплексе 2-метрового телескопа Zeiss-2000 ЦКП «Терскольская обсерватория» состоялись наблюдения ряда астероидов с малыми перигелийными расстояниями. При хороших погодных условиях

(прозрачность атмосферы, отсутствие дымки и засветки от Луны) наблюдались более слабые объекты. При неидеальных погодных условиях план наблюдений составлялся таким образом, чтобы охватить более яркие объекты (ярче 20-й звёздной величины) и не терять наблюдательное время.

В таблице 4.5 приведены данные о наблюдавшихся объектах. Здесь и далее видимые звездные величины m приводятся по данным эфемерид. По уже описанным причинам для астероида (3200) Phaethon получено наибольшее количество измерений.

Таблица 4.5 — Данные измерений астероидов с малыми перигелийными расстояниями на ЦКП «Терскольская обсерватория» в 2021 г.

№	Объект	Даты наблюдений	m	Число кадров
1	(374158) 2004 UL	28.10.2021 29.10.2021 05.11.2021	19.6 – 20.5	50
2	(289227) 2004 XY60	28.10.2021 05.11.2021	20.0 – 20.7	46
3	(3200) Phaethon	12.09.2021 13.09.2021 14.09.2021 30.10.2021 05.11.2021 06.11.2021	17.4 – 19.4	76

Необходимо отметить, что в ночи 5 и 6 ноября большую часть времени условия наблюдений были плохими. Качество изображений (обусловленное состоянием воздуха на пути светового луча от объекта к телескопу) оказалось неудовлетворительным для точных наблюдений. Чем больше seeing (видимость, диаметр видимого диска), тем больше полученное изображение искажено атмосферой. В указанные ночи seeing доходил до 3.0-4.0", что обуславливает большие ошибки наблюдений, о которых подробнее говорится ниже.

Обработка снимков проводилась в программе Astrometrica (<http://www.astrometrica.at/>) и с помощью программного комплекса Апекс-II (Девяткин и др., 2010). Обработка полученных ПЗС-изображений включает в себя калибровку снимков с помощью калибровочных кадров и успешное отождествление снимка с помощью звёздного каталога. Для первичной калибровки изображений также использовался программный комплекс Апекс-II.

В таблице 4.6 приведены данные обработки полученных снимков для наблюдавшихся объектов с малыми перигелийными расстояниями: число полученных кадров N_f , число обработанных кадров N_o , число кадров с найденными астероидами N_i , число отправленных S_{MPC} и принятых A_{MPC} в MPC измерений. Среднеквадратические ошибки по прямому восхождению $(O-C)_\alpha \cos \delta$ и склонению $(O-C)_\delta$ приведены как в целом за ночь, так и для одиночного измерения. Ошибки были рассчитаны с помощью программного пакета ЭПОС с использованием каталога Э. Боуэлла на декабрь 2021 года и модели сил, учитывающей влияние больших планет, Плутона и Луны.

Наблюдения объектов, для которых в столбцах невязок указан прочерк, имеют очень большие расхождения между вычисленными и измеренными координатами. В случае объекта (289227) 2004 XY60 это обусловлено плохими условиями видимости в конкретную ночь (28 октября) – недостаточным прониканием.

4.5.2 Наблюдения астероидов с использованием поисковых эфемерид на основе доверительных областей

Каталог Э. Боуэлла на октябрь 2021 года содержит 27130 АСЗ. С помощью программного пакета ЭПОС выявлено 336 АСЗ, удовлетворяющих благоприятным условиям наблюдений: $m \leq 21^m$ и $h \geq 35^\circ$. Следует отметить, что данные условия несколько отличаются от условий, используемых для астероидов с малыми перигелийными расстояниями, поскольку необходимость использовать большие выдержки и снимать низко над горизонтом существенно усложняет сканирование областей на небе. Кроме того, большие погрешности при определении орбиты могут привести к значительным погрешностям в определении звездной величины и высоты над горизонтом, что поставит под сомнение возможность наблюдения таких объектов.

Таблица 4.6 — Данные обработки изображений астероидов с малыми перигелийными расстояниями, наблюдавшихся в 2021 г.

Объект	N_r	N_o/N_f	S_{MPC}	A_{MPC}	Даты наблюдений	$(O-C)_{\alpha} \cos \delta$, " за ночь/ср. одиночное	$(O-C)_{\delta}$, " за ночь/ср. одиночное
(374158) 2004 UL	50	50/50	50	50	28.10.2021	1.019 ± 0.079 0.261	1.032 ± 0.038 0.126
					29.10.2021	1.060 ± 0.056 0.187	0.765 ± 0.042 0.139
					05.11.2021	0.987 ± 0.063 0.267	0.859 ± 0.024 0.102
(289227) 2004 XY60	46	46/46	43	9	28.10.2021	—	—
					05.11.2021	1.561 ± 0.129 0.516	1.975 ± 0.079 0.317
(3200) Phaethon	76	76/76	62	62	30.10.2021	0.720 ± 0.013 0.070	-0.145 ± 0.007 0.038
					05.11.2021	0.803 ± 0.021 0.097	-0.151 ± 0.023 0.107
					06.11.2021	0.719 ± 0.022 0.076	-0.138 ± 0.022 0.076

Для всех выявленных объектов с использованием автоматизированной программы, описанной в подразделе 3.12, произведена оценка размера доверительной области на небе на момент наблюдений. Обнаружилось, что для 327 исследуемых астероидов размер области по прямому восхождению и склонению не превышает размеров поля зрения телескопа Zeiss-2000 ($11' \times 11'$).

В качестве примера в таблице 4.7 приведены размеры доверительных областей некоторых избранных АСЗ по прямому восхождению ($\Delta\alpha$) и склонению ($\Delta\delta$). В первых трех столбцах приведены данные для 9 астероидов, доверительная область которых хотя бы по одной координате превышает размер поля зрения телескопа и для которых необходимо использовать поисковые эфемериды, последние три столбца содержат примеры объектов с маленькой доверительной областью, которые

легко найти по номинальной орбите. Для тестирования методики были выбраны несколько объектов с областями разного размера, а именно 2015 JF11, 2002 PU148, 2010 VT21, 2014 WB363, 2017 VD, 1990 UQ, 2003 SD220, 1993 PB и (140333) 2001 TD2. С учётом вычисленных доверительных областей в ноябре 2021 года удалось получить наблюдения шести астероидов (таблица 4.8).

Таблица 4.7 — Размеры доверительных областей для некоторых АСЗ

Астероид	$\Delta\alpha, '$	$\Delta\delta, '$	Астероид	$\Delta\alpha, '$	$\Delta\delta, '$
2010 LF64	1299	6631	1990 UQ	0.53	1.75
2016 WN55	1276	6004	2003 SD220	0.16	1.70
2015 JF11	587	4896	1993 PB	0.01	0.13
2002 PU148	1379	2684	(140333) 2001 TD2	0.02	0.29
2010 VT21	1185	2371			
2000 FX13	39	342			
2007 UH	86	194			
2014 WB363	16	54			
2017 VD	4	27			

Как уже упоминалось ранее в подразделе 4.5.1, 5 и 6 ноября большую часть времени условия наблюдений были плохими. Качество изображений было неудовлетворительным для точных наблюдений слабых объектов. В указанные ночи seeing доходил до 3.0–4.0", что обуславливает большие ошибки наблюдений. Обработка снимков, как и в случае изображений астероидов с малыми перигелийными расстояниями, проводилась в программе Astrometrica и с помощью программного комплекса Апекс-II. Для первичной калибровки изображений также использовался программный комплекс Апекс-II.

Согласно размерам вычисленных доверительных областей, поиск объектов проводился в эфемеридном поле и, с перекрытием, в соседних полях. Смещение поля по склонению больше, чем по прямому восхождению (таблица 4.7). Для поиска объектов на кадрах также использовался программный комплекс Апекс-II.

К сожалению, в наблюдательные ночи параметр seeing держался на уровне 3.5–4". Астероиды 2002 PU148 и 2017 VD на полученных кадрах обнаружены не были. Результаты наблюдений остальных объектов приведены в таблице 4.9. Среднеквадратические ошибки по прямому восхождению $(O-C)_\alpha \cos \delta$ и склонению $(O-C)_\delta$ приведены как в целом за ночь, так и для одиночного измерения. Обозначения аналогичны обозначениям таблицы 4.6. В случае объектов 2014 WB363 и 2015 JF11 большие расхождения (не приведённые в таблице) обусловлены небольшим количеством наблюдений в базе MPC к моменту настоящих измерений, и, как следствие, недостаточной точностью орбиты на момент измерений на Терсколе.

Таблица 4.8 — Данные измерений астероидов на основе поисковых эфемерид в ЦКП «Терскольская обсерватория» в 2021 году

№	Объект	Даты наблюдений	Видимая звездная величина	Число кадров
1	(5189) 1990 UQ	04.11.2021 05.11.2021	18.3 – 18.7	44
2	2014 WB363	04.11.2021	20.5 – 21.5	17
3	(163899) 2003 SD220	04.11.2021	14.8	12
4	(9202) 1993 PB	05.11.2021	17.4 – 17.5	19
5	(140333) 2001 TD2	06.11.2021	18.9 – 19.7	38
6	2015 JF11	06.11.2021	20.1 – 20.6	9

Для астероидов 2014 WB363 и 2015 JF11 предпринята попытка оценки точности наблюдений на основе методики, описанной в работе (Галушина, Скрипниченко, 2013), – полученные нами наблюдения были добавлены в общий набор и проведен процесс улучшения орбиты с отбраковкой по правилу трех сигма. В результате для всех наблюдений 2014 WB363, отправленных в Центр малых планет, удалось получить значения $(O-C)$ меньше 1", что подтверждает их достаточную точность для опубликования на сайте. Иная ситуация для астероида

2015 JF11 – не удалось подобрать систему параметров, представляющую наши наблюдения, поэтому можно предположить, что они принадлежат другому объекту.

Таблица 4.9 — Данные измерений астероидов на основе поисковых эфемерид на ЦКП «Терскольская обсерватория» в 2021 году

Объект	N_T	N_o/N_f	S_{MPC}	A_{MPC}	Даты наблюдений	$(O-C)_\alpha \cos \delta, ''$ за ночь/ср. одиночное	$(O-C)_\delta, ''$ за ночь/ср. одиночное
(5189) 1990 UQ	44	44/44	21	21	04.11.2021	0.420 ± 0.004 0.008	0.115 ± 0.003 0.006
					05.11.2021	0.405 ± 0.041 0.170	0.101 ± 0.037 0.152
2014 WB363	17	17/13	9	9	04.11.2021	—	—
(163899) 2003 SD220	12	12/12	12	12	04.11.2021	8.255 ± 0.09 0.028	5.694 ± 0.011 0.038
(9202) 1993 PB	19	19/19	19	19	05.11.2021	0.839 ± 0.011 0.048	0.998 ± 0.011 0.048
(140333) 2001 TD2	38	38/38	14	14	06.11.2021	0.196 ± 0.083 0.311	0.840 ± 0.069 0.257
2015 JF11	9	9/9	6	0	06.11.2021	—	—

Отбраковка наблюдений, как перед обработкой непосредственно наблюдателем, так и при приёме в MPC, может быть сделана по следующим причинам: по погодным условиям (недостаточная видимость: невозможность подобрать экспозицию – объект размывается), недостаточное проницание инструмента для конкретного объекта по ряду причин (погодные условия; возможности телескопа; некорректные начальные данные о блеске объекта), артефакты на снимках и пр. (объект проецируется на звёзды – невозможность

обработки; несовершенства приёмника излучения). Отбраковка наблюдений совершается тогда, когда произведена обработка всех кадров.

Можно сделать общий вывод, что чем слабее объект и хуже условия наблюдений, тем меньше измерений будет принято МРС. Для ярких объектов – все измерения были приняты (яркий пример – объект (163899) 2003 SD 220 со звёздной величиной 14.8^m).

4.6 Наблюдения 2022 года

4.6.1 Наблюдения астероидов с малыми перигелийными расстояниями

В течение 2022 года проведено два сеанса наблюдений на Терскольской обсерватории: с 28 июня по 9 июля и с 18 октября по 6 ноября. Среди наблюдаемых объектов были астероиды с малыми перигелийными расстояниями. Данные периоды выбраны из условий видимости максимального числа изучаемых объектов и минимальной фазы Луны. Погодные условия позволили провести четыре наблюдательные ночи в первом случае и семь ночей – во втором. В таблице 4.10 дана информация о погодных условиях и качестве изображений в эти ночи, здесь FWHM – полная ширина на уровне половины высоты (the full width at half maximum) видимого диска. Из таблицы 4.10 видно, что наилучшие условия наблюдений были 28 июня – минимальное значение FWHM и фазы Луны. Однако следует отметить короткую продолжительность летних ночей. Кроме того, это время года на пике Терскол характеризуется большой влажностью воздуха, поэтому в большинстве летних ночей наблюдения возможны только после полуночи. Во втором полугодии наилучшие погодные условия были 21 и 22 октября, поскольку 18 октября наблюдениям мешала Луна, а к новолунию 25 октября состояние атмосферы ухудшилось.

В таблице 4.11 представлена статистика проведенных наблюдений, где m – видимая звездная величина, N_0 – число снимков, на которых в процессе обработки программным пакетом Апекс-II удалось обнаружить наблюдаемый объект, N_{σ} – число снимков с приемлемым (O–C). Для контроля получаемых невязок использовались программный пакет ИДА и предложенная нами ранее методика отбраковки наблюдений (Галушина, Скрипниченко, 2013), основанная

на исключении по правилу трех сигм. Под приемлемым уровнем точности в большинстве случаев подразумевается значение невязок, не превышающее 3σ , где σ – среднеквадратическая ошибка представления наблюдений, полученная по полному набору наблюдений. Однако в некоторых случаях применялся индивидуальный подход к оценке точности наблюдений.

Таблица 4.10 — Погодные условия в наблюдательные ночи 2022 года

Даты наблюдений	FWHM	Фаза Луны
28.06.2022	1.9	0.01
29.06.2022	3.0–4.0	0.01
07.07.2022	3.5–3.8	0.61
09.07.2022	2.8–4.5	0.94
18.10.2022	1.9–3.0	0.44
21.10.2022	2.5–3.0	0.15
22.10.2022	2.5–3.0	0.04
25.10.2022	3.0–4.0	0.01
29.10.2022	2.6	0.20
01.11.2022	>7.0	0.40
06.11.2022	3.4–3.7	0.98

В летнем сеансе для наблюдений были доступны два астероида с малыми перигелийными расстояниями: (399457) 2002 PD43 и 2008 MG1. На 28 и 29 июня звездная величина обоих небесных тел превышала 20^m , поэтому на примере этих объектов тестировалась методика наблюдений, связанная с выставлением на инструменте скоростей наблюдаемого объекта по обеим координатам. В таком случае на всех кадрах остается зафиксированным одно и то же звездное поле, звезды при этом вытягиваются в линии, а исследуемый объект отображается точечным. При этом первые кадры делаются в астрорежиме, чтобы убедиться, что астероид попадает в поле зрения, далее выставляются скорости объекта и подбирается экспозиция, которая для таких объектов обычно составляет 3–4 минуты. Выставление экспозиции более 4 минут оказалось нецелесообразным. В результате

на работу с одним объектом затрачивается около часа наблюдательного времени, поэтому в короткие летние ночи редко удастся отнаблюдать более 2–3 слабых астероидов. Следует отметить, что наши наблюдения (399457) 2002 PD43 были первые в текущем появлении (следующие появились только 27 июля, когда он достиг звездной величины 21.5), а для 2008 MG1 – даже единственные, поэтому орбиту этого небесного тела рассмотрим ниже более подробно.

Таблица 4.11 — Данные наблюдений астероидов с малыми перигелийными расстояниями на ЦКП «Терскольская обсерватория» в 2022 году

№	Объект	Даты наблюдений	m	N_o	N_σ
1	(399457) 2002 PD43	28.06.2022	21.6	5	5
		29.06.2022	21.6	5	1
2	2008 MG1	28.06.2022	20.4	3	3
		07.07.2022	19.9	7	5
3	(3200) Phaethon	18.10.2022	17.5	23	23
4	(137924) 2000 BD19	18.10.2022	20.1	15	6
		21.10.2022	20.1	29	6
		22.10.2022	20.1	14	13
		25.10.2022	20.1	5	0
		29.10.2022	20.1	23	13
5	(289227) 2004 XY60	18.10.2022	21.3	16	1
		21.10.2022	21.2	19	0
		22.10.2022	21.2	22	0
		25.10.2022	21.1	10	0
		29.10.2022	21.0	9	0
		06.11.2022	20.7	6	6
6	(374158) 2004 UL	22.10.2022	22.3	16	5
		25.10.2022	22.4	3	0
7	2011 XA3	25.10.2022	21.5	4	0

Из таблицы 4.11 видно, что благодаря хорошим погодным условиям все наблюдения 28 июня обладают приемлемой точностью, а часть измерений 29 июня были отброшены. В таблице 4.12 представлены средние невязки всех наблюдений (в том числе исключенных) по прямому восхождению $(O-C)_{\alpha \cos \delta}$ и по склонению $(O-C)_{\delta}$ для рассматриваемых объектов. Данные результаты подтверждают вывод о лучшем качестве наблюдений 28 июня.

В осеннем сеансе для наблюдений были доступны 5 астероидов с малыми перигелийными расстояниями, все, кроме 2011 ХА3, нумерованные, однако почти все, кроме (3200) Phaethon, слабее 20^m , поэтому была продолжена апробация методики наблюдения слабых объектов. К сожалению, вследствие того, что в окрестности новолуния состояние атмосферы оказалось не очень хорошим, среди полученного наблюдательного материала многое пришлось отбросить по правилу трех сигма. Тем не менее следует отметить, что для астероидов (137924) 2000 BD19 и (289227) 2004 XY60 наши наблюдения были первыми в текущем появлении, кроме того, предыдущее появление (137924) 2000 BD19 тоже завершилось наблюдениями на Терскольской обсерватории.

Как видно из таблиц 4.11 и 4.12, в осеннем сеансе вследствие проблем с проницаемостью атмосферы процент удачных кадров оказался невелик. Исключением является только яркий астероид (3200) Phaethon. Для того, чтобы более объективно оценить качество полученных результатов, в таблице 4.13 представлены данные, аналогичные таблице 4.12, но без учета отброшенных наблюдений. Из таблицы 4.13 видно, что при благоприятных погодных условиях летом удалось достичь точности менее $0.5''$ даже для (399457) 2002 PD43 с видимой звездной величиной 21.6^m . Осенью же сложилась другая ситуация и такой точности удалось добиться только для (3200) Phaethon и (137924) 2000 BD19 при видимой звездной величине 17.5^m и 20.1^m соответственно.

Поскольку наши наблюдения астероида 2008 MG1 существенно увеличивают мерный интервал, то целесообразно оценить, насколько они повлияли на точность определения орбиты.

Таблица 4.12 — Данные наблюдений астероидов с малыми перигелийными расстояниями на ЦКП «Терскольская обсерватория» в 2022 году

№	Объект	Даты наблюдений	$(O-C)_\alpha \cos \delta, ''$	$(O-C)_\delta, ''$
1	(399457) 2002 PD43	28.06.2022	0.30	0.25
		29.06.2022	4.06	3.91
2	2008 MG1	28.06.2022	0.05	0.15
		07.07.2022	0.26	0.58
3	(3200) Phaethon	18.10.2022	0.03	0.04
4	(137924) 2000 BD19	18.10.2022	17.76	58.72
		21.10.2022	10.53	21.29
		22.10.2022	0.65	0.10
		25.10.2022	41.97	44.70
		29.10.2022	12.19	12.77
5	(289227) 2004 XY60	18.10.2022	15.05	12.28
		21.10.2022	6.35	14.36
		22.10.2022	5.49	8.71
		25.10.2022	43.73	40.15
		29.10.2022	16.12	3.82
		06.11.2022	2.01	1.94
6	(374158) 2004 UL	22.10.2022	3.99	4.34
		25.10.2022	171.22	186.22
7	2011 XA3	25.10.2022	56.62	87.37

Таблица 4.13 — Данные избранных наблюдений астероидов с малыми перигелийными расстояниями на ЦКП «Терскольская обсерватория» в 2022 году

№	Объект	Даты наблюдений	$(O-C)_\alpha \cos \delta, ''$	$(O-C)_\delta, ''$
1	(399457) 2002 PD43	28.06.2022	0.30	0.25
		29.06.2022	0.19	0.45
2	2008 MG1	28.06.2022	0.05	0.15
		07.07.2022	0.22	0.48
3	(3200) Phaethon	18.10.2022	0.03	0.04
4	(137924) 2000 BD19	18.10.2022	0.17	0.13
		21.10.2022	0.14	0.06
		22.10.2022	0.06	0.11
		29.10.2022	0.07	0.14
5	(289227) 2004 XY60	18.10.2022	3.89	2.02
		06.11.2022	2.01	1.94
6	(374158) 2004 UL	22.10.2022	2.92	2.98

В таблице 4.14 представлены результаты улучшения орбиты по наблюдениям, представленным в Центре малых планет (первая строка), и с добавлением наших шести наблюдений (вторая строка). Здесь N , ΔT – число и интервал наблюдений, σ – среднеквадратическая ошибка представления наблюдений, $\sigma(x_0)$ и $\sigma(v_0)$ – среднеквадратическая ошибка координат и компонент скорости соответственно, V_e – объем доверительного эллипсоида в шестимерном пространстве координат и компонент скорости. Из таблицы 4.14 видно, что добавление терскольских наблюдений позволяет в полтора раза уменьшить объем эллипсоида ошибок. В подразделе 5.6.3 показано, как рассматриваемые наблюдения повлияли на вероятностную эволюцию данного астероида. Полученные измерения представлены в Приложении А.

Таблица 4.14 — Результаты улучшения орбиты астероида 2008 MG1

N	ΔT	$\sigma, ''$	$\sigma(x_0), \text{ а.е.}$	$\sigma(v_0), \text{ а.е./сут.}$	$V_e, \text{ а.е.}^6/\text{сут.}^3$
39	2008–2015	0.35	$2.10 \cdot 10^{-7}$	$3.15 \cdot 10^{-9}$	$2.7 \cdot 10^{-48}$
45	2008–2022	0.38	$2.09 \cdot 10^{-7}$	$3.29 \cdot 10^{-9}$	$1.7 \cdot 10^{-48}$

Для того, чтобы убедиться в правильности полученных результатов, было проведено сравнение со значениями элементов и их неопределенностей, представленных на сайте NASA (https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb_lookup.html#/) на эпоху 09.12.2022. В таблице 4.15 показаны большая полуось a , эксцентриситет e , наклонение плоскости орбиты к эклиптике i , аргумент перигея ω , долгота восходящего узла Ω и средняя аномалия M , полученные с помощью программного пакета ИДА и с сайта NASA. В скобках указано число использованных наблюдений. Из таблицы 4.15 видно, что значения совпадают в пределах неопределенности, более того, почти для всех элементов неопределенность, полученная с использованием терскольских наблюдений, примерно на порядок меньше.

Таблица 4.15 — Сравнение с результатами NASA

Элемент	ИДА (45)		NASA (40)	
	Значение	Неопределенность	Значение	Неопределенность
a (а.е.)	0.782967849	$3 \cdot 10^{-9}$	0.782967845	$8 \cdot 10^{-9}$
e	0.82269704	$8 \cdot 10^{-8}$	0.82269705	$2 \cdot 10^{-7}$
i (°)	5.723456	$9 \cdot 10^{-6}$	5.723469	$3 \cdot 10^{-5}$
ω (°)	352.17778	$4 \cdot 10^{-5}$	352.17759	$6 \cdot 10^{-4}$
Ω (°)	109.14505	$4 \cdot 10^{-5}$	109.14523	$6 \cdot 10^{-4}$
M (°)	317.67288	$4 \cdot 10^{-5}$	317.67282	$2 \cdot 10^{-4}$

Таким образом, проведенные наблюдения показали, что методика, связанная с режимом слежения инструмента за астероидом, позволяет наблюдать объекты вплоть до 22^м. Однако точность получаемых наблюдений в существенной степени зависит от погодных условий и фазы Луны.

4.6.2 Наблюдения астероидов с использованием поисковых эфемерид на основе доверительных областей

Как упоминалось в подразделе 4.6.1, в 2022 году проведены два сеанса наблюдений на Терскольской обсерватории, в течение которых наблюдались в числе прочего объекты с плохо определенной орбитой. Подробная информация о времени наблюдений и погодных условиях приведены в таблице 4.10. На основе каталога Э. Боуэлла с помощью программного комплекса ЭПОС осуществлялся выбор астероидов, удовлетворяющих благоприятным условиям наблюдений: $m \leq 21^m$ и $h \geq 35^\circ$. В первом полугодии таковых оказалось 323, а во втором – 227. Для всех выявленных объектов был оценен размер доверительной области на небе с помощью программного комплекса ИДА. Рассматриваемые астероиды можно условно поделить на три класса:

- 1) область неопределенности положения на небе меньше поля зрения телескопа Zeiss-2000 ($11' \times 11'$);
- 2) область в разы больше поля зрения;
- 3) область в десятки и сотни раз больше поля зрения.

Первый класс самый многочисленный, для него не требуется использование поисковых эфемерид, для третьего класса использование обзорных эфемерид нецелесообразно, фактически они потеряны и могут быть только случайно переоткрыты. Предметом данного исследования являются астероиды второго класса. Однако третий класс тоже заслуживает внимания, поскольку при появлении новых наблюдений область может уменьшиться. В таблице 4.16 показан размер областей неопределенности по прямому восхождению ($\Delta\alpha$) и склонению ($\Delta\delta$) для астероидов второго и третьего классов и некоторых избранных объектов первого класса. Первые три столбца относятся к первому сеансу наблюдений, а последние три – ко второму.

Буквально за пару дней до нашего летнего наблюдательного сеанса в базе данных MPC появились наблюдения астероидов 2003 MW7 и 2014 NV63, что позволило нам найти их на небе. Результаты приведены в таблице 4.17, где обозначения соответствуют обозначениям таблицы 4.11. Во время осеннего сеанса произошла аналогичная ситуация с астероидами второго класса – в результате

появления новых наблюдений неопределенность стала меньше 1'. Поэтому для наблюдений были выбраны астероиды 2022 SG9 и (17182) 1999 VU, размер области неопределенности для положений которых составил порядка половины и целого поля зрения телескопа, соответственно. Результаты также представлены в таблице 4.17.

Таблица 4.16 — Размеры областей неопределенности для некоторых АСЗ

Астероид	$\Delta\alpha, '$	$\Delta\delta, '$	Астероид	$\Delta\alpha, '$	$\Delta\delta, '$
2003 MW7	772	4134	2010 AU118	896	8906
2014 NV63	509	3677	2005 TM	281	5826
2009 BU21	1260	2799	2015 JF11	623	4974
2019 MQ1	89	391	2022 TY	1303	33
2012 VH6	26	24	2018 UX1	912	211
2000 VN2	2	15	2011 WE32	700	177
			2015 VJ2	5	62
			2000 VN2	5	25
			2022 SS20	0.2	13
			2022 SG9	0.3	5
			(17182) 1999 VU	1	4

Особое внимание заслуживает астероид 2022 SG9 – он был открыт 19 сентября, наблюдался всего 4 ночи. В качестве примера на рисунке 4.3 показано облако неопределенности данного объекта на небесной сфере на момент первого наблюдения на Терскольской обсерватории. Облако представлено в виде 1000 тестовых частиц, черной точкой показано положение номинальной частицы, звездочкой – реально наблюдаемое положение астероида. Экваториальные координаты α и δ даны в минутах, причем нулевое значение соответствует $\alpha = 23^h$ и $\delta = 82^\circ$. Облако занимает почти все поле зрения телескопа, наблюдаемое

положение не совпадает с номинальным, но находится внутри облака. Полученные измерения представлены в Приложении А.

Таблица 4.17 — Данные наблюдений астероидов с плохо определенными орбитами в ЦКП «Терскольская обсерватория» в 2022 году

№	Объект	Даты наблюдений	m	N_o	N_σ
1	2003 MW7	28.06.2022	20.7	5	5
		29.06.2022	20.6	8	8
		09.07.2022	20.4	3	3
2	2014 NV63	09.07.2022	20.2	6	5
3	2022 SG9	25.10.2022	20.3	33	33
		29.10.2022	20.2	9	9
		01.11.2022	20.2	24	24
4	(17182) 1999 VU	25.10.2022	20.1	11	7

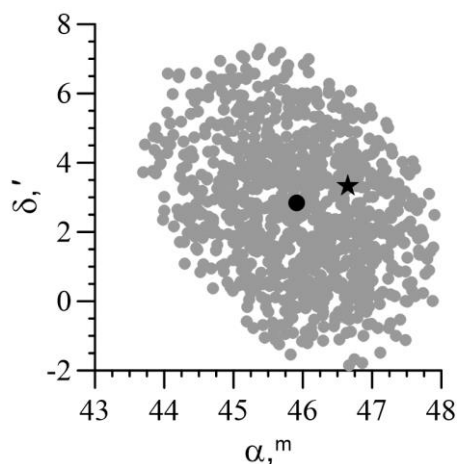


Рисунок 4.3 — Облако неопределенности на небесной сфере астероида 2022 SG9 на момент наблюдений 25 октября 2022 года

Благодаря терскольским наблюдениям удалось увеличить мерный интервал больше чем на месяц и существенно уменьшить область неопределенности. Результаты улучшения орбиты по разному набору наблюдений приведены в таблице 4.18, обозначения в которой аналогичны таблице 4.14. Из таблицы 4.18

видно, что использование полученных нами наблюдений в 14 раз увеличило мерный интервал, на 2 порядка уменьшило неопределенность в координатах и компонентах скорости и на 17 порядков уменьшило размер доверительного эллипсоида.

Таблица 4.18 — Результаты улучшения орбиты астероида 2022 SG9

N	ΔT , сут.	σ , "	$\sigma(x_0)$, а.е.	$\sigma(v_0)$, а.е./сут.	V_e , а.е. ⁶ /сут. ³
19	3.34	0.17	$5.02 \cdot 10^{-3}$	$6.00 \cdot 10^{-5}$	$1.14 \cdot 10^{-33}$
45	43.00	0.33	$5.60 \cdot 10^{-5}$	$6.30 \cdot 10^{-7}$	$2.16 \cdot 10^{-40}$

4.6.3 Наблюдения астероида (65803) Didymos

В сентябре 2022 года произошло уникальное событие: столкновение космического аппарата DART (Double Asteroid Redirection Test) с астероидом (65803) Didymos с целью изменения его орбиты (Fahnestock et al., 2022; Moskovitz et al., 2022; Rivkin and Cheng, 2023). (65803) Didymos представляет собой двойной астероид, меньший компонент которого подвергся столкновению. В результате миссии период спутника уменьшился на 32 минуты.

Астероид (65803) Didymos был открыт на обсерватории Китт-Пик 11 апреля 1996 года, интервал наблюдений составляет почти 7 лет. На сайте Центра малых планет приведено 5689 оптических наблюдений и 6 радарных, т.е. его орбита хорошо определена. На Терскольской обсерватории наблюдения проводились 25 октября, т.е. почти через сутки после столкновения с космическим аппаратом DART. В качестве примера на рисунке 4.4 представлен один из снимков с рассматриваемым астероидом, который расположен близко к центру кадра. На снимке явно виден длинный хвост, но тем не менее программный комплекс Апекс-II справился с обработкой этого и некоторых других снимков. Всего было получено 47 кадров, из них приемлемая точность достигается на восьми. Небольшой процент удачных кадров в существенной степени обусловлен неблагоприятными погодными условиями (таблица 4.10).

В таблице 4.19 приведены результаты улучшения без использования наших наблюдений (первая строка) и с их использованием (вторая строка). Обозначения

соответствуют таблице 4.18, в первой колонке отдельно представлено число оптических и радарных наблюдений. Из представленных в таблице 4.19 результатов видно, что наши наблюдения оказывают незначительное влияние на неопределенность орбиты, хотя и позволяют слегка ее уменьшить. Среднеквадратическая ошибка представления восьми наблюдений, выполненных на Терскольской обсерватории, составляет $0.020''$ и $0.057''$ по прямому восхождению и склонению соответственно, что говорит об их хорошем качестве.

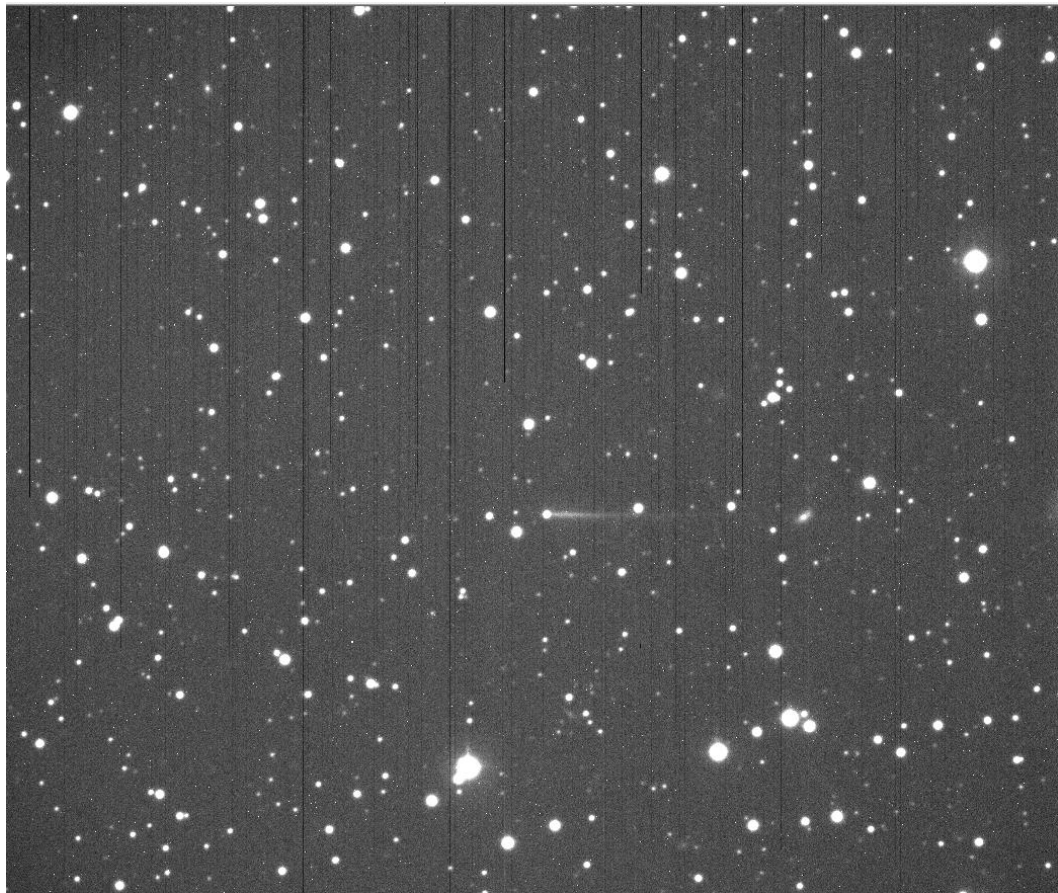


Рисунок 4.4 — Снимок с астероидом (65803) Didymos (объект с хвостом)

Таблица 4.19 — Результаты улучшения орбиты астероида (65803) Didymos

N	$\sigma, ''$	$\sigma(x_0), \text{ а.е.}$	$\sigma(v_0), \text{ а.е./сут.}$	$V_e, \text{ а.е.}^6/\text{сут.}^3$
5451+6	0.2127	$1.143 \cdot 10^{-8}$	$1.277 \cdot 10^{-10}$	$5.257 \cdot 10^{-59}$
5459+6	0.2126	$1.142 \cdot 10^{-8}$	$1.276 \cdot 10^{-10}$	$5.214 \cdot 10^{-59}$

4.7 Наблюдения 2023 года

4.7.1 Наблюдения астероидов с малыми перигелийными расстояниями

Первые сеансы наблюдений 2023 года состоялись с 14 по 31 января и включали в себя 9 ночей, в течение которых наблюдались 5 астероидов с малыми перигелийными расстояниями. Статистика наблюдений представлена в таблице 4.20, большинство обозначений которой аналогичны обозначениям таблицы 4.11. Исключением являются последние два столбца, поскольку в этом сеансе была сделана попытка использовать ручной режим обработки в программном пакете Апекс-II. Число в скобках соответствует автоматическому режиму. Из таблицы видно, что в ручном режиме в большинстве случаев удается обработать больше снимков и результат получается лучшего качества. Для астероида (3200) Phaethon ручной режим не применялся ввиду отсутствия необходимости.

В таблице 4.21 приведены среднеквадратические ошибки представления наблюдений с приемлемой точностью, обозначения соответствуют обозначениям таблицы 4.13. Аналогично предыдущей таблице число в скобках соответствует автоматическому режиму обработки. При отсутствии результатов автоматической или ручной обработке стоит прочерк. Из таблицы 4.21 видно, что по точности автоматическая обработка не уступает ручной, однако она является менее трудоемкой, поэтому можно рекомендовать использовать ручной режим для тех кадров, для которых не удалось достичь приемлемой точности в автоматическом.

Во втором полугодии наблюдались три астероида с малыми перигелийными расстояниями ((3200) Phaethon, (137924) 2000 BD19 и (386454) 2008 XM) в течение двух ночей – 2 и 20 декабря 2023 года. Результаты приведены в таблицах 4.22 и 4.23, обозначения в которых соответствуют обозначениям таблиц 4.20 и 4.21. Все полученные наблюдения обладают хорошим качеством. Естественно, наименьшая ошибка наблюдений получилась у астероида (3200) Phaethon, что обусловлено звездной величиной. Особо следует отметить небольшие невязки наблюдений слабого объекта (386454) 2008 XM с видимой звездной величиной 21.9.

Таблица 4.20 — Результаты наблюдений астероидов с малыми перигелийными расстояниями на ЦКП «Терскольская обсерватория» в первом полугодии 2023 года

№	Объект	Даты наблюдений	m	N_o	N_σ
1	(3200) Phaethon	14.01.2023	19.1	0(13)	0(13)
		15.01.2023	19.1	0(5)	0(5)
		18.01.2023	19.2	10(11)	10(11)
2	(137924) 2000 BD19	14.01.2023	18.2	12(11)	12(11)
		26.01.2023	19.0	18(0)	18(0)
		27.01.2023	19.0	0(21)	0(20)
		30.01.2023	19.2	11(14)	11(10)
		31.01.2023	19.2	31(3)	31(1)
3	(276033) 2002 AJ129	26.01.2023	21.2	0(6)	0(6)
		27.01.2023	21.1	0(14)	0(0)
4	(425755) 2011 CP4	14.01.2023	22.3	7(3)	2(0)
		15.01.2023	22.2	0(8)	0(0)
		16.01.2023	22.2	0(4)	0(0)
		27.01.2023	21.7	0(6)	0(2)
5	1995 CR	14.01.2023	20.9	5(11)	2(0)
		15.01.2023	21.0	4(3)	1(0)
		16.01.2023	21.2	4(3)	4(0)
		18.01.2023	21.5	8(4)	8(0)
		27.01.2023	22.5	8(11)	0(0)

Таблица 4.21 — Результаты избранных наблюдений астероидов с малыми перигелийными расстояниями на ЦКП «Терскольская обсерватория» в первом полугодии 2023 года

№	Объект	Даты наблюдений	$(O-C)_\alpha \cos \delta, ''$	$(O-C)_\delta, ''$
1	(3200) Phaethon	14.01.2023	-(0.07)	-(0.07)
		15.01.2023	-(0.15)	-(0.07)
		18.01.2023	0.07(0.07)	0.07(0.07)
2	(137924) 2000 BD19	14.01.2023	0.07(0.06)	0.09(0.07)
		26.01.2023	0.05(-)	0.03(-)
		27.01.2023	-(0.02)	-(0.02)
		30.01.2023	0.12(0.05)	0.06(0.02)
		31.01.2023	0.05(0.11)	0.04(0.02)
3	(276033) 2002 AJ129	26.01.2023	-(0.08)	-(0.17)
4	(425755) 2011 CP4	14.01.2023	0.38(-)	0.51(-)
		27.01.2023	-(0.32)	-(0.47)
5	1995 CR	14.01.2023	0.41(-)	0.44(-)
		15.01.2023	0.91(-)	0.10(-)
		16.01.2023	0.37(-)	0.23(-)
		18.01.2023	0.43(-)	0.10(-)

Таблица 4.22 — Результаты наблюдений астероидов с малыми перигелийными расстояниями на ЦКП «Терскольская обсерватория» во втором полугодии 2023 года

№	Объект	Даты наблюдений	m	N_o	N_σ
1	(3200) Phaethon	02.12.2023	16.5	65	65
2	(137924) 2000 BD19	20.12.2023	20.2	4	4
3	(386454) 2008 XM	20.12.2023	21.9	7	7

Таблица 4.23 — Результаты избранных наблюдений астероидов с малыми перигелийными расстояниями на ЦКП «Терскольская обсерватория» во втором полугодии 2023 года

№	Объект	Даты наблюдений	$(O-C)_{\alpha\cos\delta}$, "	$(O-C)_{\delta}$, "
1	(3200) Phaethon	02.12.2023	0.04	0.03
2	(137924) 2000 BD19	20.12.2023	0.55	0.88
3	(386454) 2008 XM	20.12.2023	0.36	0.28

Снимки астероидов слабее 20^m удастся получить только без фильтра, а для (3200) Phaethon был проведен дополнительный эксперимент с использованием различных фильтров – синего (B), инфракрасного (I), красного (R) и визуального (V). Результаты, представленные в таблице 4.24, показывают, что наименьшие невязки достигаются при использовании визуального фильтра. Однако отличия незначительные.

Таблица 4.24 — Результаты наблюдений астероида (3200) Phaethon в различных фильтрах

№	Фильтр	$(O-C)_{\alpha\cos\delta}$, "	$(O-C)_{\delta}$, "
1	B	0.10	0.07
2	I	0.08	0.07
3	R	0.08	0.07
4	V	0.08	0.06

4.7.2 Наблюдения астероидов с использованием поисковых эфемерид на основе доверительных областей

В январе 2023 года было проведено два сеанса наблюдений: с 14 по 18 января и с 25 по 31 января. В каждом сеансе для выбора объектов использовались условия $m \leq 21^m$ и $h \geq 25^\circ$, и для всех отобранных астероидов (которых оказалось 589 и 660 соответственно) оценивался размер доверительной области на момент наблюдений.

Для наблюдений выбирались объекты второго класса в соответствии с терминологией из подраздела 4.6.2, однако уже в ходе наблюдательного сеанса для некоторых из них в базе MPC появились новые наблюдения и размер области уменьшился.

В таблице 4.25 представлены размеры областей неопределенности для астероидов, которые были в результате отобраны для наблюдений на телескопе Zeiss-2000. Обозначения аналогичны обозначениями таблицы 4.16, дополнительно дана звездная величина m в первую ночь. Первые 4 столбца соответствуют сеансу наблюдений с 14 по 18 января, последние – с 25 по 31 января. Астероид 2022 SG9 уже наблюдался на Терскольской обсерватории осенью 2022 года (подраздел 4.4.2), поэтому в таблице 4.25 представлены оценки размеров его доверительной области с учетом (строка 2) и без учета наших наблюдений (строка 1). Видно, что размер области благодаря нашим наблюдениям уменьшился на несколько порядков. Между нашими сеансами наблюдения 2022 SG9 были получены на обсерватории ATLAS-НКО, что привело к тому, что во втором сеансе для данного астероида не требовалось использование обзорных эфемерид. Однако в соответствии с данными на сайте MPC (https://minorplanetcenter.net/db_search/show_object?utf8=%E2%9C%93&object_id=2022+SG9) на момент наших наблюдений неопределенность его орбиты равнялась 4, т.е. требуется продолжение слежения за ним.

Таблица 4.25 — Размеры доверительных областей для некоторых АСЗ

Астероид	m	$\Delta\alpha, '$	$\Delta\delta, '$	Астероид	m	$\Delta\alpha, '$	$\Delta\delta, '$
2010 DJ77	18.1	1.4	71.0	2012 BL77	20.9	125.6	62.6
2014 BQ8	20.6	6.8	9.5	2022 SG9	18.8	0.03	1.5
2022 SG9	19.0	83.1 0.02	76.5 0.3	2020 BZ14	18.9	3.2	296.1

К сожалению, вследствие ограниченной продолжительности ночи и неидеальных погодных условий удалось отнаблюдать только по одному объекту в каждом сеансе. Результаты наблюдений и обработки снимков приведены в таблицах 4.26 и 4.27, обозначения аналогичны таблицам 4.20 и 4.21

соответственно. Из представленных результатов видно, что для таких сложных объектов ручная обработка дает явное преимущество. Кроме того, можно отметить, что точность получаемых координат для яркого объекта выше.

Таблица 4.26 — Результаты наблюдений астероидов на основе доверительных областей в ЦКП «Терскольская обсерватория» в 2023 году

	Объект	Даты наблюдений	m	N_o	N_σ
1	2014 BQ8	14.01.2023	20.7	10(8)	0(4)
		15.01.2023	20.6	0(13)	0(0)
		16.01.2023	20.6	10(0)	6(0)
2	2022 SG9	30.01.2023	18.7	10(0)	10(0)
		31.01.2023	18.6	29(0)	28(0)

Таблица 4.27 — Результаты избранных наблюдений астероидов на основе доверительных областей в ЦКП «Терскольская обсерватория» в 2023 году

№	Объект	Даты наблюдений	m	$(O-C)_\alpha \cos \delta, ''$	$(O-C)_\delta, ''$
1	2014 BQ8	14.01.2023	20.7	-(0.33)	-(0.38)
		15.01.2023	20.6	-(-)	-(-)
		16.01.2023	20.6	0.30(-)	0.34(-)
2	2022 SG9	30.01.2023	18.7	0.32(-)	0.11(-)
		31.01.2023	18.6	0.03(-)	0.05(-)

По аналогии с подразделом 4.6.2 рассмотрим более подробно влияние Терскольских наблюдений на орбиту астероида 2022 SG9. В таблице 4.28 представлены результаты улучшения орбит без учета (первая строка) и с учетом (вторая строка) наблюдений, полученных на Терскольской обсерватории. Обозначения аналогичны обозначениям таблицы 4.18. По состоянию на апрель 2023 года на сайте MPC представлены наблюдения на интервале от 19 сентября 2022 года до 19 марта 2023 года, т.е. наши наблюдения, выполненные

в октябре-ноябре 2022 года и в январе 2023 года, не увеличивают мерный интервал. Однако, как видно из таблицы 4.28, большое число дополнительных наблюдений позволяет примерно в два раза уменьшить неопределенность в векторах положения и скорости, а также примерно на полпорядка сократить объем эллипсоида неопределенности в шестимерном пространстве. Данный факт подчеркивает ценность полученных нами наблюдений для уточнения орбиты астероида.

Таблица 4.28 — Результаты улучшения орбиты астероида 2022 SG9

N	ΔT , сут.	σ , "	$\sigma(\mathbf{x}_0)$, а.е.	$\sigma(\mathbf{v}_0)$, а.е./сут.	V_e , а.е. ⁶ /сут. ³
37	180	0.26	$2.88 \cdot 10^{-6}$	$3.51 \cdot 10^{-8}$	$1.91 \cdot 10^{-44}$
144	180	0.39	$1.46 \cdot 10^{-6}$	$1.64 \cdot 10^{-8}$	$4.58 \cdot 10^{-45}$

4.7.3 Наблюдения астероида 2023 BU

Астероид 2023 BU был впервые обнаружен 21 января 2023 года Геннадием Борисовым на обсерватории в поселке Научном (Крым). 27 января объект проходил на расстоянии порядка 10 тыс. км от геоцентра, что является очень редким явлением. Абсолютная звездная величина 2023 BU составляет 29.69, что при среднем значении альбедо (0.15) соответствует 4 м. Поэтому даже с учетом неопределенности в положении астероида, он не представлял серьезной угрозы для Земли, однако оказался своеобразным «тренажером» для наблюдателей, поскольку во время сближения двигался со скоростью примерно 3'/мин.

Поле зрения телескопа Zeiss-2000 составляет $11' \times 11'$, поэтому наблюдения на ближайшем от Земли расстоянии были невозможны, однако нам удалось получить кадры с изображением астероида 25 января, когда он двигался немного медленнее. Пример кадра показан на рисунке 4.5, где астероид выделен черным кругом. Несмотря на большую яркость объекта (видимая звездная величина в ночь наблюдений составила около 17), наблюдения велись в режиме слежения за объектом вследствие его заметного собственного движения. Выдержка составила 30 секунд, наблюдения проводились в фильтре R, обработка — с помощью программного комплекса Апекс-II.

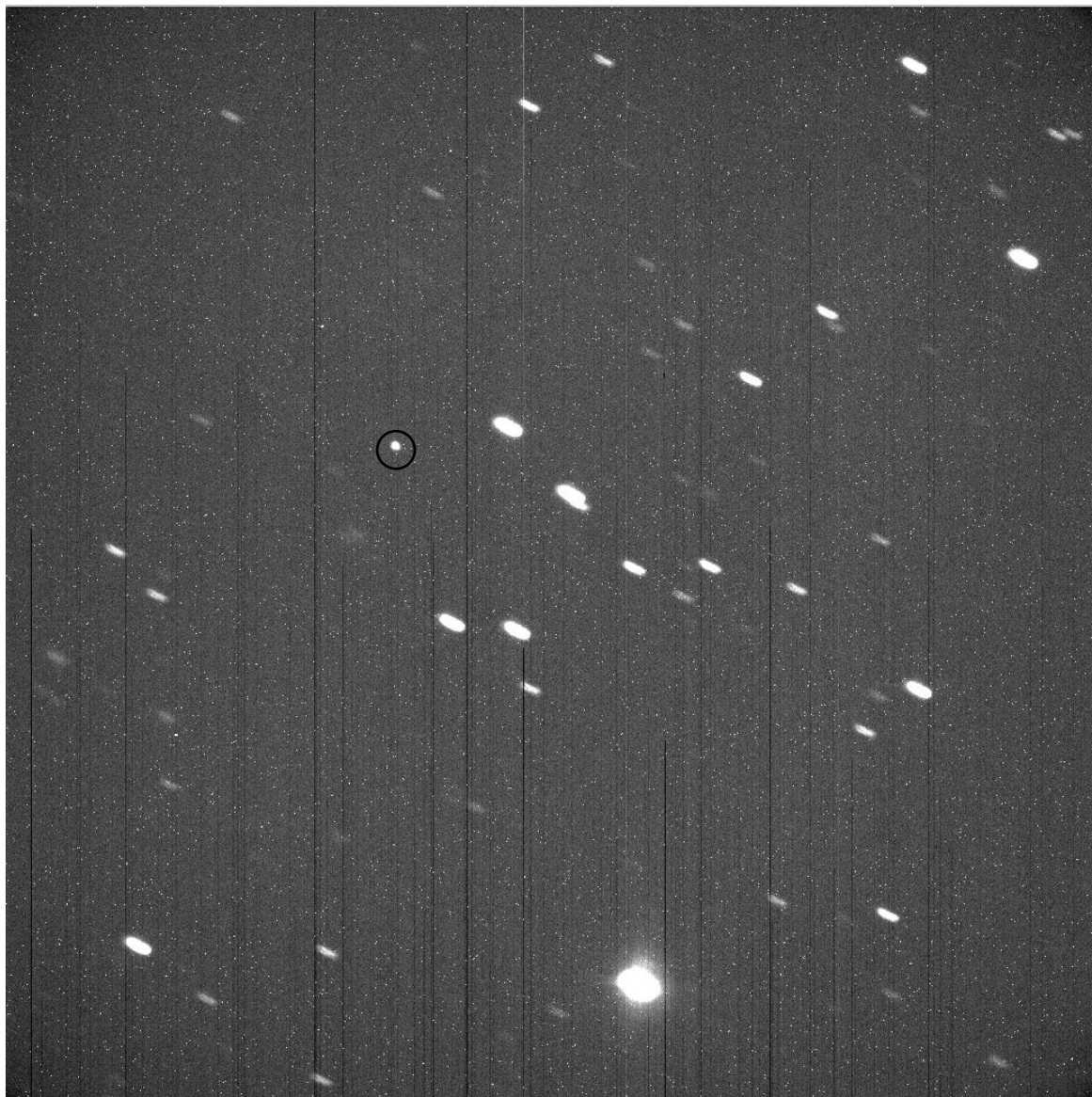


Рисунок 4.5 — Наблюдения астероида 2023 BU

Астероид 2023 BU активно наблюдался на различных обсерваториях на интервале с 21 по 31 января, всего на сайте MPC представлено 1768 наблюдений. Рассмотрим влияние наших наблюдений на орбиту объекта. Обозначения таблицы 4.29 аналогичны обозначениям таблицы 4.28, дополнительно включен коэффициент нелинейности χ (2.12). Улучшение орбиты проводилось с исключением по правилу трех сигма. Результаты показывают, что включение 85 наблюдений, выполненных на Терскольской обсерватории, приводит к уменьшению объема доверительного эллипсоида и коэффициента нелинейности, что позволяет сделать вывод о качестве этих наблюдений.

Таблица 4.29 — Результаты улучшения орбиты астероида 2023 BU

N	ΔT , сут.	σ , "	$\sigma(x_0)$, а.е.	$\sigma(v_0)$, а.е./сут.	V_e , а.е. ⁶ /сут. ³	χ
1752	10.6	5.233	$4.032 \cdot 10^{-9}$	$8.286 \cdot 10^{-8}$	$6.333 \cdot 10^{-54}$	$3.556 \cdot 10^{-4}$
1837	10.6	5.248	$4.033 \cdot 10^{-9}$	$8.282 \cdot 10^{-8}$	$5.898 \cdot 10^{-54}$	$2.654 \cdot 10^{-4}$

Для более объективной оценки точности наших наблюдений было выполнено сравнение с точностью наблюдений, полученных на обсерватории C20 (Kislovodsk Mtn. Astronomical Stn., Pulkovo Obs) в ту же ночь. В таблице 4.30 приведены среднеквадратические ошибки наблюдений по прямому восхождению $(O-C)_\alpha \cos \delta$ и склонению $(O-C)_\delta$ для двух обсерваторий – Пулковской станции под Кисловодском (C20) и Терскольской (B18). Результаты показывают, что точность наблюдений примерно равна, что окончательно подтверждает вывод о возможности наблюдения быстролетающих (по кадру) объектов на телескопе Zeiss-2000.

Таблица 4.30 — Результаты наблюдений астероида 2023 BU

Обсерватория	N	$(O-C)_\alpha \cos \delta$, "	$(O-C)_\delta$, "
C20	108	0.42	0.59
B18	85	0.46	0.69

4.8 Выводы по главе 4

Базисом любой численной модели движения реальных объектов являются наблюдения, поэтому в главе 4 уделено внимание методике проведения позиционных наблюдений, в том числе оригинальной методике построения обзорных эфемерид (Быкова, Галушина, Батурин, 2007а). В данной главе также представлены результаты наблюдений астероидов, выполненных под руководством и частично при непосредственном участии автора работы. В перечень изучаемых объектов вошли: десять астероидов с малыми перигелийными расстояниями ((374158) 2004 UL, (137924) 2000 BD19, 1995 CR, 2008 MG1, (276033) 2002 AJ129, (289227) 2004 XY60, (3200) Phaethon, (386454) 2008 XM, (399457) 2002 PD43, (425755) 2011 CP4), девять астероидов с плохо определёнными орбитами (2020 PC5,

2020 PF7, 2020 PR3, 2020 QK6, 2014 WB363, 2003 MW7, 2014 BQ8, 2014 NV63, 2022 SG9). Кроме того, в первом тестовом сеансе наблюдался астероид (3753) Cruithne, и особое внимание было уделено объектам 2023 BU во время тесного сближения с Землей в январе 2023 года и (65803) Didymos после столкновения космического аппарата DART с его спутником. В процессе наблюдений тестировалось две методики: наблюдения слабых астероидов с движением телескопа со скоростью перемещения астероида и поиск объекта на небесной сфере с использованием обзорных эфемерид.

Проведенные наблюдения, их анализ и обработка позволяют сделать следующие выводы:

1. При тщательном подборе режима работы телескопа и параметров съемки на Zeiss-2000 возможно наблюдение астероидов до 22^m , а также при прохождении ими тесного сближения с Землей.
2. Обзорные (поисковые) эфемериды облегчают поиск астероида на небесной сфере, однако в большинстве случаев они случайно попадают в поле зрения обзоров.
3. Полученные нами наблюдения соответствуют мировому уровню и способствуют уменьшению области неопределенности изучаемых астероидов.

ГЛАВА 5 ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ГРУППЫ АСТЕРОИДОВ С МАЛЫМИ ПЕРИГЕЛИЙНЫМИ РАССТОЯНИЯМИ

5.1 Популяция астероидов с малыми перигелийными расстояниями

Изучение движения и физических свойств астероидов с малыми перигелийными расстояниями актуально как с точки зрения решения проблемы астероидной опасности, так и для понимания происхождения и эволюции Солнечной системы. Данные объекты могут подходить к Земле незамеченными со стороны Солнца, что существенно затрудняет их наблюдения и определение орбит.

В работе (Емельяненко, 2017) показано, что большинство астероидов, сближающихся с Землей, в ходе эволюции подходят к Солнцу менее, чем на 0.1 а.е. Вследствие этого изучение динамики астероидов с малыми перигелийными расстояниями поможет пролить свет на эволюцию всех АСЗ.

Самым известным среди рассматриваемых объектов является (3200) Phaethon, которому посвящено множество работ (например, Hui, 2023; Kiselev et al., 2022; Ye et al., 2021; Devogèle et al., 2020; Ryabova et al., 2019; Галушина, Самбаров, 2019; Hanuš et al., 2018; Victorino, Kawakatsu, 2017; Hui, 2017; Ye, 2017; Hanuš et al., 2016). Орбита данного астероида хорошо определена из радиолокационных наблюдений, известны форма, размеры и параметры вращения (Ozaki et al., 2022). Большую значимость исследования астероида Фаэтон придает планируемая миссия DESTINY+ (Geem et al., 2022, MacLennan et al., 2022). В числе прочего рассматривается вопрос близости орбит астероидов с малыми перигелийными расстояниями друг к другу, например, (3200) Phaethon и (155140) 2005 UD (MacLennan et al., 2021; Kareta et al., 2021).

В последние годы все большее внимание уделяется и другим объектам на подобных орбитах, в частности авторы работы (Urakawa et al., 2014) находят структуру и период вращения астероида 2011 ХА3 посредством фотометрических наблюдений и анализа кривой блеска, а в статье (Devyatkin et al., 2022) описываются результаты астрометрических и фотометрических наблюдений потенциально опасного астероида (276033) 2002 АJ129. Быстрое вращение этого астероида отмечается также в статье (Carbognani et al., 2017). Большой интерес вызывает астероид 2021 РН27 (Carbognani et al., 2022; Sheppard et al., 2022; Sheppard, 2022;

de la Fuente Marcos C., de la Fuente Marcos R., 2021), поскольку обладает не только малым перигелийным расстоянием ($q = 0.133$ а.е.), но и малым афелийным ($Q = 0.790$ а.е.), т.е. принадлежит к группе Атиры.

Определение физических свойств астероидов требует проведения различного рода наблюдений. В статье (Mommert, 2020) представлены результаты фотометрических и спектрографических наблюдений шести объектов с малыми перигелийными расстояниями: (137924) 2000 BD19, (276033) 2002 AJ129, (289227) 2004 XY60, (374158) 2004 UL, (386454) 2008 XM, (394130) 2006 HY51 и (527977) 2008 EY68. Одной из целей исследования была проверка гипотезы о том, что изучаемые малые тела являются потухшими кометами, однако данный факт не подтвердился, ни у одного из рассматриваемых астероидов не замечено активности.

В работе (Reddy et al., 2007) в числе прочих рассмотрены спектрографические наблюдения астероида 2000 BD19. Наряду с наземными наблюдениями большое значение имеют космические – авторам статьи (Nugent et al., 2012) на их основе удалось определить параметры эффекта Ярковского для ряда АСЗ, среди которых изучаемые нами объекты 2010 JG87, 2006 HY51, (137924) 2000 BD19.

В данной работе под астероидами с малыми перигелийными расстояниями понимаются объекты с $q \leq 0.15$ а.е., граница относительно условна и в некоторой степени обусловлена перигелийным расстоянием одного из самых хорошо изученных астероидов – (3200) Phaethon. Согласно каталогу Э. Боуэлла на май 2023 года насчитывается 61 такой объект. Таблица 5.1 содержит информацию об орбитальных элементах этих астероидов: большой полуоси a , эксцентриситете e , наклонению плоскости орбиты к плоскости эклиптики i , перигелийном q и афелийном Q расстояниях. Данные получены путем улучшения орбиты на эпоху t_0 , которая соответствует среднему арифметическому моментов наблюдений. Использовалась следующая модель сил: учет гравитационного влияния Солнца, планет, Луны; сжатия Солнца и релятивистских эффектов от Солнца. Строки в таблице 5.1 отсортированы по возрастанию перигелийного расстояния. Для получения этих и последующих результатов данной главы использовалась программная система ИДА, описанная в главе 3.

Рисунки 5.1–5.5 содержат информацию о распределении орбитальных элементов астероидов с малыми перигелийными расстояниями: большой полуоси, эксцентриситета, наклона, перигелийного и афелийного расстояний, соответственно. Большая полуось принимает значения от 0.46 (2021 PH27) до 2.86 (2022 JX) а.е. Особыми свойствами большинства астероидов данной группы являются большие эксцентриситеты их орбит (от 0.71 до 0.97) и принадлежность к сферической подсистеме Солнечной системы – 77% (47 астероидов) объектов имеют наклоны больше 8° .

Таблица 5.1 — Элементы орбит астероидов с малыми перигелийными расстояниями

Астероид	t_0	a , а.е.	e	i , $^\circ$	q , а.е.	Q , а.е.
2005 HC4	03.05.2005	1.82037	0.96118	8.39629	0.07067	3.57007
2020 BU13	27.01.2020	2.47010	0.97039	9.15644	0.07314	4.86706
2017 TC1	05.10.2017	2.48873	0.96950	9.28759	0.07590	4.90155
2008 FF5	31.03.2008	2.26606	0.96483	2.61260	0.07969	4.45244
2017 MM7	04.07.2017	2.06215	0.96135	23.46644	0.07971	4.04459
(394130) 2006 HY51	28.07.2011	2.59866	0.96910	30.57696	0.08029	5.11703
2015 EV	13.03.2015	1.98459	0.95845	11.17095	0.08245	3.88673
2021 AF3	10.01.2021	1.29562	0.93292	7.13652	0.08691	2.50433
2016 GU2	05.04.2016	2.04558	0.95720	10.24914	0.08755	4.00360
2022 XK1	07.12.2022	1.40483	0.93585	20.89865	0.09012	2.71955
2019 JZ6	05.05.2019	2.46853	0.96315	24.16596	0.09097	4.84609
2019 AM13	18.03.2019	1.29636	0.92972	16.64134	0.09111	2.50160
(137924) 2000 BD19	02.07.2012	0.87645	0.89499	25.69059	0.09203	1.66088
2022 HB4	13.10.2021	2.03149	0.95433	9.37623	0.09278	3.97021
(374158) 2004 UL	10.09.2012	1.26637	0.92671	23.76534	0.09282	2.43992

Продолжение таблицы 5.1

Астероид	t_0	a , а.е.	e	i , °	q , а.е.	Q , а.е.
(394392) 2007 EP88	27.02.2015	0.83729	0.88586	20.77019	0.09557	1.57901
2011 KE	03.04.2012	2.20777	0.95439	5.86270	0.10070	4.31484
(465402) 2008 HW1	29.05.2011	2.58286	0.96084	10.59979	0.10114	5.06458
2015 HG	18.04.2015	2.08714	0.94969	17.68124	0.10501	4.06926
2012 US68	17.07.2015	2.50293	0.95787	25.82955	0.10545	4.90040
2011 XA3	20.09.2012	1.46683	0.92629	27.95021	0.10812	2.82554
2018 GG5	17.04.2018	1.98731	0.94460	16.73787	0.11009	3.86454
(399457) 2002 PD43	21.03.2007	2.50955	0.95574	26.18844	0.11107	4.90803
(386454) 2008 XM	25.03.2010	1.22229	0.90907	5.45804	0.11114	2.33344
(431760) 2008 HE	05.11.2011	2.26304	0.95015	9.79468	0.11282	4.41327
2020 DD	17.02.2020	2.48791	0.95353	2.33915	0.11561	4.86021
(276033) 2002 AJ129	07.08.2011	1.37094	0.91492	15.49383	0.11663	2.62524
2019 VE3	03.11.2019	1.17184	0.90015	2.52902	0.11701	2.22666
2020 GB2	07.04.2020	2.33775	0.94991	15.21730	0.11710	4.55841
(612162) 2000 LK	19.03.2013	2.17937	0.94602	17.03540	0.11765	4.24109
(425755) 2011 CP4	03.04.2012	0.91145	0.87023	9.44111	0.11828	1.70462
2022 JX	07.05.2022	2.85911	0.95847	43.10693	0.11875	5.59947
1995 CR	21.04.2003	0.90669	0.86854	4.03234	0.11919	1.69419
2007 GT3	14.01.2012	2.00406	0.93999	25.58070	0.12027	3.88786
2022 YE4	24.12.2022	1.28950	0.90437	13.73740	0.12331	2.45568

Продолжение таблицы 5.1

Астероид	t_0	a , а.е.	e	i , °	q , а.е.	Q , а.е.
2017 AF5	25.08.2017	2.47960	0.94956	20.86711	0.12506	4.83414
2004 QX2	25.08.2004	1.28651	0.90274	19.07847	0.12512	2.44789
2020 HY2	22.04.2020	2.27233	0.94482	11.31422	0.12540	4.41927
2020 TS2	08.10.2020	2.50693	0.94966	20.14085	0.12619	4.88766
2019 YV2	25.12.2019	1.22591	0.89680	6.45406	0.12652	2.32531
2021 LM1	10.06.2021	2.31170	0.94499	29.53732	0.12718	4.49623
2015 KO120	23.05.2015	1.82467	0.93003	2.13790	0.12768	3.52166
2011 BT59	27.01.2011	2.48331	0.94801	3.57704	0.12912	4.83751
(289227) 2004 XY60	27.06.2013	0.64027	0.79675	23.76211	0.13013	1.15041
2007 PR10	06.09.2011	1.23182	0.89244	20.93920	0.13249	2.33115
2023 HJ7	01.05.2023	2.02121	0.93427	18.18582	0.13286	3.90956
2021 PH27	04.08.2021	0.46173	0.71167	31.93045	0.13313	0.79033
(504181) 2006 TC	28.07.2011	1.53866	0.91193	19.65572	0.13551	2.94182
2019 UJ12	31.10.2019	2.41276	0.94315	27.45420	0.13716	4.68836
2013 JA36	18.05.2013	2.65635	0.94817	42.44017	0.13767	5.17504
2017 SK10	20.09.2017	2.10858	0.93470	24.98217	0.13770	4.07947
2008 MG1	21.09.2010	0.78333	0.82262	5.71359	0.13895	1.42772
(3200) Phaethon	27.06.2013	1.27128	0.88989	22.24089	0.13998	2.40259
2013 HK11	19.04.2013	2.13909	0.93431	17.66852	0.14051	4.13766
2013 YC	20.09.2014	2.49429	0.94366	2.84816	0.14054	4.84805
2023 FS5	27.03.2023	2.48001	0.94317	21.85911	0.14093	4.81910
2020 VL4	10.06.2020	2.12719	0.93320	55.93976	0.14210	4.11228
2023 CF	02.02.2023	2.08918	0.93089	1.02536	0.14439	4.03396
2010 JG87	18.07.2011	2.76237	0.94739	16.90959	0.14532	5.37943
2020 HE	18.04.2020	2.53245	0.94231	20.54213	0.14610	4.91880
2015 DU180	26.07.2017	1.92627	0.92210	4.85368	0.15005	3.70248

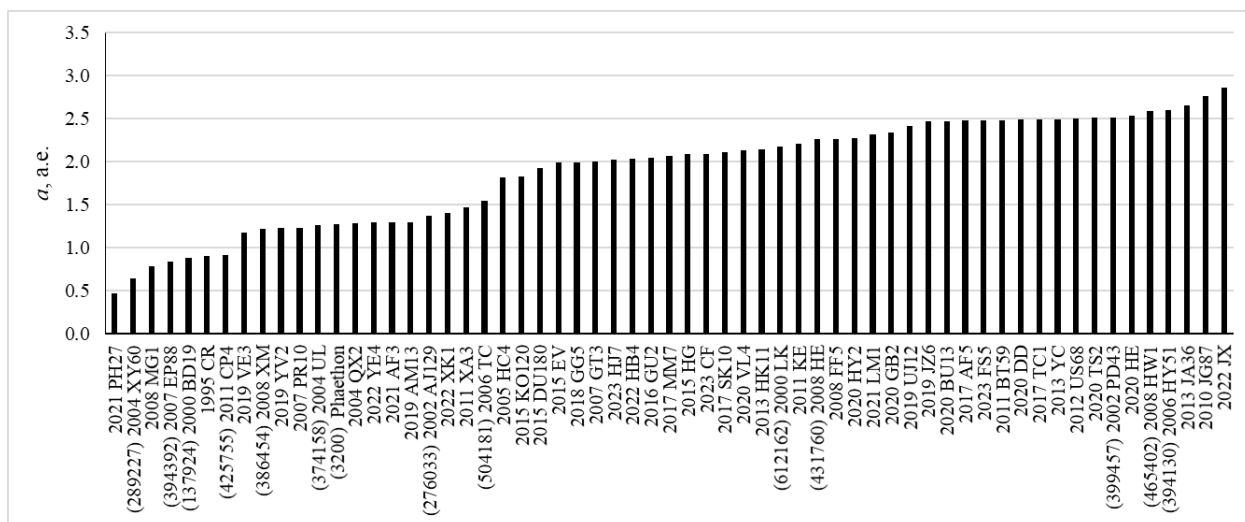


Рисунок 5.1 — Распределение элементов орбит астероидов с малыми перигелийными расстояниями: большая полуось

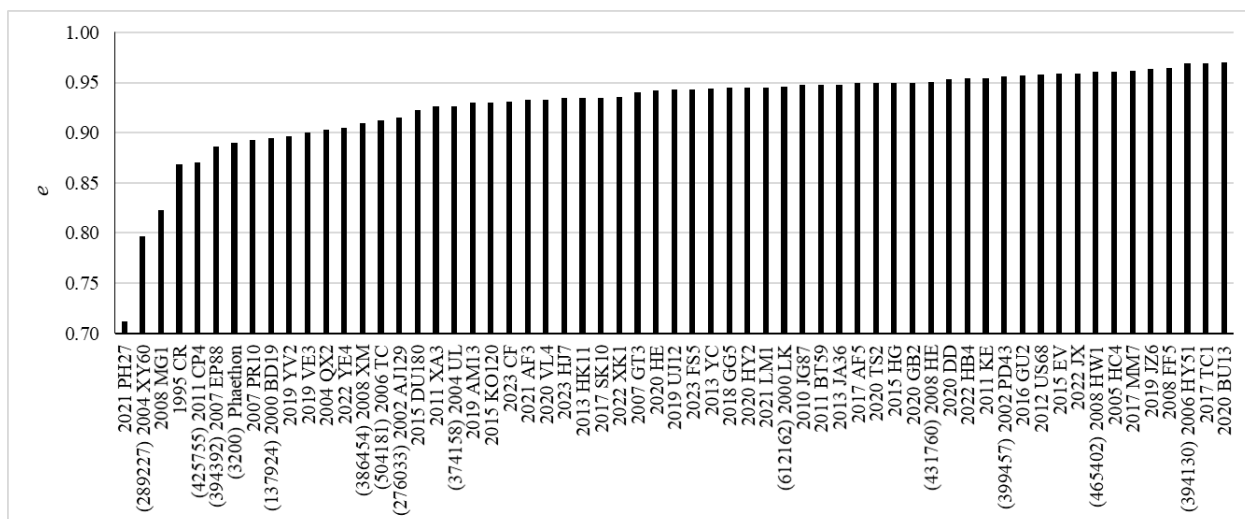


Рисунок 5.2 — Распределение элементов орбит астероидов с малыми перигелийными расстояниями: эксцентриситет

В качестве примера на рисунке 5.6 показаны проекции на плоскость эклиптики орбит астероидов 2020 BU13 и 2021 PH27, которые имеют наибольший ($e = 0.970$) и наименьший ($e = 0.712$) эксцентриситеты, соответственно. Орбиты астероидов и планет ниже плоскости эклиптики показаны серым. Объект 2021 PH27 принадлежит группе Атиры, т.е. всегда находится внутри орбиты Земли, афелий же 2020 BU13 расположен в окрестности орбиты Юпитера. Самым большим в рассматриваемой группе афелийным расстоянием обладает астероид 2022 JX ($Q = 5.599$ а.е.). Однако, следует отметить, что данный вывод сделан

по номинальной орбите, которая определена с низкой точностью. Если судить по номинальным орбитам, то всего 17 из рассматриваемых объектов движутся по кометным орбитам, т.е. имеют афелийные расстояния $Q > 4.8$ а.е. (Fernández, Sosa, 2015). Ближе всего к Солнцу среди всех известных астероидов подходит 2005 HC4 ($q = 0.071$ а.е.).

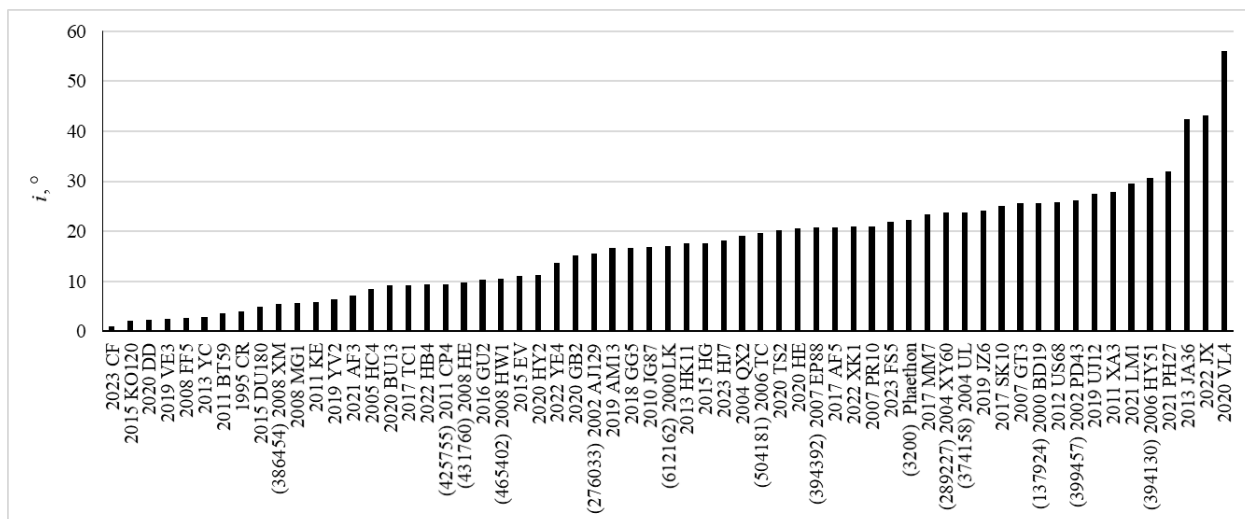


Рисунок 5.3 — Распределение элементов орбит астероидов с малыми перигелийными расстояниями: наклонение

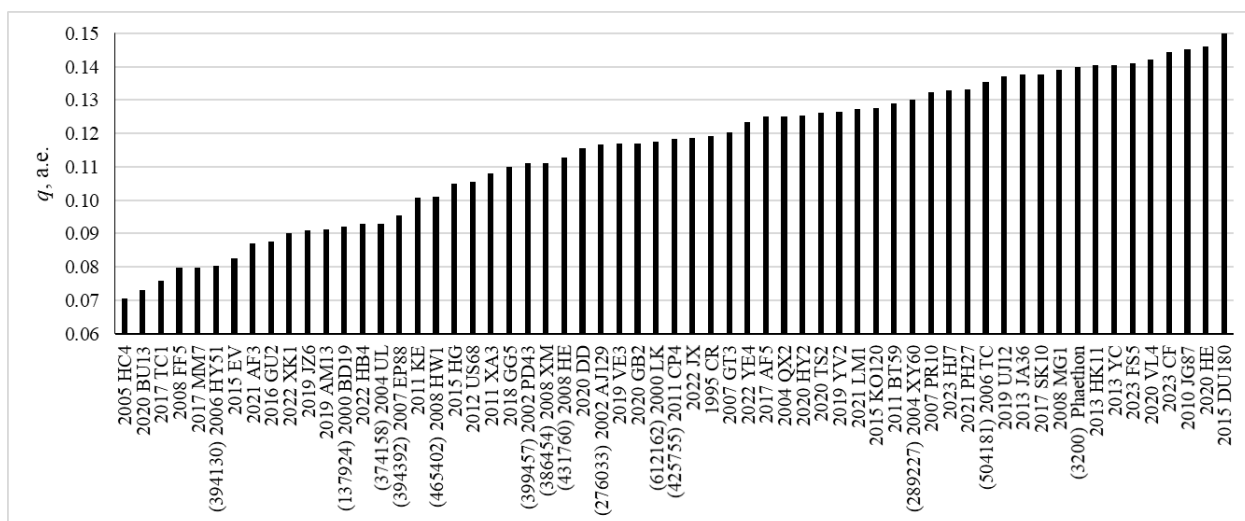


Рисунок 5.4 — Распределение элементов орбит астероидов с малыми перигелийными расстояниями: перигелийное расстояние

В таблице 5.2 представлена информация о результатах процесса улучшения орбит, где N — число использованных наблюдений, Δt — мерный интервал,

σ – среднеквадратическая ошибка представления наблюдений, $\sigma(\mathbf{x}_0)$ и $\sigma(\mathbf{v}_0)$ – среднеквадратическая ошибка оценок векторов положения и скорости соответственно, полученных методом наименьших квадратов (НК-оценок). Таблица 5.2 сортирована по возрастанию значений $\sigma(\mathbf{x}_0)$. Из полученных результатов видно, что только 28 астероидов (от (3200) Phaethon до 2007 GT3) имеют многочисленные наблюдения на длинной дуге и их орбиты хорошо определены. Неопределенность в координатах более половины исследуемых астероидов составляет $\sigma(\mathbf{x}_0) > 10^{-6}$ а.е., большинство из них наблюдались на интервале меньше месяца и/или имеют меньше 50 наблюдений. Для достоверного прогноза их эволюции требуются новые наблюдения.

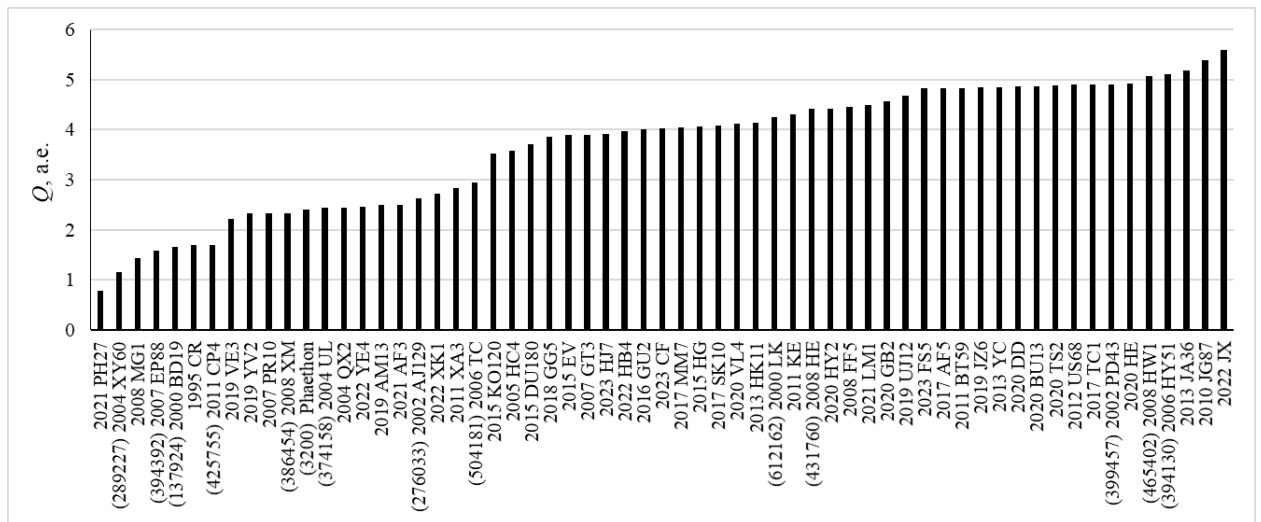


Рисунок 5.5 — Распределение элементов орбит астероидов с малыми перигелийными расстояниями: афелийное расстояние

5.2 Структура возмущений астероидов с малыми перигелийными расстояниями

Исследование структуры возмущений должно быть первым шагом численного моделирования движения, поскольку оно призвано дать ответ на вопрос, влияние каких сил необходимо учитывать при изучении динамики. Для оценки влияния действующих сил использовалась методика, описанная в разделе 2.8. Набор оцениваемых возмущений включает: учет гравитационного влияния Солнца, планет, Луны; сжатия Солнца, Земли и Юпитера и релятивистских эффектов от Солнца,

планет, Луны и Плутона. Учет светового давления и эффекта Ярковского требует знания физических параметров астероидов, поэтому отдельно будет рассмотрен ниже.

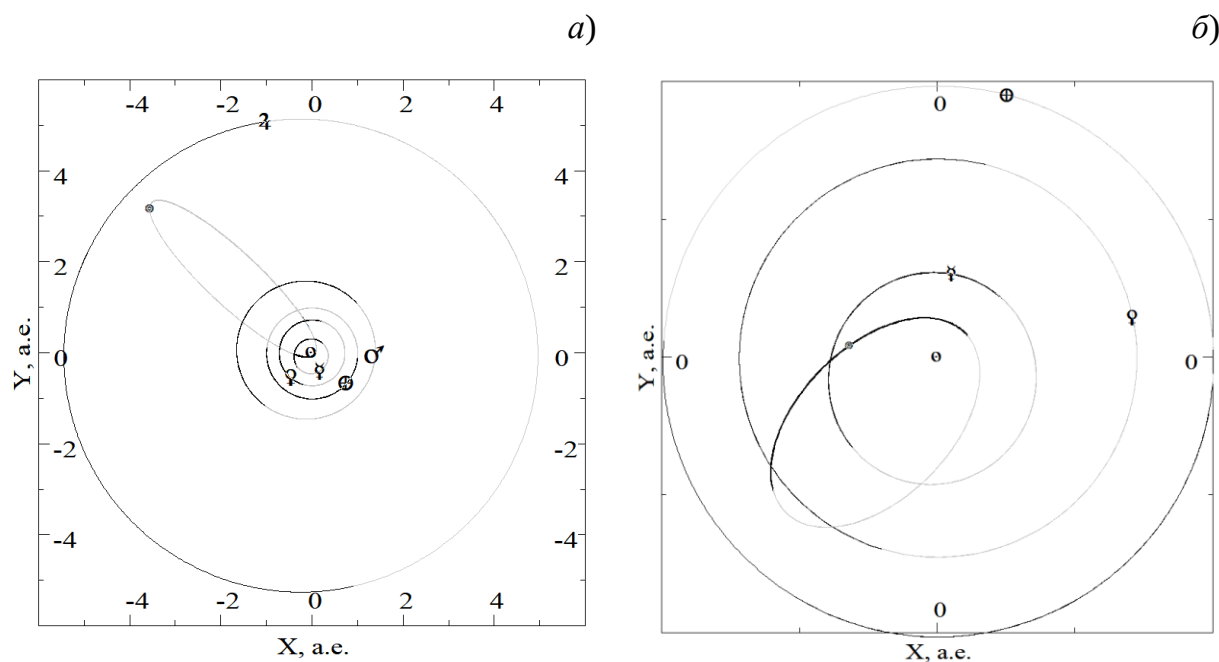


Рисунок 5.6 — Проекция орбит астероидов 2020 BU13 (а) и 2021 PH27 (б) и планет на плоскость эклиптики

Таблица 5.2 — Результаты улучшения орбит астероидов с малыми перигелийными расстояниями

Астероид	N	ΔT , сут.	σ , "	$\sigma(x_0)$, а.е.	$\sigma(v_0)$, а.е./сут.
(3200) Phaethon	6744	14378	0.448	$2.73 \cdot 10^{-8}$	$3.16 \cdot 10^{-10}$
(137924) 2000 BD19	913	9567	0.601	$1.06 \cdot 10^{-7}$	$1.52 \cdot 10^{-9}$
(276033) 2002 AJ129	501	7730	0.594	$1.57 \cdot 10^{-7}$	$9.06 \cdot 10^{-9}$
(386454) 2008 XM	77	1859	0.602	$2.56 \cdot 10^{-7}$	$4.80 \cdot 10^{-9}$
2008 MG1	39	2580	0.349	$2.65 \cdot 10^{-7}$	$4.79 \cdot 10^{-9}$
(425755) 2011 CP4	140	5869	0.605	$2.83 \cdot 10^{-7}$	$8.34 \cdot 10^{-8}$
(289227) 2004 XY60	101	6566	0.275	$2.87 \cdot 10^{-7}$	$5.07 \cdot 10^{-9}$
(431760) 2008 HE	219	4802	0.380	$3.16 \cdot 10^{-7}$	$1.54 \cdot 10^{-9}$
2019 AM13	44	2170	0.389	$3.49 \cdot 10^{-7}$	$3.69 \cdot 10^{-9}$
(612162) 2000 LK	219	8356	0.471	$3.60 \cdot 10^{-7}$	$2.28 \cdot 10^{-9}$

Продолжение таблицы 5.2

Астероид	N	ΔT , сут.	σ , "	$\sigma(x_0)$, а.е.	$\sigma(v_0)$, а.е./сут.
1995 CR	259	10205	0.868	$4.14 \cdot 10^{-7}$	$1.53 \cdot 10^{-9}$
(465402) 2008 HW1	354	4766	0.337	$4.24 \cdot 10^{-7}$	$6.98 \cdot 10^{-10}$
2021 PH27	56	1709	0.174	$4.27 \cdot 10^{-7}$	$2.61 \cdot 10^{-8}$
(374158) 2004 UL	250	7674	0.391	$4.50 \cdot 10^{-7}$	$1.17 \cdot 10^{-9}$
2011 KE	198	2520	0.350	$4.56 \cdot 10^{-7}$	$4.37 \cdot 10^{-10}$
2017 AF5	342	1859	0.306	$4.56 \cdot 10^{-7}$	$1.72 \cdot 10^{-9}$
(394392) 2007 EP88	163	5879	0.469	$5.81 \cdot 10^{-7}$	$3.58 \cdot 10^{-9}$
(394130) 2006 HY51	289	4784	0.409	$6.19 \cdot 10^{-7}$	$5.86 \cdot 10^{-10}$
(504181) 2006 TC	57	4792	0.323	$7.00 \cdot 10^{-7}$	$1.73 \cdot 10^{-9}$
2011 XA3	154	4004	0.287	$9.95 \cdot 10^{-7}$	$1.06 \cdot 10^{-9}$
2007 PR10	55	5482	0.404	$9.99 \cdot 10^{-7}$	$3.09 \cdot 10^{-8}$
(399457) 2002 PD43	171	7318	0.488	$1.20 \cdot 10^{-6}$	$4.36 \cdot 10^{-9}$
2022 HB4	87	1133	0.181	$1.26 \cdot 10^{-6}$	$5.08 \cdot 10^{-9}$
2010 JG87	88	3340	0.489	$1.33 \cdot 10^{-6}$	$2.11 \cdot 10^{-9}$
2015 DU180	65	2943	0.346	$1.35 \cdot 10^{-6}$	$2.06 \cdot 10^{-8}$
2012 US68	61	2915	0.245	$1.92 \cdot 10^{-6}$	$5.19 \cdot 10^{-9}$
2013 YC	74	2910	0.223	$3.28 \cdot 10^{-6}$	$9.72 \cdot 10^{-9}$
2007 GT3	46	5113	0.451	$9.18 \cdot 10^{-6}$	$1.85 \cdot 10^{-8}$
2020 DD	97	6	0.319	$1.18 \cdot 10^{-5}$	$6.52 \cdot 10^{-6}$
2020 BU13	43	47	0.253	$1.37 \cdot 10^{-5}$	$6.10 \cdot 10^{-7}$
2017 MM7	67	29	0.366	$2.95 \cdot 10^{-5}$	$1.90 \cdot 10^{-6}$
2020 VL4	43	1536	0.334	$3.04 \cdot 10^{-5}$	$1.98 \cdot 10^{-6}$
2020 TS2	40	48	0.335	$3.12 \cdot 10^{-5}$	$1.22 \cdot 10^{-6}$
2021 LM1	35	66	0.271	$3.48 \cdot 10^{-5}$	$7.45 \cdot 10^{-7}$
2022 XK1	24	48	0.280	$3.53 \cdot 10^{-5}$	$7.28 \cdot 10^{-7}$
2020 GB2	96	24	0.470	$4.61 \cdot 10^{-5}$	$3.83 \cdot 10^{-6}$
2019 UJ12	70	22	1.306	$5.35 \cdot 10^{-5}$	$1.28 \cdot 10^{-5}$

Продолжение таблицы 5.2

Астероид	N	ΔT , сут.	σ , "	$\sigma(x_0)$, а.е.	$\sigma(v_0)$, а.е./сут.
2018 GG5	78	46	0.421	$6.21 \cdot 10^{-5}$	$2.54 \cdot 10^{-6}$
2019 JZ6	27	20	0.248	$7.78 \cdot 10^{-5}$	$3.47 \cdot 10^{-6}$
2023 HJ7	43	11	0.253	$7.86 \cdot 10^{-5}$	$1.99 \cdot 10^{-5}$
2022 YE4	21	18	0.291	$8.16 \cdot 10^{-5}$	$3.89 \cdot 10^{-6}$
2017 TC1	54	22	0.283	$8.61 \cdot 10^{-5}$	$5.34 \cdot 10^{-6}$
2023 CF	30	2	0.303	$9.86 \cdot 10^{-5}$	$2.72 \cdot 10^{-5}$
2011 BT59	16	28	0.174	$1.04 \cdot 10^{-4}$	$3.78 \cdot 10^{-6}$
2019 YV2	62	20	0.415	$1.08 \cdot 10^{-4}$	$7.05 \cdot 10^{-6}$
2017 SK10	36	23	0.273	$1.28 \cdot 10^{-4}$	$6.94 \cdot 10^{-6}$
2013 JA36	52	25	0.612	$1.39 \cdot 10^{-4}$	$1.05 \cdot 10^{-5}$
2016 GU2	29	7	0.259	$1.56 \cdot 10^{-4}$	$2.01 \cdot 10^{-5}$
2019 VE3	29	11	0.567	$1.71 \cdot 10^{-4}$	$3.29 \cdot 10^{-5}$
2020 HY2	25	4	0.423	$1.72 \cdot 10^{-4}$	$4.62 \cdot 10^{-5}$
2020 HE	41	6	0.272	$1.82 \cdot 10^{-4}$	$2.85 \cdot 10^{-5}$
2004 QX2	24	17	0.802	$2.59 \cdot 10^{-4}$	$1.75 \cdot 10^{-5}$
2021 AF3	28	10	0.375	$3.12 \cdot 10^{-4}$	$2.55 \cdot 10^{-5}$
2022 JX	37	4	0.498	$3.19 \cdot 10^{-4}$	$5.37 \cdot 10^{-5}$
2008 FF5	51	11	0.528	$3.54 \cdot 10^{-4}$	$4.26 \cdot 10^{-5}$
2015 EV	51	6	0.507	$3.77 \cdot 10^{-4}$	$6.76 \cdot 10^{-5}$
2005 HC4	50	12	0.578	$7.27 \cdot 10^{-4}$	$5.04 \cdot 10^{-5}$
2015 HG	27	7	0.251	$8.81 \cdot 10^{-4}$	$6.27 \cdot 10^{-5}$
2023 FS5	24	4	0.334	$1.46 \cdot 10^{-3}$	$1.30 \cdot 10^{-4}$
2013 HK11	22	6	0.477	$2.17 \cdot 10^{-3}$	$2.06 \cdot 10^{-4}$
2015 KO120	15	13	0.34	$2.55 \cdot 10^{-3}$	$1.23 \cdot 10^{-4}$

Результаты данного исследования показали, что для части астероидов с плохо определенной орбитой четвертый и пятый метод не позволяют осуществить классификацию возмущающих факторов на сильные и слабые. Эта проблема

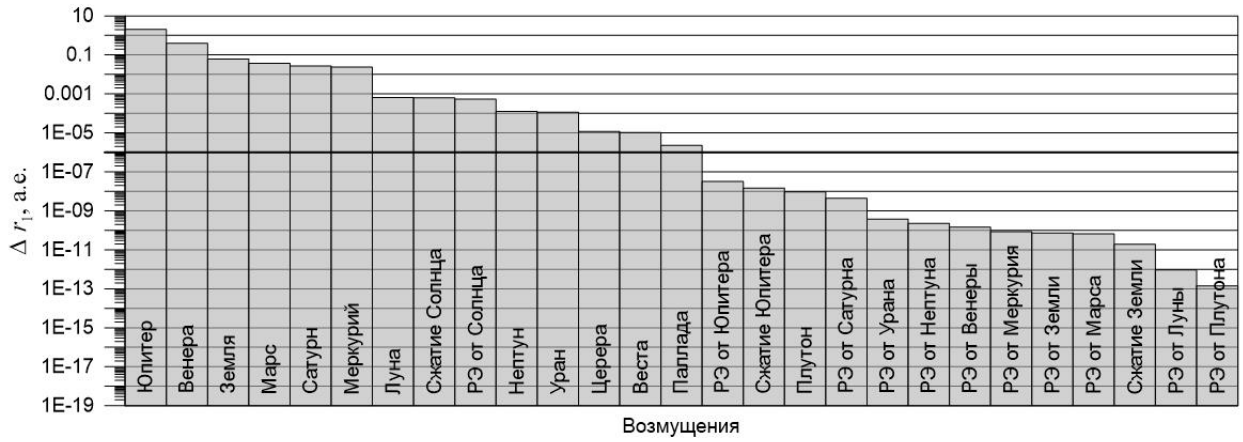
обусловлена большим размером начального облака неопределенности и может быть решена только с появлением новых наблюдений. К данному подклассу относятся следующие астероиды: 2004 QX2, 2005 HC4, 2008 FF5, 2011 BT59, 2013 HK11, 2013 JA36, 2015 EV, 2015 HG, 2015 KO120, 2016 GU2, 2017 MM7, 2017 SK10, 2017 TC1, 2018 GG5, 2019 JZ6, 2019 UJ12, 2019 VE3, 2019 YV2, 2020 BU13, 2020 DD, 2020 GB2, 2020 HE, 2020 HY2, 2020 TS2, 2020 VL4, 2021 AF3, 2021 LM1, 2022 JX, 2022 XK1, 2022 YE4, 2023 CF, 2023 FS5, 2023 HJ7. Для перечисленных объектов в настоящий момент невозможно дать точную рекомендацию об использовании той или иной модели сил, поэтому, по-видимому, лучшим выходом будет использовать ту же модель, что и для остальных астероидов с малыми перигелийными расстояниями. Орбиты остальных астероидов ((3200) Phaethon, (137924) 2000 BD19, (276033) 2002 AJ129, (289227) 2004 XY60, (374158) 2004 UL, (386454) 2008 XM, (394130) 2006 HY51, (394392) 2007 EP88, (399457) 2002 PD43, (425755) 2011 CP4, (431760) 2008 HE, (465402) 2008 HW1, (504181) 2006 TC, 1995 CR, 2000 LK, 2007 GT3, 2007 PR10, 2008 MG1, 2010 JG87, 2011 KE, 2011 XA3, 2012 US68, 2013 YC, 2015 DU180, 2017 AF5, 2019 AM13, 2021 PH27, 2022 HB4) хорошо определены и использование пяти методов позволяет классифицировать возмущения на сильные и слабые. Проведенное исследование показало, что оптимальная модель сил для большинства изучаемых объектов включает учет влияния больших планет и Луны, сжатия Солнца и релятивистских эффектов от Солнца. В некоторых случаях для повышения точности прогноза также желателен учет влияния крупных астероидов, а при очень тесных сближениях с Землей может потребоваться учет ее сжатия.

Пятый метод также использовался в работе (Sambarov et al., 2014) для оценки влияния сжатия Солнца на динамику астероидов 2011 KE и 1995 CR. Результаты для 2011 KE хорошо согласуются с нашими. Что касается 1995 CR, то до 2014 года он наблюдался только в одной оппозиции, орбита была плохо определена, и пятый метод практически не применим.

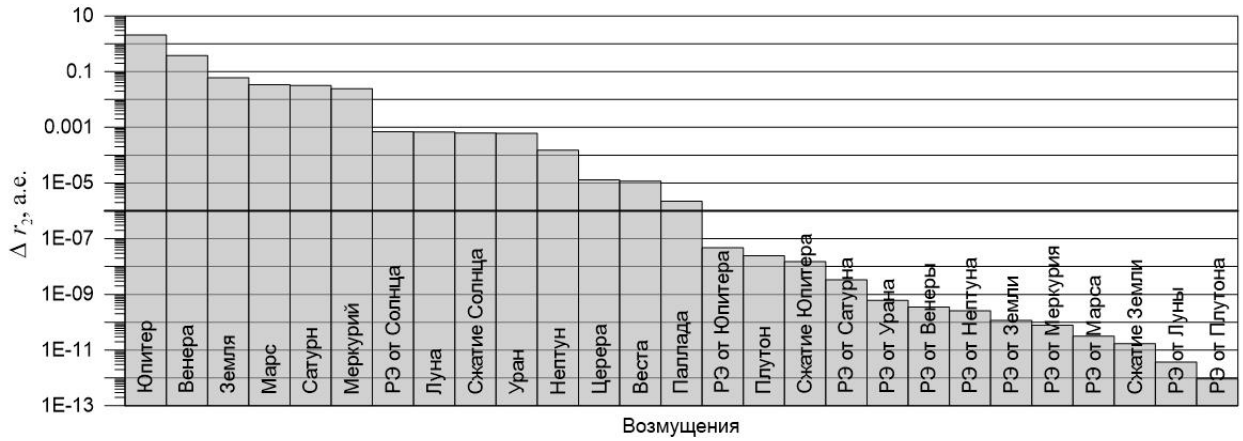
В качестве примера на рисунках 5.7 и 5.8 представлены результаты использования пяти методов для астероида (3200) Phaethon. Все обозначения описаны в разделе 2.8. Жирная горизонтальная линия показывает границу между

сильными и слабыми возмущениями. Граничные значения для четвертого и пятого методов (рисунок 5.8) представляют собой ψ_{crit} (2.36) и $\varepsilon = 1$ (2.37) соответственно.

Метод 1



Метод 2



Метод 3

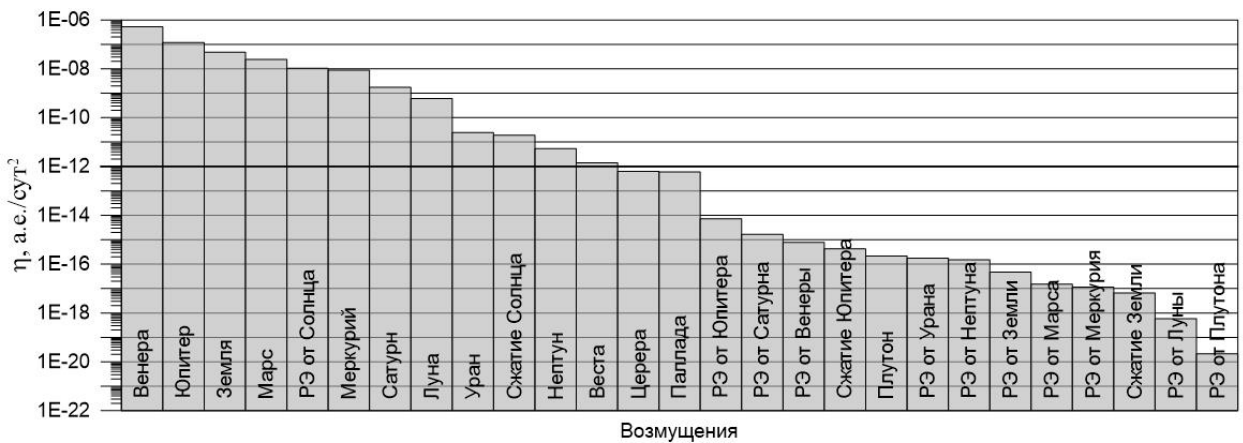
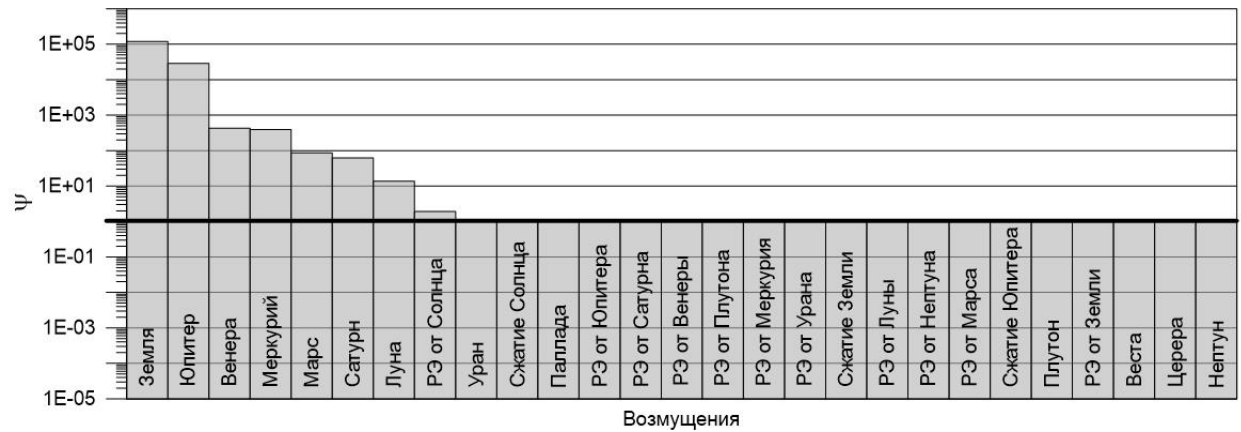
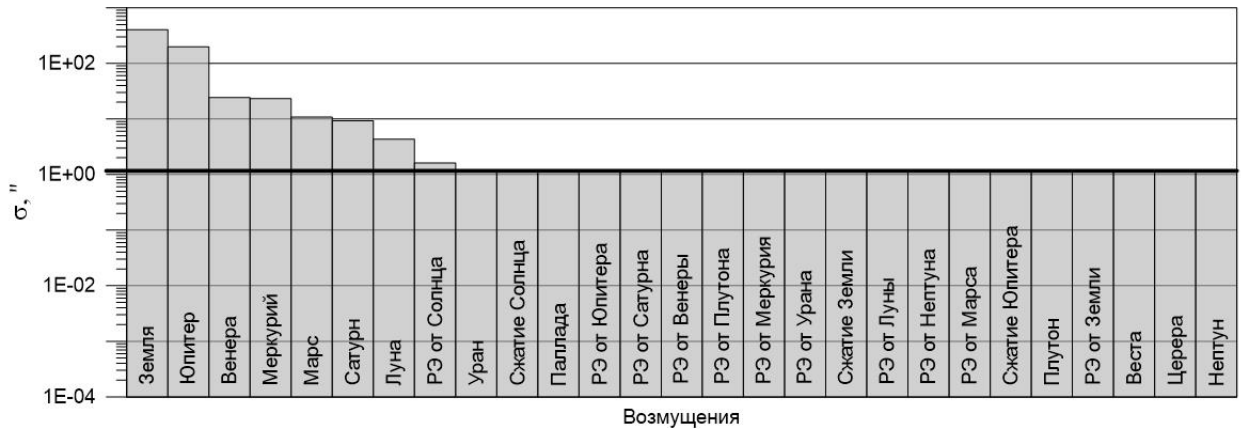


Рисунок 5.7 — Структура возмущений астероида (3200) Phaethon, полученная первыми тремя методами

Границы для первых трех методов определялись опытным путем и составили $\Delta r = 10^{-6}$ а.е. и $\eta = 10^{-12}$ а.е./сут². Из рисунков 5.7 и 5.8 видно, что результаты различных методов хорошо согласуются между собой.

Метод 4



Метод 5

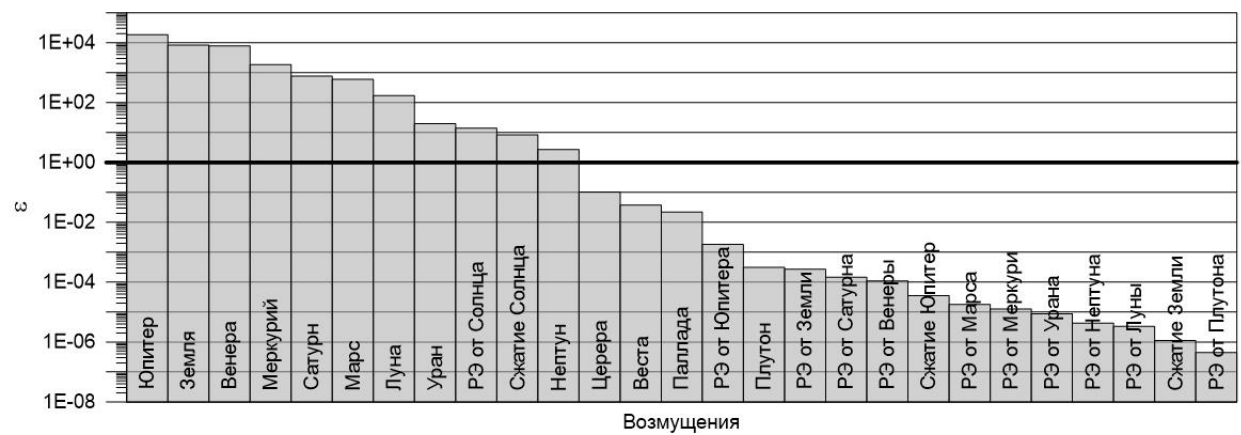


Рисунок 5.8 — Структура возмущений астероида (3200) Phaethon, полученная четвертым и пятым методами

Для демонстрации преимущества рекомендованной модели сил относительно полной, мы сравнили время вычислений для обеих моделей. Результаты показаны в таблице 5.3, которая содержит время вычислений для рекомендованной модели в процентах от времени, требуемого для полной модели, для астероидов (3200) Phaethon и 1995 CR. Результаты показывают выигрыш во времени почти в 4 раза.

Таблица 5.3 — Время вычислений, требуемое для рекомендуемой модели, в процентах от полной

Интервал времени	(3200) Phaethon	1995 CR
100 лет	27.9%	27.5%
500 лет	27.6%	28.4%

Таким образом, для астероидов с малыми перигелийными расстояниями можно рекомендовать использование следующей модели сил: учет влияния планет, Луны, сжатия Солнца и релятивистских эффектов от Солнца. Учет влияния светового давления и эффекта Ярковского требует знания физических параметров, поэтому рассмотрим его отдельно.

Значения ускорения, обусловленного влиянием светового давления и эффекта Ярковского, зависят от диаметра, массы, альбедо, параметров вращений и т.д. (Vokrouhlicky et al., 2015). К сожалению, эти величины известны для небольшого числа астероидов, поэтому часто единственным выходом является их определение из наблюдений. Как уже было описано в подразделе 2.2, обычно предполагают, что ускорение, обусловленное эффектом Ярковского, обратно пропорционально квадрату расстояния до Солнца (Farnocchia et al., 2013) и определяют его трансверсальную составляющую A_2 .

В таблице 5.4 представлена информация о физических параметрах, а в таблице 5.5 – о параметре эффекта Ярковского для некоторых астероидов. Абсолютная звездная величина H , диаметр D , альбедо p_V и масса M_a были получены из следующих источников: <https://ssd.jpl.nasa.gov>, <http://smallbodies.ru>, работы (Devyatkin et al., 2022). Трансверсальное ускорение A_2 и его неопределенность ΔA_2

взяты с сайта <https://ssd.jpl.nasa.gov> и работы (Tardioli et al., 2017). Скорости изменения большой полуоси da/dt и их неопределенности $\Delta da/dt$ приведены в соответствии с работами (Nugent et al., 2012a) и (Greenberg et al., 2020). Символ «—» означает, что данные не найдены в вышеупомянутых источниках.

Таблица 5.4 — Физические параметры некоторых астероидов с малыми перигелийными расстояниями

Астероид	H	A	D , км	M_a , кг
(3200) Phaethon	14.3	0.1066	6.25	$1.4 \cdot 10^{14}$
(137924) 2000 BD19	17.2	0.247	0.97	$1.10 \cdot 10^{12}$
(276033) 2002 AJ129	18.7	0.04	570	$1.81 \cdot 10^{12}$
(386454) 2008 XM	20	0.128	0.367	$3.43 \cdot 10^{10}$
(394130) 2006 HY51	17.1	0.157	1.218	$1.94 \cdot 10^{12}$
(394392) 2007 EP88	18.5	0.174	0.636	$2.96 \cdot 10^{11}$
2005 HC4	20.7	0.25–0.05	0.193–0.431	$1.31 \cdot 10^{10}$
2010 JG87	19.2	0.202	0.408	—
2015 DU180	20.89	0.045	0.435	$9.91 \cdot 10^9$

Таблица 5.5 — Параметры эффекта Ярковского для некоторых астероидов с малыми перигелийными расстояниями

Астероид	A_2 , а.е./сут ²	ΔA_2 , а.е./сут ²	da/dt , а.е./млн лет	$\Delta da/dt$, а.е./млн лет
(3200) Phaethon	$-6.69 \cdot 10^{-15}$	$7.99 \cdot 10^{-16}$	$-9.01 \cdot 10^{-4}$	$2.8 \cdot 10^{-4}$
(137924) 2000 BD19	$-9.73 \cdot 10^{-15}$	$6.36 \cdot 10^{-15}$	$34.30 \cdot 10^{-4}$	$12.02 \cdot 10^{-4}$
(276033) 2002 AJ129	$3.03 \cdot 10^{-15}$	$8.23 \cdot 10^{-15}$	—	—
(394130) 2006 HY51	—	—	$54.35 \cdot 10^{-4}$	$23.85 \cdot 10^{-4}$
(394392) 2007 EP88	—	—	$48.57 \cdot 10^{-4}$	$16.22 \cdot 10^{-4}$
(425755) 2011 CP4	$5.61 \cdot 10^{-14}$	$1.71 \cdot 10^{-14}$	—	—
1995 CR	$-4.83 \cdot 10^{-14}$	$1.98 \cdot 10^{-15}$	—	—
2010 JG87	—	—	$72.11 \cdot 10^{-4}$	$25.12 \cdot 10^{-4}$

Как видно из таблицы 5.4, все параметры, требуемые для определения светового давления известны только для 8 астероидов. Однако, 2005 HC4 наблюдался в течении только 12 ночей, и его орбита плохо определена. С другой стороны, для астероида 2010 JG87 нам не удалось обнаружить значения массы, поэтому оно было вычислено по формуле (1.1). Результаты применения пяти методов приведены в таблице 5.6. Световое давление оказывает слабое влияние на начальное положение астероида, его влияние на эволюцию также незначительно. В большинстве случаев это возмущение меньше, чем сжатие Солнца и релятивистские эффекты от Солнца. Однако следует отметить, что для всех рассмотренных объектов третий метод показал существенное влияние светового давления, большее чем сжатие Солнца. По-видимому, это обусловлено тем, что световое давление оказывает существенное влияние в малой части орбиты при прохождении перигелия.

Таблица 5.6 — Влияние светового давления на движение некоторых астероидов с малыми перигелийными расстояниями

Астероид	Δr_1 , а.е.	Δr_2 , а.е.	η , а.е./сут ²	ψ	ε
(3200) Phaethon	$1.67 \cdot 10^{-7}$	$2.88 \cdot 10^{-10}$	$2.02 \cdot 10^{-11}$	1.00	0.049
(137924) 2000 BD19	$6.95 \cdot 10^{-7}$	$1.62 \cdot 10^{-8}$	$2.45 \cdot 10^{-10}$	1.00	0.034
(276033) 2002 AJ129	$1.97 \cdot 10^{-6}$	$9.60 \cdot 10^{-9}$	$9.54 \cdot 10^{-11}$	1.00	1.360
(386454) 2008 XM	$8.24 \cdot 10^{-6}$	$1.13 \cdot 10^{-7}$	$5.83 \cdot 10^{-10}$	1.00	0.024
(394130) 2006 HY51	$9.96 \cdot 10^{-7}$	$3.08 \cdot 10^{-8}$	$2.98 \cdot 10^{-10}$	1.00	0.026
(394392) 2007 EP88	$1.91 \cdot 10^{-6}$	$2.64 \cdot 10^{-8}$	$3.34 \cdot 10^{-10}$	1.00	0.025
2010 JG87	$1.72 \cdot 10^{-6}$	$1.80 \cdot 10^{-8}$	$1.35 \cdot 10^{-10}$	1.00	0.028
2015 DU180	$7.13 \cdot 10^{-5}$	$1.53 \cdot 10^{-7}$	$1.07 \cdot 10^{-9}$	1.00	2.973

Параметр эффекта Ярковского также известен только для нескольких астероидов, и даже для большинства из них имеет место неопределенность того же порядка, что и сама величина. Более того, разные исследования дают различные значения. Например, в работе (Tardioli et al., 2017) для астероида 1995 CR приводится значение $A_2 = -17.25 \cdot 10^{-14}$ а.е./сут². Разница между этими значениями больше их

неопределенностей. Подобная ситуация наблюдается для скорости изменения большой полуоси. Для астероида (137924) 2000 BD19 в работе (Nugent et al., 2012) приводится значение $da/dt = 3.43 \cdot 10^{-3}$ а.е./млн лет. Однако соответствующее значение в таблице 5.5 отрицательное, т.е. неизвестно увеличивается большая полуось или уменьшается под влиянием эффекта Ярковского. Для астероидов (394130) 2006 HY51, (394392) 2007 EP88 и 2010 JG87 в таблице 5.5 приведены только значения da/dt , поэтому A_2 для этих объектов были посчитаны по формуле, приведенной в работе (Farnocchia et al., 2013b).

Тем не менее, мы оценили влияние эффекта Ярковского на движение некоторых астероидов – в таблице 5.7 приведены оценки, полученные с использованием пяти методов. Полученные результаты показывают, что эффект Ярковского оказывает существенное влияние как на начальное облако неопределенности, так и на движение большинства рассматриваемых объектов, в некоторых случаях даже большее, чем влияние релятивистских эффектов от Солнца. Причем в отличие от светового давления, данный возмущающий фактор влияет не только в окрестности Солнца, что явно демонстрируют первые два метода.

Таблица 5.7 — Влияние эффекта Ярковского на движение некоторых астероидов с малыми перигелийными расстояниями

Астероид	Δr_1 , а.е.	Δr_2 , а.е.	η , а.е./сут ²	ψ	ε
(3200) Phaethon	$7.66 \cdot 10^{-5}$	$7.12 \cdot 10^{-5}$	$3.42 \cdot 10^{-13}$	1.00	1.985
(137924) 2000 BD19	$3.22 \cdot 10^{-4}$	$3.15 \cdot 10^{-4}$	$1.15 \cdot 10^{-12}$	1.00	0.310
(276033) 2002 AJ129	$8.62 \cdot 10^{-5}$	$8.29 \cdot 10^{-5}$	$2.26 \cdot 10^{-13}$	1.00	2.164
(394130) 2006 HY51	$2.75 \cdot 10^{-4}$	$1.54 \cdot 10^{-4}$	$1.95 \cdot 10^{-12}$	1.00	2.954
(394392) 2007 EP88	$1.41 \cdot 10^{-3}$	$1.39 \cdot 10^{-3}$	$2.49 \cdot 10^{-12}$	0.99	0.276
(425755) 2011 CP4	$5.15 \cdot 10^{-4}$	$5.23 \cdot 10^{-4}$	$4.02 \cdot 10^{-12}$	0.98	0.652
1995 CR	$7.86 \cdot 10^{-4}$	$7.81 \cdot 10^{-4}$	$3.40 \cdot 10^{-12}$	0.79	14.341
2010 JG87	$3.43 \cdot 10^{-4}$	$1.80 \cdot 10^{-4}$	$1.40 \cdot 10^{-12}$	1.00	3.321

Можно сделать вывод, что эффект Ярковского оказывает значительное влияние на движение астероидов с малыми перигелийными расстояниями, однако

значение параметра A_2 в большинстве случаев плохо определено. Со временем можно ожидать увеличения точности, в частности, в связи с увеличением числа радарных наблюдений. В настоящее время такие наблюдения получены только для (3200) Phaethon и (425755) 2011 CP4. Более подробно эффект Ярковского рассмотрен в следующем подразделе.

Таким образом, можно сделать вывод, что для астероидов с малыми перигелийными расстояниями необходимо учитывать влияние больших планет, Луны, релятивистских эффектов от Солнца и сжатия Солнца. Если удастся определить параметр эффекта Ярковского, то данный эффект тоже необходимо включать в модель. Световое давление оказывает меньшее влияние, поэтому его необходимо учитывать только при повышенных требованиях к точности и знании физических параметров. Аналогично для повышения точности нужен учет влияния крупных астероидов.

5.3 Исследование эффекта Ярковского

5.3.1 Сравнение двух методик определения параметра эффекта Ярковского

Определение параметра эффекта Ярковского проводилось с помощью двух методик, описанных в разделе 2.4, для астероидов с малыми перигелийными расстояниями по состоянию на июль 2019 года, когда было известно 40 таких объектов.

С помощью первой методики удалось определить значение трансверсального ускорения A_2 для 22 объектов, варьируя A_2 в пределах интервала $[-10^{-12}, 10^{-12}]$ с шагом 10^{-15} а.е./сут.² (Галушина, Летнер, 2020). Наблюдения были взяты с сайта Центра малых планет (<https://minorplanetcenter.net/>).

В качестве примера работы программы на рисунке 5.9 представлены графики изменения среднеквадратической ошибки представления наблюдений σ и среднеквадратической ошибки НК-оценки вектора положения $\sigma(x_0)$ в зависимости от величины параметра A_2 для астероидов (431760) 2008 NE (a) и (425755) 2011 CP4 (б), на которых явно просматривается минимум для обеих величин. Причем положение минимального значения сигма совпадает с минимальным объемом эллипсоида неопределенности. Такая картина

наблюдается для 22 астероидов. Для 18-ти определить минимум таким образом не удалось, что в большинстве случаев обусловлено малым числом и небольшим интервалом наблюдений. Для некоторых объектов, возможно, значение A_2 лежит за пределами рассматриваемого интервала.

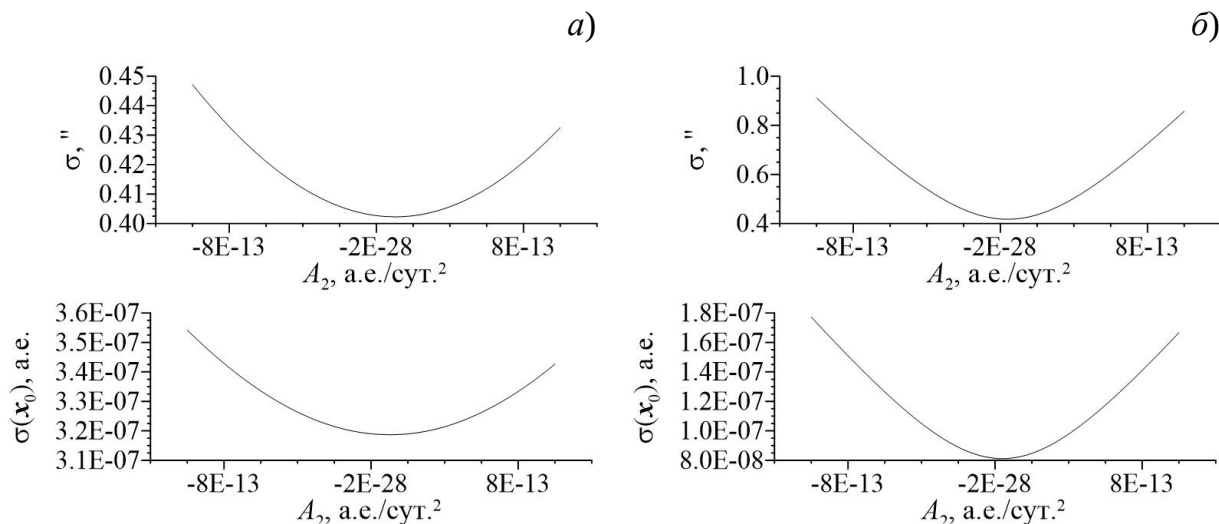


Рисунок 5.9 — Графики изменения σ и $\sigma(x_0)$ в зависимости от параметра A_2 для астероидов (431760) 2008 NE (a) и (425755) 2011 CP4 (б)

В таблице 5.8 представлены полученные коэффициенты A_2 , а также значения σ и $\sigma(x)$ с учетом ЭЯ и без него (помечены индексом «0») для этих объектов. Данные в таблице отсортированы по уменьшению влияния ЭЯ на σ , что в большинстве случаев коррелирует со значением A_2 .

Из таблицы 5.8 также видно, что для большинства астероидов учет влияния эффекта Ярковского приводит к уменьшению среднеквадратической ошибки представления наблюдений и размера облака неопределенности. В результате данного исследования объекты были упорядочены нами по степени влияния эффекта Ярковского на их движение. На рисунке 5.10 представлены изменения значения среднеквадратической ошибки представления наблюдений σ и размера начального облака неопределенности $\sigma(x_0)$ с учетом ЭЯ и без него. Данные результаты показывают, что максимальное влияние ЭЯ оказывает на движение астероида (504181) 2006 ТС. Подробное исследование динамики этого астероида представлено в подразделе 5.6.4. Отдельно отметим, что влияние ЭЯ на астероид

(394392) 2007 EP88 пренебрежимо мало, что связано с близким к нулю значением коэффициента A_2 .

Таблица 5.8 — Результаты определения параметра A_2 с помощью первой методики

Имя	A_2 , а.е./сут. ²	σ	σ_0	$\sigma(x)$, а.е.	$\sigma(x_0)$, а.е.
(504181) 2006 TC	$4.55 \cdot 10^{-13}$	0.27675	0.29341	$5.4106 \cdot 10^{-7}$	$5.7362 \cdot 10^{-7}$
2007 PR10	$-3.86 \cdot 10^{-13}$	0.37404	0.38817	$7.2807 \cdot 10^{-6}$	$7.5554 \cdot 10^{-6}$
2008 MG1	$-1.84 \cdot 10^{-13}$	0.34767	0.35417	$2.6433 \cdot 10^{-7}$	$2.6927 \cdot 10^{-7}$
(137924) 2000 BD19	$5.10 \cdot 10^{-14}$	0.49465	0.50014	$1.1534 \cdot 10^{-7}$	$1.1663 \cdot 10^{-7}$
2012 US68	$4.60 \cdot 10^{-13}$	0.21586	0.21946	$1.6846 \cdot 10^{-6}$	$1.7126 \cdot 10^{-6}$
(276033) 2002 AJ129	$-2.00 \cdot 10^{-14}$	0.51960	0.52238	$2.1223 \cdot 10^{-7}$	$2.1337 \cdot 10^{-7}$
(289227) 2004 XY60	$1.65 \cdot 10^{-13}$	0.30144	0.30412	$6.5380 \cdot 10^{-7}$	$6.5962 \cdot 10^{-7}$
(386454) 2008 XM	$-1.50 \cdot 10^{-13}$	0.56816	0.57055	$2.3610 \cdot 10^{-7}$	$2.3709 \cdot 10^{-7}$
1995 CR	$-1.00 \cdot 10^{-15}$	0.78004	0.78128	$3.6736 \cdot 10^{-7}$	$3.6795 \cdot 10^{-7}$
(465402) 2008 HW1	$1.74 \cdot 10^{-13}$	0.31611	0.31729	$1.1033 \cdot 10^{-6}$	$1.1074 \cdot 10^{-6}$
(425755) 2011 CP4	$4.00 \cdot 10^{-14}$	0.41744	0.41852	$8.1153 \cdot 10^{-8}$	$8.1364 \cdot 10^{-8}$
2000 LK	$-2.30 \cdot 10^{-14}$	0.58021	0.58107	$6.6629 \cdot 10^{-7}$	$6.6729 \cdot 10^{-7}$
2010 JG87	$-1.59 \cdot 10^{-13}$	0.49073	0.49151	$1.3381 \cdot 10^{-6}$	$1.3402 \cdot 10^{-6}$
(374158) 2004 UL	$2.20 \cdot 10^{-14}$	0.46643	0.46719	$3.2035 \cdot 10^{-7}$	$3.2088 \cdot 10^{-7}$
2011 KE	$3.19 \cdot 10^{-13}$	0.31124	0.31172	$6.0121 \cdot 10^{-7}$	$6.0214 \cdot 10^{-7}$
(3200) Phaethon	$-1.10 \cdot 10^{-14}$	0.50402	0.50449	$3.2049 \cdot 10^{-8}$	$3.2078 \cdot 10^{-8}$
(431760) 2008 HE	$1.02 \cdot 10^{-13}$	0.40228	0.40268	$3.1867 \cdot 10^{-7}$	$3.1899 \cdot 10^{-7}$
(399457) 2002 PD43	$-3.00 \cdot 10^{-14}$	0.49824	0.49860	$7.0737 \cdot 10^{-7}$	$7.0788 \cdot 10^{-7}$
(394130) 2006 HY51	$7.70 \cdot 10^{-14}$	0.36477	0.36502	$4.7834 \cdot 10^{-7}$	$4.7867 \cdot 10^{-7}$
2011 XA3	$-1.00 \cdot 10^{-14}$	0.30182	0.30184	$1.2325 \cdot 10^{-6}$	$1.2326 \cdot 10^{-6}$
2013 YC	$-1.20 \cdot 10^{-14}$	0.22623	0.22623	$2.7127 \cdot 10^{-6}$	$2.7128 \cdot 10^{-6}$
(394392) 2007 EP88	$1.00 \cdot 10^{-15}$	0.51767	0.51767	$1.0726 \cdot 10^{-6}$	$1.0726 \cdot 10^{-6}$

Учет ЭЯ может привести к изменению размеров и положения начального облака неопределенности. Для иллюстрации на рисунке 5.11 представлены

начальные облака неопределенности (10 тысяч тестовых частиц) для астероида (431760) 2008 HE. Серым цветом на рисунке 5.11 обозначена область, построенная на основе модели движения без учета ЭЯ, черным цветом – на основе модели движения с ЭЯ.

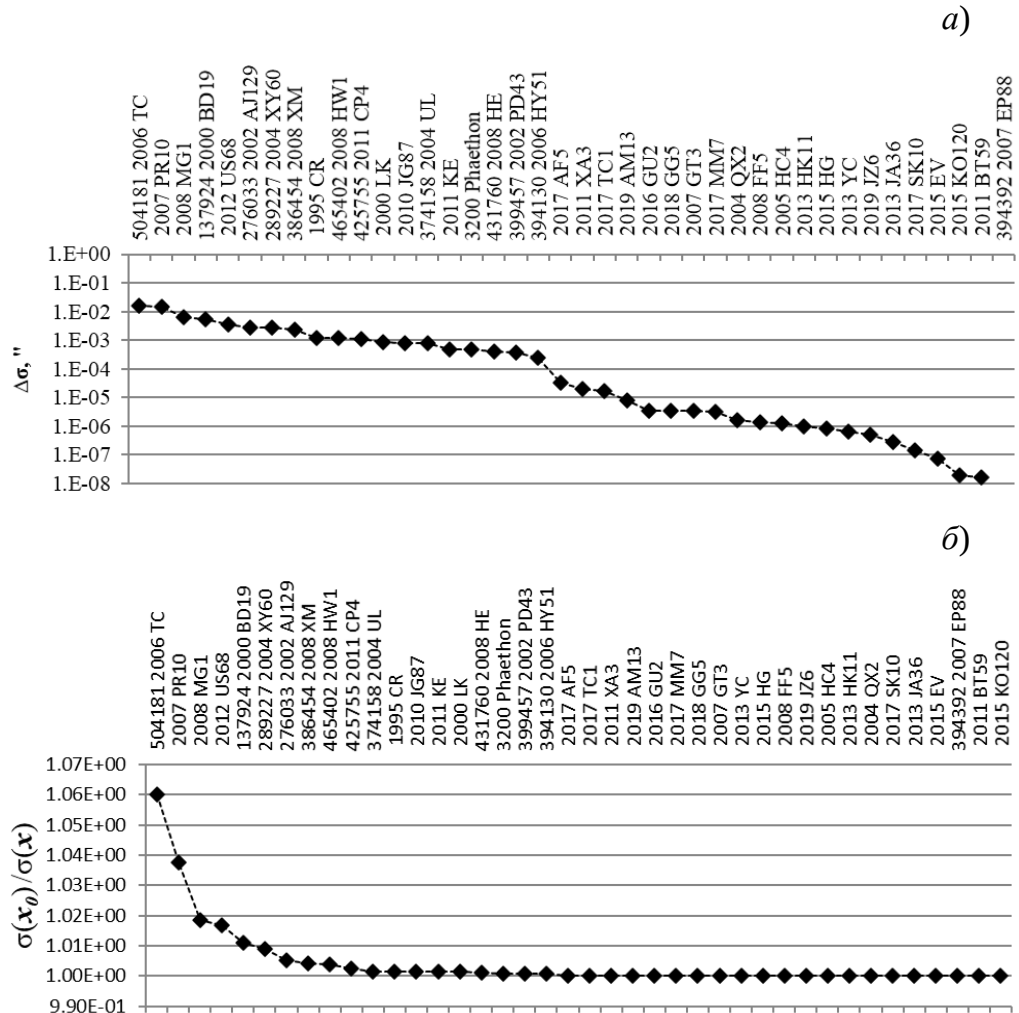


Рисунок 5.10 — Изменение среднеквадратических ошибок представления наблюдений σ (a) и размера доверительной области $\sigma(x)$ (б) при учете эффекта Ярковского и без него для астероидов с малыми перигелийными расстояниями

В качестве объектов для сравнения результатов, получаемых различными методиками, были выбраны несколько астероидов с малым перигелийным расстоянием. Элементы орбит исследуемых объектов взяты из каталога Э. Боуэлла и приведены в таблице 5.9. Здесь a – большая полуось, e – эксцентриситет, i – наклонение, q – перигелийное расстояние. Данные в таблице отсортированы в порядке возрастания перигелийного расстояния. На рисунке 5.12 показаны

проекции орбит астероидов (431760) 2008 HE и (425755) 2011 CP4, а также некоторых планет на плоскость эклиптики.

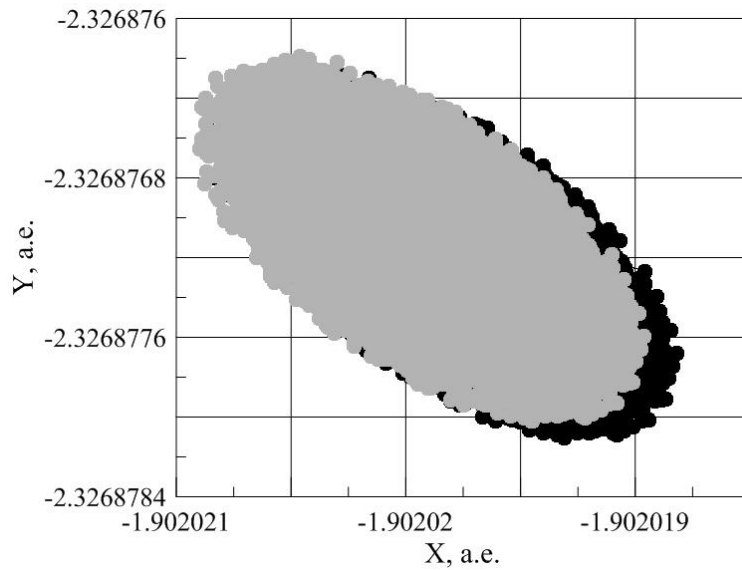


Рисунок 5.11 — Начальные облака неопределенности для астероида (431760) 2008 HE с учетом (черный цвет) и без учета ЭЯ (серый цвет)

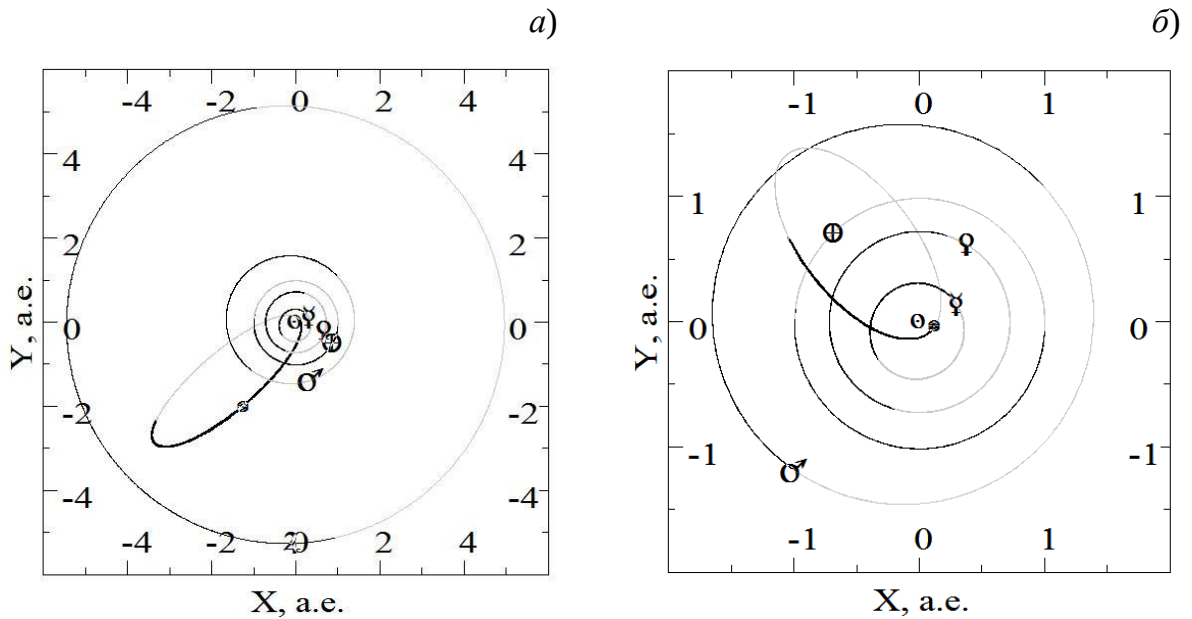


Рисунок 5.12 — Проекция орбит астероидов (431760) 2008 HE (а) и (425755) 2011 CP4 (б) на плоскость эклиптики

Для рассматриваемых астероидов получены оценки параметра трансверсального ускорения A_2 разными способами (Галушина, Сюсина, 2020). В рамках второй методики было рассмотрено три способа. В первом способе (M21)

предварительно было произведено улучшение орбиты объекта на основе модели движения, не включающей в себя эффект Ярковского. В результате данного улучшения были отбракованы наблюдения согласно правилу «трех сигма» и затем, используя полученную выборку наблюдений и модель движения, включающей в себя ЭЯ, определен параметр A_2 . Во втором способе (M22) на первом шаге по всем наблюдениям, интегрируя совместно уравнения движения, уравнения для параметра A_2 и уравнения в частных производных, получаем оценки координат, скоростей и параметра A_2 . Затем на основе полученных оценок производим отбраковку наблюдений и находим уточненное значение искомого параметра A_2 . При получении значений параметра A_2 на основе первой методики и двух способов второй методики использовались только позиционные наблюдения объектов. Для объектов, у которых имеются позиционные и радарные наблюдения, рассматривался еще третий способ (M23), в котором значение параметра A_2 было получено на основе позиционных и радарных наблюдений при предварительно проведенной отбраковке позиционных наблюдений.

Таблица 5.9 — Кеплеровские элементы орбит астероидов

Объект	a , а.е.	e	i , °	q , а.е.
(431760) 2008 HE	2.261150	0.950441	9.828476	0.112059
(425755) 2011 CP4	0.911391	0.870328	9.455386	0.118181
2017 AF5	2.479031	0.949752	20.90706	0.124566
2007 PR10	1.231907	0.892377	20.92459	0.132581
(3200) Phaethon	1.271339	0.889879	22.26036	0.140001

Результаты определения значения параметра трансверсального ускорения A_2 обеими методиками для исследуемых астероидов приведены в таблице 5.10. Следует отметить, что одним из тестовых объектов для второй методики был астероид 2017 AF5, для которого не удалось получить результаты первым методом. В первой методике первоначально для всех астероидов мы задавали интервал равный $[-10^{-12}, 10^{-12}]$ с шагом 10^{-15} а.е./сут.², но оказалось, что для астероида 2017 AF5 минимум на рассматриваемом интервале не был обнаружен, поэтому мы расширили границы интервала до $[-10^{-12}, 10^{-11}]$ а.е./сут.². Параметры A_2 , полученные по второй

методике методом наименьших квадратов, приведены в таблице 5.10 со своими среднеквадратичными ошибками. Из изучаемых в данном разделе объектов только для двух астероидов параметр эффекта ЭЯ приведен на сайте NASA, данные значения можно увидеть в последнем столбце таблицы 5.10.

Таблица 5.10 — Результаты определения параметра A_2 , а.е./сут.²

Объект	A_2 (M1)	A_2 (M21)	A_2 (M22)	A_2 (M23)	A_2 (сайт NASA)
(431760) 2008 HE	$1.02 \cdot 10^{-13}$	$1.03 \cdot 10^{-13}$ $\pm 1.15 \cdot 10^{-13}$	$1.31 \cdot 10^{-13}$ $\pm 1.16 \cdot 10^{-13}$	—	—
(425755) 2011 CP4	$4.00 \cdot 10^{-14}$	$3.94 \cdot 10^{-14}$ $\pm 3.32 \cdot 10^{-14}$	$3.94 \cdot 10^{-14}$ $\pm 3.33 \cdot 10^{-14}$	$4.32 \cdot 10^{-14}$ $\pm 3.32 \cdot 10^{-14}$	$5.61 \cdot 10^{-14}$ $\pm 1.71 \cdot 10^{-14}$
2017 AF5	$3.36 \cdot 10^{-12}$	$3.36 \cdot 10^{-12}$ $\pm 7.65 \cdot 10^{-12}$	$3.36 \cdot 10^{-12}$ $\pm 7.65 \cdot 10^{-12}$	—	-
2007 PR10	$-3.86 \cdot 10^{-13}$	$-3.86 \cdot 10^{-13}$ $\pm 1.40 \cdot 10^{-13}$	$-3.86 \cdot 10^{-13}$ $\pm 1.40 \cdot 10^{-13}$	—	-
(3200) Phaethon	$-1.10 \cdot 10^{-14}$	$-1.19 \cdot 10^{-14}$ $\pm 2.78 \cdot 10^{-15}$	$-8.43 \cdot 10^{-15}$ $\pm 2.80 \cdot 10^{-15}$	$-6.12 \cdot 10^{-15}$ $\pm 1.66 \cdot 10^{-15}$	$-6.69 \cdot 10^{-15}$ $\pm 7.99 \cdot 10^{-16}$

Как показали наши результаты, обе методики для всех объектов дают близкие значения для параметра трансверсального ускорения. Как видно из сравнения, в случае применения радарных наблюдений для астероидов (3200) Phaethon и (425755) 2011 CP4 параметр A_2 , полученный нами, ближе всего к значению с сайта NASA. При этом каждое из получаемых нами значений в пределах неопределенности согласуется со значением, полученным NASA. Однако вторая методика характеризуется лучшим быстродействием и позволяет получить не только значение параметра эффекта Ярковского, но и его среднеквадратическую ошибку, поэтому она использовалась в дальнейших исследованиях.

5.3.2 Определение значения параметра эффекта Ярковского для всех астероидов с малыми перигелийными расстояниями

В таблице 5.11 представлены результаты определения значений параметра ЭЯ для всех указанных в заголовке астероидов, полученные на основе наблюдений по состоянию на июль 2020 года. Здесь в первом столбце приведено название астероида, во втором число наблюдений N , в третьем интервал наблюдения ΔT в сутках, в четвертом – диаметр объекта D в километрах, в пятом – значение параметра эффекта Ярковского A_2 , в шестом среднеквадратическая ошибка значения параметра эффекта Ярковского δA_2 , полученная в процессе улучшения, в седьмом – среднеквадратическая ошибка представления наблюдений σ_0 . Для семи объектов диаметр был взят с сайта NASA (<https://ssd.jpl.nasa.gov/>), для остальных астероидов данный параметр определялся из значения абсолютной звездной величины с помощью формулы, приведенной в работе (Perna et al., 2013), со средним альбедо равным 0.14. В таблице такие значения отмечены символом «*».

Таблица 5.11 отсортирована в порядке увеличения неопределенности параметра A_2 . Для большинства объектов значение параметра эффекта Ярковского и значение среднеквадратической ошибки, которая получается при его определении, имеет один порядок. В начале таблицы приведены четыре объекта, для которых среднеквадратическая ошибка значения параметра эффекта Ярковского меньше самого значения. Большинство из них нумерованные астероиды с хорошо определенной орбитой, наблюдавшиеся на большом промежутке времени: (3200) Phaethon (наблюдался 37 лет с 11 октября 1983 года по 20 февраля 2020 года), (276033) 2002 AJ129 (наблюдался 16 лет с 15 января 2002 года по 10 марта 2018 года) и (137924) 2000 BD19 (наблюдался 22 года с 10 февраля 1997 года по 16 декабря 2020 года). Однако наименьшая неопределенность параметра оказалась у астероида 1995 CR, который хоть и не имеет номер, но наблюдался на солидном интервале с 3 февраля 1995 года по 28 февраля 2020 года.

Для двух объектов среднеквадратическая ошибка значения параметра эффекта Ярковского оказалась выше самого значения на порядок. Это астероиды, наблюдавшиеся в одном появлении: 2015 EV (52 наблюдения на мерном интервале в 4 суток) и 2015 KO120 (15 наблюдений на мерном интервале в 2.8 суток).

Таблица 5.11 — Результаты определения параметра A_2 для всех астероидов с малыми перигелийными расстояниями

Объект	N	ΔT , сут.	D , км	A_2 , а.е./сут ²	δA_2 , а.е./сут ²	σ_0 , "
1995 CR	244	9155	0.162*	$-2.98 \cdot 10^{-15}$	$1.76 \cdot 10^{-15}$	0.686
(3200) Phaethon	5662	13622	6.25	$-3.36 \cdot 10^{-15}$	$2.50 \cdot 10^{-15}$	0.451
(276033) 2002 AJ129	466	5898	0.646*	$-1.74 \cdot 10^{-14}$	$6.99 \cdot 10^{-15}$	0.552
(137924) 2000 BD19	729	8772	0.970	$4.93 \cdot 10^{-14}$	$9.69 \cdot 10^{-15}$	0.552
(374158) 2004 UL	181	6260	0.617*	$1.60 \cdot 10^{-14}$	$2.11 \cdot 10^{-14}$	0.505
2000 LK	118	7265	0.742*	$-1.97 \cdot 10^{-14}$	$2.66 \cdot 10^{-14}$	0.546
(425755) 2011 CP4	137	5869	0.204*	$4.82 \cdot 10^{-14}$	$4.02 \cdot 10^{-14}$	0.506
(394392) 2007 EP88	115	4753	0.636	$2.76 \cdot 10^{-14}$	$4.37 \cdot 10^{-14}$	0.512
(399457) 2002 PD43	164	5855	0.538*	$-3.28 \cdot 10^{-14}$	$4.68 \cdot 10^{-14}$	0.511
2017 AF5	346	1859	1.024*	$-5.57 \cdot 10^{-14}$	$7.54 \cdot 10^{-14}$	0.366
(465402) 2008 HW1	318	4708	1.232*	$1.25 \cdot 10^{-13}$	$9.44 \cdot 10^{-14}$	0.419
(394130) 2006 HY51	395	4784	1.218	$3.90 \cdot 10^{-14}$	$9.80 \cdot 10^{-14}$	0.417
2008 MG1	39	2581	0.372*	$-1.49 \cdot 10^{-13}$	$1.14 \cdot 10^{-13}$	0.349
(289227) 2004 XY60	60	2924	0.589*	$1.66 \cdot 10^{-13}$	$1.15 \cdot 10^{-13}$	0.302
(504181) 2006 TC	57	4043	0.646*	$5.59 \cdot 10^{-13}$	$1.16 \cdot 10^{-13}$	0.294
(431760) 2008 HE	212	2560	0.852	$1.84 \cdot 10^{-13}$	$1.31 \cdot 10^{-13}$	0.463
2012 US68	61	2915	0.777*	$1.28 \cdot 10^{-13}$	$1.34 \cdot 10^{-13}$	0.244
(386454) 2008 XM	75	1884	0.367	$-1.48 \cdot 10^{-13}$	$1.36 \cdot 10^{-13}$	0.569
2007 PR10	54	4020	0.235*	$-3.97 \cdot 10^{-13}$	$1.56 \cdot 10^{-13}$	0.417
2010 JG87	91	3341	0.408	$-2.12 \cdot 10^{-13}$	$2.10 \cdot 10^{-13}$	0.489
2011 KE	196	2521	0.389*	$2.77 \cdot 10^{-13}$	$2.86 \cdot 10^{-13}$	0.313
2013 YC	70	1447	0.186*	$2.71 \cdot 10^{-14}$	$4.86 \cdot 10^{-13}$	0.244
2019 AM13	42	1081	0.141*	$-8.22 \cdot 10^{-13}$	$5.59 \cdot 10^{-13}$	0.424
2011 XA3	137	28	0.295*	$9.52 \cdot 10^{-10}$	$1.49 \cdot 10^{-10}$	0.280
2017 TC1	54	22	0.235*	$-5.55 \cdot 10^{-10}$	$3.44 \cdot 10^{-10}$	0.277

Продолжение таблицы 5.11

Объект	N	Δt , сут.	D , км	A_2 , а.е./сут ²	δA_2 , а.е./сут ²	σ_0 , "
2017 MM7	66	22	0.214*	$8.91 \cdot 10^{-10}$	$7.41 \cdot 10^{-10}$	0.423
2018 GG5	74	24	0.389*	$7.96 \cdot 10^{-10}$	$7.87 \cdot 10^{-10}$	0.384
2019 UJ12	66	22	0.117*	$2.35 \cdot 10^{-10}$	$7.95 \cdot 10^{-10}$	0.313
2020 GB2	94	23	0.211*	$-3.02 \cdot 10^{-10}$	$9.91 \cdot 10^{-10}$	0.540
2020 TS2	30	21	0.586*	$1.53 \cdot 10^{-9}$	$1.12 \cdot 10^{-9}$	0.246
2019 YV2	54	12	0.148*	$-1.09 \cdot 10^{-9}$	$1.13 \cdot 10^{-9}$	0.450
2020 DD	90	2	0.070*	$-4.94 \cdot 10^{-10}$	$1.49 \cdot 10^{-9}$	0.346
2020 HE	41	6	0.064*	$2.34 \cdot 10^{-9}$	$1.98 \cdot 10^{-9}$	0.279
2005 HC4	50	11	0.257*	$-1.09 \cdot 10^{-9}$	$2.28 \cdot 10^{-9}$	0.579
2016 GU2	30	7	0.056*	$-4.59 \cdot 10^{-9}$	$2.450 \cdot 10^{-9}$	0.292
2019 VE3	19	3	0.078*	$-1.33 \cdot 10^{-9}$	$4.14 \cdot 10^{-9}$	0.497
2015 HG	27	6	0.224*	$-3.22 \cdot 10^{-9}$	$4.45 \cdot 10^{-9}$	0.253
2007 GT3	31	13	0.408*	$-8.26 \cdot 10^{-9}$	$4.75 \cdot 10^{-9}$	0.527
2013 HK11	22	6	0.257*	$-2.81 \cdot 10^{-9}$	$6.10 \cdot 10^{-9}$	0.483
2008 FF5	51	11	0.085*	$-1.43 \cdot 10^{-8}$	$6.63 \cdot 10^{-9}$	0.529
2004 QX2	23	17	0.162*	$-3.88 \cdot 10^{-9}$	$6.98 \cdot 10^{-9}$	0.742
2017 SK10	35	7	0.186*	$9.31 \cdot 10^{-9}$	$1.17 \cdot 10^{-8}$	0.247
2015 EV	49	4	0.112*	$-5.52 \cdot 10^{-9}$	$1.48 \cdot 10^{-8}$	0.418
2013 JA36	46	14	0.224*	$1.03 \cdot 10^{-8}$	$1.62 \cdot 10^{-8}$	0.701
2020 BU13	40	12	0.197*	$1.23 \cdot 10^{-8}$	$1.66 \cdot 10^{-8}$	0.269
2019 JZ6	13	6	0.224*	$7.96 \cdot 10^{-8}$	$3.67 \cdot 10^{-8}$	0.172
2020 HY2	24	3	0.036*	$2.88 \cdot 10^{-9}$	$3.00 \cdot 10^{-8}$	0.630
2011 BT59	13	8	0.224*	$1.64 \cdot 10^{-8}$	$3.85 \cdot 10^{-8}$	0.105
2020 VL4	38	24	0.685*	$1.05 \cdot 10^{-7}$	$6.07 \cdot 10^{-8}$	0.470
2015 KO120	15	13	0.141*	$5.59 \cdot 10^{-8}$	$2.40 \cdot 10^{-7}$	0.458

Анализ результатов определения параметра эффекта Ярковского для астероидов, наблюдавшихся в одном появлении, показывает, что существенную роль в надежности получаемого результата играет длина мерного интервала, что вполне естественно, поскольку при малом мерном интервале задача оценивания, как правило, плохо обусловлена. Кроме того, для таких объектов на основе методики, представленной в данной работе, получаются достаточно большие (от 10^{-7} до 10^{-10} порядка) значения для параметра A_2 и для его среднеквадратической ошибки, что соответствует значительному дрейфу большой полуоси. Например, для объекта 2013 JA36 это 2725.8 а.е./млн. лет, а для объекта 2020 HE – 557.8 а.е./млн. лет. Данные результаты говорят о том, что для объектов с таким составом наблюдений представленный метод определения значения данного параметра является недостаточно надежным и для его применения стоит дожидаться новых наблюдений астероидов.

5.3.3 Сравнение полученных значений параметра Ярковского со значениями из других источников

Среди представленных в таблице 5.11 объектов для астероидов 1995 CR, (3200) Phaethon и (425755) 2011 CP4 на сайте NASA приведены значения параметра эффекта Ярковского. Для объектов (3200) Phaethon и (425755) 2011 CP4 полученные нами значения согласуются со значениями, представленными на сайте NASA:

– для астероида (425755) 2011 CP4 $A_2 = 5.61 \cdot 10^{-14} \pm 1.71 \cdot 10^{-14}$ а.е./сут² (по состоянию на май 2021 года),

– для астероида (3200) Phaethon $A_2 = -6.69 \cdot 10^{-15} \pm 7.99 \cdot 10^{-16}$ а.е./сут².

Как упоминалось ранее, среди рассматриваемых объектов наибольшее внимание ученых приковано к астероиду (3200) Phaethon, поэтому нами было проведено сравнение значений скорости изменения большой полуоси под влиянием эффекта Ярковского, полученных разными авторами. Результаты, представленные в таблице 5.12, показывают, что величины совпадают в пределах погрешности.

В работах (Hanus et al., 2018) и (Greenberg et al., 2020) результаты получены на основе физических параметров. Поэтому нами была предпринята попытка оценить da/dt с помощью приблизительной формулы (2.9). (3200) Phaethon принадлежит к спектральному классу SMASSII, для которого в работе (Carry, 2012)

приведено значение плотности $\rho = 2.15 \pm 0.74$ г/см³. В таблице 5.13 представлены значения скорости изменения большой полуоси в зависимости от коэффициента эффективности ξ_{Yar} . Данные результаты показывают, что полученные нами в результате улучшения орбит значения не противоречат физическому смыслу эффекта Ярковского.

Таблица 5.12 — Результаты определения скорости изменения большой полуоси под влиянием эффекта Ярковского для астероида (3200) Phaethon

Источник	da/dt , а.е./млн. лет	$\Delta da/dt$, а.е./млн. лет
(Сюсина, Галушина, 2021)	$-6.1 \cdot 10^{-4}$	$4.5 \cdot 10^{-4}$
(Hanuš et al., 2018)	$-6.9 \cdot 10^{-4}$	$1.9 \cdot 10^{-4}$
(Greenberg et al., 2020)	$-9.0 \cdot 10^{-4}$	$2.8 \cdot 10^{-4}$

Таблица 5.13 — Скорости изменения большой полуоси в зависимости от коэффициента эффективности Ярковского для астероида (3200) Phaethon

ξ_{Yar}	da/dt , а.е./млн. лет
0.06	± 2.4
0.12	± 4.9
0.15	± 6.1
0.23	± 9.3
0.28	± 11.4

Для объекта 1995 CR наши результаты отличаются от результатов, приведённых на сайте NASA в 2020 году. Результаты, опубликованные на сайте NASA, получены по 243 наблюдениям объекта на 9156 сутках. При этом значение параметра эффекта Ярковского равнялось $A_2 = -4.80 \cdot 10^{-14} \pm 3.3 \cdot 10^{-15}$ а.е./сут². Полученная среднеквадратическая ошибка единицы веса составляла 0.586". Всего же на сайте малых планет приведено 260 наблюдений этого объекта на временном интервале с 3 февраля 1995 года по 28 февраля 2020 года. Мы попробовали при определении значения параметра эффекта Ярковского рассмотреть различные выборки наблюдений этого объекта. Некоторые результаты данного исследования приведены в таблице 5.14.

Таблица 5.14 — Результаты определения параметра A_2 для астероида 1995 CR

N	ΔT , сут.	A_2 , а.е./сут ²	δA_2 , а.е./сут ²	σ_0 , "
260	9156	$-6.35 \cdot 10^{-15}$	$2.11 \cdot 10^{-15}$	0.854
258	9156	$-6.47 \cdot 10^{-15}$	$1.94 \cdot 10^{-15}$	0.784
244	9156	$-2.98 \cdot 10^{-15}$	$1.76 \cdot 10^{-15}$	0.686
243	9156	$-3.26 \cdot 10^{-15}$	$1.75 \cdot 10^{-15}$	0.681
242	9156	$-3.58 \cdot 10^{-15}$	$1.74 \cdot 10^{-15}$	0.676

Как видно из таблицы 5.14 получаемые результаты достаточно чувствительны к используемой выборке наблюдений. Рассмотрение других выборок наблюдений, кроме тех, что представлены в таблице, также не привело к согласию со значением, приведенным на сайте NASA. Безусловно, сравнение было бы более точным, если бы было известно, с какой именно выборкой наблюдений работали представители NASA.

5.3.4 Влияние отбраковки наблюдений на полученное значение параметра эффекта Ярковского

Значения параметра эффекта Ярковского, приведенные в таблице 5.11, получены на основе выборки наблюдений с учетом отбраковки по правилу трех сигма. Наличие «грубых» наблюдений иногда оказывает существенное влияние на значение данного параметра. В таблице 5.15 для нескольких объектов представлено значение параметра эффекта Ярковского на основе полной выборки наблюдений (N), взятой с сайта Центра малых планет.

Как видно из таблицы 5.15, наличие грубых наблюдений приводит к тому, что получаемое значение параметра эффекта Ярковского может изменить знак или порядок. В то же время в пределах получаемой неопределенности значения параметра эффекта Ярковского, приведенные в таблице 5.11, согласуются с теми, что даны в таблице 5.15.

Безусловно, отбраковка грубых наблюдений является одним из важных этапов при исследовании вероятностной эволюции астероидов. Наличие таких наблюдений может привести к недостоверным оценкам начальных параметров. Следовательно,

из выборки наблюдений, которая применяется для получения параметра эффекта Ярковского, должны быть исключены грубые. Но возникает вопрос, будет ли значение параметра эффекта Ярковского устойчивым, если оно получено на основе близких по точности выборок наблюдений. В рамках данного исследования из исходной выборки наблюдений объекта, не содержащей в себе грубые, мы убрали каждый раз по одному наблюдению, сформировав, таким образом, ряд выборок наблюдений, точность полученных оценок на основе которых отличается друг от друга незначительно в пределах трех сигма. На основе каждой такой выборки было получено значение параметра Ярковского. В качестве объектов исследования выбраны 4 астероида, два из которых наблюдались в нескольких появлениях (это (386454) 2008 XM и 2017 AF5) и два объекта, открытых недавно (это астероиды 2020 VL4 и 2020 TS2). Результаты исследования приведены ниже на рисунке 5.13. Здесь на оси абсцисс отложен номер наблюдения, который исключался из исходной выборки. На оси ординат отложено значение параметра эффекта Ярковского, полученного по данной выборке наблюдений.

Таблица 5.15 — Значения параметра эффекта Ярковского на основе всех наблюдений объектов

Объект	N	A_2 , а.е./сут ²	δA_2 , а.е./сут ²	σ_0 , "
2008 MG1	40	$-9.16 \cdot 10^{-14}$	$1.24 \cdot 10^{-13}$	0.385
2019 UJ12	68	$-0.99 \cdot 10^{-11}$	$1.11 \cdot 10^{-9}$	0.440
2015 EV	52	$2.91 \cdot 10^{-9}$	$2.57 \cdot 10^{-8}$	0.734
2017 AF5	347	$-1.49 \cdot 10^{-14}$	$2.31 \cdot 10^{-13}$	1.124

Результаты сравнивались со значением параметра эффекта Ярковского, полученного по исходной выборке. Данное значение приведено в таблице 5.11 и представлено на графиках серой горизонтальной линией. Нужно отметить, что все колебания происходят в окрестности данного значения плюс/минус его среднеквадратическая ошибка.

Для астероида (386454) 2008 XM при исключении 62 и 63 наблюдений имеет место всплеск. Данные наблюдения получены с помощью космического телескопа, но у объектов 2017 AF5 и 2020 TS2 тоже есть спутниковые наблюдения, и при их

исключении таких всплесков не наблюдается. Таким образом, можно сделать вывод, что вид наблюдения в данном случае не играет особой роли.

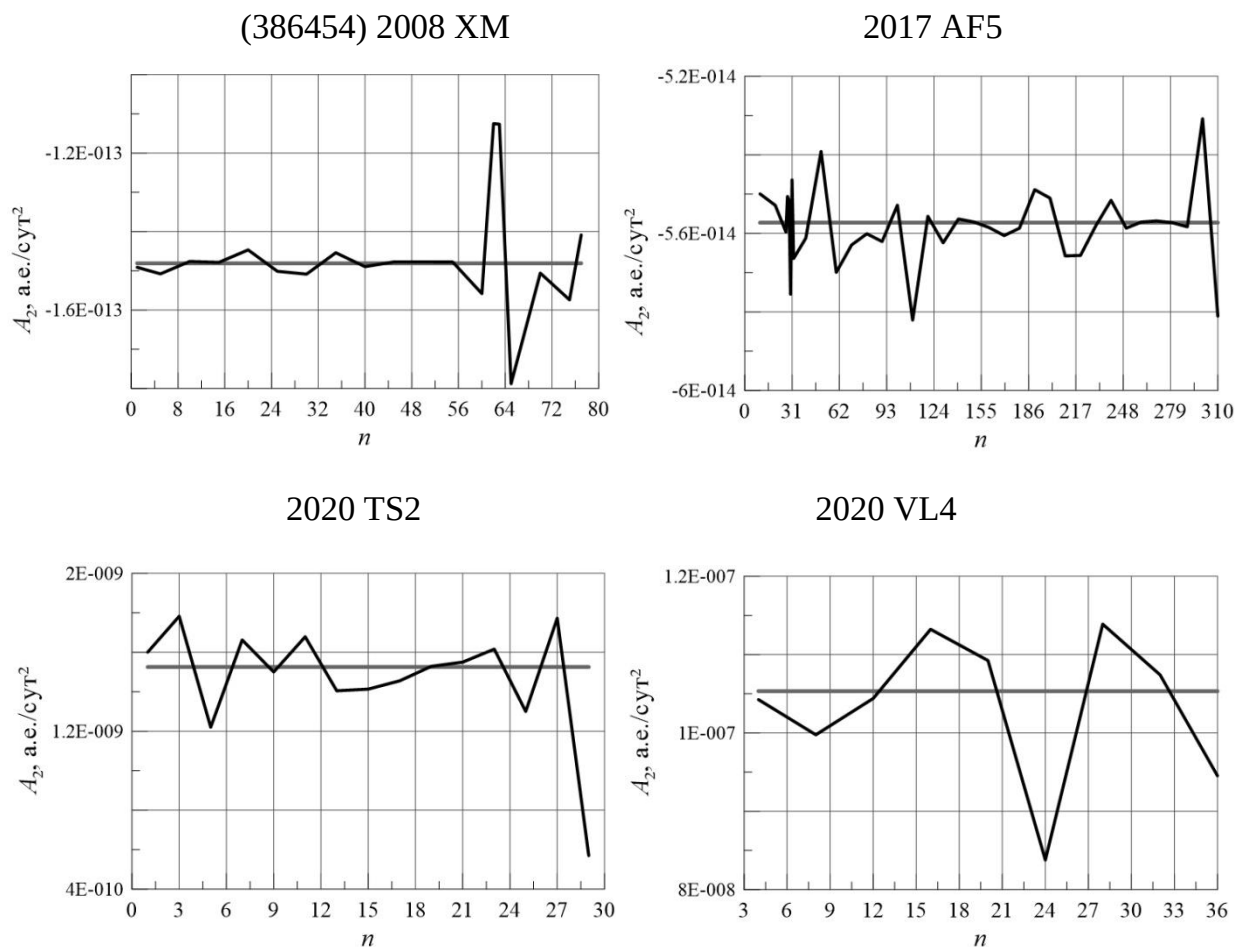


Рисунок 5.13 — Определение значения параметра эффекта Ярковского при изменении выборки наблюдений

5.3.5 Оценка точности определения значения параметра эффекта Ярковского на основе реальных и модельных наблюдений астероидов

В подразделе 5.3.2 были получены оценки параметра эффекта Ярковского для 50 астероидов с малыми перигелийными расстояниями. На рисунке 5.14 представлена среднеквадратическая ошибка определения рассматриваемой величины δA_2 в зависимости от интервала ΔT и числа наблюдений N . Каждая точка на графике соответствует одному астероиду. Как видно из рисунка 5.14, изучаемые нами объекты условно поделились на две группы – с интервалом наблюдений меньше 100 и больше 1000 суток. Отсутствие объектов в диапазоне между интервалами в 100 и 1000 суток объясняется их малой выборкой.

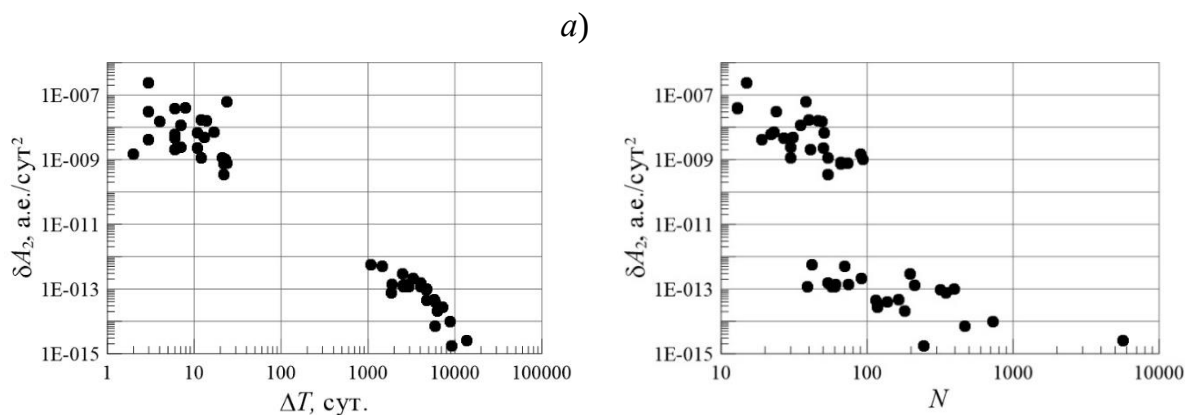


Рисунок 5.14 — Зависимость среднеквадратической ошибки параметра эффекта Ярковского от длины мерного интервала объекта (а) и числа наблюдений (б)

В первую группу вошли недавно открытые объекты с плохо определённой орбитой, для которых данный метод учета эффекта Ярковского сопряжен с существенными трудностями. Для второй группы характерна линейная зависимость точности определения параметра от интервала наблюдений. С наилучшей точностью параметр определен для астероидов 1995 CR и (3200) Phaethon, которые наблюдались на интервалах 9155 и 13622 суток соответственно. Из графика 5.14б можно заметить, что влияние числа наблюдений на определяемый параметр не такое явное.

Для того, чтобы оценить, насколько сильно влияет состав наблюдений на точность параметра эффекта Ярковского, нами было отобрано два объекта, имеющих много наблюдений, распределенных на длинном мерном интервале. Безусловно, для данного эксперимента из числа исследуемых астероидов идеально подходит (3200) Phaethon, так как он имеет наибольшее число наблюдений (5662), полученных в период с 1983 по 2021 годы. Вторым по количеству имеющихся на момент исследования наблюдений (729) является нумерованный астероид (137924) 2000 BD19, регулярно наблюдавшийся на интервале времени 1997–2021 гг.

Так как астероид можно наблюдать в период прохождения узлов орбиты при условии близости Земли, такие временные промежутки являются довольно регулярными, формируя группы наблюдений в определенные месяцы каждого года. Каждую такую группу наблюдений будем условно называть одним появлением. Суть эксперимента заключается в следующем. От настоящего времени в прошлое

в несколько этапов исключается одно последнее появление и в процессе улучшения орбиты определяется значение параметра A_2 и его среднеквадратическая ошибка. В таблице 5.16 приведены результаты исследования для астероида (3200) Phaethon. На этапе «0» производилось улучшение орбиты по всем имеющимся наблюдениям, в процессе улучшения исключались наблюдения по правилу $3\sigma_0$, где σ_0 – среднеквадратическая ошибка представления наблюдений на нулевом этапе. На каждом последующем шаге удалялось последнее появление предыдущего этапа. Для всех выборок исключался тот же перечень наблюдений, что и на этапе «0» по правилу $3\sigma_0$. Из таблицы 5.16 видно, что при уменьшении временного интервала и количества наблюдений точность определения параметра A_2 падает.

Таблица 5.16 — Результаты определения параметра A_2 для астероида (3200) Phaethon при различных выборках реальных наблюдений

Этап	N	ΔT , сут.	A_2 , а.е./сут ²	δA_2 , а.е./сут ²
0	5784	13622	$-1.90 \cdot 10^{-14}$	$2.53 \cdot 10^{-15}$
1	5549	13281	$-1.89 \cdot 10^{-14}$	$2.58 \cdot 10^{-15}$
2	5105	12942	$-1.74 \cdot 10^{-14}$	$2.73 \cdot 10^{-15}$
3	4813	12492	$-1.70 \cdot 10^{-14}$	$2.79 \cdot 10^{-15}$
4	3740	12165	$-2.77 \cdot 10^{-14}$	$4.25 \cdot 10^{-15}$
5	3225	11783	$-3.78 \cdot 10^{-14}$	$4.69 \cdot 10^{-15}$
6	3051	11454	$-3.83 \cdot 10^{-14}$	$4.98 \cdot 10^{-15}$
7	2643	11049	$-4.98 \cdot 10^{-14}$	$6.08 \cdot 10^{-15}$
8	2560	10699	$-5.13 \cdot 10^{-14}$	$6.08 \cdot 10^{-15}$
9	2413	10364	$-5.46 \cdot 10^{-14}$	$6.43 \cdot 10^{-15}$
10	2223	9981	$-5.34 \cdot 10^{-14}$	$6.97 \cdot 10^{-15}$
11	2161	9591	$-5.29 \cdot 10^{-14}$	$7.05 \cdot 10^{-15}$
12	1940	9244	$-5.19 \cdot 10^{-14}$	$7.74 \cdot 10^{-15}$
13	1794	8821	$-5.04 \cdot 10^{-14}$	$8.18 \cdot 10^{-15}$

На рисунке 5.15 для астероидов (3200) Phaethon и (137924) 2000 BD19 представлены графики зависимости среднеквадратической ошибки δA_2 от интервала

наблюдений ΔT . Оба графика демонстрируют схожую ситуацию, в обоих случаях прослеживается тенденция к увеличению среднеквадратической ошибки определения A_2 при уменьшении как интервала, так и числа наблюдений.

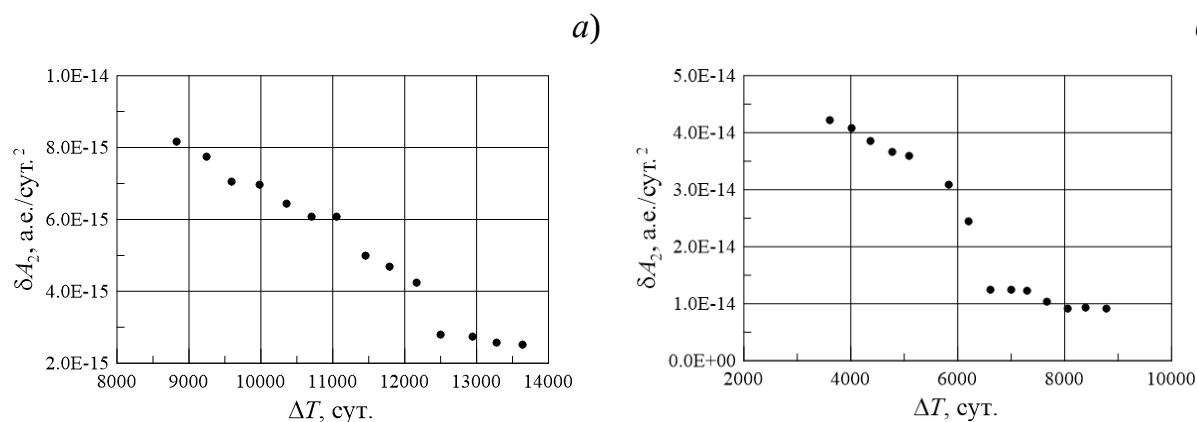


Рисунок 5.15 — Зависимость среднеквадратической ошибки параметра эффекта Ярковского δA_2 от мерного интервала ΔT реальных наблюдений для астероидов (3200) Phaethon (a) и (137924) 2000 BD19 (б)

Интересно отметить, что для обоих астероидов добавление нескольких последних появлений практически не влияет на точность определения параметра A_2 , среднеквадратическая ошибка δA_2 стабильно удерживается около одного значения. Для астероида (3200) Phaethon после достижения интервала длиной в 12165 суток улучшение точности параметра A_2 прекращается. Для астероида (13792) 2000 BD19 этот предел достигается, начиная с интервала в 6209 суток.

Проведенный эксперимент позволяет сделать вывод, что для объектов с плохо определённой орбитой регулярное пополнение наблюдательного материала позволит точнее определить параметр эффекта Ярковского A_2 , однако для каждого астероида есть предельный мерный интервал, при достижении которого точность определения параметра перестает улучшаться. Единственным выходом в данной ситуации является увеличение точности наблюдений.

Для получения ответа на вопрос о требуемой точности наблюдений было проведено определение параметра эффекта Ярковского A_2 с использованием модельных наблюдений. Модельные наблюдения строились на основе номинальной орбиты, полученной в результате улучшения координат, компонент скорости и параметра A_2 . Принимая полученную орбиту за точную, наблюдения

моделировались на моменты реальных наблюдений, но с уменьшенной в несколько раз среднеквадратической ошибкой, в пределах которой по нормальному закону формировались ошибки.

Ориентируясь на эксперимент, описанный выше, для астероида (3200) Phaethon были построены модельные наблюдения на основе групп реальных наблюдений, представленных в таблице 5.16, со значением σ_0 , уменьшенным в 10 и 100 раз. Для каждого случая были получены параметр A_2 и его среднеквадратическая ошибка. Увеличение точности наблюдений привело к уменьшению среднеквадратической ошибки параметра эффекта Ярковского, причем само значение A_2 незначительно отличается от такового для реальных наблюдений. На рисунке 5.16 представлены графики изменения δA_2 от ΔT для групп модельных наблюдений со значением σ_0 , уменьшенным в 10 (а) и 100 (б) раз.

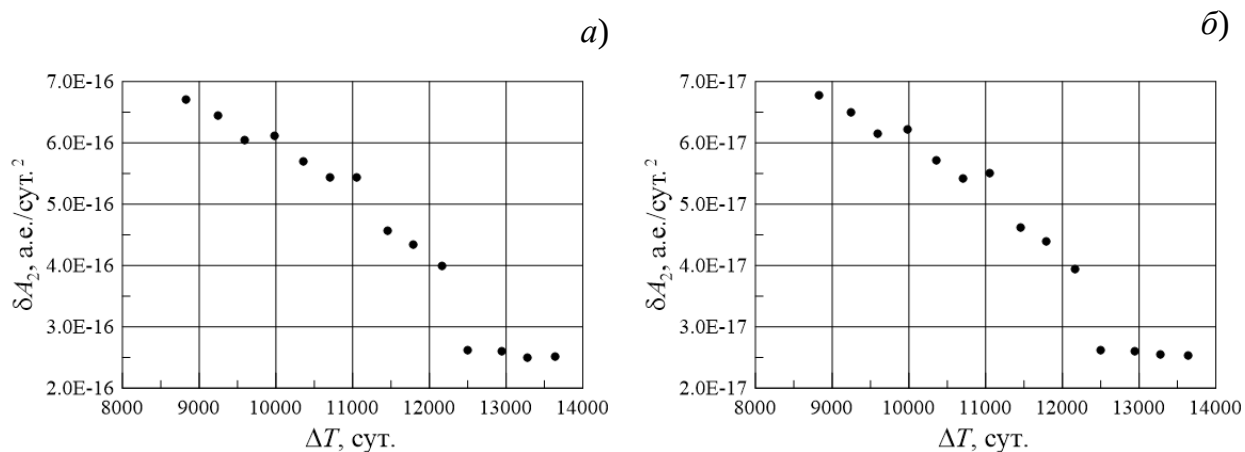


Рисунок 5.16 — Зависимость среднеквадратической ошибки δA_2 от мерного интервала ΔT модельных наблюдений с $\sigma_0/10$ (а) и $\sigma_0/100$ (б) для астероида (3200) Phaethon

Исследование показало, что уменьшение σ_0 при формировании модельных наблюдений привело к увеличению точности параметра A_2 в процессе улучшения орбиты, что становится очевидным при сравнении рисунков 5.15а и 5.16. Причем, из рисунка 5.16 видно, что порядок δA_2 меняется пропорционально изменению порядка среднеквадратической ошибки представления наблюдений.

Кроме изменения точности моделируемых наблюдений, был проведен эксперимент по увеличению временного интервала, путем добавления моментов времени модельных наблюдений. Результаты такого исследования для астероида

2008 MG1 приведен в таблице 5.17. На момент исследования у данного объекта имелось 40 наблюдений с 2008 по 2015 год. В первой строке таблицы приведены результаты, полученные по исходной реальной выборке наблюдений (этап «0»). Далее к реальным наблюдениям добавлялись каждый раз по 5 наблюдений, моделируемых на даты следующего года, увеличивая временной интервал на каждом этапе на 1 год. Точность моделируемых наблюдений была задана равной точности выборки под номером «0».

Таблица 5.17 — Результаты определения параметра A_2 для астероида 2008 MG1 при увеличении временного интервала

Этап	N	ΔT , сут.	A_2 , а.е./сут ²	δA_2 , а.е./сут ²
0	40	2008-2015	$-1.49 \cdot 10^{-13}$	$1.14 \cdot 10^{-13}$
1	45	2008-2016	$-2.66 \cdot 10^{-13}$	$5.46 \cdot 10^{-14}$
2	50	2008-2017	$-1.52 \cdot 10^{-13}$	$4.96 \cdot 10^{-14}$
3	55	2008-2018	$-1.10 \cdot 10^{-13}$	$3.57 \cdot 10^{-14}$
4	60	2008-2019	$-1.32 \cdot 10^{-13}$	$3.58 \cdot 10^{-14}$
5	65	2008-2020	$-1.62 \cdot 10^{-13}$	$2.82 \cdot 10^{-14}$
6	70	2008-2021	$-1.29 \cdot 10^{-13}$	$2.92 \cdot 10^{-14}$

Как видно из результатов исследования для данного объекта, увеличение временного интервала приводит к уменьшению среднеквадратической ошибки, причем при изменении интервала почти в два раза, ошибка уменьшилась почти на порядок.

Аналогичное исследование было проведено для объекта 2020 BU13. Данный астероид открыт недавно, у него 40 наблюдений на временном интервале в 25 дней. Результаты исследования приведены в таблице 5.18.

Как видно из таблицы, увеличение мерного интервала на три года не привело к изменению значения самого параметра, изменения происходят только при увеличении временного интервала до 2024 года, что косвенным образом подтверждает выводы, сделанные в 5.3.2 (Галушина, Летнер, 2020) о завышенных оценках параметра эффекта Ярковского для объектов с плохо определенной

орбитой. При этом значение среднеквадратической ошибки изменяется на несколько порядков уже для первой выборки наблюдений, что объясняется значительным увеличением мерного интервала. При дальнейшем увеличении изменение ошибки менее существенно.

Таблица 5.18 — Результаты определения параметра A_2 для астероида 2020 BU13 при увеличении временного интервала

Этап	N	ΔT , сут.	A_2 , а.е./сут ²	δA_2 , а.е./сут ²
0	40	2020-2020	$1.23 \cdot 10^{-8}$	$1.66 \cdot 10^{-8}$
1	45	2020-2021	$1.23 \cdot 10^{-8}$	$6.27 \cdot 10^{-12}$
2	50	2020-2022	$1.23 \cdot 10^{-8}$	$5.39 \cdot 10^{-12}$
3	55	2020-2023	$1.23 \cdot 10^{-8}$	$1.79 \cdot 10^{-12}$
4	55	2020-2024	$4.14 \cdot 10^{-11}$	$2.00 \cdot 10^{-13}$

5.3.6 Выводы

Таким образом, в данном подразделе подробно рассмотрен эффект Ярковского в движении астероидов с малыми перигелийными расстояниями, в том числе поставлен и исследован вопрос влияния интервала и точности наблюдений на ошибку определения параметра эффекта Ярковского A_2 . Для всех астероидов с малыми перигелийными расстояниями на основе имеющихся на момент исследования наблюдений получены значения параметра A_2 и его среднеквадратические ошибки. Изучаемые астероиды можно условно поделить на две группы – астероиды с плохо определенной орбитой и интервалом наблюдений меньше 100 суток и объекты с интервалом наблюдения больше 1000 суток. С увеличением наблюдательного интервала точность определяемого параметра эффекта Ярковского значительно улучшается. С наилучшей точностью параметр A_2 определен для астероидов 1995 CR и (3200) Phaethon.

Для двух астероидов, (3200) Phaethon и (137924) 2000 BD19, наблюдавшихся на интервале 13622 и 7666 суток соответственно проведен эксперимент по уменьшению числа реальных наблюдений в 13 этапов от настоящего времени в прошлое. На каждом этапе получены значения параметра A_2 и его

среднеквадратические ошибки. Уменьшение интервала и числа наблюдений приводит к потере точности определяемого параметра. Для обоих астероидов последние несколько групп наблюдений (появлений) практически не оказывают влияния на значение среднеквадратической ошибки A_2 . Моделирование наблюдений для астероида (3200) Phaethon на основе реальных с уменьшенной в 10 и 100 раз среднеквадратической ошибкой их представления привело к улучшению точности параметра эффекта Ярковского пропорционально порядку изменения σ . При этом само значение A_2 незначительно отличается для модельных и реальных наблюдений.

На примере астероидов 2008 MG1 и 2020 BU13 проведен эксперимент по увеличению мерного интервала путем использования модельных наблюдений. Данное исследование подтвердило, что увеличение интервала приводит к уменьшению неопределенности параметра A_2 .

5.4 Исследование нелинейности задачи оценивания начальных параметров

В данном разделе представлены результаты определения степени нелинейности задачи оценивания начальных параметров астероидов с малыми перигелийными расстояниями по состоянию на сентябрь 2021 года, когда было известно 53 таких объекта. Нелинейность оценивалась с помощью показателя χ (2.12), подробно описанного в работе (Сюсина и др., 2013а).

В таблице 5.19 для всех исследуемых астероидов приведены значения перигелийного расстояния q , данные о наблюдениях (число наблюдений N и интервал наблюдений ΔT в сутках) и показатель нелинейности χ . Астероиды расположены в порядке убывания значения показателя нелинейности χ . Число и интервал наблюдений были взяты с сайта Центра малых планет по состоянию на октябрь 2021 года.

Руководствуясь приведенным подразделе 2.4 критерием показателя χ , задача оценивания начальных параметров астероидов была классифицирована следующим образом. Для 2015 KO120 задача является сильно нелинейной, для 6 объектов (с 2013 HK11 по 2020 HE) – умеренно, и для остальных 46 – слабо нелинейной.

Таблица 5.19 — Показатель нелинейности и данные о наблюдениях астероидов с малыми перигелийными расстояниями, известных на сентябрь 2021 года

Астероид	q , а.е.	N	ΔT	χ
2015 KO120	0.123	15	3	0.183225
2013 HK11	0.138	22	6	0.050792
2015 EV	0.081	52	4	0.030988
2020 HY2	0.125	24	3	0.024483
2019 VE3	0.117	20	3	0.021830
2011 BT59	0.140	13	8	0.011253
2020 HE	0.146	41	6	0.011207
2005 HC4	0.071	53	12	0.009477
2008 FF5	0.077	52	11	0.008720
2015 HG	0.104	27	7	0.008709
2021 PH27	0.133	46	1515	0.008122
2020 VL4	0.142	38	24	0.007892
2017 SK10	0.140	35	7	0.006483
2019 JZ6	0.091	13	6	0.006090
2013 JA36	0.135	47	14	0.005838
2019 YV2	0.126	55	12	0.005259
2016 GU2	0.086	30	7	0.004558
2020 DD	0.116	92	2	0.002886
2004 QX2	0.125	24	17	0.002832
2021 AF3	0.087	27	10	0.000923
1995 CR	0.119	260	2209	0.000820
2020 GB2	0.117	94	24	0.000688
2018 GG5	0.110	79	46	0.000580
2017 TC1	0.076	54	22	0.000446
2019 UJ12	0.137	68	22	0.000392
2020 BU13	0.073	40	25	0.000361
2017 MM7	0.080	66	24	0.000242

Продолжение таблицы 5.19

Астероид	q , а.е.	N	ΔT	χ
2021 LM1	0.127	36	66	0.000150
2020 TS2	0.126	30	21	0.000141
2007 PR10	0.133	54	4020	0.000112
(137924) 2000 BD19	0.092	780	7748	0.000109
2013 YC	0.143	70	1447	0.000092
(394392) 2007 EP88	0.096	122	4753	0.000040
(3200) Phaethon	0.140	5991	13847	0.000034
2007 GT3	0.122	47	5113	0.000024
2011 XA3	0.109	154	2623	0.000023
(386454) 2008 XM	0.111	79	1884	0.000017
2011 KE	0.100	201	2520	0.000016
(289227) 2004 XY60	0.130	61	2923	0.000015
(276033) 2002 AJ129	0.117	479	5898	0.000015
(425755) 2011 CP4	0.118	140	5869	0.000015
(374158) 2004 UL	0.093	196	5498	0.000010
(465402) 2008 HW1	0.103	380	4728	0.000010
2019 AM13	0.091	42	1081	0.000008
(399457) 2002 PD43	0.110	169	5855	0.000008
2012 US68	0.105	62	2915	0.000008
2000 LK	0.121	123	7265	0.000005
2017 AF5	0.124	354	1827	0.000005
2008 MG1	0.139	40	2580	0.000004
(504181) 2006 TC	0.136	57	4043	0.000004
(431760) 2008 HE	0.112	230	2802	0.000003
2010 JG87	0.145	97	3340	0.000003
(394130) 2006 HY51	0.082	300	4784	0.000002

Анализируя данные, приведенные в таблице 5.19, следует отметить, что объекты с сильной и умеренной нелинейностью имеют небольшое количество

наблюдений на довольно коротком мерном интервале (меньше 10 суток). Орбиты этих астероидов определены плохо, что отражается на степени нелинейности задачи оценивания. При построении начального облака неопределенности этих объектов рекомендуется применять нелинейные методы для получения более достоверных результатов. Результаты построения начального облака неопределенности и исследования вероятностной орбитальной эволюции будут приведены в разделе 5.6.

5.5 Исследование динамики астероидов с малыми перигелийными расстояниями в окрестностях орбитальных и вековых резонансов

5.5.1 Вводные замечания

Исследование резонансных движений астероидов, сближающихся с Землей, является одной из важных задач на пути к решению проблемы астероидной опасности. Поскольку орбитальный резонанс (или резонанс по среднему движению) возникает, когда астероид имеет орбитальный период, соизмеримый с периодом большой планеты (Мюррей, Дермотт, 2009), то устойчивая геометрическая конфигурация «астероид – планета» может служить защитным механизмом от тесных сближений с ней (Li et al., 2019). Иная ситуация складывается с неустойчивой геометрической конфигурацией, возникновение которой повышает риск сближения астероида с планетой. Такое взаимное расположение астероида и массивного тела может привести к значительным изменениям элементов орбит объектов и возможным сближениям с другими планетами, в том числе с Землей. Особенно актуально исследование резонансов средних движений для астероидов, имеющих малые перигелийные расстояния, так как орбиты этих объектов имеют вытянутую форму и потенциально способны взаимодействовать с большинством внутренних планет Солнечной системы (Емельяненко, 2017; Toliou, Granvik, 2020; Devyatkin et al., 2022; Самбаров и др., 2014).

Эффект Ярковского (Farnocchia et al., 2013; Панасенко, Чернетенко, 2014; Сюсина, Галушина, 2021) может оказывать существенное влияние на движение астероидов при прохождении их вблизи Солнца, а именно, на значение большой полуоси, и, следовательно, на поведение резонансных характеристик со временем

(Christou, Georgakarakos, 2021). Поэтому в данном разделе детально рассмотрено влияние эффекта Ярковского на резонансные характеристики. В процессе исследования выявлены все астероиды с малыми перигелийными расстояниями, движущиеся в окрестности устойчивых и неустойчивых резонансов средних движений с большими планетами. Построена эволюция характеристик орбитального резонанса с учетом эффекта Ярковского и без него и проведен сравнительный анализ их поведения со временем.

Исследование динамики астероидов выполнялось путем численного интегрирования уравнений их движения коллокационным интегратором Lobbie, основанным на разбиении Лобатто (Авдюшев, 2021) с использованием программного комплекса ИДА (Galushina, Letner, 2021). На этапе предварительного выявления орбитальных резонансов в движении объектов была построена эволюция их орбит с начальными данными, взятыми из каталога Э. Боуэлла (Bowell et al. 1994) на апрель 2023 года. Модель сил подбиралась в соответствии с моделью, используемой в каталоге Боуэлла, и включала в себя возмущения от всех больших планет, Луны, Цереры, Паллады, Весты. Резонансное движение оценивалось путем анализа поведения двух характеристик: резонансного (критического) аргумента β (2.21) и резонансной щели α (2.22).

Оценка влияния эффекта Ярковского на резонансную динамику астероидов осуществлялась путем сравнения результатов эволюции резонансных характеристик при модели сил с учетом возмущений от всех больших планет, Плутона, Луны, релятивистских эффектов от Солнца, сжатия Солнца с включенным возмущением от эффекта Ярковского и без него. При этом начальные данные получались путем улучшения орбит методом наименьших квадратов при той же модели сил, что и расчет эволюции. В связи с тем, что физические параметры для большинства астероидов не известны, в качестве возмущающего фактора, отвечающего за учет эффекта Ярковского, использовалось значение трансверсального ускорения A_2 , обусловленного влиянием эффекта. Значения параметров A_2 , полученные для всех астероидов с малыми перигелийными расстояниями, приведены в таблице 5.11.

5.5.2 Поиск орбитальных резонансов в движении астероидов с малыми перигелийными расстояниями

С использованием интегратора Lobbie исследована орбитальная эволюция всех астероидов с малыми перигелийными расстояниями (60 объектов, известных на апрель 2023 года) на интервале времени (0, 4000) лет и получен перечень астероидов, движущихся в окрестности орбитальных резонансов с большими планетами (Галушина и др., 2022). Среди 60 исследуемых астероидов 33 движутся в окрестности орбитальных резонансов с одной или несколькими планетами одновременно. Всего было выявлено 50 соизмеримостей, 16 из которых являются устойчивыми. Подробные результаты приведены в таблице 5.20, а краткая статистика – в таблице 5.21. В процессе исследования обнаружены резонансы с Венерой, Землей, Марсом, Юпитером и Сатурном. С Меркурием резонансов выявлено не было. В таблице введены условные обозначения: У – устойчивый резонанс; НУ – неустойчивый резонанс. Так как исследование выполнялось для массива астероидов, то предварительный анализ данных выполнялся по поведению резонансной щели, максимальной амплитуде и количеству проходов через точный резонанс. Следует отметить, что устойчивый резонанс 3/1 с Юпитером всегда сопровождается неустойчивым резонансом 1/4 с Землей, при этом устойчивых резонансов с Землей выявлено не было.

Таблица 5.20 — Орбитальные резонансы астероидов с большими планетами

Астероид	Венера		Земля		Марс		Юпитер		Сатурн	
	У	НУ	У	НУ	У	НУ	У	НУ	У	НУ
(3200) Phaethon		3/7								
(137924) 2000 BD19	3/4									
(399457) 2002 PD43				1/4			3/1			
(374158) 2004 UL										
(394130) 2006 HY51										7/1
(431760) 2008 HE						5/9		7/2		
1995 CR		5/7								
2005 HC4		1/4								

[illegible]

Таблица 5.21 — Орбитальные резонансы астероидов с большими планетами

	Венера	Земля	Марс	Юпитер	Сатурн
У	1	0	1	14	0
НУ	4	15	7	5	3

На рисунке 5.17 в качестве примера приведены графики эволюции характеристик орбитального резонанса для случаев устойчивого (*а*) и неустойчивого (*б*) резонансов. Астероид 2019 JZ6 находится в резонансе 3/1 с Юпитером (рисунок 5.17*а*), демонстрируя устойчивые колебания резонансных характеристик относительно определенного центра либрации с небольшой амплитудой. На всем интервале интегрирования резонансный аргумент совершает регулярные колебания относительно немного смещающегося центра, в то время как резонансная щель регулярно проходит через значение точной соизмеримости с амплитудой, не превышающей 21 угловую секунду в сутки. Астероид движется в устойчивой геометрической конфигурации с Юпитером и избегает сближений с планетой.

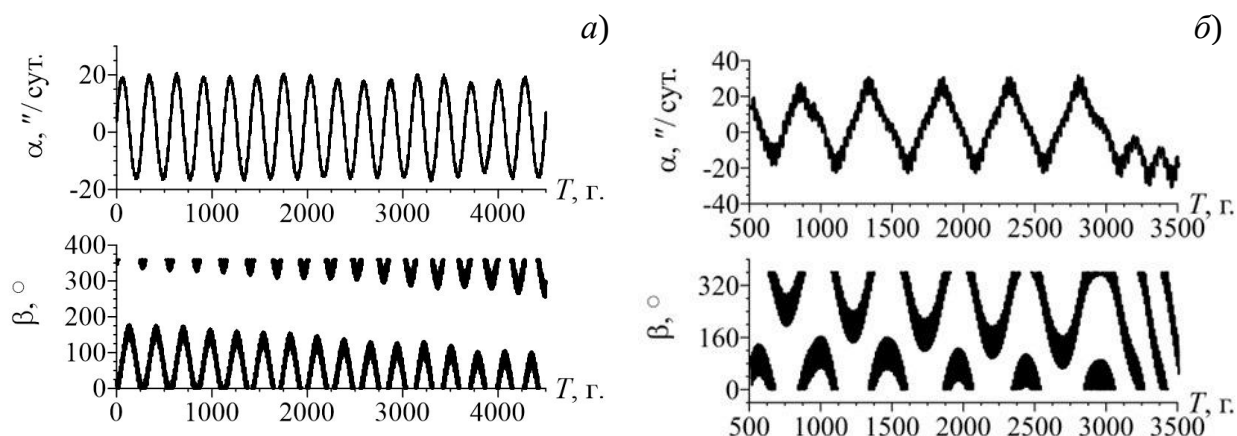


Рисунок 5.17 — Пример устойчивого резонанса 3/1 астероида 2019 JZ6 (*а*) и неустойчивого резонанса 7/2 астероида (431760) 2008 NE (*б*) с Юпитером

В качестве примера неустойчивости резонанса на рисунке 5.17*б* представлена эволюция характеристик резонанса 7/2 астероида (431760) 2008 NE с Юпитером. Из рисунка 5.17*б* видно, что регулярное прохождение щели через нулевое значение в конце интервала сменяется колебаниями по одну сторону от точной соизмеримости. Такое поведение щели сопровождается сменой регулярных

колебаний резонансного аргумента на циркуляцию. В период устойчивых колебаний резонансный аргумент имеет большую амплитуду, но значение резонансной щели на всем интервале исследования не превышает 30 секунд в сутки по модулю. Геометрическая конфигурация «астероид-планета» для приведенного резонанса является неустойчивой, что приводит к сближениям астероида с Юпитером и впоследствии к значительным изменениям элементов орбиты исследуемого объекта.

5.5.3 Оценка влияния эффекта Ярковского на орбитальные резонансы астероидов с малыми перигелийными расстояниями

Оценка влияния эффекта Ярковского на резонансную динамику астероидов осуществлялась путем сравнения результатов эволюции резонансных характеристик при модели сил с учетом возмущений от всех больших планет, Плутона, Луны, релятивистских эффектов от Солнца, сжатия Солнца (назовем эту модель основной) с включенным возмущением от эффекта Ярковского и без него. При этом начальные данные получались путем улучшения орбит методом наименьших квадратов при той же модели сил, что и расчет эволюции. Анализ поведения резонансных характеристик с учетом эффекта Ярковского и без него для случаев устойчивых и неустойчивых конфигураций «астероид-планета» привел к следующим результатам.

При устойчивом резонансном взаимодействии астероидов с планетами учет эффекта Ярковского незначительно влияет на поведение характеристик, приводя к небольшим изменениям в амплитуде колебаний, как аргумента, так и резонансной щели, при этом устойчивость резонанса сохраняется. На рисунке 5.18 представлена эволюция резонансных характеристик устойчивого резонанса $3/1$ астероидов (399457) 2002 PD43 (a_1 , b_1) и 2013 YC (a_2 , b_2) с Юпитером. Слева приведены графики без учета эффекта Ярковского, справа – с его учетом. Для обоих астероидов на рассматриваемом интервале времени резонансный аргумент совершает либрационные движения относительно определенного центра с небольшой амплитудой, а резонансная щель регулярно колеблется около нулевого значения. Следует отметить, что учет эффекта Ярковского при построении орбитальной эволюции астероидов по-разному повлиял на поведение резонансных

характеристик. Для (399457) 2002 PD43 при интегрировании в будущее с учетом эффекта уменьшается амплитуда колебания α и β (рисунок 5.18б1). При интегрировании в прошлое, поведение характеристик орбитального резонанса практически не изменяется. Для астероида 2013 YC наблюдается обратная картина, учет эффекта Ярковского приводит к незначительному увеличению амплитуды колебания α и β на всем интервале интегрирования. В обоих случаях сохраняется устойчивость резонансного взаимодействия астероидов с планетой.

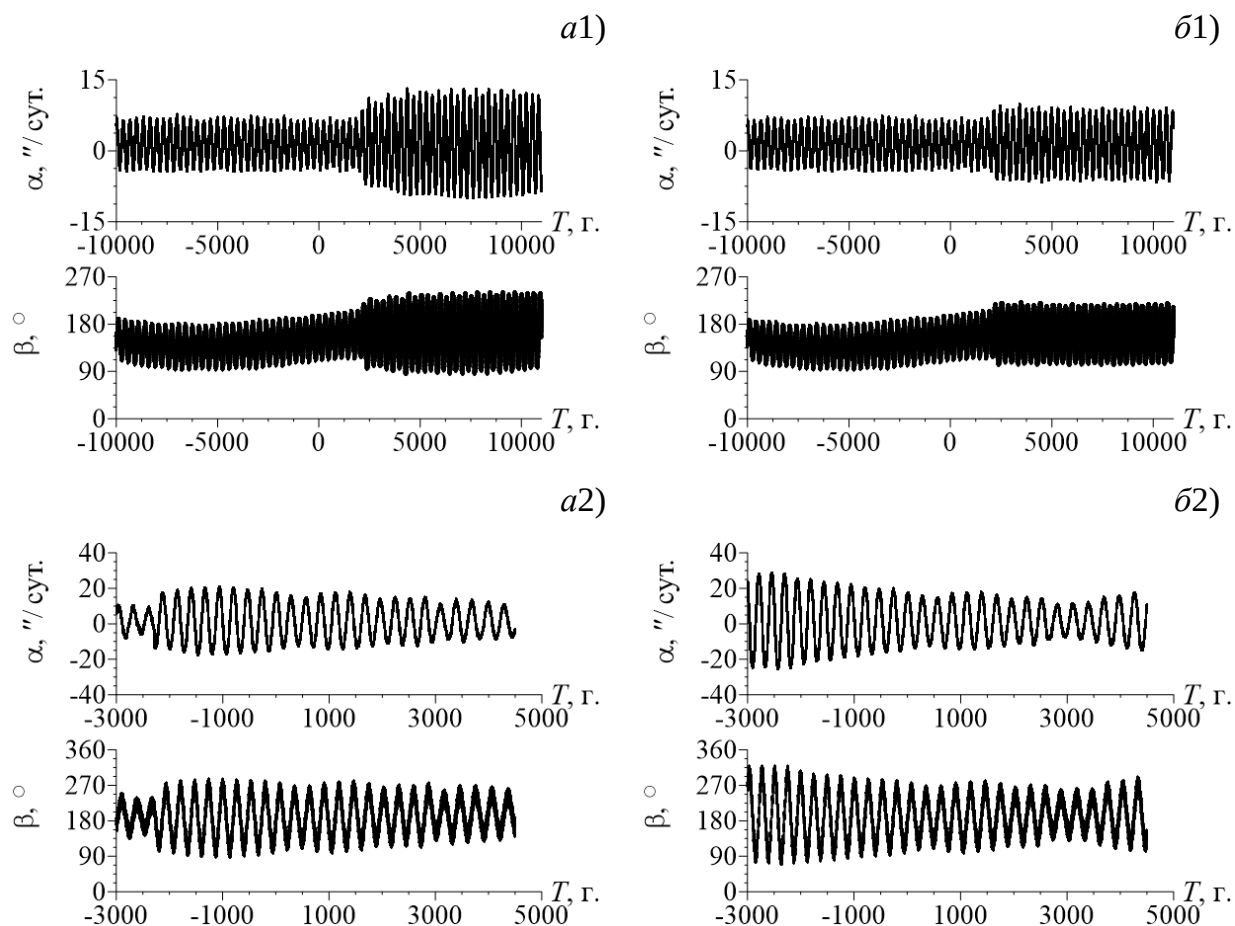


Рисунок 5.18 — Поведение характеристик орбитального резонанса 3/1 астероидов (399457) 2002 PD43 (a1, б1) и 2013 YC (a2, б2) с Юпитером. На графиках (a1, a2) представлена эволюция характеристик без учета эффекта Ярковского, на графиках (б1, б2) – с учетом эффекта

Учет эффекта Ярковского при неустойчивом резонансе оказывает более существенное влияние. На рисунке 5.19 в качестве примера приведены графики поведения резонансных характеристик для двух резонансов: 1/4 астероида 2013 YC (a1, б1) с Землей и 9/1 2011 KE (a3, б3) с Сатурном.

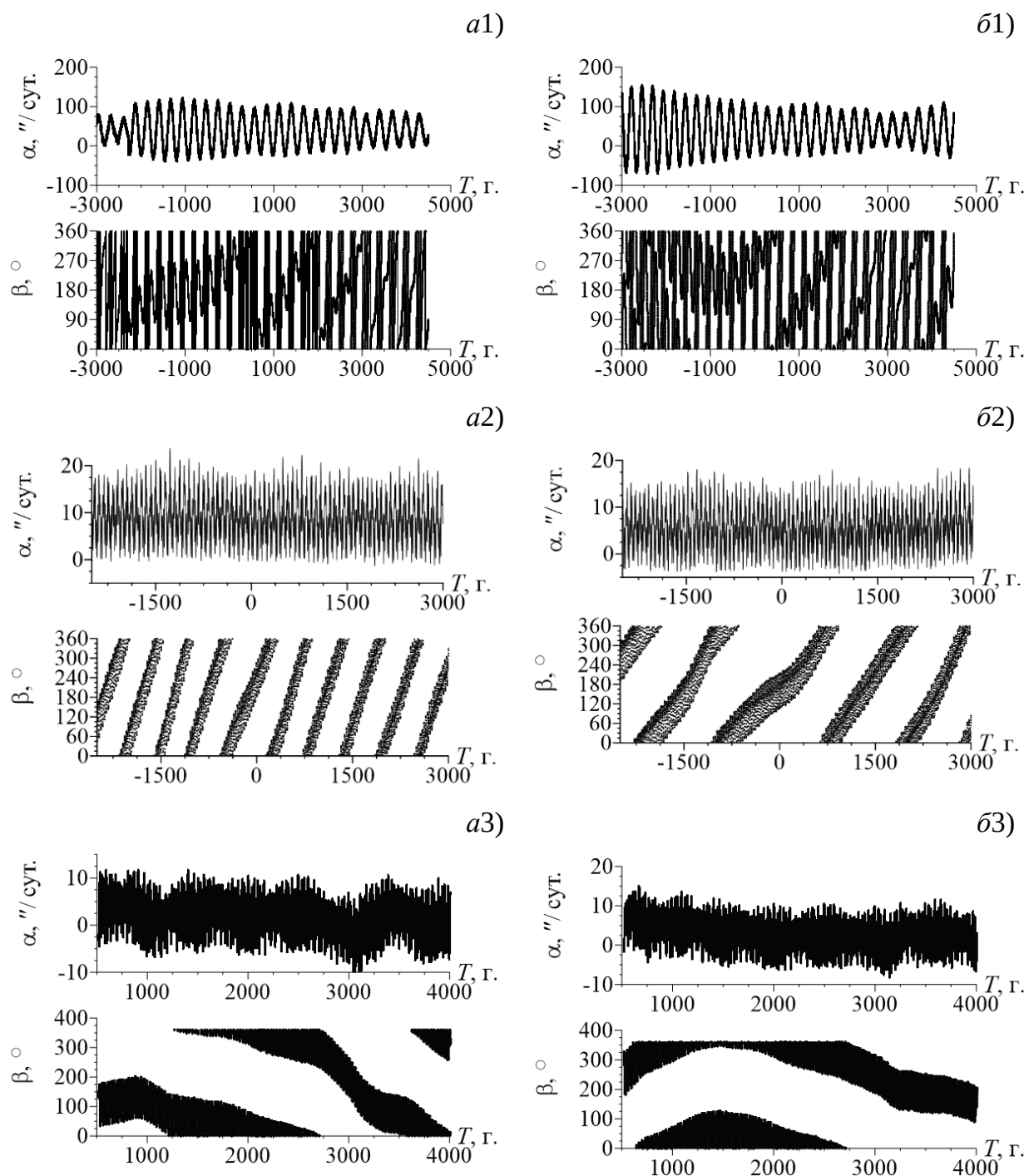


Рисунок 5.19 — Поведение характеристик орбитального резонанса: 1/4 астероида 2013 YC (*a1*, *б1*) с Землей, 7/1 астероида (394130) 2006 NY51 (*a2*, *б2*) и 9/1 2011 KE (*a3*, *б3*) с Сатурном. На графиках (*a1*, *a2*, *a3*) представлена эволюция характеристик без учета эффекта Ярковского, на графиках (*б1*, *б2*, *б3*) – с учетом эффекта

Астероид 2013 YC, находясь в устойчивом резонансе 3/1 с Юпитером (рисунок 5.18*a2*), одновременно движется в неустойчивом резонансе 1/4 с Землей (рисунок 5.19*a1*). Анализируя поведение характеристик неустойчивого резонанса,

следует отметить, что без учета эффекта Ярковского резонансная щель α регулярно проходит через ноль, совершая колебания с большой амплитудой со смещенным относительно нуля центром. Для резонансного аргумента наблюдаются участки либрации с переходом в циркуляцию. Учет эффекта Ярковского, как видно из рисунка 5.19б1, приводит к незначительному увеличению амплитуды либраций α , но при этом центр колебаний резонансной щели смещается ближе к нулевому значению. В поведении β отмечается увеличение либрационных участков, то есть можно отметить некоторое положительное влияние эффекта Ярковского на резонанс.

Интересное влияние оказывает эффект Ярковского на резонансные соотношения с Сатурном. Без учета эффекта резонансная щель астероида 2011 KE (рисунок 5.19а2) регулярно проходит через значение точной соизмеримости, но со смещенным относительно него центром либрации. При этом критический аргумент демонстрирует медленное циркуляционное поведение. Как и в предыдущем случае эффект Ярковского приводит к смещению центра либраций резонансной щели в сторону нулевого значения, а для резонансного аргумента наблюдается переход от медленной циркуляции к либрации с предельной амплитудой (рисунок 5.19б2).

Следует отметить, что все приведенные в данном подразделе результаты получены только на основе номинальной орбиты, без исследования доверительной области астероида. Оценки влияния эффекта Ярковского на вероятностную орбитальную эволюцию астероидов (137924) 2000 BD19 (Letner, Galushina, 2020) и (3200) Phaethon (Galushina et al., 2021) будут представлены в подразделе 5.6.4.

5.5.4 Оценка влияния светового давления на орбитальные и вековые резонансы астероидов с малыми перигелийными расстояниями

Вычисление светового давления требует знания диаметра D , массы M_a и альбедо p_v . Из рассматриваемых астероидов, движущихся в окрестности орбитальных резонансов, только для трех ((3200) Phaethon, (394130) 2006 HY51, (137924) 2000 BD19) с хорошей точностью определены физические параметры для вычисления силы влияния светового давления, поэтому наше исследование

ограничивается ими. Для сравнения в данном подразделе также приводятся оценки влияния эффекта Ярковского на динамику данных объектов.

В таблице 5.22 представлены результаты улучшения орбит с тремя наборами возмущений: 1 – основная модель (возмущения от всех больших планет, Плутона, Луны, релятивистских эффектов от Солнца и сжатия Солнца), 2 – с включением в основную модель возмущения от светового давления и 3 – с включением влияния эффекта Ярковского. Результаты для каждой модели представлены в соответствующей строке. Приведены следующие параметры: число наблюдений N и интервал наблюдений ΔT в сутках, начальная эпоха t_0 , среднеквадратическая ошибка представления наблюдений σ , среднеквадратическая ошибка НК-оценок векторов положения $\sigma(\mathbf{x}_0)$ и скорости $\sigma(\mathbf{v}_0)$.

Таблица 5.22 — Данные о наблюдениях и результатах улучшения орбит некоторых астероидов с малыми перигелийными расстояниями

Астероид	N	ΔT , сут.	t_0	σ , "	$\sigma(\mathbf{x}_0)$, а.е.	$\sigma(\mathbf{v}_0)$, а.е./сут
(3200) Phaethon	6833	14376	07.07.2013	0.445574	$2.534 \cdot 10^{-8}$	$3.247 \cdot 10^{-10}$
				0.445575	$2.534 \cdot 10^{-8}$	$3.247 \cdot 10^{-10}$
				0.445301	$2.533 \cdot 10^{-8}$	$3.245 \cdot 10^{-10}$
(137924) 2000 BD19	769	7748	10.12.2010	0.552563	$9.457 \cdot 10^{-8}$	$1.767 \cdot 10^{-9}$
				0.552564	$9.457 \cdot 10^{-8}$	$1.767 \cdot 10^{-9}$
				0.542384	$9.418 \cdot 10^{-8}$	$1.760 \cdot 10^{-9}$
(394130) 2006 HY51	300	4784	28.06.2011	0.403594	$6.026 \cdot 10^{-7}$	$6.678 \cdot 10^{-10}$
				0.403595	$6.026 \cdot 10^{-7}$	$6.678 \cdot 10^{-10}$
				0.403419	$6.024 \cdot 10^{-7}$	$6.675 \cdot 10^{-10}$

Из таблицы 5.22 видно, что орбиты астероидов хорошо определены, они наблюдались на большой временной дуге, а среднеквадратические ошибки $\sigma(\mathbf{x}_0)$ не превышают 10^{-6} а.е. Результаты улучшения орбит исследуемых объектов демонстрируют слабое влияние светового давления и эффекта Ярковского на процесс улучшения и формирование начальных данных, но следует отметить, что учет эффекта Ярковского во всех случаях приводит к уменьшению

среднеквадратической ошибки представления наблюдений и размера начального облака неопределенности.

По результатам улучшения орбит исследуемых астероидов для каждого из них была сформирована номинальная орбита в виде двух векторов (положения и скорости) с тремя моделями сил: с основной моделью и с добавлением в эту модель по отдельности возмущения от эффекта Ярковского или от светового давления. Путем сравнения результатов построения орбитальной эволюции номинальных частиц с основной моделью и с включенным возмущением оценивалось влияние описанных малых возмущений на движение астероидов.

Исследование влияния светового давления и эффекта Ярковского на динамику астероидов показало, что учет рассматриваемых негравитационных возмущающих факторов практически не оказывает влияния на эволюцию орбитальных элементов, лишь незначительно изменяя поведение большой полуоси на концах интервала интегрирования. Вследствие такого влияния возмущений изменяется число сближений астероидов с большими планетами и расстояние до планет. Так как поведение резонансной щели напрямую зависит от большой полуоси, изменения коснулись и характеристик орбитального резонанса. Причем, следует заметить, что световое давление меньше влияет на движение изучаемых астероидов, чем эффект Ярковского. Что касается влияния эффекта Ярковского и светового давления на характеристики апсидально-нодальных резонансов, важным является, что в основе их вычисления лежат элементы, отвечающие за пространственное расположение орбит астероидов (долгота восходящего узла Ω и аргумент перицентра ω). Так как эффект Ярковского и световое давление не оказывают существенного влияния на эволюцию аргумента перицентра и долготы восходящего узла, изменений в поведении вековых резонансных характеристик с разными моделями сил также не было выявлено.

В качестве примера приведем результаты построения орбитальной эволюции астероидов (137924) 2000 BD19 и (394130) 2006 HY51. На рисунках 5.20 и 5.21 для 2000 BD19 представлены графики эволюции характеристик орбитального резонанса $3/4$ с Венерой α (рисунки 5.20a1–a3) и β (рисунки 5.20b1–b3), сближения с Землей (рисунки 5.21a1–a3) и эволюция параметра $OMEGNO \bar{Y}_1$

(рисунки 5.21б1–б3). Нумерация графиков отвечает за использование одной из моделей сил при исследовании и обозначает следующее: 1 – основная модель; 2 – основная модель с включенным возмущением от СД; 3 – основная модель с включенным возмущением от ЭЯ.

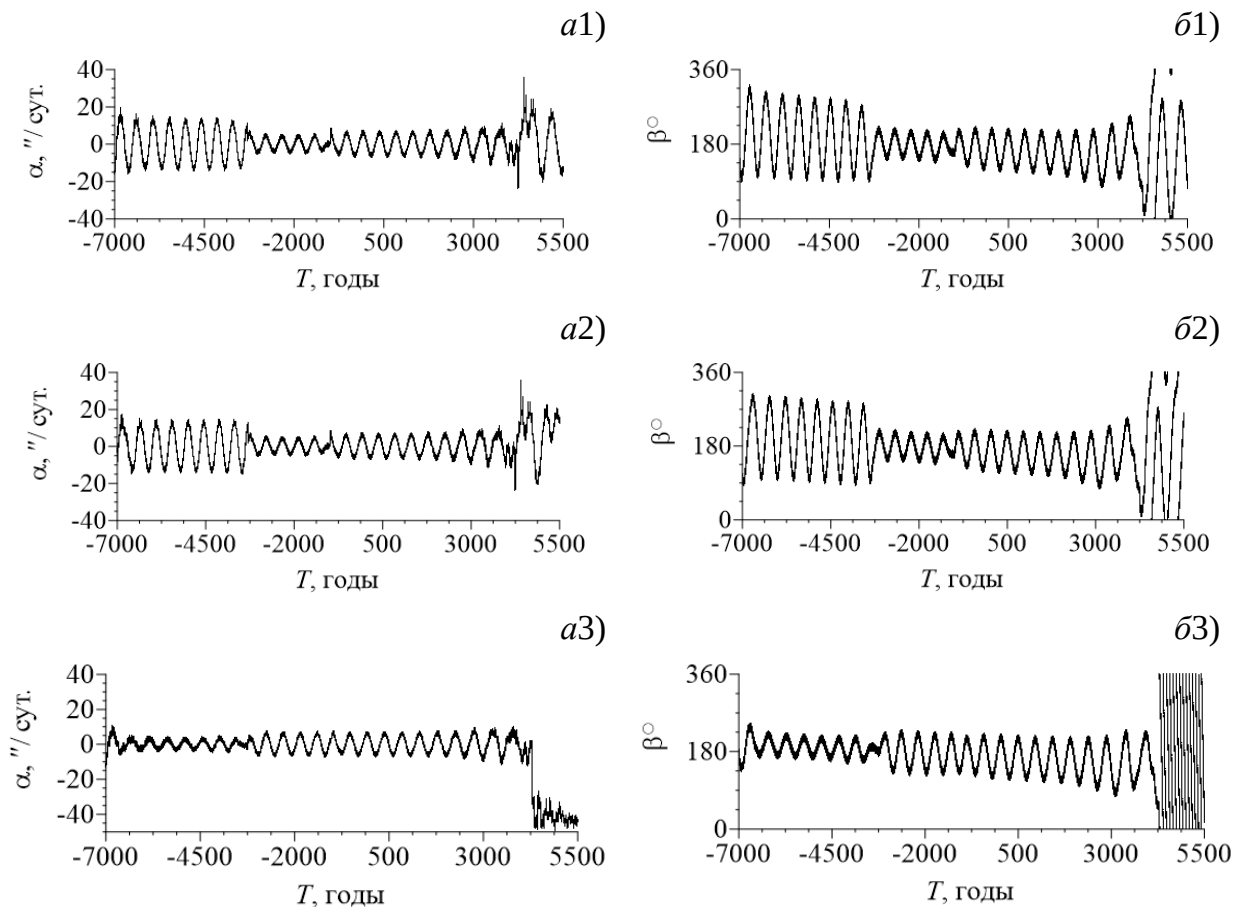


Рисунок 5.20 — Эволюция резонансной щели α (a1, a2, a3) и критического аргумента β (б1, б2, б3) для резонанса 3/4 (137924) 2000 BD19 с Венерой с основной моделью сил (1), с учетом светового давления (2) и с учетом эффекта Ярковского (3)

Из рисунка 5.20 видно, что световое давление влияет меньше на эволюцию резонансных характеристик, чем эффект Ярковского. С учетом ЭЯ изменение большой полуоси приводит к изменению поведения резонансных характеристик α и β : при интегрировании в прошлое уменьшается амплитуда колебаний α и β , а при интегрировании в будущее в конце интервала либрация аргумента переходит в циркуляцию, а α начинает колебаться по одну сторону от точной соизмеримости. Без учета эффекта Ярковского переход к циркуляции вызывает сомнение и скорее характеризует неустойчивость резонанса на этом промежутке времени.

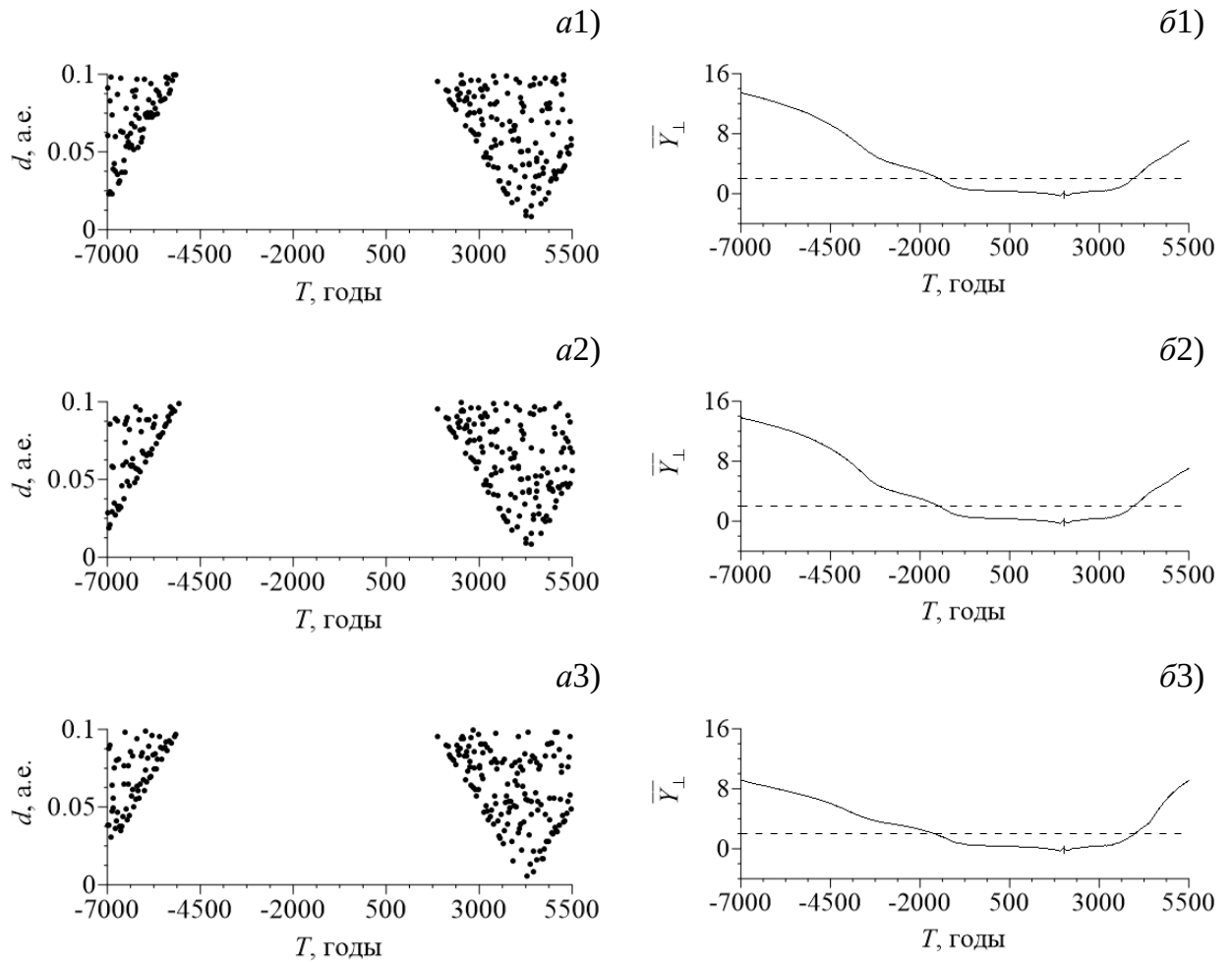


Рисунок 5.21 — Сближения астероида (137924) 2000 BD19 с Землей ($a1$, $a2$, $a3$) и эволюция параметра OMEGNO $\bar{Y}_\perp$ ($b1$, $b2$, $b3$) с основной моделью сил (1), с учетом светового давления (2) и с учетом эффекта Ярковского (3)

Астероид (137924) 2000 BD19 на интервале исследования испытывает сближения лишь с Землей и Меркурием. Устойчивое резонансное взаимодействие с Венерой защищает объект от сближений с планетой. Что касается влияния СД и ЭЯ на сближения с другими планетами, на примере сближений астероида с Землей на рисунках 5.21a1–a3 видно, что изменяется расстояние до планет на концах интервала интегрирования, что очевидно при изменениях поведения большой полуоси.

Оценки хаотичности орбиты астероида (137924) 2000 BD19 с помощью параметра OMEGNO, полученные с разными моделями сил, показывают, что световое давление и эффект Ярковского не влияют на интервал предсказуемости движения астероида (137924) 2000 BD19 (когда $\bar{Y}_\perp \leq 2$), для всех трех случаев он

составляет примерно 5400 лет. За пределами этого интервала параметра OMEGNO растёт, в среднем, линейно, и у орбиты астероида проявляются признаки хаотичности. Но следует отметить, что учет эффекта Ярковского приводит к уменьшению значений параметра хаотичности в период его линейного роста.

Результаты построения орбитальной эволюции астероида (394130) 2006 HY51 приведены на рисунках 5.22, 5.23. Астероид (394130), в отличие от (137924), испытывает сближения с пятью планетами от Меркурия до Юпитера. Реже всего астероид сближается с Марсом, а сближения с Венерой имеют схожее поведение, что и сближения с Землей. Расположение графиков имеет тот же порядок, что и для астероида (137924) 2000 BD19.

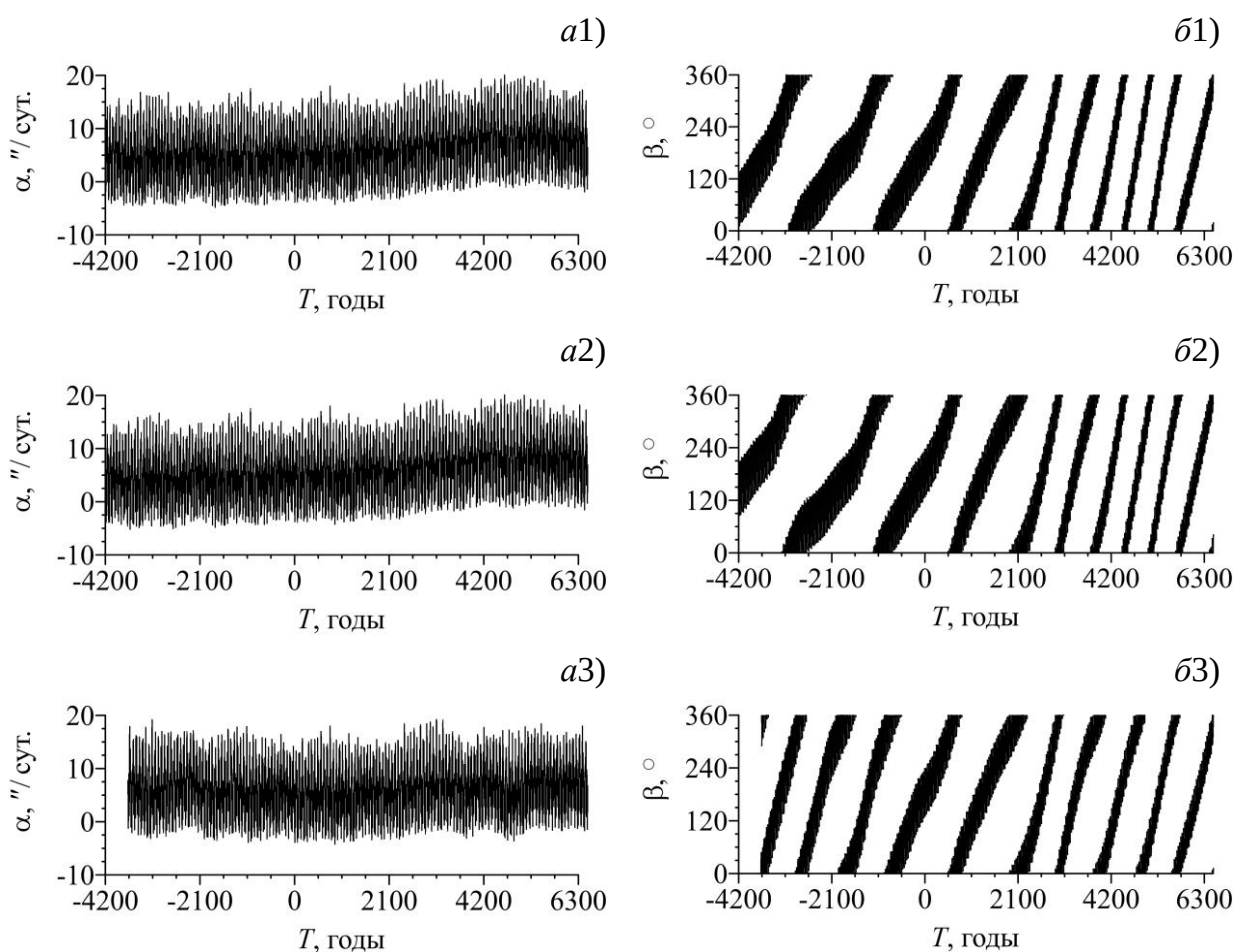


Рисунок 5.22 — Эволюция резонансной щели α ($a1$, $a2$, $a3$) и критического аргумента β ($b1$, $b2$, $b3$) для резонанса 7/1 астероида (394130) 2006 HY51 с Сатурном с основной моделью сил (1), с учетом светового давления (2) и с учетом эффекта Ярковского (3)

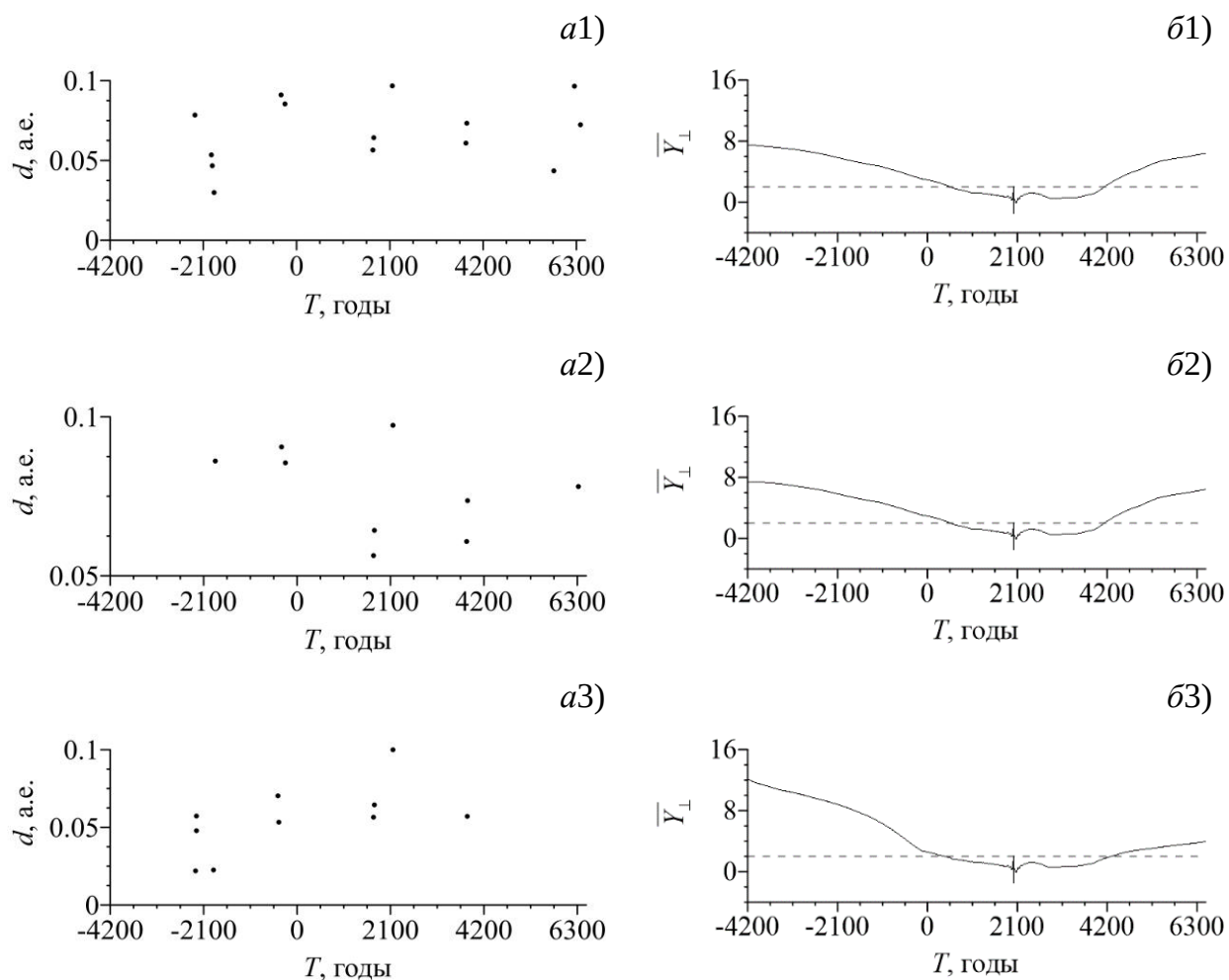


Рисунок 5.23 — Сближения астероида (394130) 2006 HY51 с Землей ($a1$, $a2$, $a3$) и эволюция параметра OMEGNO $\bar{Y}_\perp$ ($b1$, $b2$, $b3$) с основной моделью сил (1), с учетом светового давления (2) и с учетом эффекта Ярковского (3)

Анализируя результаты построения орбитальной эволюции астероида (394130) 2006 HY51 с тремя наборами возмущающих факторов, можно сделать вывод, что эффект Ярковского и световое давление практически не влияют на его динамику. Но если обратить внимание на поведение характеристик орбитального резонанса (рисунок 5.22), то можно заметить, что с моделями сил 1 и 2 резонансная щель уходит дальше от точного резонанса в будущем и период циркуляции критического аргумента уменьшается. С учетом ЭЯ (модель сил 3) резонансная щель колеблется ближе к нулю, а период циркуляции β заметно медленнее уменьшается по сравнению с результатами при моделях сил 1 и 2. Кроме этого, анализ сближений астероида с большими планетами показывает, что эффект Ярковского существенно меняет расстояние до планет (рисунок 5.23). Астероид

ближе подходит ко всем планетам, с которыми испытывает сближения на интервале исследования.

Эволюция параметра OMEGNO для астероида (394130) 2006 HY51, представленная на графиках (б1, б2, б3) рисунка 5.23, демонстрирует примерно одинаковое время предсказуемости движения астероида с разными моделями сил, около 4200 лет. Так как с учетом эффекта Ярковского объект теснее сближается с планетами, что особенно очевидно при интегрировании в прошлое, параметр $\bar{Y}_\perp$ растет быстрее и принимает большие значения по сравнению с моделями 1 и 2. При интегрировании в будущее с учетом ЭЯ $\bar{Y}_\perp$ растет медленнее, чем с основной моделью сил и с учетом СД, тем не менее для всех трех случаев признаки хаотичности проявляются в обоих направлениях.

Эффект Ярковского и световое давление, как уже упоминалось выше, не оказывают существенного влияния на эволюцию характеристик апсидально-нодальных резонансов. Полученные результаты не вызывают сомнения, так как учет как ЭЯ, так и СД приводит в основном к изменению поведения большой полуоси a и мало влияет на долготу восходящего узла Ω и аргумент перигелия ω . Рассмотрим поведение двух апсидально-нодальных резонансов для астероида (394130) 2006 HY51, интервал исследования динамики которого оказался достаточным для классификации поведения критического аргумента Ψ на циркуляцию и либрацию. На всем интервале интегрирования с основной моделью обнаружено 4 резонансных взаимодействия из 20 исследуемых со всеми большими планетами, остальные резонансы отсутствуют.

В качестве примера устойчивого резонанса на рисунке 5.24 для астероида 2006 HY51 приводится эволюция резонансного соотношения $\dot{\psi}_{11} = (\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_6) + \dot{\omega}$ (а1) и соответствующего ему резонансного аргумента $\psi_{11} = (\Omega - \Omega'_6) + \omega$ (б1) при взаимодействии с орбитой Сатурна. Видно, что $\dot{\psi}_{11}$ колеблется около нуля с небольшой амплитудой, а аргумент ψ_{11} либрирует на рассматриваемом интервале времени. На рисунках 5.24а2 и 5.24б2 представлена эволюция соотношения $\dot{\psi}_2 = (\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_6) - \dot{\omega} + \dot{\omega}'_6$ и резонансного аргумента $\psi_2 = (\Omega - \Omega'_6) - \omega + \omega'_6$, демонстрирующие пример отсутствия резонанса. В данном случае аргумент ψ_2

циркулирует, а соотношение ψ_2 колеблется по одну сторону от точной соизмеримости с большой амплитудой. Здесь ω'_6, Ω'_6 – аргумент перигелия и долгота восходящего узла орбиты Сатурна.

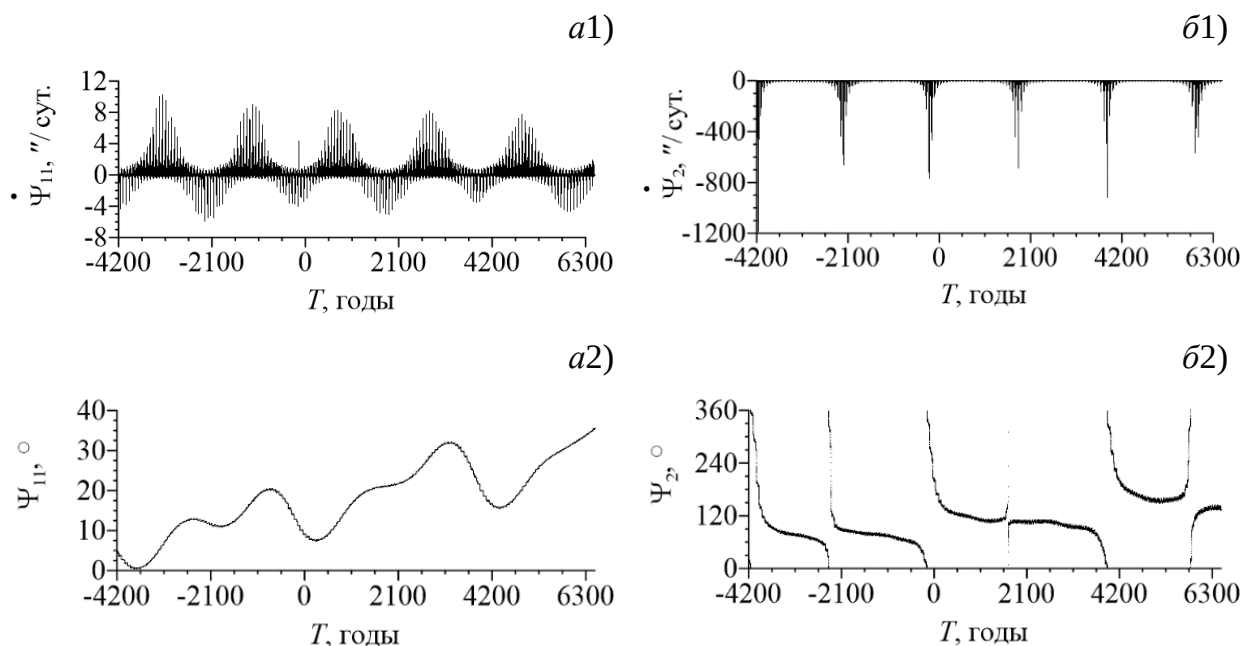


Рисунок 5.24 — Эволюция характеристик апсидально-нодальных резонансов $\dot{\psi}_{11}, \psi_{11}$ (a1, б1) и $\dot{\psi}_2, \psi_2$ (a2, б2) при взаимодействии астероида (394130) 2006 HY51 с Сатурном

5.5.5 Выводы

Были выявлены все астероиды с малыми перигелийными расстояниями, движущиеся в окрестности орбитальных резонансов низких порядков с большими планетами. На основе полученных ранее значений параметра эффекта Ярковского оценено его влияние на резонансные характеристики: резонансную щель и критический аргумент. Для части астероидов вследствие скудного состава наблюдений значения параметра завышены, что приводит к катастрофическому влиянию эффекта – полному разрушению резонанса и даже падению на Солнце. Естественно, что данные результаты недостоверны и являются следствием плохо определенной орбиты. Остальные астероиды с адекватно определенным значением параметра Ярковского можно поделить на два класса: движущиеся в устойчивом и неустойчивом резонансе с планетами. Причем для части объектов устойчивый резонанс с Юпитером сопровождается неустойчивым с Землей. Результаты

исследования орбитальной эволюции показали, что влияние эффекта Ярковского на устойчивые резонансные соотношения незначительно: он может несущественно менять амплитуду либрации, но не приводит к разрушению резонанса. В случае же неустойчивого резонанса изменяется число проходов через точную соизмеримость, а для некоторых объектов даже резонанс становится более устойчивым.

Что касается светового давления, то среди 33 объектов этого класса, которые движутся в окрестности орбитальных резонансов с одной или несколькими планетами одновременно, под рассмотрение попали всего три астероида ((3200) Phaethon, (394130) 2006 HY51, (137924) 2000 BD19), так как только для них с хорошей точностью известны физические параметры, позволяющие адекватно оценить влияние светового давления на их движение. Для этих астероидов была построена орбитальная эволюция с тремя моделями сил: с основной моделью без включения негравитационных возмущений от ЭЯ и СД и с добавлением в основную модель одного из факторов. Путем сравнения результатов эволюции номинальных орбит астероидов с основной моделью и с включенным возмущением оценивалось влияние СД и ЭЯ на их динамику. Выявлены сближения астероидов с большими планетами и получены оценки времени предсказуемости их движения с помощью параметра хаотичности OMEGNO. Помимо характеристик орбитального резонанса построена и проанализирована эволюция характеристик вековых резонансов с планетами.

Среди рассмотренных астероидов два ((137924) 2000 BD19 и (3200) Phaethon) движутся в окрестности орбитальных резонансов с Венерой с разной соизмеримостью средних движений астероида и планеты. Астероид (137924) 2000 BD19 находится в устойчивом резонансе $3/4$ с Венерой. Астероид (3200) Phaethon движется в окрестности резонанса $3/7$ с планетой, но на интервале исследования испытывает всего несколько прохождений через точный резонанс. Астероид (394130) 2006 HY51 движется в окрестности резонансной области $7/1$ с Сатурном, но, скорее всего, не захвачен в резонанс, так как резонансная щель колеблется с небольшой амплитудой, периодически проходя через точную соизмеримость, но центр ее либрации смещен относительно нулевого значения, а критический аргумент медленно циркулирует.

Исследование с разными моделями сил показало, что учет светового давления и эффекта Ярковского практически не оказывает влияния на эволюцию орбитальных элементов астероидов, изменяя поведение большой полуоси лишь на концах интервала интегрирования. Вследствие такого влияния возмущений изменяются количество сближений астероидов с большими планетами и расстояние до них. Причем световое давление влияет заметно меньше, нежели эффект Ярковского. Эволюция параметра OMEGNO с учетом одного из факторов показала, что данные возмущения не влияют на интервал предсказуемости движения, но в некоторых случаях учет одного из возмущений приводит к замедлению или же к ускорению роста параметра вследствие изменения количества сближений и расстояния до планет.

Что касается оценки влияния эффекта Ярковского и светового давления на характеристики вековых (апсидально-нодальных) резонансов, изменений в поведении этих характеристик не было отмечено, так как исследуемые возмущающие факторы не оказывают существенного влияния на эволюцию элементов орбит, лежащих в основе вычисления этих характеристик (долгота восходящего узла Ω и аргумент перицентра ω).

5.6 Исследование вероятностной орбитальной эволюции некоторых астероидов с малыми перигелийными расстояниями

5.6.1 Вводные замечания

Результаты, приведенные в предыдущих разделах, получены только для номинальной (т.е. наиболее вероятной орбиты). Однако, как известно, начальные данные известны с некоторой погрешностью, поэтому для достоверного прогноза необходимо исследовать эволюцию всего облака неопределенности, представляемого набором тестовых частиц. С другой стороны, учет неопределенности сокращает интервал численного интегрирования (поскольку требует соблюдения приемлемой точности интегрирования для каждой тестовой частицы) и существенно увеличивает время расчетов. Поэтому в данном разделе приводятся результаты исследования вероятностной орбитальной эволюции только для некоторых избранных объектов. В числе прочих решались следующие задачи:

исследование начальных облаков неопределенности, полученных линейным и нелинейным методом; оценка влияния наблюдений, полученных на Терскольской обсерватории, на вероятностную орбитальную эволюции; и оценка влияния эффекта Ярковского на динамику изучаемых объектов.

5.6.2 Вероятностная орбитальная эволюция астероидов с разной степенью нелинейности задачи оценивания

Задача построения вероятностной орбитальной эволюции астероидов, как уже отмечалось в разделе 2.4, включает в себя два этапа: формирование облака вероятных значений начальных параметров астероидов и отображение полученного облака во времени. В зависимости от степени нелинейности производится выбор способа построения начального облака. Для слабо нелинейных задач можно уверенно применять линейные методы, в умеренно и сильно нелинейных случаях рекомендуется использовать нелинейные способы построения начального облака неопределенности. Удобство применения линейных методов заключается в том, что из-за своей алгоритмической простоты они позволяют получить значительное количество виртуальных решений достаточно быстро. В свою очередь нелинейные методы являются более трудоемкими, и применение их для слабо нелинейных задач не целесообразно.

Из перечня всех астероидов с малыми перигелийными расстояниями было выбрано девять объектов с разной степенью нелинейности для построения начального облака неопределенности разными способами. Использовались два метода: классический линейный, основанный на вероятных ошибках орбитальных параметров, получаемых из наблюдений путем решения задачи НК, и нелинейный метод возмущенных наблюдений, идея которого заключается во внесении гауссова шума с дисперсией ошибок в наблюдения, и последующем многократном решении задачи НК. Подробную информацию о методах можно найти в разделе 2.4 и работах (Авдюшев, 2015; Айвазян и др., 1983). В таблице 5.23 приведены сведения о наблюдениях и информация об улучшении орбит астероидов, а именно: количество моментов наблюдений N и интервал наблюдений ΔT , начальная эпоха t_0 , среднеквадратическая ошибка представления наблюдений σ , среднеквадратическая ошибка НК-оценок векторов положения $\sigma(\mathbf{x}_0)$ и скорости $\sigma(\mathbf{v}_0)$, а также коэффициент

нелинейности χ . Таблица 5.23 отсортирована в порядке убывания коэффициента нелинейности, все результаты (кроме астероида 2022 JX) приведены по состоянию на сентябрь 2021 года. Из таблицы 5.23 можно сделать вывод, что для астероида 2015 KO120 задача оценивания начальных параметров сильно нелинейная, для 2013 НК11, 2015 EV, 2019 VE3, 2022 JX, 2020 HE – умеренно, а для 2017 TC1, 2007 GT3 и 2015 HG – слабо нелинейная.

Таблица 5.23 — Данные о наблюдениях и результатах улучшения орбит некоторых астероидов с малыми перигелийными расстояниями

Астероид	N	ΔT , сут.	t_0	σ , "	$\sigma(x_0)$, а.е.	$\sigma(v_0)$, а.е./сут	χ
2015 KO120	15	13	24.05.2015	0.449	$8.4 \cdot 10^{-3}$	$4.2 \cdot 10^{-4}$	$1.8 \cdot 10^{-1}$
2013 НК11	22	6	19.04.2013	0.478	$2.2 \cdot 10^{-3}$	$2.1 \cdot 10^{-4}$	$5.1 \cdot 10^{-2}$
2015 EV	52	4	12.03.2015	0.474	$4.4 \cdot 10^{-4}$	$7.1 \cdot 10^{-5}$	$3.1 \cdot 10^{-2}$
2019 VE3	20	11	05.11.2019	0.587	$1.6 \cdot 10^{-4}$	$4.3 \cdot 10^{-5}$	$2.9 \cdot 10^{-2}$
2022 JX	37	4	07.05.2022	0.514	$3.3 \cdot 10^{-4}$	$5.5 \cdot 10^{-5}$	$2.3 \cdot 10^{-2}$
2020 HE	41	6	18.04.2020	0.280	$1.9 \cdot 10^{-4}$	$2.9 \cdot 10^{-5}$	$1.1 \cdot 10^{-2}$
2015 HG	27	7	18.04.2015	0.252	$8.8 \cdot 10^{-4}$	$6.3 \cdot 10^{-5}$	$8.7 \cdot 10^{-3}$
2017 TC1	52	22	05.10.2017	0.244	$7.5 \cdot 10^{-5}$	$4.6 \cdot 10^{-6}$	$4.5 \cdot 10^{-4}$
2007 GT3	31	13	15.04.2007	0.548	$2.3 \cdot 10^{-3}$	$1.5 \cdot 10^{-4}$	$2.4 \cdot 10^{-5}$

После улучшения орбит астероидов, перечисленных в таблице 5.23, были сформированы начальные облака неопределенности линейным методом и методом возмущенных наблюдений. При этом начальное облако представлялось в виде 10000 виртуальных частиц. В силу специфики орбит астероидов в модели сил помимо основных гравитационных возмущений от больших планет и Луны учитывались сжатие Солнца и релятивистские эффекты от Солнца. Для 2015 KO120 дополнительно учитывались возмущения от трех крупных астероидов, Цереры, Паллады и Весты, так как в данном случае их влиянием нельзя пренебречь. Движение исследуемых объектов рассматривалось в прямоугольной системе координат, отнесенной к экватору эпохи 2000.0.

На рисунках 5.25–5.27 в качестве примера приведены графики облаков для трех кандидатов из таблицы 5.23. Для каждого астероида облака представлены в проекциях XY и XZ физического пространства координат (графики $a1$ и $a2$ соответственно) и в проекциях на плоскости собственных векторов w_i ($i = 1, \dots, 6$) ковариационной матрицы ошибок задачи НК (графики $b1$ и $b2$). Облака, ориентированные вдоль собственных векторов, рассматриваются относительно номинальной орбиты, помещенной в начало координат. Черным цветом отображено облако, построенное линейным методом, серым – облако, сформированное методом возмущенных наблюдений.

Способ ориентации начальных облаков неопределенности вдоль собственных векторов применяется для более детального анализа конфигурации возможных положений (Авдюшев, 2015). Кроме того, данные проекции позволяют визуально оценить, имеются ли различия в облаках, построенных линейным и нелинейными методами.

На рисунке 5.25 изображены начальные облака неопределенности для астероида 2007 GT3, который на момент исследования имел 31 наблюдение на небольшом мерном интервале в 13 суток, т.е. весь имеющийся наблюдательный материал был получен в одно появление астероида. Несмотря на короткий мерный интервал задача оценивания начальных параметров определяется как слабо нелинейная ($\chi = 0.0031$). Из графиков $a1$ и $a2$ видно, что облака, построенные разными методами, в физическом пространстве принимают форму, вытянутую в линию. Такая форма объясняется малой наблюдательной базой. При ориентации начальных облаков вдоль собственных векторов видно, что визуально они не отличаются друг от друга, что также подтверждает факт слабой нелинейности задачи для описываемого астероида.

Аналогично рисунку 5.25, на рисунке 5.26 приведены начальные облака неопределенности для астероида 2015 EV с умеренной степенью нелинейности задачи оценивания начальных параметров ($\chi = 0.0310$). Объект имеет 52 наблюдения, но они охватывают очень короткий мерный интервал, всего четверо суток. Несмотря на то, что нелинейность неслабая, облака, ориентированные вдоль собственных векторов, визуально не отличаются друг от друга (рисунки 5.26b1 и 5.26b2).

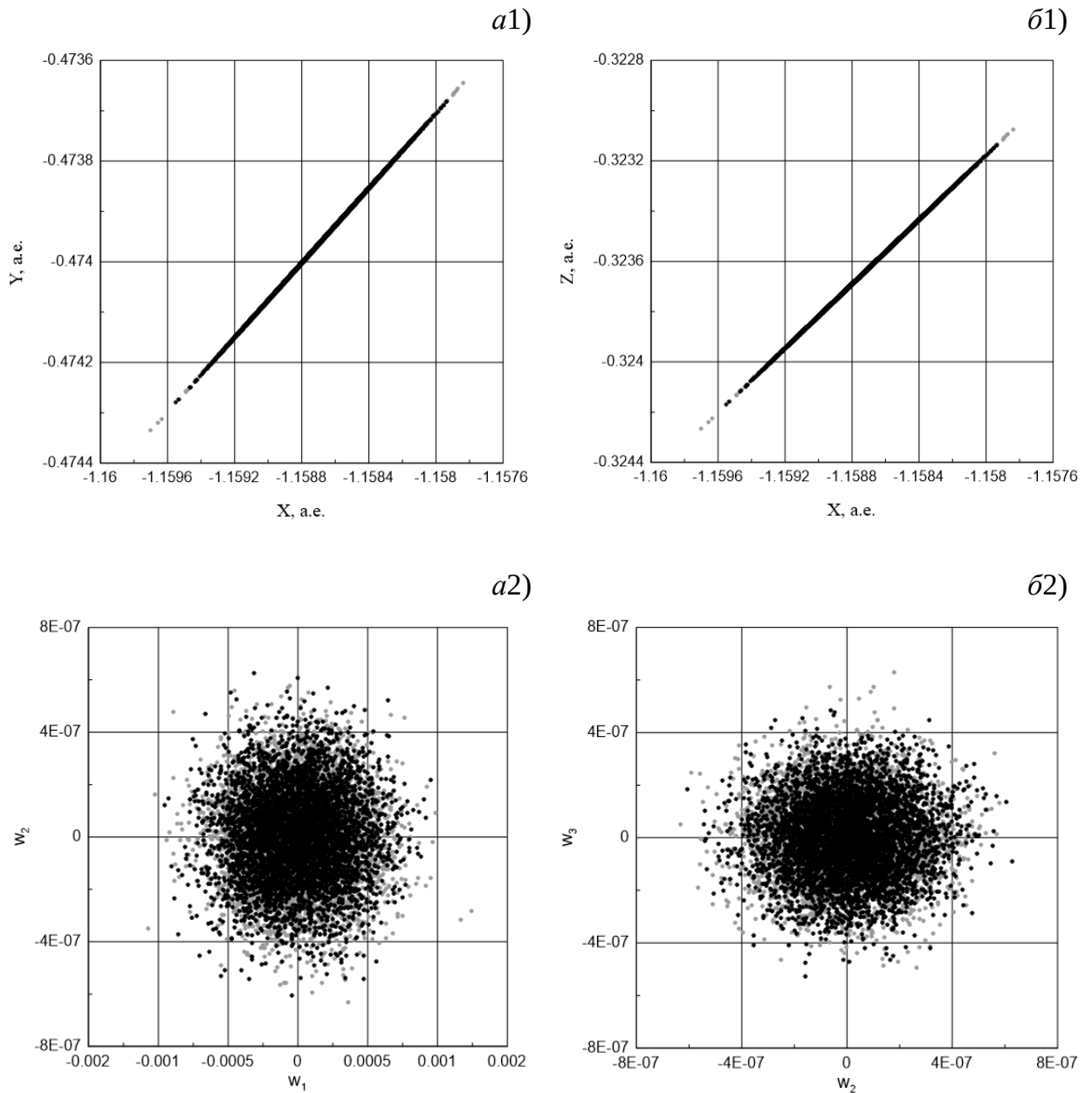


Рисунок 5.25 — Проекция начальных вероятностных облаков астероида 2007 GT3: ($a1$, $a2$) — на координатные плоскости XY и XZ соответственно; ($б1$, $б2$) — на плоскости собственных векторов w_i ($i = 1, \dots, 6$) ковариационной матрицы ошибок с номинальной частицей в начале координат. Черным цветом изображена линейная область, серым — область, сформированная методом возмущенных наблюдений

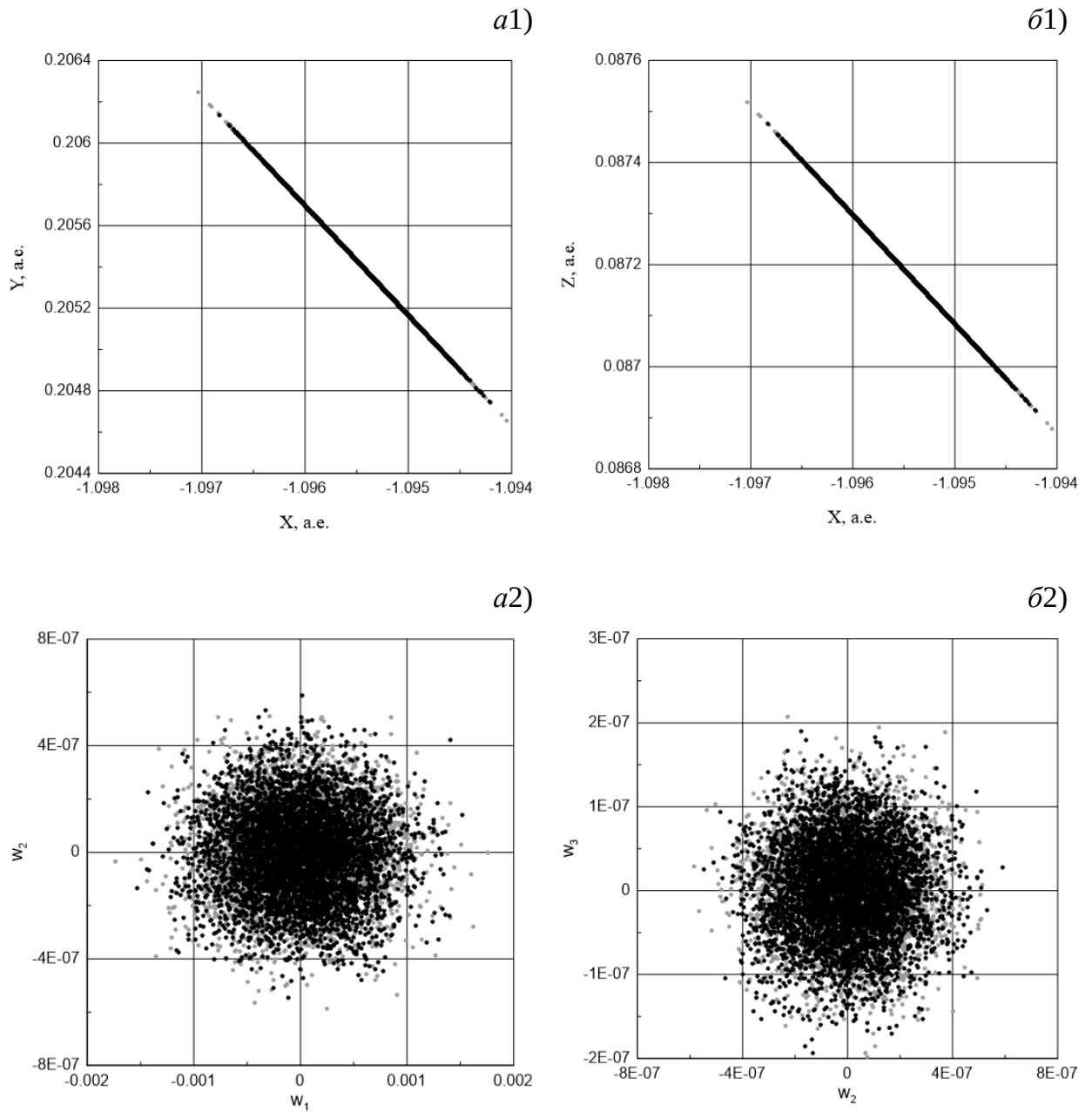


Рисунок 5.26 — Проекция начальных вероятностных областей астероида 2015 EV: (a1, a2) – на координатные плоскости XY и XZ соответственно; (b1, b2) – на плоскости собственных векторов w_i ($i = 1, \dots, 6$) ковариационной матрицы ошибок с номинальной частицей в начале координат. Черным цветом изображена линейная область, серым – область, сформированная методом возмущенных наблюдений

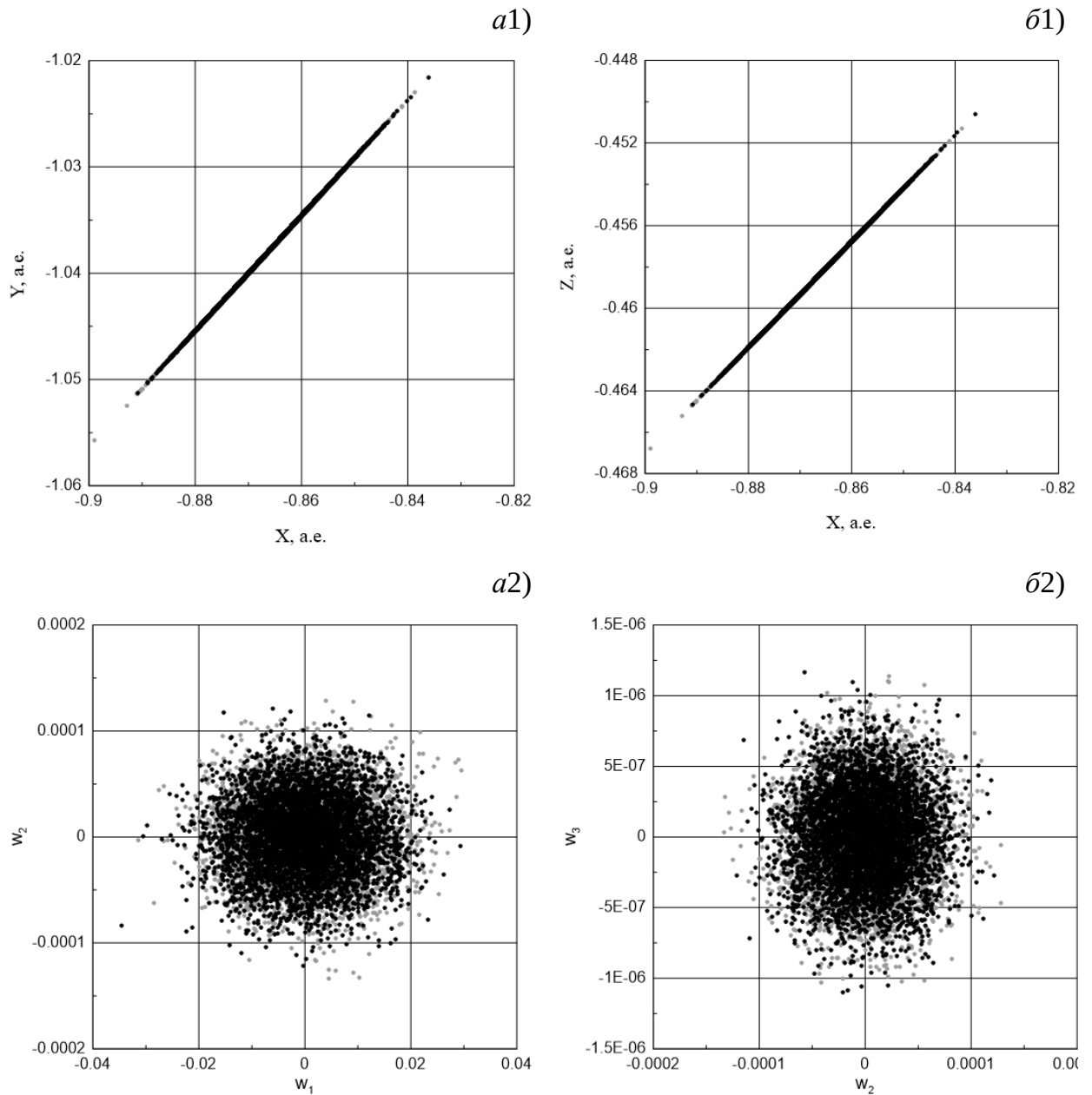


Рисунок 5.27 — Проекция начальных вероятностных облаков астероида 2015 KO120: ($a1$, $a2$) — на координатные плоскости XY и XZ соответственно; ($b1$, $b2$) — на плоскости собственных векторов w_i ($i = 1, \dots, 6$) ковариационной матрицы ошибок с номинальной частицей в начале координат. Черным цветом изображена линейная область, серым — область, сформированная методом возмущенных наблюдений

В качестве примера сильной нелинейности задачи оценивания на рисунке 5.27 представлены результаты построения начальных облаков для астероида 2015 KO120. Среди исследуемых объектов из таблицы 5.23 он имеет наименьшее

число наблюдений, всего 15, на интервале трое суток. Большое значение показателя нелинейности свидетельствует о том, что задача оценивания начальных параметров является сильно нелинейной ($\chi = 0.183$). В силу того, что коэффициент нелинейности близок к пороговому значению $\chi = 0.1$, визуально сложно оценить отличие линейной и нелинейной областей (графики $b1$ и $b2$ рисунка 5.27). Тем не менее, нелинейность сильная, и использование линейного метода для построения начальной области недопустимо в таких случаях. Во избежание получения недостоверных результатов необходимым является применение нелинейных методов.

Вероятностная орбитальная эволюция астероидов строилась путем численного отображения во времени начальных облаков и номинальной частицы. Уравнения движения номинальной и тестовых частиц численно интегрировались методом Эверхарта (Everhart, 1974), порядок метода подбирался индивидуально. Интервал времени, на котором выполнялось исследование, определялся путем сравнения результатов прямого и обратного интегрирования и сохранения приемлемой точности в координатах не более 10^{-7} а.е.

В процессе исследования для всех астероидов выявлены особенности их движения, а именно сближения с большими планетами, а для большинства изучаемых объектов (за исключением 2019 VE3 и 2007 GT3) также соизмеримости средних движений (орбитальные резонансы). Для всех исследуемых объектов проведено сравнение поведения линейного и нелинейного облака со временем.

Исследование показало, что эволюция начальных облаков неопределенности, построенных линейным и нелинейным методами для астероидов со слабой нелинейностью (в данном исследовании 2015 HG, 2017 TC1 и 2007 GT3) визуально отличаются незначительно. Несмотря на это было выявлено отличие в поведении некоторых частиц из линейного облака от поведения частиц из нелинейного. На рисунке 5.28 в качестве примера приведены графики вероятностной орбитальной эволюции для астероида 2015 HG. На графиках представлена эволюция: перигелийного расстояния q ($a1, a2$), эксцентриситета e ($b1, b2$), наклона плоскости орбиты астероида i к плоскости эклиптики ($\vartheta1, \vartheta2$), сближения с Меркурием ($z1, z2$), Землей ($\partial1, \partial2$) и Марсом ($e1, e2$). Номинальная орбита отображена черным цветом, 10000 тестовых частиц – серым. Эволюция начального

облака неопределенности, сформированного линейным методом приведена на графиках (*a1–e1*), методом возмущенных наблюдений – на графиках (*a2–e2*). Эволюция номинальной частицы и 10000 тестовых частиц из начальных облаков неопределенности, построенных разными методами (слева линейным, справа нелинейным), была исследована на интервале времени (–2000, 6000) лет.

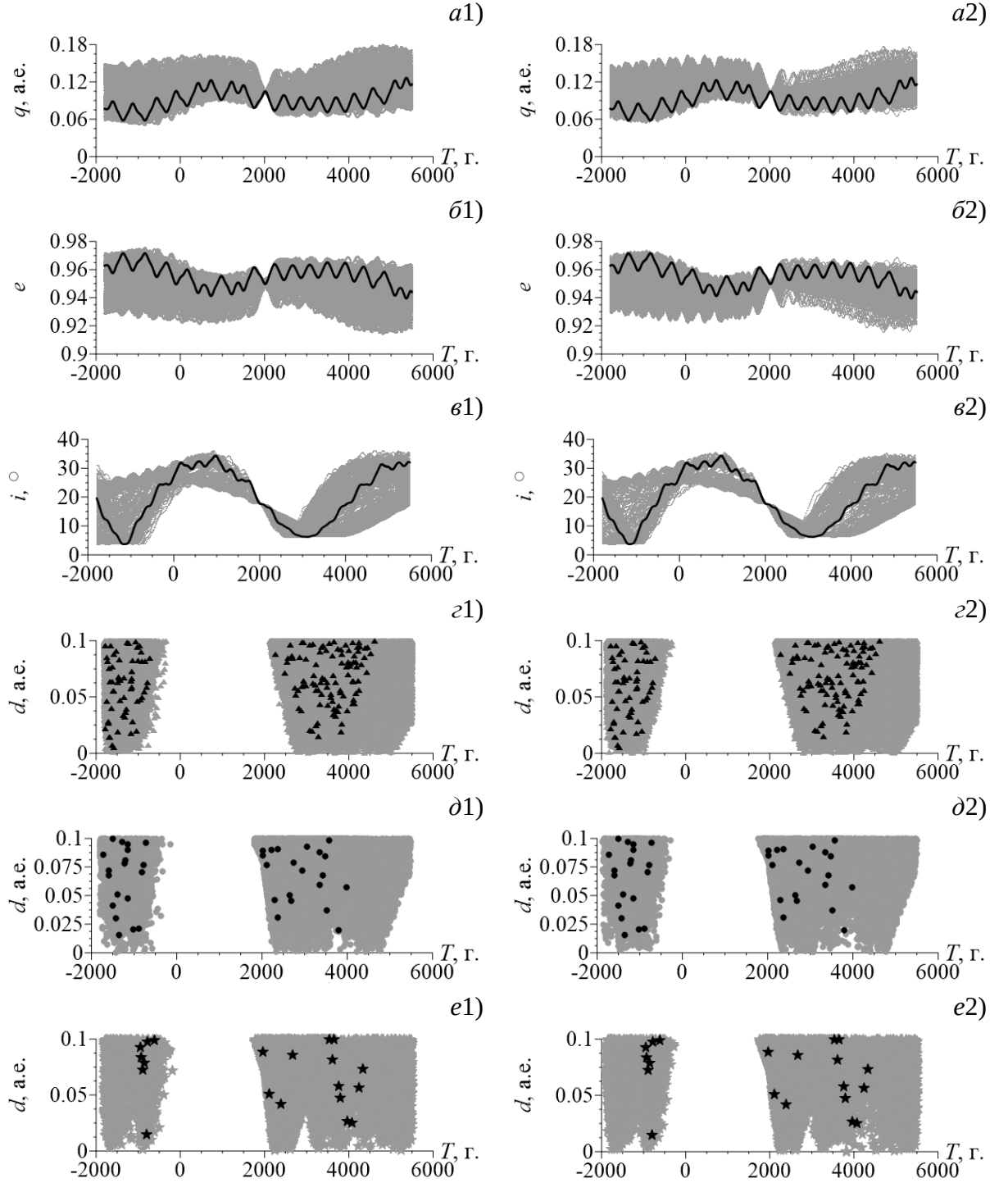


Рисунок 5.28 — Вероятностная орбитальная эволюция астероида 2015 NG

Из рисунка 5.28 видно, что в обоих случаях облака разрастаются со временем, поведение некоторых частиц из линейного и нелинейного начального облака визуально отличается. В данном случае особое внимание следует обратить на размер начальной линейной области ($\sigma(x_0)$ в таблице 5.23). Если орбита астероида определена плохо, и начальная неопределенность оказывается достаточно большой ($\sigma(x_0) \geq 10^{-5}$ а.е.), к таковым относятся все объекты из таблицы 5.23, целесообразным будет построение начального облака нелинейным методом для проведения сравнительного анализа с частицами из линейного. Чаще всего для таких объектов в процессе эволюции вероятностное облако, как линейное, так и нелинейное, быстро разрастается, что препятствует получению достоверного прогноза динамики астероидов. Единственный выход в данной ситуации – дожидаться нового наблюдательного материала. Если орбита астероида со слабой нелинейностью определена хорошо, начальная неопределенность оказывается маленькой ($\sigma(x_0) \leq 10^{-7}$ а.е.), то нет необходимости использовать трудоемкие нелинейные методы: достаточным будет применение классического линейного метода.

Для астероидов с умеренной и сильной нелинейностью рекомендуется применять нелинейные методы построения начального облака неопределенности. В качестве примера на рисунке 5.29 приведены графики эволюции начальных облаков неопределенности (линейного слева и нелинейного справа) для астероида 2015 KO120. Исследование проводилось на интервале времени (0; 4000) лет. Выявлены сближения астероида и тестовых частиц с Меркурием, Венерой, Землей и Марсом. Некоторые тестовые частицы, помимо сближений с планетами внутренней группы, сближаются с Юпитером, в то время как номинальная частица на всем интервале исследования не подходит к планете ближе, чем на 1 а.е. На рисунке 5.29, аналогично рисунку 5.28, приведены графики эволюции перигелийного расстояния q (a_1, a_2), эксцентриситета e (b_1, b_2), наклона плоскости орбиты астероида к плоскости эклиптики i (v_1, v_2), сближения с Землей (z_1, z_2), Марсом (δ_1, δ_2) и Юпитером (e_1, e_2). Эволюция номинальной орбиты отображена черным цветом, тестовых частиц из начальной вероятностной области – серым.

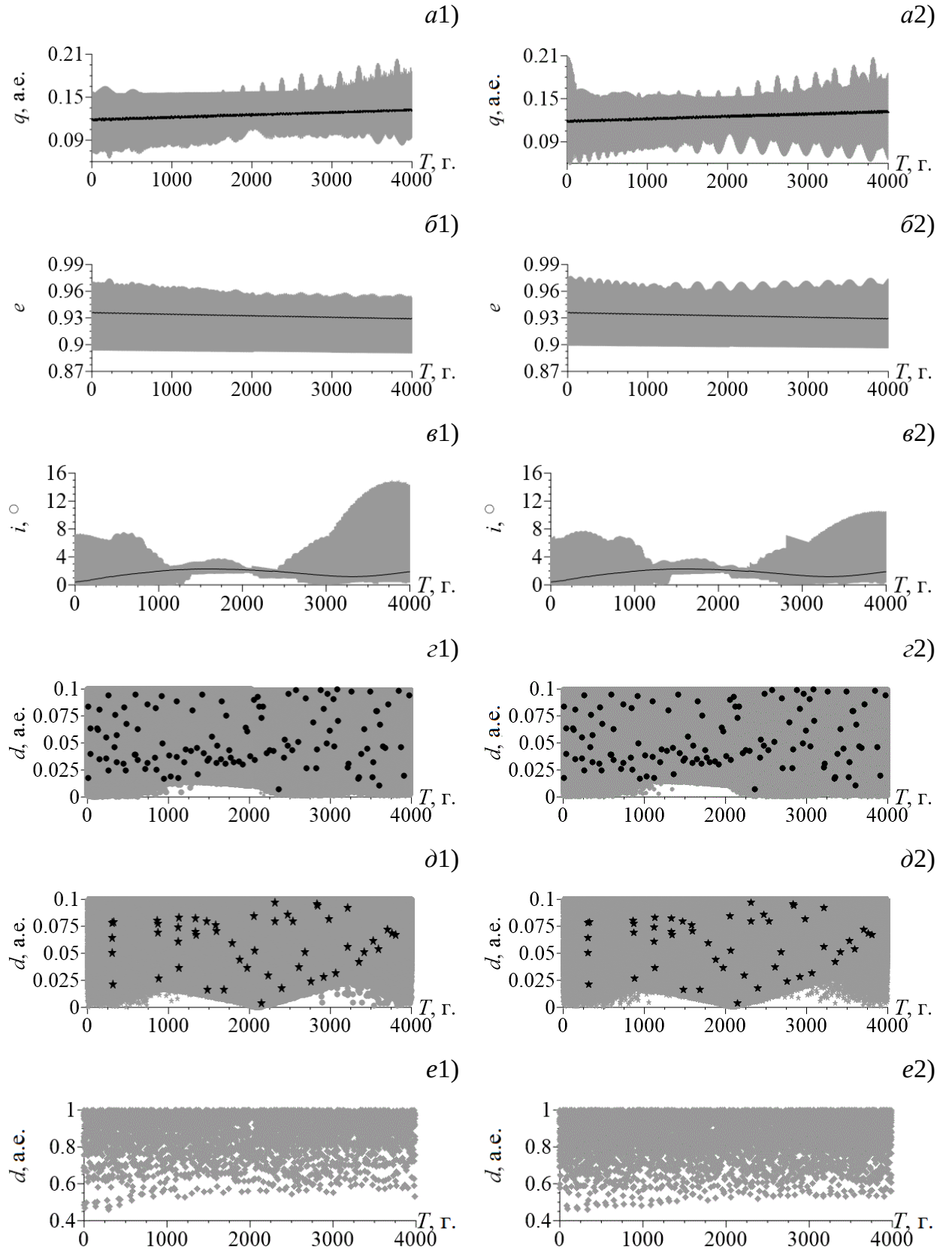


Рисунок 5.29 — Вероятностная орбитальная эволюция астероида 2015 КО120

Наиболее тесно астероид сближается с Землей и Марсом. Минимальное расстояние номинальной частицы до планет на рассматриваемом интервале времени

составляет 0.008 а.е. и 0.004 а.е. соответственно. Наиболее тесные сближения с планетами можно визуальнo отметить на графиках (z_1 , z_2) и (δ_1 , δ_2).

Что касается поведения облака неопределенности со временем, из рисунка 5.29 видно, что, несмотря на разрастание области, визуальнo можно отметить различие между движением тестовых частиц из линейного и нелинейного облака. Использование в данном случае линейного метода для построения облака вероятных значений начальных параметров астероида может привести к ложной оценке возможного поведения объекта, как в будущем, так и в прошлом.

Для наиболее адекватного прогноза движения астероида необходимым является использование нелинейного метода для формирования начального облака неопределенности.

5.6.3 Вероятностная орбитальная эволюция астероида 2008 MG1

Исследование показало, что эволюция начальных облаков неопределенности, построенных линейным и нелинейным методами, для астероида 2008 MG1 визуальнo не отличается. В данном случае начальные облака были сформированы в результате улучшения орбиты астероида по 39 наблюдениям, взятым с сайта Центра малых планет (<https://minorplanetcenter.net/>). Отображение начальных облаков во времени выполнялось на интервале (800, 3600) лет. В подразделе 4.6.1 данной работы приводятся результаты улучшения орбиты астероида с добавлением шести наблюдений, полученных нами на Терскольской обсерватории с 28.06.2022 по 07.07.2022. Показано, что добавление терскольских наблюдений позволяет в полтора раза уменьшить объем эллипсоида ошибок. Для того, чтобы оценить влияние этих наблюдений на вероятностную эволюцию астероида, по результатам улучшения его орбиты с их учетом было сформировано облако вероятных значений начальных параметров линейным методом (10000 виртуальных частиц) и отображено во времени на том же интервале, что и при работе с группой наблюдений с сайта MPC. На рисунке 5.30 представлены результаты построения вероятностной орбитальной эволюции астероида 2008 MG1 при обработке наблюдений только с сайта MPC (графики слева) и с добавлением наблюдений, полученных нами на пике Терскол (графики справа). Эволюция номинальной орбиты отображена черным цветом, 10000 тестовых частиц – серым. В качестве

примера на рисунке 5.30 изображены: эволюция перигелийного расстояния q ($a1$, $a2$), эксцентриситета e ($b1$, $b2$), наклона плоскости орбиты астероида к плоскости эклиптики i ($v1$, $v2$) и сближения с Землей ($z1$, $z2$) и Венерой ($d1$, $d2$).

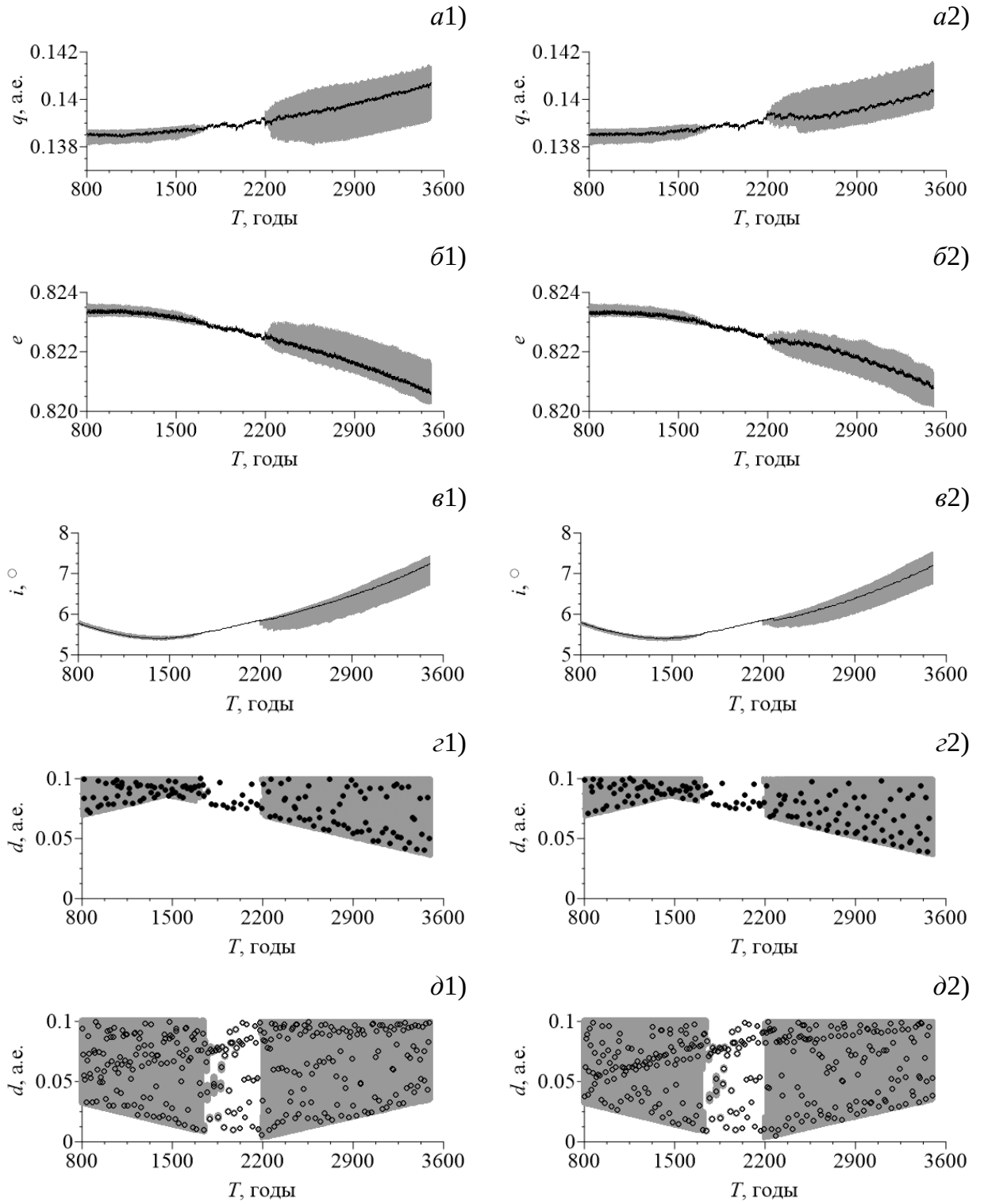


Рисунок 5.30 — Вероятностная орбитальная эволюция астероида 2008 MG1

Из рисунка 5.30 видно, что эволюция номинальной орбиты, полученной с разными группами наблюдений визуально различима, но эти различия несущественно отражаются на поведении кеплеровских элементов орбиты астероида и на расстоянии до планет. В обоих случаях наиболее тесно объект сближается с Венерой, подходя к планете на минимальное расстояние порядка 0.005 а.е. (графики δ_1 , δ_2 рисунка 5.30). При интегрировании в будущее размер вероятностной области справа (с добавлением терскольских наблюдений) растет медленнее, но точность интегрирования номинальной орбиты на конце интервала не отличается от таковой с набором наблюдений с МРС. При интегрировании в прошлое виртуальные частицы ведут себя аналогичным образом, в то время как для номинальной частицы при учете терскольских наблюдений точность интегрирования на рассматриваемом интервале выше на 3 порядка. Таким образом, с расширенным составом наблюдений появляется возможность рассмотреть динамику астероида на более длительном интервале времени.

5.6.4 Оценка влияния эффекта Ярковского на вероятностную орбитальную эволюцию ряда астероидов

Оценка влияния эффекта Ярковского на динамику астероидов осуществлялась путем сравнения результатов исследования при модели сил с учетом возмущений от больших планет, Луны, релятивистских эффектов от Солнца и сжатия Солнца с включенным возмущением от эффекта Ярковского и без него. При этом коэффициент A_2 для учета эффекта определялся из условия минимума среднеквадратической ошибки представления наблюдений путем включения A_2 в число оцениваемых параметров при решении задачи наименьших квадратов. В процессе исследования динамики астероидов построена эволюция орбитальных элементов и выявлены такие особенности движения, как сближения с большими планетами, орбитальные резонансы и проявления хаотичности.

В таблице 5.24 приведены данные о наблюдениях, результаты улучшения орбит астероидов и используемые при исследовании коэффициенты A_2 . Здесь N и ΔT – число и интервал используемых наблюдений, σ – среднеквадратическая ошибка представления наблюдений; $\sigma(x_0)$, $\sigma(v_0)$ – среднеквадратическая ошибка МНК-оценок векторов положения и скорости астероида, соответственно.

Из таблицы 5.24 видно, что учет эффекта Ярковского приводит к уменьшению среднеквадратической ошибки представления наблюдений σ и среднеквадратической ошибки МНК-оценок векторов положения и скорости астероида $\sigma(x_0)$.

Таблица 5.24 — Данные о наблюдениях и результатах улучшения орбит некоторых астероидов с малыми перигелийными расстояниями

Астероид	N	ΔT , сут.	A_2 , а.е./сут. ²	σ , "	$\sigma(x_0)$, а.е.	$\sigma(v_0)$, а.е./сут
(3200) Phaethon	5629	13276	0	0.4864	$7.243 \cdot 10^{-8}$	$1.524 \cdot 10^{-10}$
			$-3.62 \cdot 10^{-15}$	0.4860	$7.238 \cdot 10^{-8}$	$1.523 \cdot 10^{-10}$
(137924) 2000 BD19	731	8771	0	0.527	$2.452 \cdot 10^{-7}$	$1.604 \cdot 10^{-8}$
			$4.90 \cdot 10^{-14}$	0.524	$2.440 \cdot 10^{-7}$	$1.595 \cdot 10^{-8}$
(504181) 2006 TC	57	4043	0	0.282	$5.610 \cdot 10^{-7}$	$1.698 \cdot 10^{-9}$
			$5.97 \cdot 10^{-13}$	0.270	$5.379 \cdot 10^{-7}$	$1.628 \cdot 10^{-9}$
2007 PR10	53	4020	0	0.388	$7.554 \cdot 10^{-6}$	$2.226 \cdot 10^{-8}$
			$-3.87 \cdot 10^{-13}$	0.374	$7.280 \cdot 10^{-6}$	$2.145 \cdot 10^{-8}$

В качестве примера на рисунке 5.31 представлена проекция орбиты астероида (504181) 2006 TC в неподвижной гелиоцентрической системе координат как на плоскость эклиптики (а), так и на плоскость, перпендикулярную плоскости эклиптики (б). Из рисунка 5.31б видно, что орбита АСЗ имеет такое наклонение, что сближения астероида с большими планетами могут происходить лишь в окрестности узлов.

С помощью программного комплекса ИДА построена вероятностная орбитальная эволюция данного астероида на интервале времени $(-5000, 4000)$ лет и выявлены все особенности его движения. Обнаружены сближения астероида со всеми планетами внутренней группы (Меркурий, Венера, Земля, Марс) и получена оценка хаотичности орбиты с помощью индикатора OMEGNO. Исследование показало, что эволюция кеплеровских элементов орбиты 2006 TC, за исключением большой полуоси a , для двух моделей сил отличается незначительно.

На рисунке 5.32 представлены графики эволюции большой полуоси a ($a1$, $b1$), эксцентриситета e ($a2$, $b2$), наклона орбиты астероида к плоскости эклиптики i ($a3$, $b3$), сближения астероида с Меркурием ($a4$, $b4$), Венерой ($a5$, $b5$) и Марсом ($a6$, $b6$) и эволюция параметра хаотичности OMEGNO ($a7$). На графиках (a) показаны результаты без учета эффекта Ярковского, а на графиках (b) – с его учетом. Из рисунка 5.32 можно заметить, что эффект Ярковского оказывает влияние на эволюцию большой полуоси, что, по-видимому, приводит к разному количеству и качеству сближений астероида с планетами. Например, для номинальной орбиты без учета ЭЯ 2006 ТС испытывает 135 сближений с Меркурием, самое тесное сближение произойдет в 3152 году (0.002 а.е.). В тоже время с учетом ЭЯ астероид испытывает 128 сближений, а самое тесное из них произойдет в 2651 году (0.012 а.е.). Таким образом, без учета эффекта астероид подходит ближе к Меркурию, нежели с его учетом. Обратная ситуация обстоит со сближениями с другими планетами. С учетом ЭЯ астероид испытывает больше сближений с Марсом и Венерой, и ближе подходит к Марсу и Земле. Эволюция 9984 тестовых частиц из начальной доверительной области показывает, что область увеличивается после группы тесных и многократных сближений с Меркурием. Причем, без учета ЭЯ из-за более тесных сближений с планетой доверительная область растет сильнее, что особенно заметно по эволюции большой полуоси.

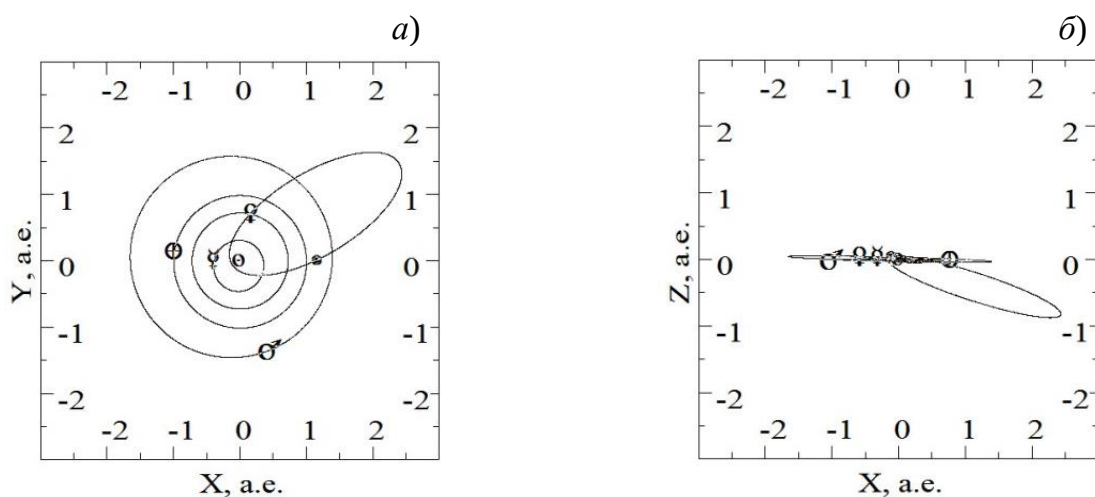


Рисунок 5.31 — Проекция орбиты астероида (504181) 2006 ТС в неподвижной гелиоцентрической системе координат: (a) – на плоскость эклиптики, (b) – на плоскость, перпендикулярную плоскости эклиптики

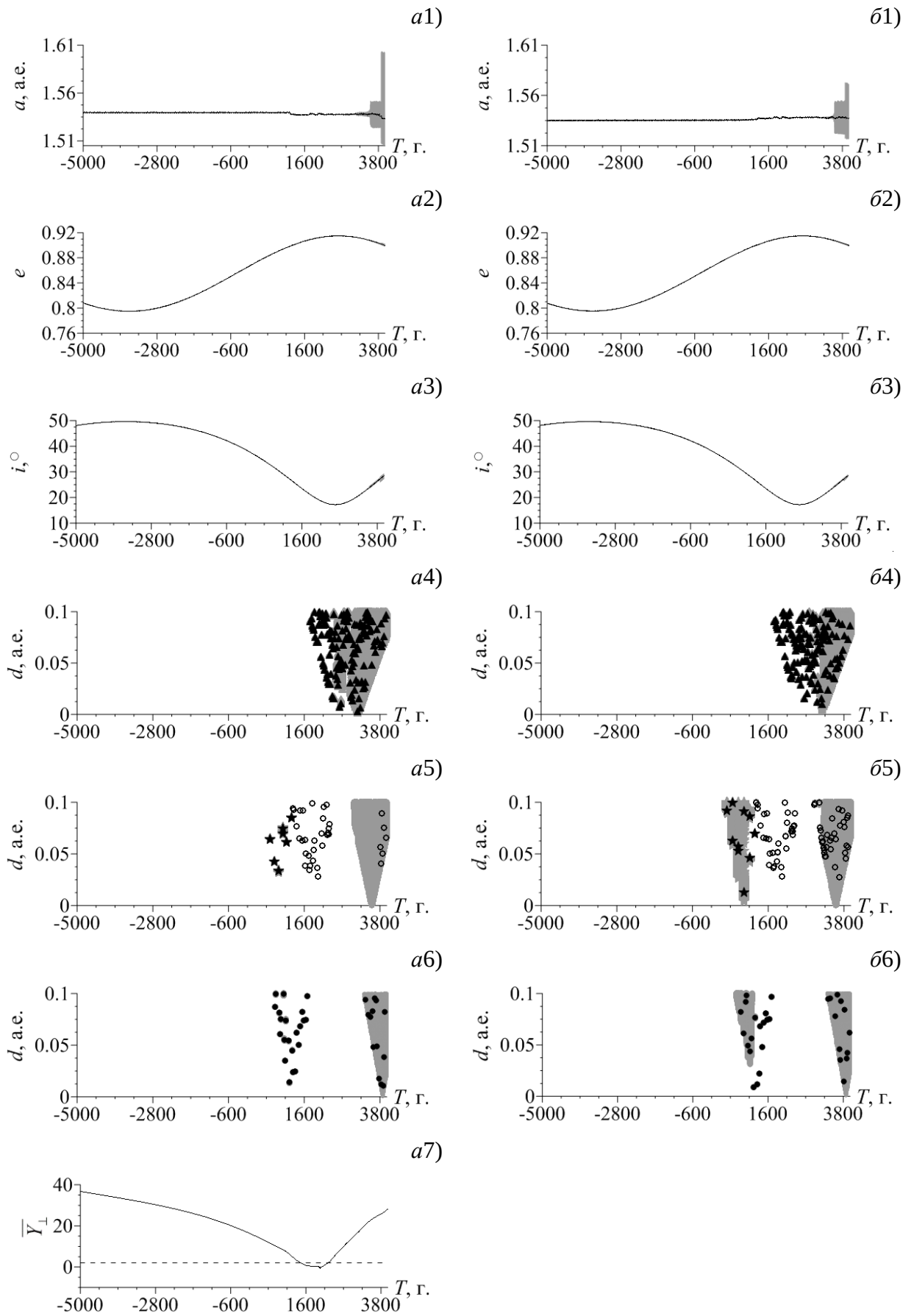


Рисунок 5.32 — Вероятностная орбитальная эволюция астероида 2006 ТС

Эволюция параметра OMEGNO (рисунок 5.32a7) показывает, что на рассмотренном интервале времени движение можно считать регулярным лишь с 1440 года по 2270 годы, когда параметр не превышает порогового значения, равного двум. В остальное время OMEGNO растет в среднем линейно и принимает значения больше двух, что говорит о проявлении хаотичности у орбиты астероида. Отметим, что интегрирование осуществлялось от начальной эпохи в прошлое и будущее. Для данного объекта поведение параметра OMEGNO при учете ЭЯ отличается незначительно, поэтому данный график на рисунке 5.32 отсутствует.

Так как резонансная динамика играет большую роль в орбитальной эволюции астероидов, на следующем этапе исследования были выявлены все апсидально-нодальные резонансы до 6-го порядка включительно. Рассмотрено 20 резонансных соотношений и соответствующих им резонансных аргументов, представленных в таблице 2.1, построена эволюция резонансных характеристик на рассматриваемом интервале времени и проанализирован характер их поведения.

На рисунке 5.33 приведены примеры поведения резонансных характеристик для соотношений $\dot{\psi}_1 = (\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_j) + \dot{\omega} - \dot{\omega}'_j$ (устойчивый резонанс) и $\dot{\psi}_8 = (\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_j) - 2\dot{\omega} - 2\dot{\omega}'_j$ (резонанс отсутствует).

Для каждого резонанса приведены эволюция резонансного соотношения и аргумента ($a1, a2$), а также фазовый портрет ($b1, b2$). Под фазовым портретом будем понимать изображение эволюции в координатах $e \cos \psi$ и $e \sin \psi$ (Мюррей, Дермотт, 2009). Если кривая охватывает начало координат, то наблюдается циркуляция, иное поведение позволяет говорить о наличии либрации.

Анализ полученных результатов показал, что для всех планет резонансные характеристики ведут себя схожим образом. Для шести из рассмотренных резонансов (соотношения 2, 4, 6, 8, 10, 12) наблюдается циркуляция резонансного аргумента, то есть резонанс отсутствует. Для остальных 14-ти имеет место либрационное поведение аргумента. Кроме того, учет ЭЯ практически не влияет на резонансную динамику.

Астероид 2007 PR10 относится к классу AC3 с орбитой типа Аполлона и имеет перигелийное расстояние q , равное 0.133 а.е. Вероятностная орбитальная эволюция астероида с учетом эффекта Ярковского и без него была построена на интервале

времени (–6000, 5500) лет. Вероятностная область начальных параметров астероида была сформирована с помощью 10000 тестовых частиц.

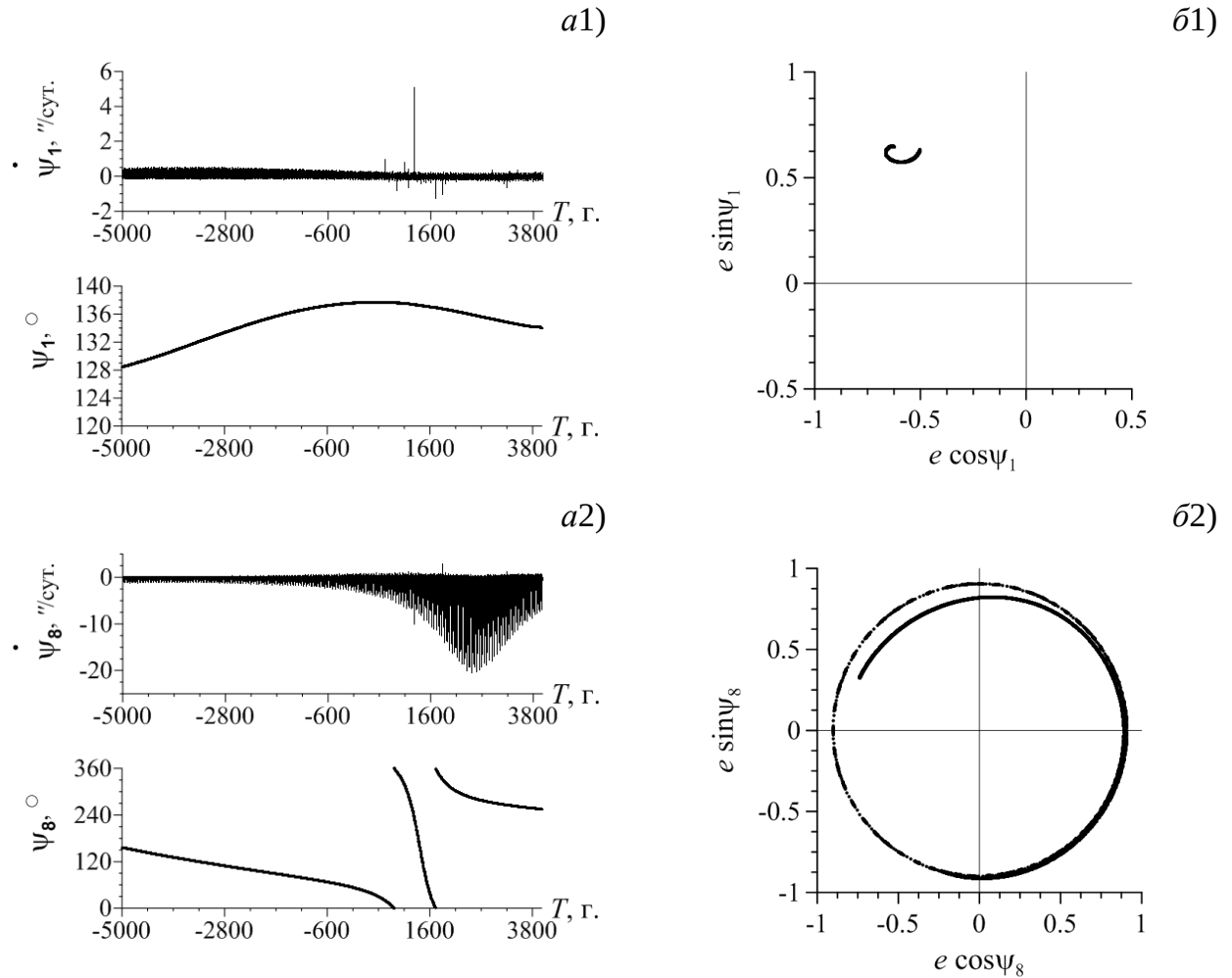


Рисунок 5.33 — Примеры поведения вековых резонансных характеристик для астероида (504181) 2006 TC

Выявлены сближения астероида со всеми планетами внутренней группы (Меркурий, Венера, Земля, Марс) и получена оценка хаотичности орбиты с помощью индикатора OMEGNO. На рисунке 5.34 представлены графики эволюции большой полуоси a , сближения астероида с большими планетами и эволюция параметра OMEGNO без учета эффекта Ярковского и с его учетом. На рисунке 5.34 левая панель соответствует результатам без эффекта Ярковского, правая – с эффектом.

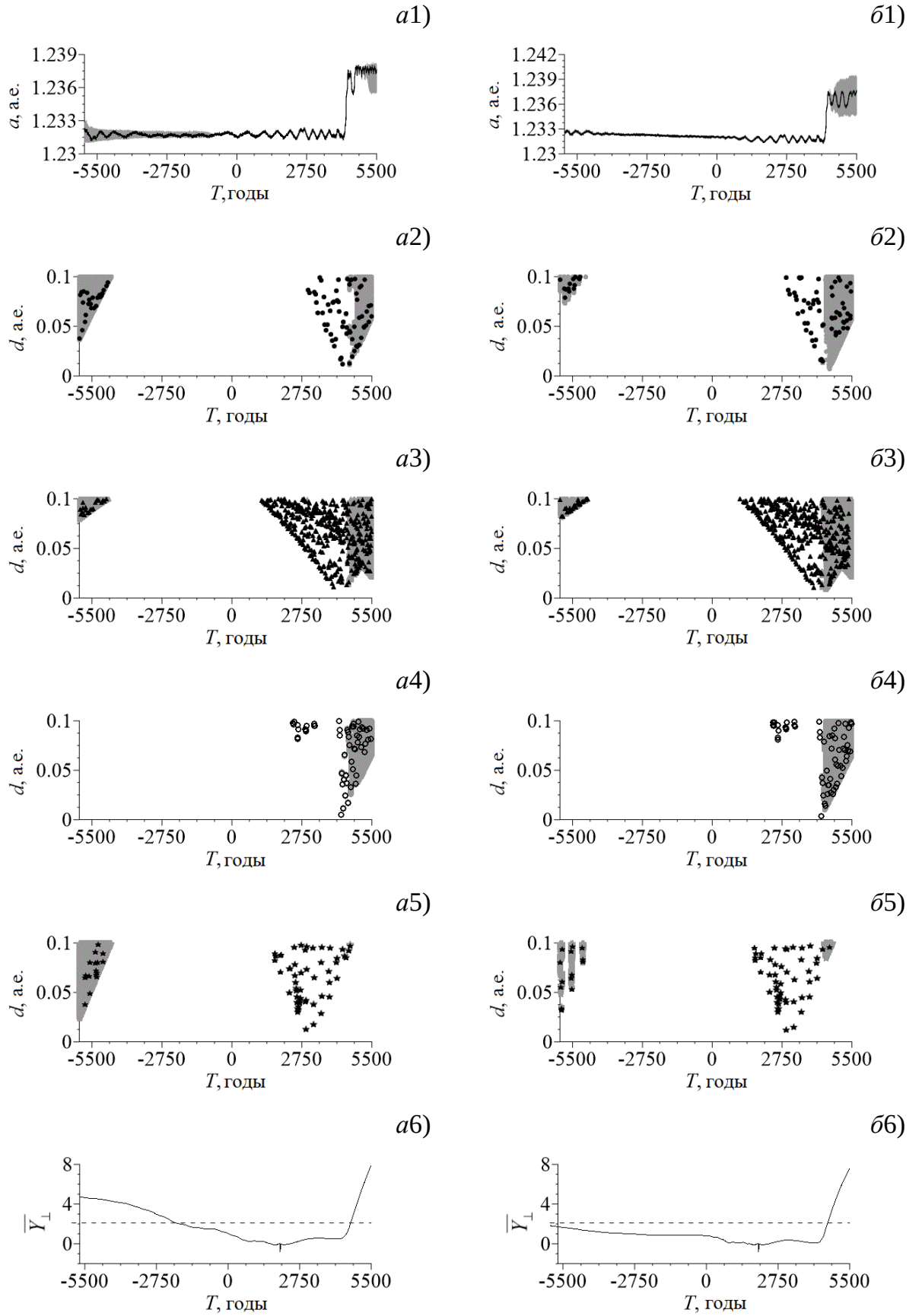


Рисунок 5.34 — Вероятностная орбитальная эволюция астероида 2007 PR10

Исследование показало, что эволюция кеплеровских элементов орбиты 2007 PR10, за исключением большой полуоси a , для двух моделей сил отличается незначительно. Как видно из рисунков 5.34а1 и 5.34б1, учет эффекта приводит к заметным изменениям большой полуоси, что, по-видимому, влияет на число сближений и расстояние до планет в момент сближений. При интегрировании в будущее с учетом эффекта Ярковского для номинальной частицы точность оказывается существенно ниже, а вероятностная область начинает расти раньше таковой без учета эффекта. Из рисунка 5.34б4 видно, что астероид теснее сближается с Венерой, после чего область начинает расти. При интегрировании в прошлое наблюдается противоположная картина. Без учета эффекта вероятностная область начинает расти раньше.

Эволюция параметра OMEGNO (рисунки 5.34а6, 5.34б6) для двух моделей сил близка при интегрировании в будущее и значительно отличается при интегрировании в прошлое. В будущем в обоих случаях астероид испытывает многократные и тесные сближения с Меркурием, Венерой, Землей и Марсом. После группы наиболее тесных сближений с планетами параметр OMEGNO начинает расти, в среднем, линейно, то есть у орбиты астероида проявляются признаки хаотичности. При интегрировании в прошлое без учета эффекта астероид испытывает больше сближений с Землей и Марсом и теснее сближения с Землей. До 1960 года у орбиты астероида проявляются признаки хаотичности. С учетом эффекта Ярковского движение астероида в прошлом остается регулярным. Стоит отметить, что начало роста облака неопределенности коррелирует с возрастанием параметра OMEGNO, то есть с проявлением хаотичности в движении астероида.

Вероятностная орбитальная эволюция астероида (3200) Phaethon для двух моделей сил (с учетом эффекта Ярковского и без учета) построена на интервале времени (-2000, 9000) лет. Исследование показало, что астероид испытывает тесные и многократные сближения с планетами земной группы (Меркурием, Венерой, Землей и Марсом), которые, по-видимому, привели к резкому увеличению облака неопределенности при интегрировании в прошлое. По этой причине на рисунках 5.35, 5.36 все графики приведены на укороченном интервале времени (-1600, 9000) лет. На всех рисунках левые панели также соответствуют модели сил без учета эффекта Ярковского, правые – с учетом эффекта.

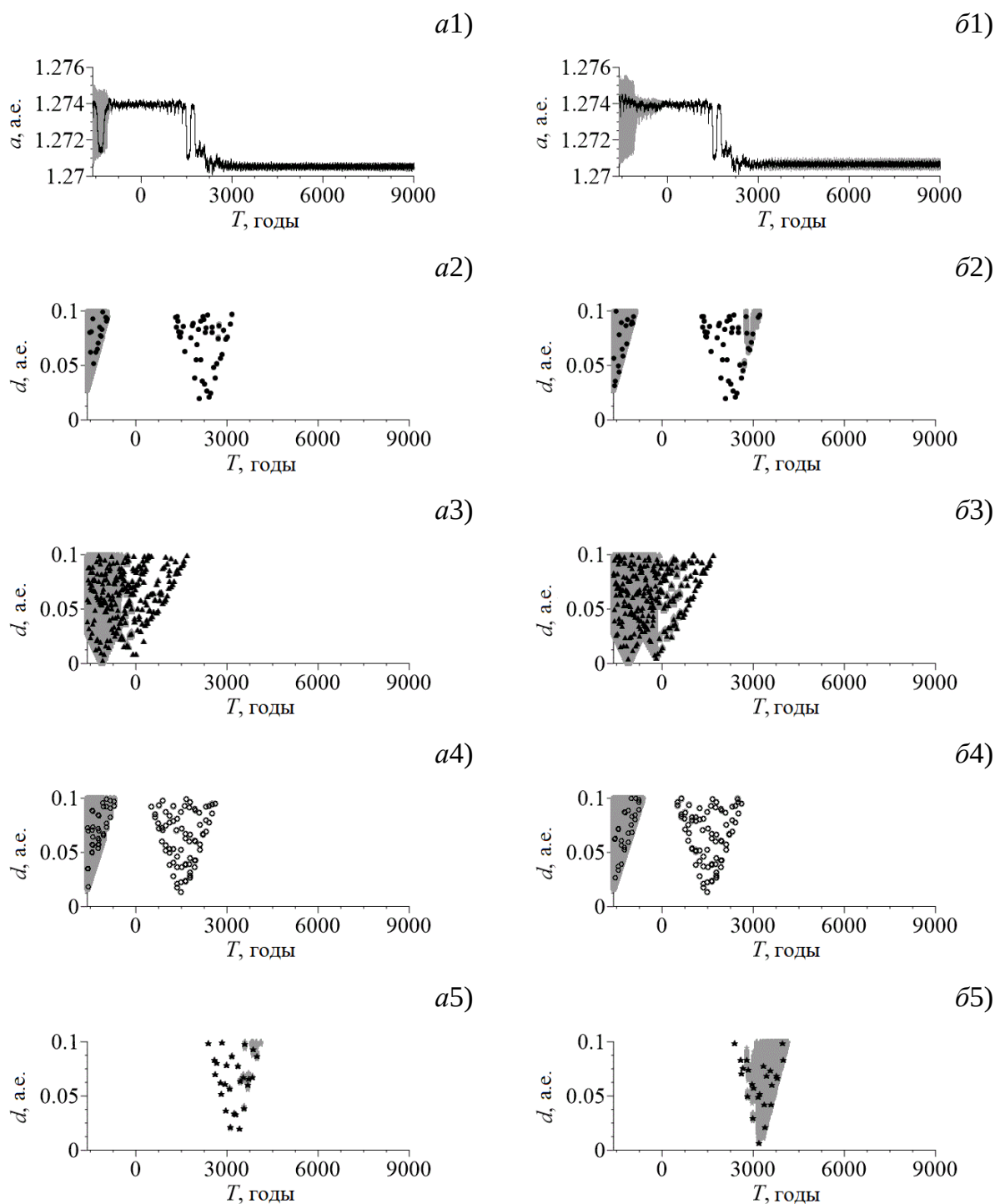


Рисунок 5.35 — Вероятностная орбитальная эволюция астероида (3200) Phaethon

На рисунке 5.35 представлены графики эволюции большой полуоси ($a1$, $b1$), сближения астероида с Меркурием ($a2$, $b2$), с Венерой ($a3$, $b3$), Землей ($a4$, $b4$) и Марсом ($a5$, $b5$). Из рисунка видно, что эффект Ярковского оказывает значительное влияние на эволюцию большой полуоси a , что существенно отражается на числе сближений и расстоянии до планет. При интегрировании в прошлое в обоих случаях

астероид многократно сближается со всеми планетами внутренней группы, поэтому облако неопределенности начинает быстро расти. При интегрировании в будущее с учетом эффекта Ярковского (3200) Phaethon ближе подходит к Марсу, что приводит к росту неопределенности (рисунок 5.35б5).

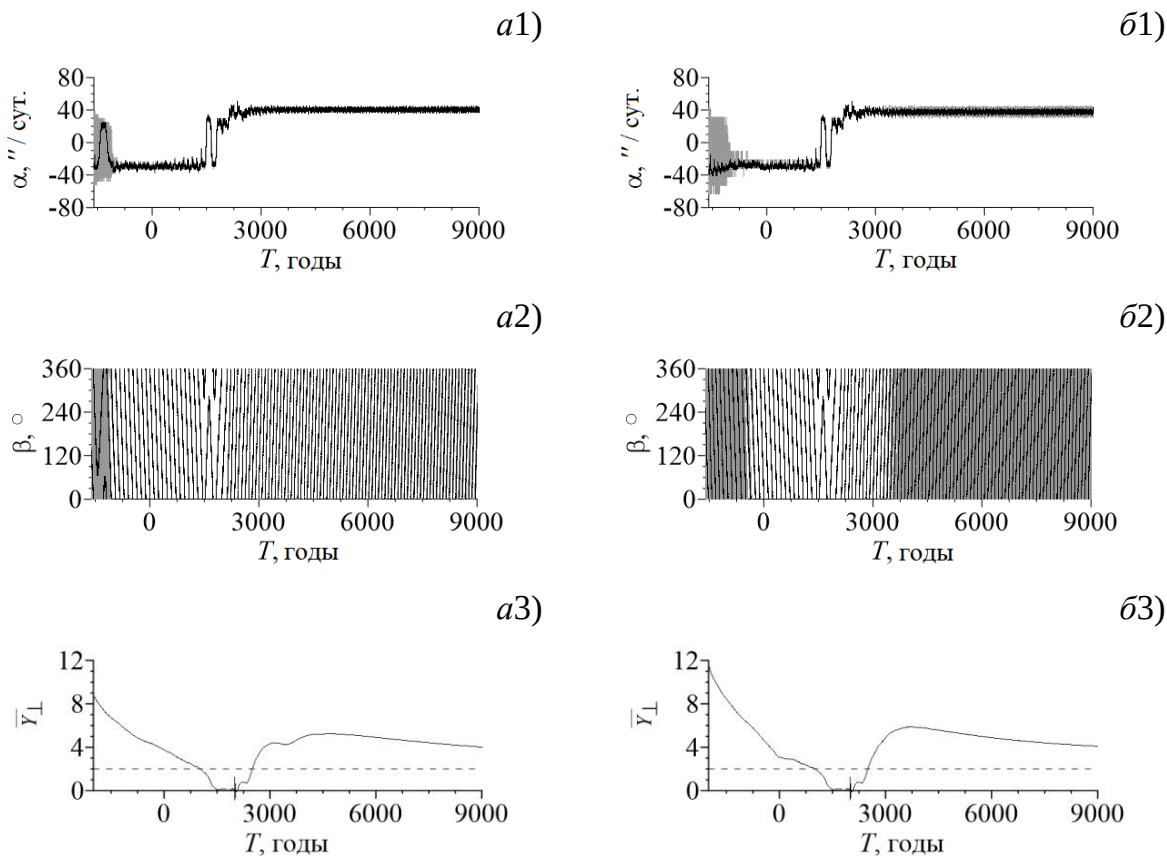


Рисунок 5.36 — Вероятностная эволюция характеристик орбитального резонанса и параметр OMEGNO для астероида (3200) Phaethon

Поиск орбитальных резонансов в движении астероида показал, что (3200) Phaethon движется в окрестности резонанса 3/7 с Венерой. Вероятностная эволюция резонансных характеристик α и β , а также эволюция параметра хаотичности OMEGNO представлены на рисунке 5.36.

С учетом эффекта Ярковского и без него астероид проходит через точную соизмеримость ($\alpha = 0$) несколько раз на интервале времени (1400, 1800) лет (рисунки 5.36а1, 5.36б1). Но в самом начале интервала интегрирования в поведении резонансных характеристик наблюдаются существенные различия. Без учета эффекта Ярковского астероид проходит через точный резонанс с Венерой до -1200 лет, с учетом эффекта в этот период резонанс с Венерой отсутствует

Эволюция параметра OMEGNO (рисунки 5.36*а*3, 5.36*б*3) показывает, что движение предсказуемо на интервале (1000, 2500) лет. В данном случае эволюция параметра OMEGNO практически не зависит от модели сил, что для астероида (3200) Phaethon объясняется большим влиянием тесных и многократных сближений с планетами на поведение параметра хаотичности. При интегрировании в прошлое после 1000 года под влиянием тесных сближений и неустойчивого резонанса вероятностная область растет экспоненциально. При интегрировании в будущее наблюдается иная картина: сближения с Землей и Марсом приводят к линейному росту параметра OMEGNO, но затем в отсутствие сближения параметр выходит практически на постоянное значение.

Астероид (137924) 2000 BD19 движется в орбитальном резонансе $3/4$ с Венерой, и такое взаимодействие с планетой, безусловно, играет большую роль в орбитальной эволюции АСЗ. На рисунке 5.37 представлена траектория движения астероида на интервале времени около 1000 лет в неподвижной гелиоцентрической системе координат (рисунок 5.37*а*) и в системе, вращающейся с орбитальной угловой скоростью Венеры (рисунок 5.37*б*). Из рисунка 5.37*б* видно, что астероид движется в устойчивом резонансе $3/4$ с Венерой и избегает встреч с планетой.

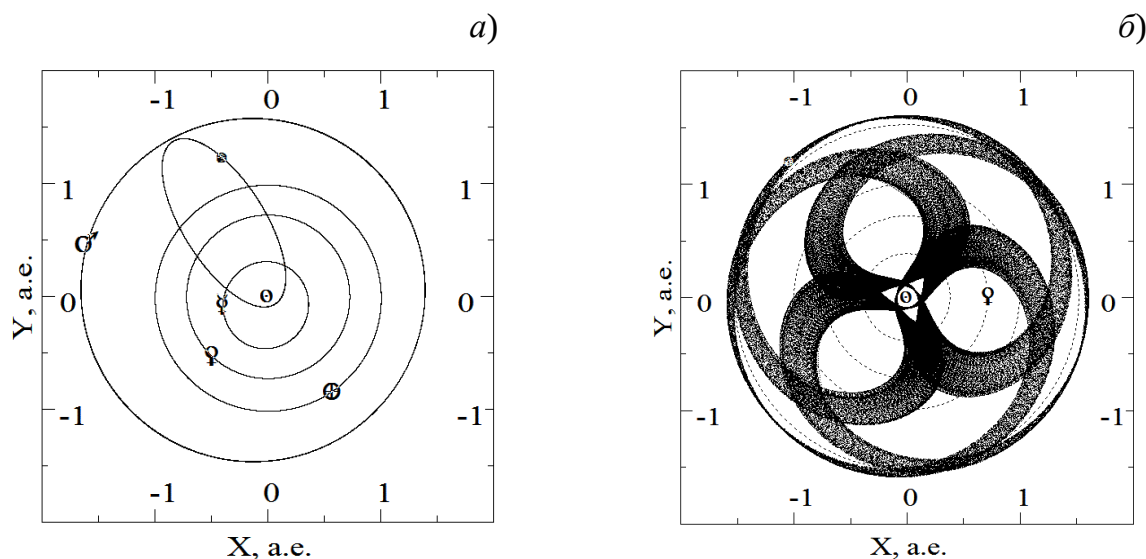


Рисунок 5.37 — Проекция орбиты астероида (137924) 2000 BD19 на плоскость эклиптики в гелиоцентрической системе координат: (а) — неподвижной, (б) — вращающейся с орбитальной угловой скоростью Венеры

Для рассматриваемого астероида была построена орбитальная эволюция номинальной обиты и 10000 тестовых частиц на интервале времени (–7500, 5000) лет. В процессе исследования орбитальной эволюции были выявлены такие особенности движения астероида, как тесные и многократные сближения с Землей и Меркурием, орбитальный резонанс $3/4$ с Венерой, а также получена оценка хаотичности орбиты AC3 с помощью индикатора OMEGNO.

При исследовании номинальной орбиты без учета эффекта Ярковского и с ним было обнаружено небольшое расхождение в эволюции большой полуоси на концах интервала интегрирования. При этом результаты построения вероятностной орбитальной эволюции астероида показали, что на концах интервала интегрирования тестовые частицы расходятся, а облако неопределенности значительно увеличивается. Дело в том, что в эти временные промежутки астероид испытывает тесные и многократные сближения с Землей, а до –7300 года при интегрировании в прошлое и с 4200 года при интегрировании в будущее он несколько раз проходит через сферу Хилла Земли (0.01 а.е.). Такие сближения и приводят к значительному увеличению вероятностной области движения астероида.

На рисунке 5.38 для двух моделей сил представлена вероятностная эволюция большой полуоси и сближения астероида с Землей. На рисунках 5.38a1 и 5.38b1 приведена эволюция большой полуоси для номинальной орбиты и для 10000 тестовых частиц соответственно. На рисунках 5.38a3 и 5.38b3 приведены графики сближений астероида и тестовых частиц с Землей на рассматриваемом интервале времени. Эволюция номинальной орбиты изображена черным цветом, а эволюция тестовых частиц – серым.

Из рисунка 5.38 видно, что такое различие в эволюции большой полуоси связано с резким ростом облака неопределенности. Увеличение облака не позволяет визуально оценить характер поведения элементов со временем, поэтому далее мы приводим результаты исследования вероятностной орбитальной эволюции на усеченном временном интервале (–7300, 4200) лет.

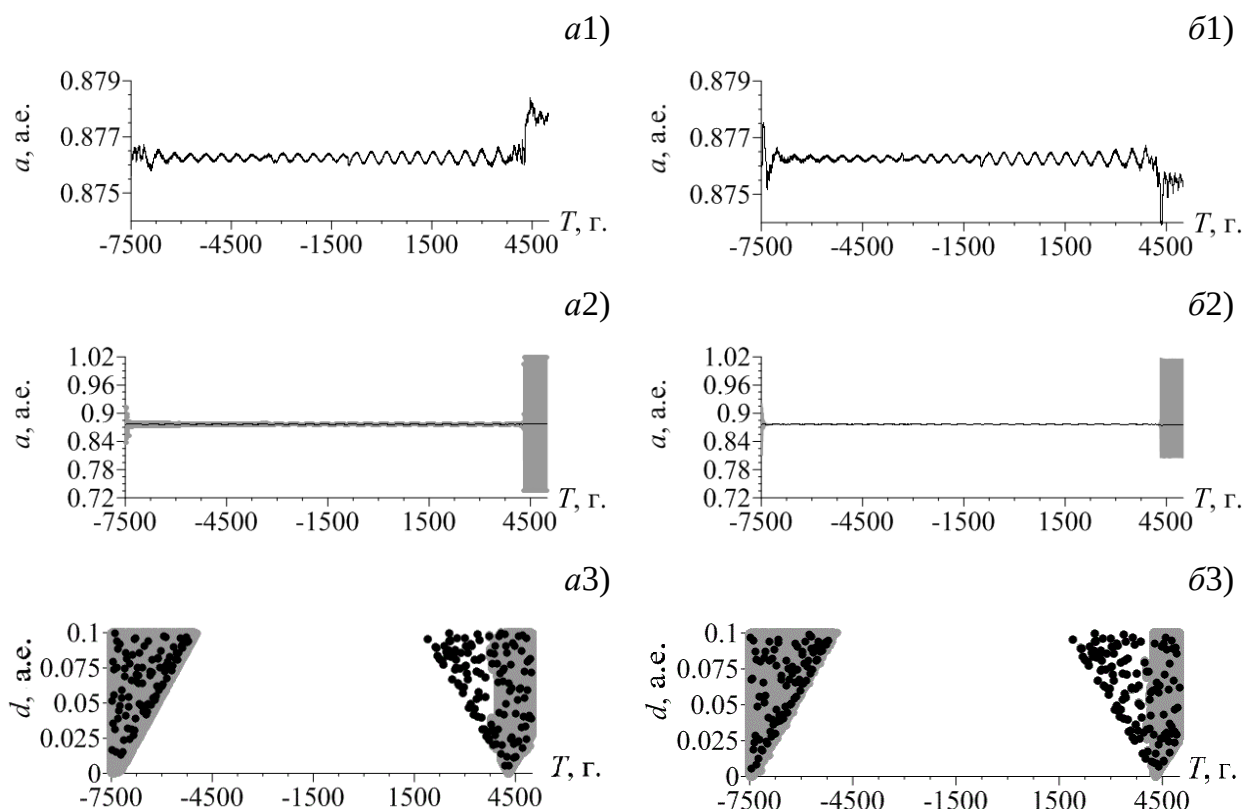


Рисунок 5.38 — Вероятностная орбитальная эволюция астероида (137924) 2000 BD19 на интервале времени $(-7500, 5000)$ лет

На рисунке 5.39 представлена вероятностная эволюция основных элементов орбиты астероида, характеризующих форму орбиты и ее расположение в пространстве, на интервале времени $(-7300, 4200)$ лет. Так как тесные и многократные сближения АСЗ с большими планетами могут значительно повлиять на эволюцию орбитальных элементов, на рисунках 5.38а6 и 5.38б6 приведены сближения астероида с Меркурием. Здесь также как и на предыдущем рисунке слева изображены графики при модели сил без учета эффекта Ярковского, а справа – с его учетом.

Из рисунка 5.39 видно, что эволюция всех орбитальных элементов для номинальной орбиты, кроме большой полуоси, совпадает без учета эффекта Ярковского и с его учетом. При этом визуальное сравнение облаков неопределенности позволяет сделать вывод о том, что облако без учета эффекта Ярковского значительно шире. Такое заключение становится очевидным при сравнении графиков эволюции большой полуоси 5.39а1 и 5.39б1. Разница в величине облака неопределенности вполне объяснима.

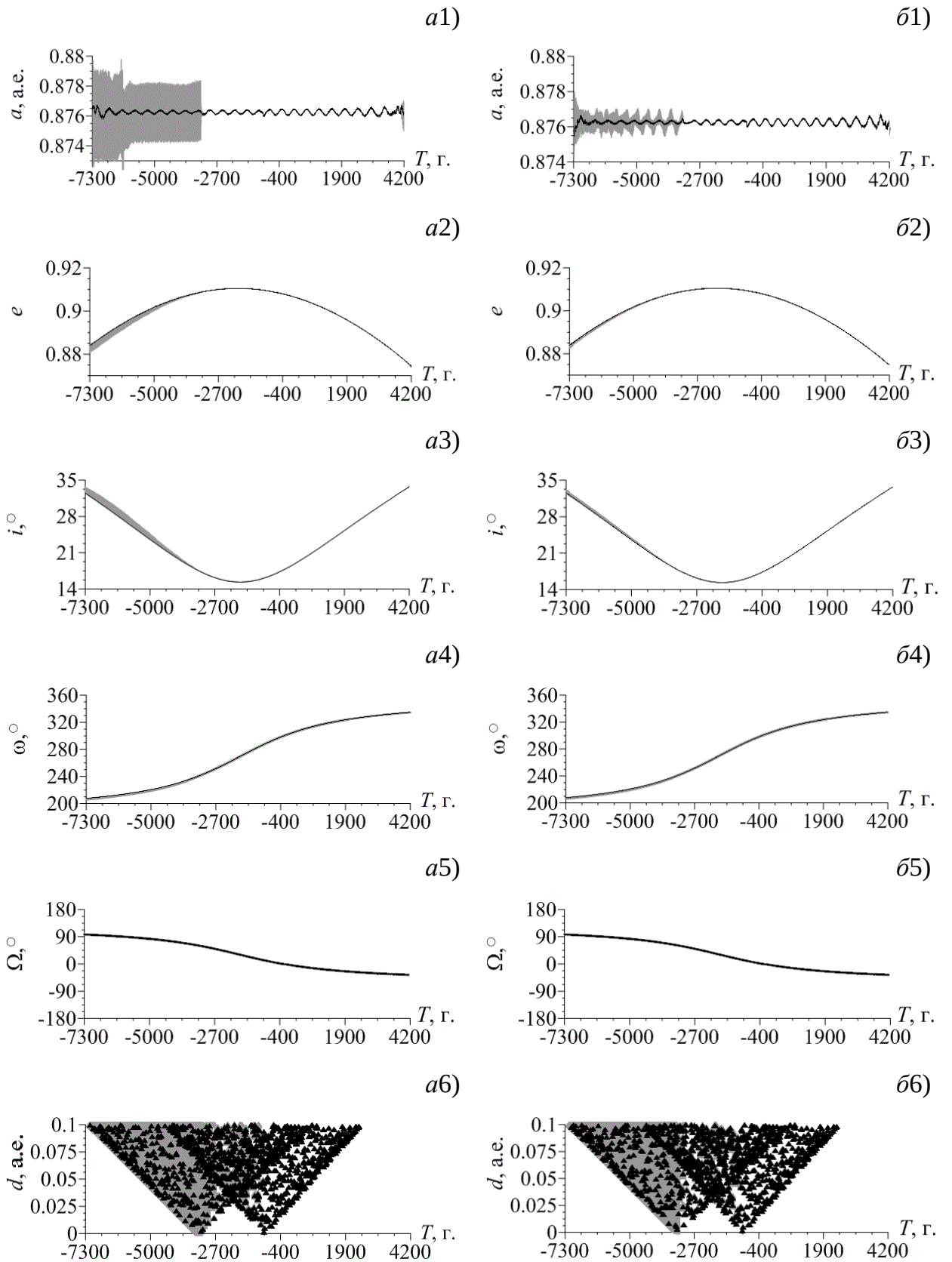


Рисунок 5.39 — Вероятностная орбитальная эволюция астероида
(137924) 2000 BD19 на интервале времени $(-7300, 4200)$ лет

Помимо сближений с Землей, астероид испытывает тесные и многократные сближения с Меркурием. Более того, на интервале времени $(-5000, -1500)$ лет без учета эффекта Ярковского тесных сближений для номинальной орбиты больше, нежели с учетом данного эффекта. Сравнивая графики 5.39а6 и 5.39б6 можно заметить, что буквально перед увеличением облака неопределенности и сразу после него концентрация сближений порядка 0.01 а.е. на рисунке 5.39а6 выше, чем на 5.39б6. Таким образом, можно отметить, что учет эффекта Ярковского для исследуемого астероида оказал влияние на величину сближений с Меркурием, при этом общая картина сближений кажется неизменной. Заметим, что изменение положения астероида, обусловленное воздействием эффекта Ярковского меньше неопределенности, вызванной ошибкой начальных данных.

Как уже отмечалось выше, одной из особенностей динамики астероида (137924) 2000 BD19 является движение в орбитальном резонансе $3/4$ с Венерой. Поэтому помимо эволюции орбитальных элементов, была построена эволюция характеристик орбитального резонанса и исследован характер их поведения.

Результаты исследования эволюции характеристик орбитального резонанса показали, что астероид находится в резонансе $3/4$ с Венерой на всем интервале интегрирования $(-7500, 5000)$ лет. Такое устойчивое резонансное взаимодействие астероида с планетой защищает его от сближений с Венерой. Эволюция параметра OMEGNO показала, что под действием тесных и многократных сближений с Землей и Меркурием у орбиты астероида проявляются признаки хаотичности до -1570 и после 3940 года. На интервале времени $(-1570, 3940)$ лет движение астероида можно считать устойчивым квазипериодическим, так как в это время параметр OMEGNO имеет значение меньше двух.

На рисунке 5.40 представлены графики эволюции резонансного аргумента (a_2, b_2) и резонансной щели (a_1, b_1) , а также эволюция индикатора хаотичности OMEGNO (a_3) на интервале времени $(-7300, 4200)$ лет. Параметр OMEGNO представлен лишь для одной модели сил, так как его эволюция полностью совпадает как при учете эффекта Ярковского, так и без него.

Поиск вековых резонансов для астероида (137924) 2000 BD19 показал следующие результаты. Для всех планет резонансные характеристики ведут себя подобным образом. Всего два резонанса из рассмотренного спектра отсутствуют.

Этим резонансам соответствуют соотношения $\dot{\psi}_8 = (\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_j) - 2\dot{\omega} - 2\dot{\omega}'_j$ и $\dot{\psi}_{10} = (\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_j) - 2\dot{\omega}$ из таблицы 2.1. Несмотря на то, что резонансные соотношения близки к нулю на рассматриваемом интервале времени, соответствующие им резонансные аргументы циркулируют, что позволяет нам сделать вывод об отсутствии резонансов.

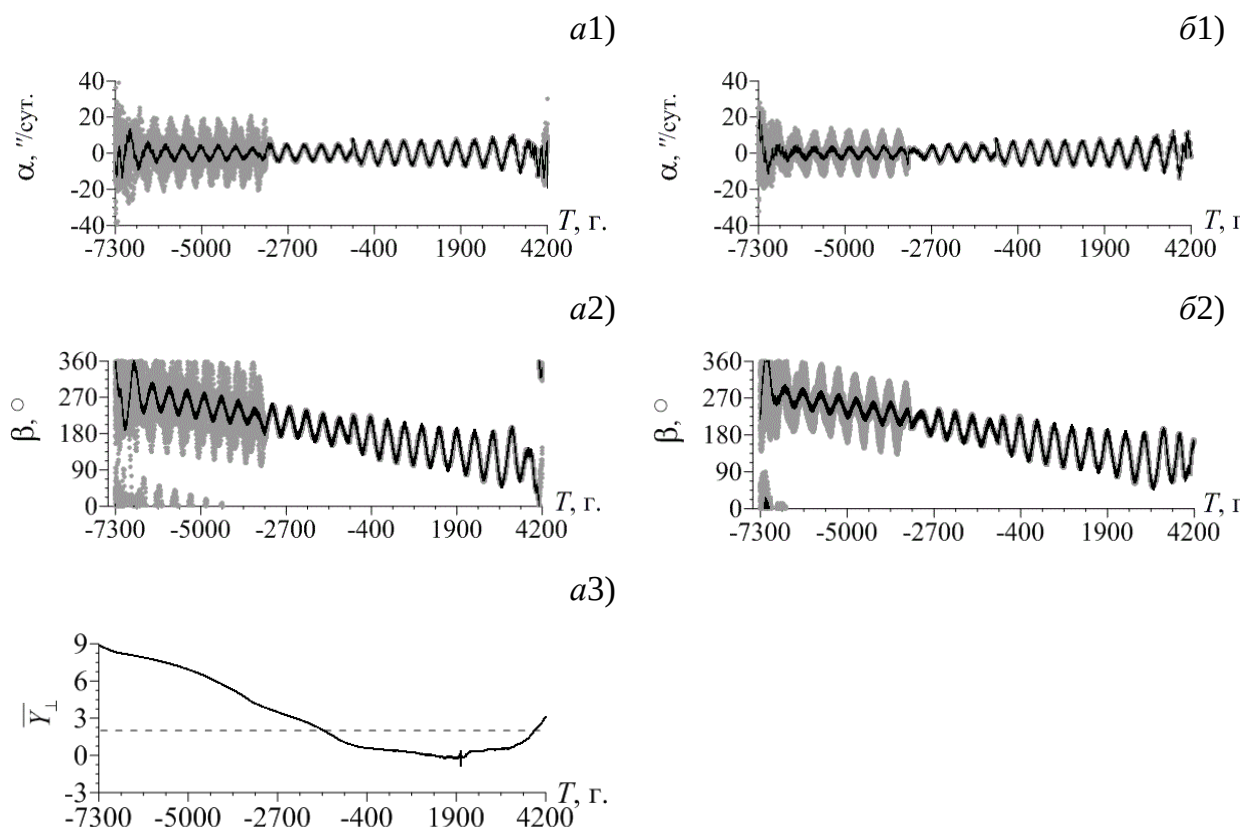


Рисунок 5.40 — Вероятностная эволюция резонансных характеристик и параметра OMEGNO астероида (137924) 2000 BD19

Остальные резонансы присутствуют и являются устойчивыми на рассматриваемом интервале времени. При этом для резонансов 1–3, 5, 7, 9, 11, 13–20 критический аргумент либрирует с небольшой амплитудой, а для резонансов 4, 6 и 12 аргумент колеблется с предельно большой амплитудой (достигает значения 180°). На такие резонансы, для которых аргумент имеет предельно большую амплитуду либраций, стоит обратить особое внимание, так как при возможном увеличении интервала интегрирования либрационное поведение может смениться

циркуляцией, то есть объект может выйти из резонанса даже при незначительном внешнем воздействии.

На рисунке 5.41 в качестве примера отсутствия резонанса приведены резонансные соотношения 8 и 10 и соответствующие им критические аргументы при взаимодействии с Меркурием. На рисунках 5.41a1 и 5.41a2 представлена эволюция резонансных соотношений 8 и 10 и соответствующих им критических аргументов. На рисунках 5.41б1 и 5.41б2 приведены фазовые портреты для критических аргументов.

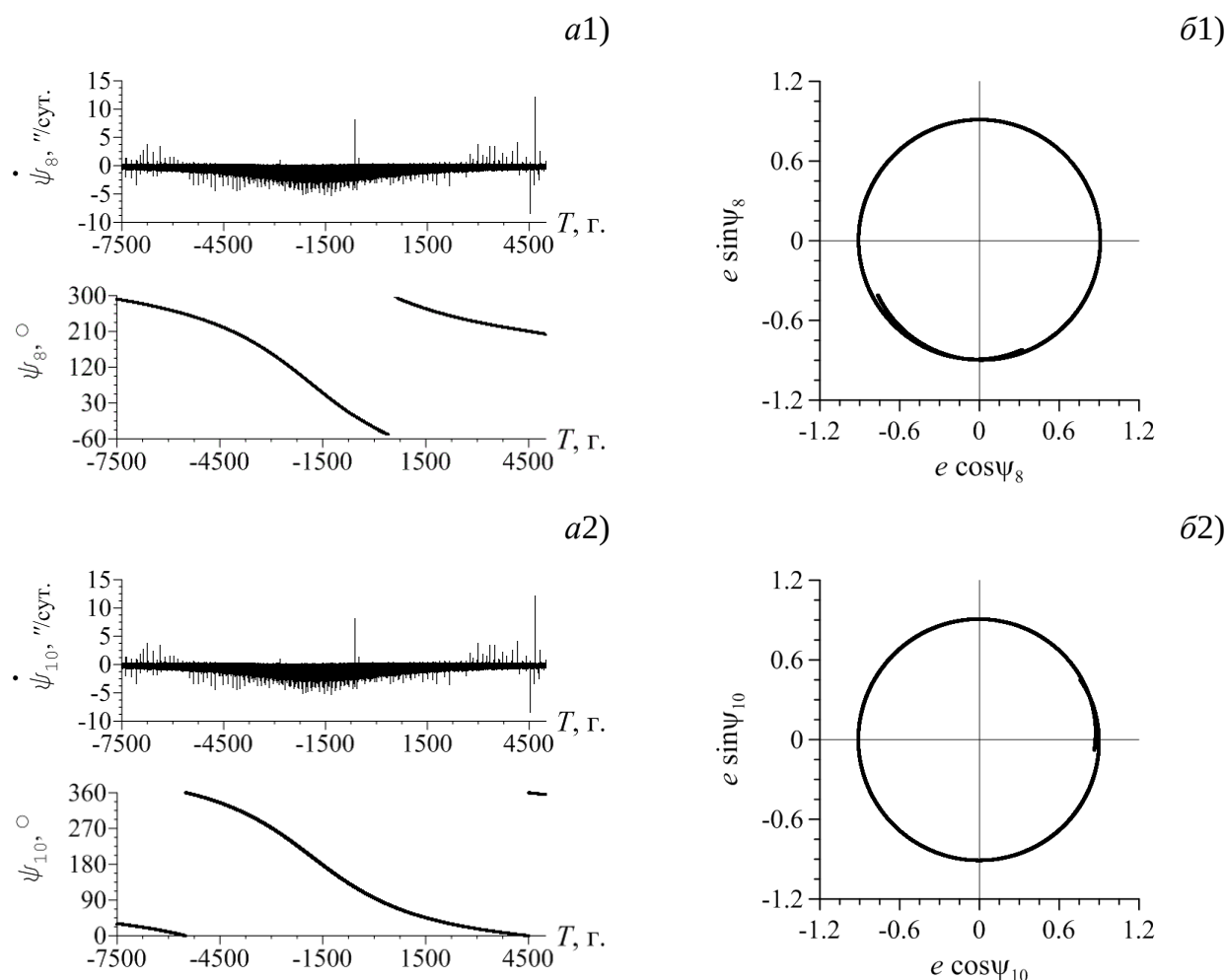


Рисунок 5.41 — Поведение резонансных характеристик для вековых резонансов 8 и 10 астероида (137924) 2000 BD19 с Меркурием

Из рисунка 5.41 видно, что критический аргумент изменяется в пределах 360° , при этом отсутствует либрация около определенного центра, а кривая на фазовых портретах замыкается и охватывает начало координат. Такое поведение позволяет

нам сделать вывод о циркуляции аргумента, и как следствие, отсутствии резонансов 8 и 10 с Меркурием.

На рисунках 5.42 и 5.43 приведены примеры поведения вековых резонансных характеристик при устойчивом резонансном взаимодействии АСЗ с планетами. На рисунке 5.42 приведены примеры устойчивых резонансов с Марсом для соотношений $\dot{\psi}_3 = (\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_j) + 2\dot{\omega} - 2\dot{\omega}'_j$ и $\dot{\psi}_{16} = (\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_j) + 2\dot{\omega}'_j$ из таблицы 2.1, для которых резонансный аргумент имеет небольшую амплитуду либраций. Здесь также на рисунках (а) приведена эволюция резонансного соотношения и соответствующего критического аргумента, а на рисунках (б) представлены фазовые портреты для аргументов.

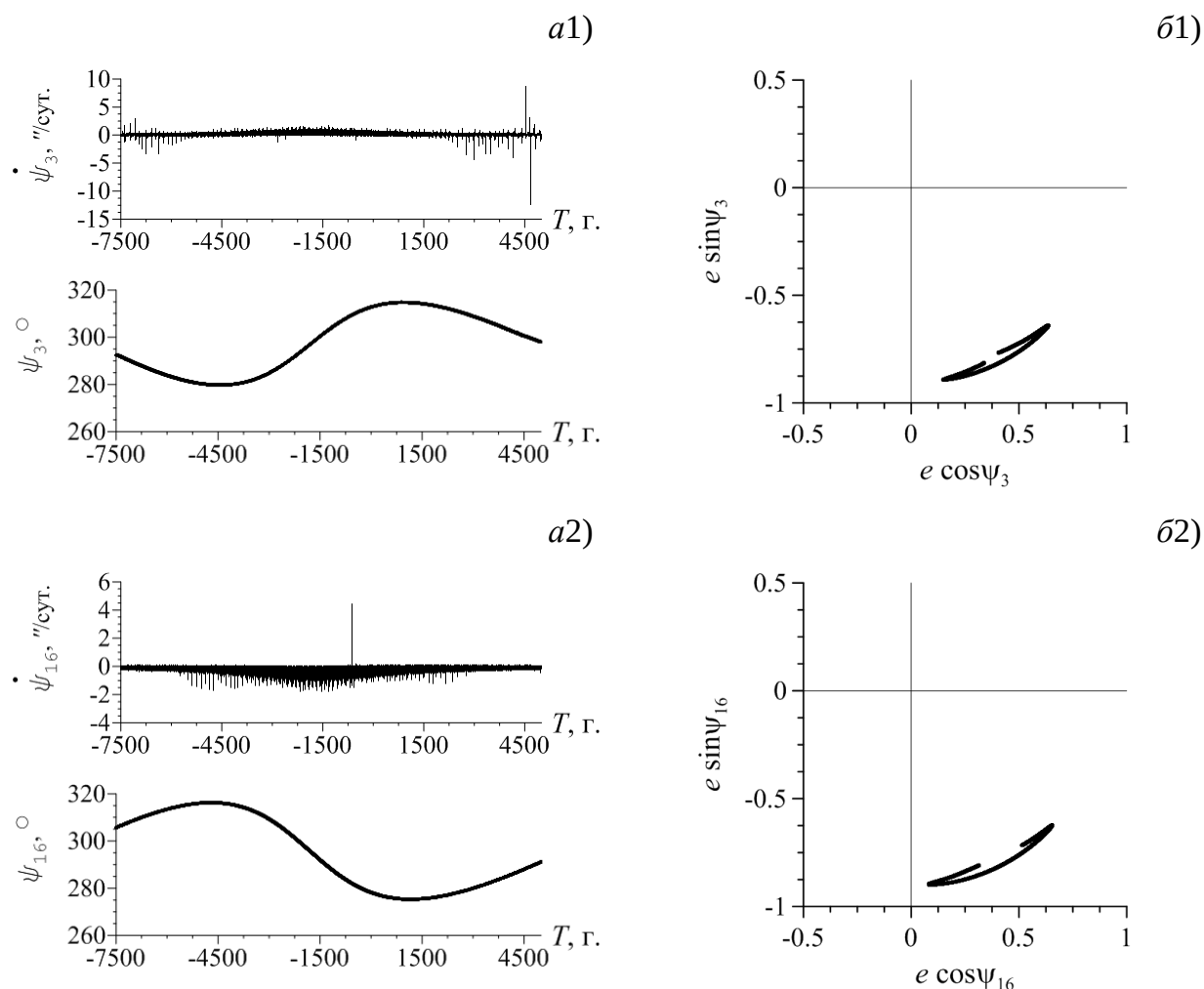


Рисунок 5.42 — Поведение резонансных характеристик для вековых резонансов 3 и 16 астероида (137924) 2000 BD19 с Меркурием

Из рисунка 5.42 видно, что аргумент колеблется в пределах 50° , а кривая на фазовых портретах расположена с одной стороны от начала координат, не покрывая его. Такое поведение позволяет сделать вывод о либрационном колебании резонансного аргумента, то есть резонанс является устойчивым на рассматриваемом интервале времени.

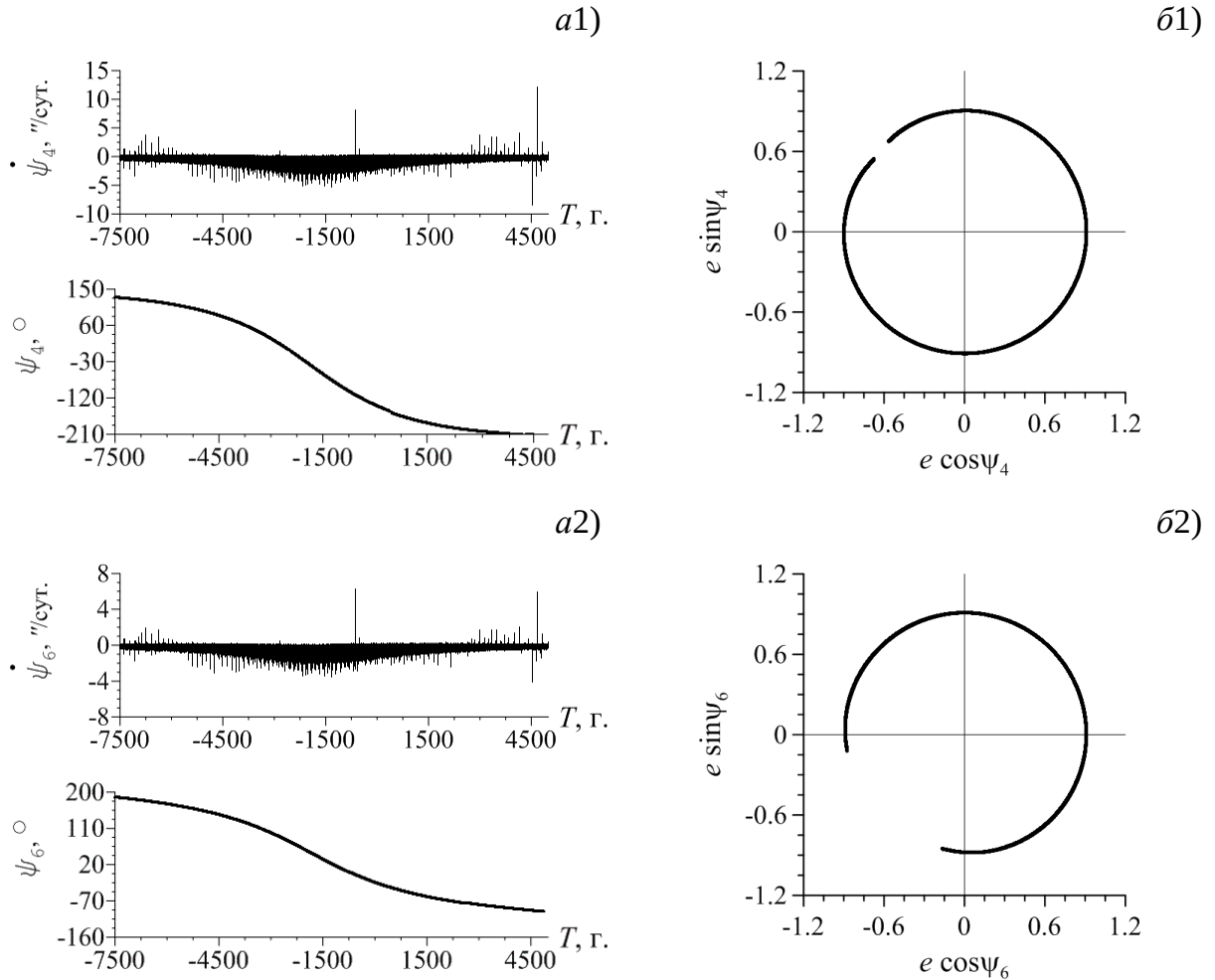


Рисунок 5.43 — Поведение резонансных характеристик для вековых резонансов 4 и 6 астероида (137924) 2000 BD19 с Меркурием

На рисунке 5.43 представлены примеры резонансов с Меркурием для соотношений $\dot{\psi}_4 = (\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_1) - 2\dot{\omega} + 2\dot{\omega}'_1$ и $\dot{\psi}_6 = (\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_1) + \dot{\omega} - \dot{\omega}'_1$ из таблицы 2.1. Для них резонансные аргументы имеют предельно большую амплитуду либраций, но при этом резонанс сохраняется на рассматриваемом интервале времени. Из рисунка видно, что колебания аргумента практически достигают 360° , но кривая на фазовых портретах не покрывает начало координат.

Исследуя вековую резонансную динамику астероида, нами была замечена еще одна интересная особенность в его движении. Анализ поведения эксцентриситета и наклона орбиты астероида к плоскости эклиптики показал, что в движении объекта явно проявляется эффект Лидова-Козаи. Этот эффект говорит о том, что происходит перекачка энергии между эксцентриситетом и наклоном (Shevchenko, 2017). Чтобы достоверно проверить это проявление эффекта Лидова-Козаи, необходимо оценить поведение так называемого интеграла Лидова Козаи $c_1 = (1-e^2)\cos^2 i$, который должен сохраняться на рассматриваемом интервале времени. На рисунке 5.44 приведены графики эволюции эксцентриситета e (а), наклона орбиты астероида к эклиптике (б) и интеграла Лидова-Козаи c_1 (в).

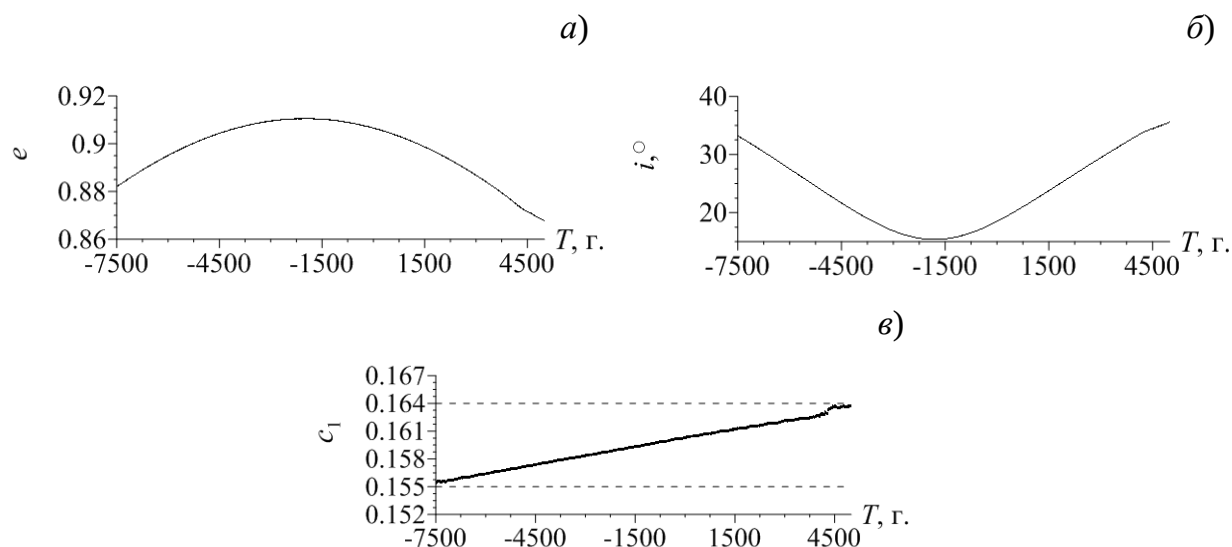


Рисунок 5.44 — Проявление эффекта Лидова-Козаи в движении астероида (137924) 2000 BD19

Из рисунка 5.44 видно, что минимальное значение наклона i соответствует максимальному значению эксцентриситета e , то есть действительно наблюдается перекачка энергии между этими элементами. Кроме этого, график (в) показывает, что интеграл Лидова-Козаи c_1 незначительно растет в пределах значения 0.01, а в конце интервала интегрирования кривая вовсе прекращает свой рост. Действительно наблюдается тенденция к сохранению интеграла Лидова-Козаи, а значит, можно говорить и о проявлении эффекта Лидова-Козаи для исследуемого астероида.

5.6.5 Выводы

Таким образом, в данном разделе приводятся результаты исследования вероятностной орбитальной эволюции 14 астероидов с малыми перигелийными расстояниями. В ходе исследования решались задачи оценки влияния различных факторов на динамику изучаемых объектов. Задача построения вероятностной орбитальной эволюции астероидов включала в себя два основных этапа: построение облака вероятных значений начальных параметров и отображение полученного облака неопределенности во времени. В зависимости от степени нелинейности задачи оценивания целесообразно выбирать способ построения начального облака: классический линейный или нелинейный метод. Исследование нелинейности задачи выбранных астероидов привели к выводу, что для пяти из них (2013 НК11, 2015 EV, 2019 VE3, 2022 JX, 2020 HE) нелинейность оценивается как умеренная, а для 2015 KO120 как сильно нелинейная, и для этого объекта является целесообразным построение начального облака не только классическим линейным, но и нелинейным методом для проведения сравнительного анализа. Для астероидов 2017 TC1, 2007 GT3 и 2015 HG нелинейность задачи слабая, для них достаточно применения классического линейного метода.

Сравнительный анализ поведения частиц из разных областей показал, что для астероида со слабой нелинейностью (2008 MG1) эволюция начальных вероятностных облаков, построенных линейным и нелинейным методами на основе группы наблюдений, взятых с сайта Центра малых планет, визуально не отличается. Для этого астероида в 2022 году нами были получены новые наблюдения на Терскольской обсерватории. Группируя эти наблюдения с уже имеющимися в базе MPC, было сформировано начальное облако неопределенности линейным методом и отображено во времени с целью проведения анализа влияния добавления новых наблюдений на поведение вероятностной эволюции. Исследование показало, что область неопределенности при обработке расширенного состава наблюдений имеет меньший размер, а точность интегрирования оказывается выше, что дает возможность рассмотреть вероятностную орбитальную эволюцию астероида на более длительном интервале времени.

Кроме того, описываются результаты исследований вероятностной орбитальной эволюции ряда астероидов ((504181) 2006 TC, 2007 PR10, (3200) Phaethon и (137924) 2000 BD19) с учетом и без учета эффекта Ярковского. Выявлены сближения с планетами внутренней группы, рассмотрена вековая резонансная динамика (выявлен ряд апсидально-нодальных резонансов) и получена оценка времени предсказуемости движения астероидов с помощью параметра OMEGNO. Результаты исследований показали, что эффект Ярковского оказывает существенное влияние на большую полуось орбит астероидов, что приводит к изменениям в числе и расстоянии сближений. Кроме того, в большинстве случаев учет эффекта Ярковского приводит к уменьшению неопределенности положения астероидов.

Поиск орбитальных резонансов в движении астероидов показал, что (3200) Phaethon движется в окрестности орбитального резонанса $3/7$ с Венерой. Без учета эффекта Ярковского астероид дольше находится в резонансе с планетой, нежели при учете эффекта, что говорит о необходимости его учета для более правильной картины. Астероид (137924) 2000 BD19 движется в орбитальном резонансе $3/4$ с Венерой. Сравнение результатов исследования с учетом эффекта Ярковского и без него показало, что учет данного эффекта оказывает влияние на величину сближений с Меркурием, и, как следствие, на величину неопределенности положения и скорости астероида.

ГЛАВА 6 АПРОБАЦИЯ МЕТОДИК ОЦЕНКИ ВЕРОЯТНОСТИ СТОЛКНОВЕНИЯ И ЕГО ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ

6.1 Вводные замечания

В главе 5 подробно рассмотрена эволюция астероидов с малыми перигелийными расстояниями, которые, к счастью, в настоящий момент не представляют реальной опасности для Земли. Однако возможность быстрой оценки вероятности столкновения и его предотвращения не теряет своей актуальности. Описание предложенной нами методики оценки вероятности столкновения было приведено в разделе 2.9. В главе 6 описывается методика предотвращения столкновения на основе превентивного разрушения, разработанная при участии автора данной работы (Александрова и др., 2016, 2019; Галушина и др., 2016). Кроме того, в данной главе приводятся результаты тестирования методов и программ на примере ряда астероидов, которые считались опасными для Земли на момент проведения исследований.

6.2 Тестирование методики быстрой оценки вероятности столкновения

Быстрые отображения были опробованы на ряде астероидов, в том числе 2011 AG5 и 2007 VK184 (рисунок 6.1, таблица 6.1), которые в 2014 году возглавляли список наиболее опасных объектов (neo.jpl.nasa.gov), и по Туринской (десятибалльной) шкале имели наивысшую единичную оценку. В таблице 6.1 для каждого астероида приведены позиционные орбитальные элементы (большая полуось a , эксцентриситет e и наклонение i); оценки диаметра D и массы M_a , а также абсолютная звездная величина H .

Чтобы сформировать начальное облако виртуальных астероидов, необходимо было предварительно из наблюдений получить оценки орбитальных параметров $\hat{q}$ и ковариационной матрицы $\mathbf{C}_q$. Оценивание выполнялось в рамках задачи наименьших квадратов без взвешивания. В результате отбраковки (по правилу трех сигма) были исключены три наблюдения для 2011 AG5 и одно для 2007 VK184. Наблюдения (угловые координаты α и δ — прямое восхождение и склонение) брались с сайта Центра малых планет. Количество используемых наблюдений N и временные

интервалы ΔT , покрываемые ими, а также среднеквадратические ошибки МНК-оценок векторов положения $\sigma(x_0)$ и скорости $\sigma(v_0)$ представлены в таблице 6.2.

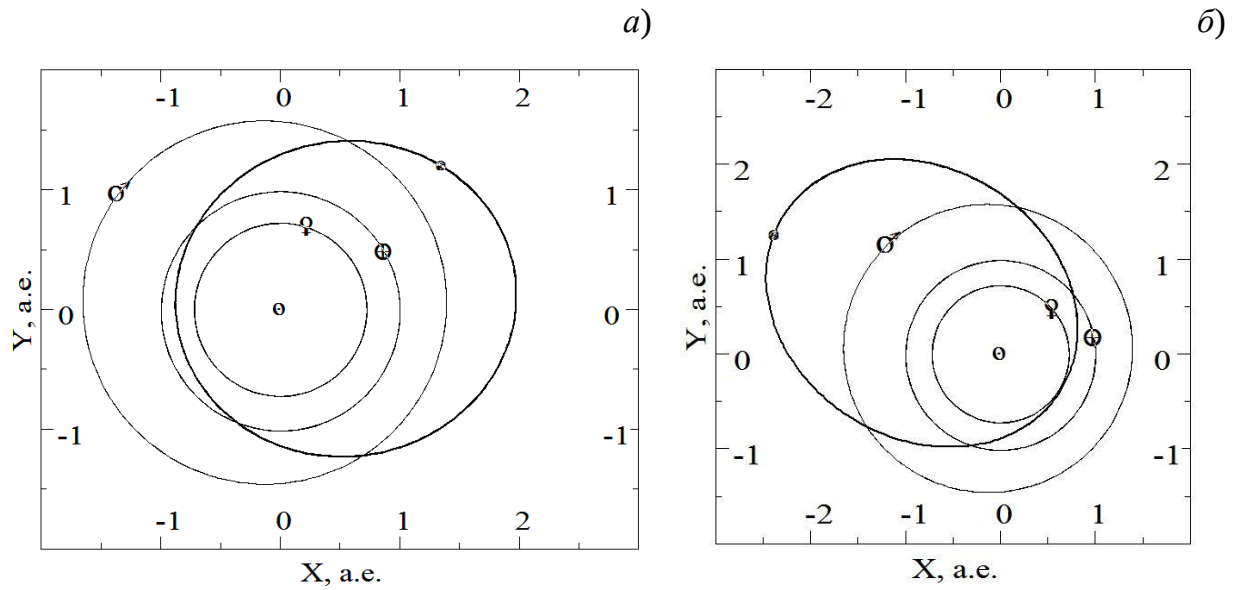


Рисунок 6.1 — Орбиты астероидов 2011 AG5 (а) и 2007 VK184 (б) и планет в гелиоцентрической системе координат в проекции на плоскость эклиптики

Таблица 6.1 — Орбитальные элементы и физические параметры астероидов

Астероид	a , а.е.	e	i , °	D , м	M_a , кг	H
2011 AG5	1.4	0.39	3.7	140	$4.0 \cdot 10^9$	22
2007 VK184	1.7	0.57	1.2	130	$3.3 \cdot 10^9$	22

Таблица 6.2 — Результаты обработки наблюдений

Астероид	N	ΔT , сут	t_0	σ , "	$\sigma(x_0)$, а.е.	$\sigma(v_0)$, а.е./сут
2011 AG5	210	317	10.03.2011 г.	0.41	$5.8 \cdot 10^{-7}$	$2.4 \cdot 10^{-8}$
2007 VK184	101	60	13.11.2007 г.	0.43	$2.5 \cdot 10^{-6}$	$2.5 \cdot 10^{-7}$

Численное моделирование орбит астероидов (как для представления наблюдений, так и для последующего прогноза движения) выполнялось в прямоугольных координатах с учетом гравитационного влияния Солнца, больших планет, Плутона, Луны, Цереры, Паллады, Весты, сжатия Земли, а также релятивистских эффектов от Солнца в рамках задачи Шварцшильда. Дифференциальные уравнения, лежащие в основе численных моделей,

интегрировались методом Эверхарта 19-го порядка (Авдюшев, 2010). Положения больших планет, Плутона и Луны, необходимые для определения значений правых частей уравнений, вычислялись по интерполяционным формулам эфемериды DE405 (Standish, 1998), тогда как положения астероидов Цереры, Паллады и Весты моделировались численно (путем интегрирования дифференциальных уравнений их движения) совместно с моделированием орбит 2011 AG5 и 2007 VK184.

Начальная эпоха подбиралась так, чтобы нелинейность обратной задачи была минимальной. Для астероидов показатели нелинейности составили порядка 10^{-4} при критическом 0.1 (Avdyushev, 2011). Малые показатели нелинейности фактически говорят о том, что ковариационные матрицы достаточно хорошо описывают неопределенности в орбитальных параметрах и поэтому вполне могут быть использованы для статистического моделирования начальных облаков виртуальных астероидов.

В результате обработки наблюдений среднеквадратические ошибки составили величины, хорошо согласующиеся с дисперсиями ошибок современных наземных астрометрических наблюдений. Параметрические ошибки оценивались как корни из сумм дисперсий ковариационной матрицы соответственно для координат и скоростей.

Для статистического моделирования облака неопределенности использовалась линейная схема (Avdyushev, 2011)

$$\mathbf{q} = \hat{\mathbf{q}} + \mathbf{C}_q^{1/2} \mathbf{v}, \quad (6.1)$$

где $\mathbf{q}$ — вектор динамического состояния виртуального астероида; $\hat{\mathbf{q}}$ — вектор номинального динамического состояния, полученный из наблюдений; $\mathbf{C}_q^{1/2}$ — матрица Холецкого: $\mathbf{C}_q^{1/2} (\mathbf{C}_q^{1/2})^T = \mathbf{C}_q$; $\mathbf{v}$ — случайный многомерный (точнее, шестимерный) нормально распределенный вектор с нулевым векторным средним и единичной ковариационной матрицей. В результате было получено эллипсоидальное облако виртуальных астероидов в параметрическом пространстве.

Сформированное начальное облако неопределенности для каждого астероида отображалось численной моделью до момента первого опасного сближения

с Землей: 05.02.2040 г. для 2011 AG5 и 03.06.2048 г. для 2007 VK184, и оценивалась вероятность столкновения астероида с планетой. Таким образом, моделирование эволюции облаков неопределенности предполагало численное интегрирование каждой виртуальной орбиты на временных интервалах более 10 тыс. сут. Поскольку такое численное моделирование сопряжено с большими затратами процессорного времени, вычисления проводились на суперкомпьютере «Cyberia» (566 двухъядерных процессоров Intel® Xeon® Processor 5150) Томского государственного университета с помощью специально разработанного программного обеспечения (Быкова, Галушина, 2009). Оценки вероятностей для различных объемов выборок виртуальных астероидов *NVA* и требуемые для них затраты процессорного времени приведены в таблицах 6.3 и 6.4. В таблице 6.4 даются показатели быстродействия только для одного астероида, поскольку для второго они подобные. Оценки вероятности столкновения, полученные нами разными методами, совпадают.

Таблица 6.3 — Оценки вероятностей столкновений астероидов с Землей

<i>NVA</i>	Оценка вероятности (%)	
	2011 AG5	2007 VK184
10 тыс.	0.02	0.00
100 тыс.	0.029	0.000
1 млн.	0.0295	0.0001

Таблица 6.4 — Затраты процессорного время на оценивание вероятности столкновения для астероида 2011 AG5

<i>NVA</i>	Процессорное время (мин)	
	Численное интегрирование	Линейное отображение
10 тыс.	941	3 (3 итер.)
100 тыс.	11576	3 (4 итер.)
1 млн.	114954	4 (3 итер.)

Следует заметить, что наша оценка вероятности столкновения для 2011 AG5 почти на порядок меньше оценки NASA, которая составляет 0.2% (Chesley

et al., 2012a). Такое расхождение в результатах объясняется главным образом разными подходами в формировании начального облака неопределенности. Насколько нам известно, оценка NASA получена в рамках взвешенной задачи наименьших квадратов, хотя в данном случае мы не видим особой надобности прибегать к взвешиванию, так как, если судить по невязкам (рисунки 6.2 и 6.3), наблюдения можно рассматривать как равноточные. Кроме того, при определении астероидной орбиты NASA используемые наблюдения исправлялись за выявленные систематические ошибки в положениях опорных звезд (Chesley et al., 2010).

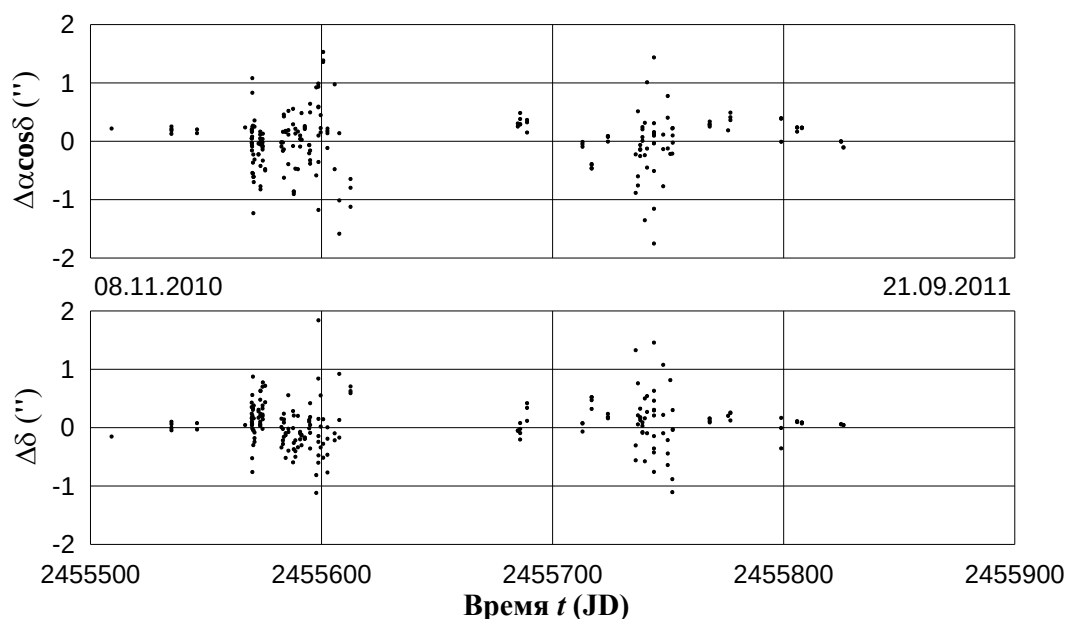


Рисунок 6.2 — Невязки для астероида 2011 AG5

Наконец, вполне возможно, что для формирования начального облака неопределенности применялся так называемый метод линии вариаций (Milani et al., 2002). Согласно этому методу, виртуальные динамические состояния распределяются на линии, которая проходит через номинальное состояние и вдоль которой целевая функция обратной задачи изменяется наиболее медленно. В линейном случае виртуальные динамические состояния распределяются на прямой, направленной вдоль собственного вектора ковариационной матрицы с наибольшим собственным числом, по нормальному закону.

Начальное облако неопределенности для 2011 AG5 достаточно мало и поэтому, как уже отмечалось выше, оно вполне может моделироваться в рамках линейной обратной задачи. Однако тогда очевидно, что результаты статистического

моделирования методом линии вариации должны быть менее точными, нежели полученные нами по схеме (6.1).

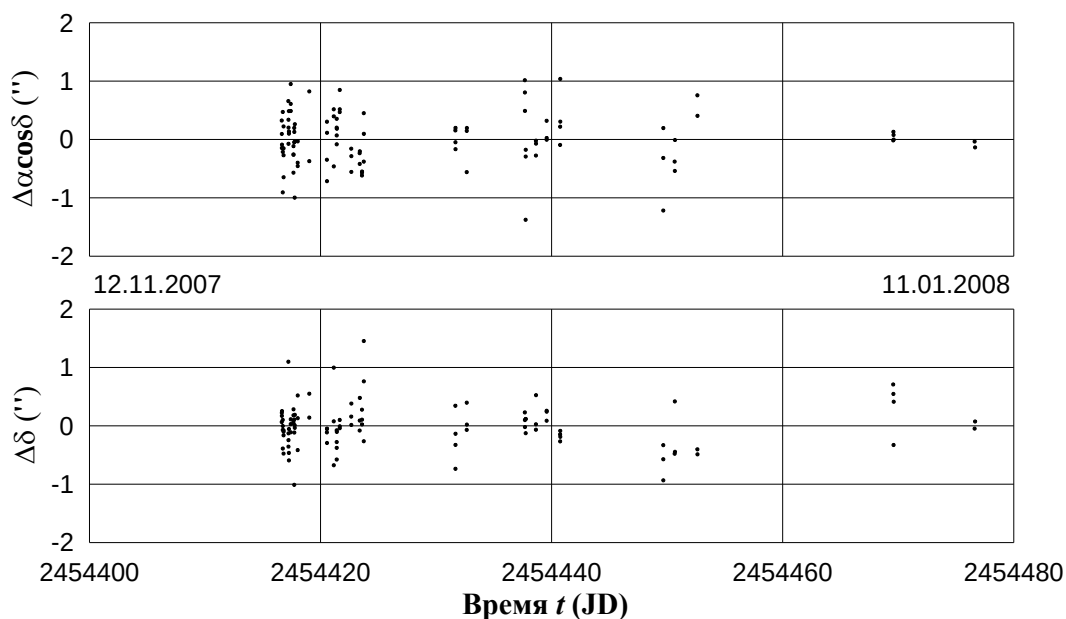


Рисунок 6.3 — Невязки для астероида 2007 VK184

Показатель быстродействия в таблице 6.4 — это фактически суммарное процессорное время, затраченное на каждом ядре суперкомпьютера. Как видно, если используется выборка из миллиона виртуальных астероидов (а именно такая выборка обеспечивает выявление малой вероятности столкновения для 2007 VK184), суммарное время составляет почти 80 сут. Как раз именно столько времени потребовалось бы при многократном численном интегрировании орбит на одноядерном компьютере с частотой одного ядра суперкомпьютера (2.66 GHz).

Проблема долговременных вычислений при оценивании малых вероятностей, разумеется, разрешается путем распараллеливания вычислительных процессов на суперкомпьютерах, которые сейчас вполне доступны для исследователей. Однако, если суперкомпьютеры и доступны, то того же нельзя сказать об их ресурсах, на которые претендуют другие пользователи и которые не безграничны. Эффективным средством в этом случае могут стать рассматриваемые в работе быстрые методы оценивания вероятностей на основе линейных отображений (2.39).

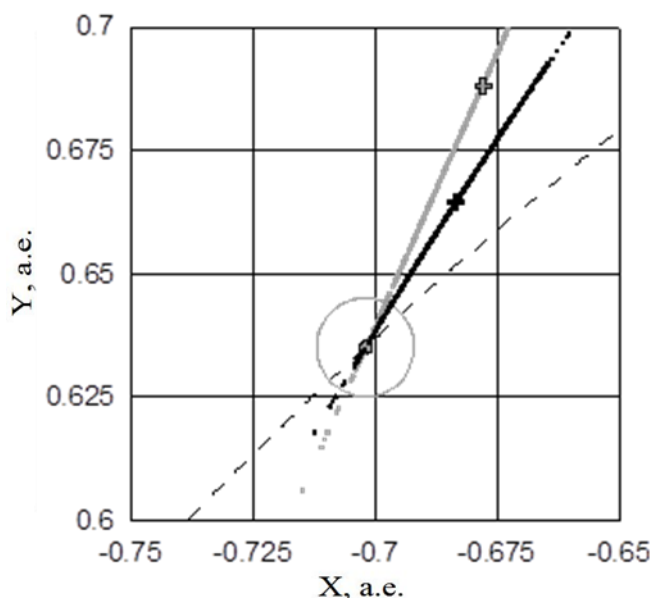
Описанное выше двойное отображение на основе частных производных (2.39) и формул задачи двух тел было также применено для получения оценок вероятности. Они до последних знаков совпали с аналогами, полученными непосредственно

численным интегрированием всех орбит виртуальных астероидов. Между тем впечатляют объемы вычислений, которые уменьшились на порядки (см. таблицу 6.4), что в принципе уже дает возможность выполнять оценивание даже на малобюджетных одноядерных нетбуках. При этом, если для численного интегрирования множества орбит с увеличением объема выборки виртуальных астероидов процессорное время возрастает, то временные затраты двойного отображения оказываются слабо чувствительными к объемам выборок, поскольку именно на численное интегрирование тратится основное время вычислений. Поэтому эффективность двойного отображения тем выше, чем плотнее облако неопределенности.

Попутно заметим, что на поиск целевой орбиты требовалось всего несколько итераций (таблица 6.4), что не заняло много времени, хотя и предполагало численное интегрирование нескольких орбит, выступающих в качестве приближений целевой орбиты. Вообще говоря, при больших выборках виртуальных орбит для экономии вычислений итерационный поиск целевой орбиты вполне можно выполнять на более малой подвыборке, на 1–2 порядка меньше. В этом случае целевая орбита может не быть столкновительной, а только лишь приводить к тесному сближению: достаточно того, чтобы линейные отображения (2.39) относительно нее достаточно хорошо описывали локальную динамику на столкновительных орбитах оригинальной выборки, что обычно выполняется.

Программная реализация двойного отображения после нахождения целевой орбиты — это фактически: 1) вычисление на заданный момент времени (в преддверии сближения) матрицы изохронных производных $\partial \mathbf{p} / \partial \mathbf{q}$ посредством численного интегрирования так называемых дифференциальных уравнений в вариациях; 2) матричное преобразование массива векторов начальных динамических состояний; и 3) анализ перигейных расстояний кеплеровых орбит, определяемых полученными в результате матричного преобразования динамическими состояниями. Отношение числа орбит, чьи перигейные расстояния меньше экваториального радиуса Земли, к общему числу дает оценку вероятности столкновения астероида с планетой.

На рисунке 6.4 для астероида 2011 AG5 показаны облака неопределенности, отображенные линейно и численной моделью на момент времени за 12 часов до того, как виртуальный астероид на целевой орбите достигнет минимального расстояния до Земли. Как видно, облака пересекаются только в малой окрестности около планеты, тогда как на периферии отличаются значительно. Интересно отметить, что на момент, когда облака набегают на планету, их номинальные положения остаются еще достаточно далеко от целевого положения настолько, что оказываются даже вне сферы Хилла для Земли.



Облака виртуальных астероидов, полученные линейным отображением (серый цвет) и численным интегрированием (черный цвет), на момент за 12 часов до соударения виртуального астероида на целевой орбите. Крестиками обозначены соответствующие номинальные положения астероида. Серой окружностью показана сфера Хилла для Земли, а серым кружком — планета. Пунктирной линией представлена орбита Земли

Рисунок 6.4 — Астероид 2011 AG5

Однако встает вопрос: является ли момент за 12 часов до сближения оптимальным для линейного отображения, чтобы получить оценку вероятности столкновения с высокой точностью? Чтобы ответить на этот вопрос, мы рассмотрели другие моменты в пределах двух суток, до и после сближения, и оценили вероятность столкновения астероида 2011 AG5 с Землей. Для получения

высокоточных вероятностных оценок начальное облако неопределенности формировалось из миллиона виртуальных астероидов.

Результаты, приведенные на рисунке 6.5, показывают, что линейное отображение вполне допустимо на моменты времени как за сутки, так и за 12 часов до сближения. Оценка вероятности, полученная во время сближения, немного завышена, хотя может быть все еще приемлема. Оценки на моменты после сближения значительно занижены, что является следствием влияния сильной нелинейности во время сближения. Между тем результаты подобного эксперимента для 2007 VK184 показали хорошее согласие оценок, полученных посредством численного интегрирования и двойного отображения, на всем рассматриваемом временном интервале.

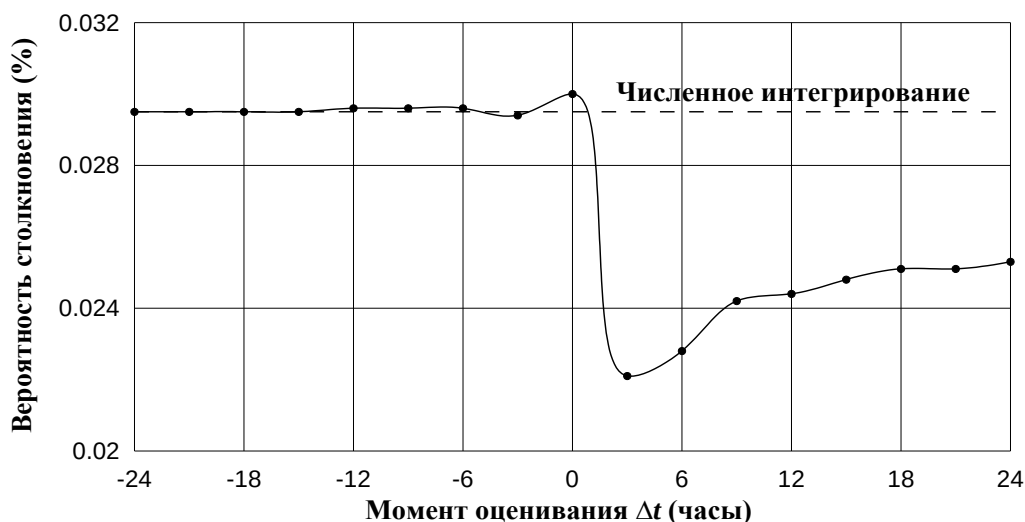


Рисунок 6.5 — Астероид 2011 AG5. Оценка вероятности столкновения с Землей в зависимости от момента времени Δt (относительно момента столкновения на целевой орбите), на который выполняется линейное отображение

В работе (Авдюшев, Галушина, 2013) рассматриваемый метод был применен к оценке вероятности столкновения астероида 2008 СК70. Численные результаты показали, что оценки вероятности столкновения 2008 СК70 с Землей, полученные численным интегрированием всех виртуальных орбит и линейным отображением, очень хорошо согласуются и составляют величину порядка 0.05%. Между тем быстрое действие метода на основе линейных отображений существенно выше и тем значительнее, чем больше виртуальных орбит используются.

Для подтверждения достоверности полученных результатов для ряда астероидов было выполнено сравнение с результатами других авторов, а именно – с результатами, представленными на сайте NASA и в работе (Vavilov, Medvedev, 2015) (таблица 6.5). Наибольшее отличие результатов наблюдается для астероида 2011 AG5, скорее всего данный факт обусловлен различиями начального облака неопределенности. Воспользовавшись той же ковариационной матрицей, что и авторы работы (Vavilov, Medvedev, 2015) мы получили значение $1.1 \cdot 10^{-4}$, которое находится в хорошем соответствии с представленным в последнем столбце таблицы 6.5.

Таблица 6.5 — Оценки вероятности столкновения в сравнении с другими авторами

Объект	Данная работа	NASA	Vavilov, Medvedev, 2015
2007 VK184	$1.1 \cdot 10^{-4}$	$5.5 \cdot 10^{-4}$	$3.0 \cdot 10^{-5}$
2011 AG5	$3.0 \cdot 10^{-2}$	$1.6 \cdot 10^{-3}$	$5.1 \cdot 10^{-4}$
2008 JL3	$3.4 \cdot 10^{-4}$	$1.5 \cdot 10^{-4}$	$4.7 \cdot 10^{-4}$
2006 JY26	$2.0 \cdot 10^{-5}$	$3.2 \cdot 10^{-6}$	$1.1 \cdot 10^{-4}$

Таким образом, представленный в работе подход для численного оценивания вероятности столкновения астероида с планетой действительно эффективно разрешает проблему объемных вычислений, которые требуются при численном моделировании долгосрочной эволюции облака неопределенности, от начальной эпохи до момента сближения. Новый подход предполагает интегрирование только целевой орбиты, а не всех виртуальных, поэтому объем вычислений удастся уменьшить на порядки, что дает возможность выполнять их даже на низкопроизводительных компьютерах.

Линейные отображения, лежащие в основе предлагаемого подхода, могут быть особенно полезными при оценивании малых вероятностей, для выявления которых (даже с точностью до двух–трех значащих цифр) требуются большие выборки виртуальных астероидов. Более того, обращение к линейным отображениям становится безальтернативным, если маловероятное столкновение астероида с планетой ожидается в неблизком будущем.

Разумеется, возможности линейных отображений ограничены. Главным необходимым условием для эффективного оценивания вероятностей является слабая нелинейность в преддверии сближения небесных тел. Поэтому, если эффективность линейных отображений при первом сближении не вызывает сомнений, то при последующем она, конечно же, будет непосредственно зависеть от того, насколько значительно повлияла нелинейность после первого сближения на облако виртуальных астероидов.

Впрочем, если даже облако трансформируется существенно, вплоть до разрыва, это косвенно свидетельствует о возможном наличии хаотичности в орбитальном движении астероида, и тогда все подобные оценки вероятностей для последующих сближений линейным, нелинейным или комбинированным способами становятся бессмысленными. Необходимы новые астрометрические наблюдения, которые вывели бы на новую (номинальную) нехаотичную орбиту, что дало бы основание продолжить дальнейшие вероятностные исследования астероидного движения.

6.3 Метод предотвращения столкновения астероида с Землей, основанный на превентивном разрушении опасного объекта

6.3.1 Вводные замечания

В настоящее время предложено несколько способов противодействия астероидной опасности, каждый из которых обладает своими достоинствами и недостатками (Шустов и др., 2010). Самым радикальным из них является подрыв ядерного устройства с целью уничтожения опасного небесного тела (Тукмаков, 2013). Подрыв обычно предполагается на завершающем участке траектории астероида за несколько месяцев до его падения на Землю. Главный недостаток проекта состоит в том, что на планету упадет рой осколков, в высокой степени радиоактивных.

В настоящем подразделе рассматривается подрыв астероида за несколько лет до его предсказанного падения (Александрова и др., 2016, 2019; Галушина и др., 2016). Осуществимость проекта связана с тем, что падение астероида диаметром 100 м и более сразу после его открытия маловероятно. Заметим, что, к счастью,

маловероятно само столкновение с Землей. Частота оценивается в одно событие примерно за 2000 лет (Шустов и др., 2010; Perna et al., 2013). Вероятность же столкновения сразу после открытия опасного объекта еще на 2–3 порядка ниже¹. В общем случае он несколько раз пролетает мимо Земли на близком расстоянии (и тогда обнаруживается), прежде чем столкнуться с ней (Emelyanenko, 2015). Превентивное уничтожение объекта задолго до последующего столкновения приводит к тому, что все или почти все осколки уходят с орбиты столкновения.

6.3.2 Разрушение опасного астероида

Пусть астероид является однородным шаром с диаметром D и плотностью ρ . При расчетах будем полагать, что он состоит из вещества типа монолитного скального гранита (начальная плотность $\rho = 2500 \text{ кг/м}^3$, ударные давления испарения и плавления 0.15 и 0.068 ТПа, соответственно) и что сравнительно безопасными будут его осколки с характерным размером не более 10 м. Реальные астероиды имеют неправильную форму и могут быть как более прочными (металлические типа астероида (6178) 1986 DA), так и менее прочными (частично раздробленные типа (17656) Nanyabusa). Однако задача данного исследования – дать качественную картину явления для оценки его эффективности, так что допустима некоторая идеализация модельной задачи.

Исследуем влияние подрыва ядерного устройства с энерговыделением в 1 Мт тротилового эквивалента ($4.18 \times 10^{15} \text{ Дж}$). Следует различать три типа ядерного взрыва:

- предконтактный (на некотором расстоянии от поверхности);
- контактный (на поверхности);
- заглубленный (под поверхностью).

В условиях космического вакуума доля энергии p_e , сообщаемой ядерным взрывом объекту, при предконтактном и контактном подрыве очень мала и не превосходит 0.1 для ядерного устройства мегатонного класса (Архипов и др.,

¹ Это не так для тел метрового и декаметрового размера, обнаруживаемых только в непосредственной близости от Земли. Но уничтожение или отклонение таких тел не требует ядерных зарядов.

2003). Доля p_e существенно увеличивается даже при малозаглубленном подрыве, реализация которого возможна при упреждающем, по сравнению с ядерным устройством, столкновении ударника с астероидом (Мещеряков, Липницкий, 2015).

Ниже мы считаем, что взрыв происходит на глубине 3–5 м, несколько превышающей размеры ядерного устройства. В процессе развития ядерного взрыва под действием рентгеновского излучения и удара вещества ядерного устройства формируется центральный источник – область испарившегося вещества преграды, примыкающая к взрыву. Это вещество, находящееся под большим давлением, играет роль совершающего работу тела. Граница области близка по форме к поверхности шарового сегмента и образована распространяющейся тепловой волной, а затем и ударной волной; последняя представляет собой тонкий диск испаренного грунта, сужающийся к краям, с радиусом, несколько превышающим радиус зоны существования мягкого рентгеновского излучения. Поскольку заглубление превышает размер взрывного устройства, рентгеновское излучение частично или полностью экранируется. При заглублении, превышающем радиус тепловой волны, не происходит существенного ослабления ударной волны за счет излучения и существенно снижается интенсивность газодинамических процессов выброса вещества из центрального источника.

В начальные моменты передачу энергии ядерного взрыва преграде определяет, в основном, рентгеновское излучение. Энергия взрыва поглощается веществом ядерного устройства, которое разогревается до десятков миллионов градусов и расширяется, одновременно являясь источником интенсивного рентгеновского излучения. По истечении примерно 100 нс излучение (доля энергии которого составляет около 90% от общей энергии ядерного взрыва) практически полностью выходит из источника.

Излучение прогревает прилегающий слой вещества преграды, толщина которого определяется длиной пробега излучения, до температур порядка нескольких миллионов градусов. С повышением температуры прогреваемого слоя длина пробега увеличивается, что в свою очередь дает возможность прогреваться следующему слою вещества. Благодаря сильной зависимости пробега излучения от температуры образуется фронт тепловой волны, разделяющий нагретое и холодное вещество. Для температуры в несколько миллионов градусов длина

пробега излучения в твердом теле нормальной плотности соизмерима с размером самой прогретой области, и происходит выравнивание температуры внутри тепловой волны.

По мере распространения тепловой волны температура прогретого вещества снижается и все большее значение в развитии взрыва начинает приобретать гидродинамическое движение. Со временем образовавшаяся внутри тепловой зоны ударная волна обгоняет фронт волны. После этого механизм передачи энергии веществу связан, главным образом, с распространением сильной ударной волны.

В отличие от тепловой волны, в которой движение среды несущественно, на фронте ударной волны скачком изменяется плотность вещества и скорость его движения, порода испытывает термодинамические превращения: ионизацию, диссоциацию, испарение, плавление, термическое разложение слагающих породу минералов. Радиус зоны испарения гранита при заглубленном ядерном взрыве с энергосвободением в 1 Мт составляет 15 м, а масса ионизованной и испаренной породы – 7×10^7 кг. Соответствующие параметры зоны, где имеет место плавление, составляют 26 м и 1.2×10^8 кг. Поскольку на данной стадии давление в породе все еще значительно (более 40 ГПа), роль касательных напряжений мала, и среда ведет себя подобно сжимаемой жидкости, а ее напряженное состояние определяется только давлением.

Далее параметры волны снижаются и существенным становится влияние прочностных свойств породы. Для породы типа скальных гранитов это влияние начинает проявляться, когда давление на фронте волны составляет от 20 до 40 ГПа. Примерно этому же уровню давления соответствует зона полиморфных фазовых переходов. Фазовые переходы и характерная для твердой среды связь между напряженным и деформированным состояниями приводят к тому, что ударный фронт расстраивается и ударная волна вырождается в волну сжатия с непрерывным распределением параметров.

Если в ударной волне диссипация энергии происходит при необратимом нагружении среды и определяется параметрами фронта, то в волне сжатия она связана с потерями энергии на неупругое деформирование и разрушение среды. После прохождения ударной волны элемент среды расширяется в соответствии с энтропией разгрузки. В зависимости от приобретенного при прохождении ударной

волны значения энтропии, при разгрузке частицы могут претерпевать полное или частичное испарение, плавление, термическое разложение. Задав точку отсчета энтропии, определив энтропию частицы грунта и критические энтропии каждого компонента породы, можно определить его состояние после прохождения фронта ударной волны и последующей фазы разгрузки.

Описанными процессами определяются макроэффекты воздействия ядерного взрыва на преграду. Вследствие уплотнения породы при воздействии взрыва и волны сжатия образуется полость взрыва. Эмпирические зависимости дают для мегатонного взрыва значение радиуса полости $R_1 \approx 40$ м (все радиусы отсчитываются от центра взрыва).

К полости взрыва прилегает зона дробления радиусом $R_2 \approx (1.5-3) \cdot R_1 \approx (60-120)$ м, где преграда раздроблена до щебня и пыли, и характерный размер обломков не превышает 10 см.

В зоне интенсивной трещиноватости радиусом $R_3 \approx (3-5.5) \cdot R_1 \approx (120-220)$ м, под действием волн сжатия и разгрузки происходит объемное и сдвиговое разрушение гранита, образование трещин, связанное с локальными ослаблениями прочности. Максимальная степень трещиноватости достигает 4–6 новых трещин на погонный метр, а на внешней границе этой зоны характерный размер осколков может составлять 10 м – максимально допустимое значение с точки зрения безопасности для Земли. Ядерный взрыв с мегатонным энерговыделением способен разбить на сравнительно безопасные осколки гранитный астероид диаметром до 220 м. Радиус зоны интенсивной трещиноватости пропорционален корню кубическому из энерговыделения ядерного взрыва, поэтому, определив размер астероида и вещество, из которого он состоит, можно оценить, какова должна быть необходимая мощность ядерного зарядного устройства, чтобы полностью раздробить астероид.

Напомним, что оценка радиуса зоны дробления на безопасные осколки получена в предположении монолитности гранитного астероида. В большинстве реальных случаев для астероида характерна собственная трещиноватость, которую ядерный взрыв разовьет, увеличив зону эффективного дробления. Напротив,

в редких случаях металлических астероидов эта зона окажется меньше приведенной оценочной.

Если размеры астероида превышают размеры области дробления, в остаточной части имеют место лишь упругие деформации, однако ядерный взрыв сообщит неразрушенной части астероида импульс, сделав возможным изменение ее траектории и предотвращение столкновения с Землей. Доля энергии ядерного взрыва в газообразных продуктах составляет от 7 до 20%, за счет нее происходит ускорение и разуплотнение разрушенной породы, возникает фильтрационный поток газообразных продуктов через зону разрушения.

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

- При $D < 25$ м астероид разрушается полностью, превращаясь в газ и быстро затвердевающие капли жидкости. Скорости частиц относительно родительского тела столь велики (порядка километров в секунду), что практически все они уходят с орбиты столкновения.

- При $25 < D < 200$ м примыкающая к заряду часть астероида ($\approx 10^8$ кг) ведет себя, как описано выше. Оставшаяся часть разбивается на осколки, не превышающие 10 м в диаметре.

6.3.3 Область начальных данных

Определим область начальных данных для совокупности осколков. Полагаем $D = 200$ м, так что астероид полностью разрушается на осколки размером до 10 м. Число крупных осколков $N \sim 10^4 - 10^5$. Нас интересуют траектории осколков вплоть до момента их следующего сближения с Землей. Для большей статистической достоверности при расчетах примем $N = 10^5$. В этой работе мы пренебрегаем негравитационными силами, поэтому траектория осколка не зависит от его массы. Важны лишь его положение и скорость в начальную эпоху. Без потери точности примем, что начальное положение совпадает с положением астероида в момент взрыва. Скорости осколков можно рассматривать как случайные величины, полная информация о которых заключена в функции распределения или в более удобной для расчетов плотности вероятности. Она нам неизвестна, но для наших целей можно использовать ее правдоподобные представления.

Пусть $Oxyz$ – гелиоцентрическая невращающаяся система координат; $O_1x_1y_1z_1$ – вспомогательная невращающаяся система координат. В момент взрыва t_0 ее начало O_1 совпадает с положением астероида; ось x_1 направлена по касательной к гелиоцентрической траектории астероида, положения осей y_1, z_1 безразличны; скорость точки O_1 в системе $Oxyz$ постоянна и равна v – скорости астероида в эпоху t_0 . Вектор начальной скорости осколка в системе $O_1x_1y_1z_1$ определим сферическими координатами v, φ_1, λ_1 :

$$v_x = v \cos \varphi_1, v_y = v \sin \varphi_1 \cos \lambda_1, v_z = v \sin \varphi_1 \sin \lambda_1. \quad (6.2)$$

Построим плотности вероятности случайных величин v, φ_1, λ_1 . Все значения приводим в системе СИ, если не оговорено противное.

Модуль скорости

Согласно опубликованным (Григорян, Шапиро, 1971) экспериментальным данным, приобретаемые скорости частиц зависят от расстояния r_E до центра взрыва приблизительно по степенному закону

$$v = w r_E^{-\sigma_E}, r_E = w^{1/\sigma_E} v^{-1/\sigma_E}. \quad (6.3)$$

Для $r_E > 25$ (напомним, что ближняя зона нас не интересует) можно принять $\sigma_E = 1.72, w = 0.980 \cdot 10^6$.

Построим распределение случайной величины v . Согласно связи (6.2) достаточно найти распределение случайной величины r_E . Поскольку заглупление заряда не превышает 5 м, можно считать, что радиусы отсчитываются от некоторой точки O на поверхности сферы, представляющей поверхность шарообразного астероида (рисунок 6.6). Множество S точек астероида, отвечающих $r_E = \text{const}$ ($0 \leq r_E \leq 2R = D$), является частью сферы радиуса r_E , вырезаемой конусом с полураствором $\psi_E = \angle S_2 O S_3$. Естественно предположить, что плотность $f_E(r)$ распределения r пропорциональна площади $S(r_E)$ поверхности S .

Легко показать, что точки S_1, S_3 пересечения двух окружностей на рисунке 6.6 имеют абсциссу $r_E^2/(2R)$:

$$\cos \psi_E = \frac{r_E}{2R},$$

$$S(r_E) = 2\pi r_E^2 (1 - \cos \psi_E) = 2\pi r_E^2 \left(1 - \frac{r_E}{2R}\right),$$

так что

$$f_E(r_E) dr_E = \frac{3}{4\pi R^3} S(r_E) dr_E = \frac{3r_E^2}{2R^3} \left(1 - \frac{r_E}{2R}\right) dr_E,$$

$$0 \leq r_E \leq 2R.$$

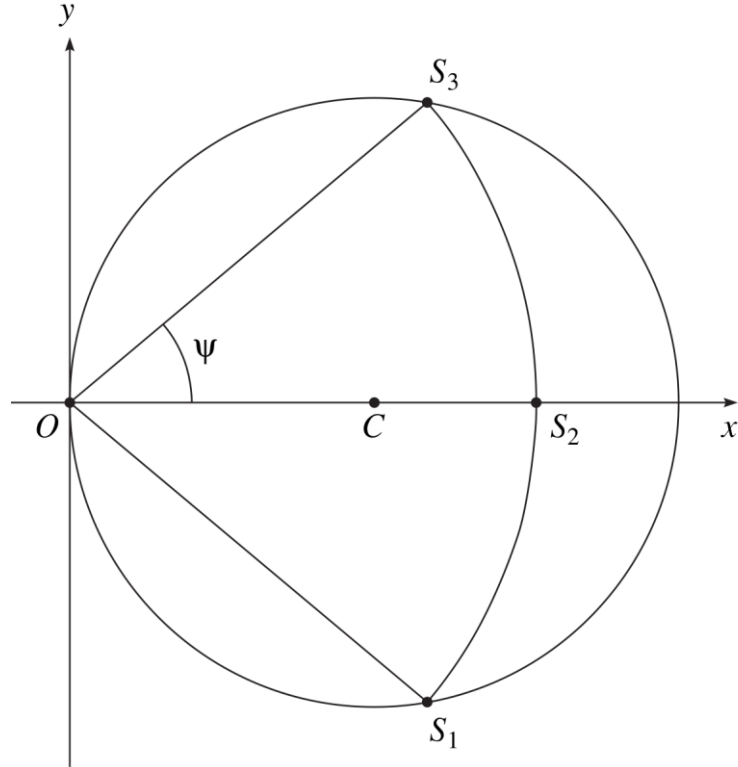


Рисунок 6.6 — Сечение шарообразного астероида плоскостью, проходящей через его центр C ; O — центр взрыва, дуга $S_1S_2S_3$ — дуга окружности радиуса

$$r_E \leq D = 2R \text{ с центром в } O; OC = R, OS_k = r_E$$

Поскольку правая часть (6.3) убывает, распределение случайной величины v определяется равенством

$$f_E(r_E) dr = -f_1(v) dv,$$

так что

$$f_1(v) = \frac{3}{2\sigma_E R^3} w^{3/\sigma_E} v^{-(3+\sigma_E)/\sigma_E} \left(1 - \frac{1}{2R} w^{1/\sigma_E} v^{-1/\sigma_E}\right), \quad \frac{w}{(2R)^{\sigma_E}} \leq v < \infty. \quad (6.4)$$

Упростим функцию распределения модуля скорости, введя новую безразмерную случайную величину ξ :

$$\xi = \frac{1}{2R} w^{1/\sigma_E} v^{-1/\sigma_E}, \quad v = \frac{W}{(2R)^{\sigma_E}} \xi^{-\sigma_E}, \quad dv = -\frac{w\sigma_E}{(2R)^{\sigma_E}} \xi^{-1-\sigma_E} d\xi. \quad (6.5)$$

По определению с учетом монотонной зависимости v от ξ

$$-f_1(v)dv = f_2(\xi)d\xi.$$

Откуда

$$f_2(\xi) = 12\xi^2(1-\xi), \quad 0 \leq \xi \leq 1, \quad (6.6)$$

что отвечает стандартному B -распределению (Шмыров, Шмыров, 2012) при $\lambda_{11}=3$, $\lambda_{12}=2$, $B(\lambda_{11}, \lambda_{12}) = 1/12$.

Функция распределения случайной величины ξ находится элементарно:

$$F_2(\xi) = \xi^3(4-3\xi), \quad 0 \leq \xi \leq 1. \quad (6.7)$$

Найдем моменты распределения скоростей

$$\int_{w(2R)^{-\sigma_E}}^{\infty} v^n f_1(v) dv = \frac{w^n}{(2R)^{n\sigma_E}} \int_0^1 \xi^{-n\sigma_E} f_2(\xi) d\xi = \frac{12w^n}{(2R)^{n\sigma_E}} \int_0^1 \xi^{2-n\sigma_E} (1-\xi) d\xi. \quad (6.8)$$

При указанном значении $\sigma = 1.72$ существует лишь момент первого порядка, т.е. среднее значение скорости

$$\bar{v} = \frac{3 \cdot 2^{2-\sigma_E} w}{(3-\sigma_E)(4-\sigma_E) R^{\sigma_E}} = 44, \quad (6.9)$$

где в конце подставлены числовые значения w , R , σ_E .

Для контроля оценим $\bar{v}$ иначе. Пусть E – энергия взрыва; $E_0 = p_E E$ – часть энергии взрыва, превратившейся в кинетическую энергию всех осколков (твердых, жидких и газообразных), $0 < p_E < 1$; $M_a = \pi r D^3/6$ – масса астероида. Кинетическая энергия множества осколков E_0 равна половине их суммарной массы, помноженной на квадрат средней скорости $\bar{v}$, так что

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{2p_E E}{M}}.$$

Если положить $p_E = 0.25$, то $E = 4.18 \cdot 10^{15}$, $E_0 = 1.045 \cdot 10^{15}$, $M_a = 1.048 \cdot 10^{10}$, $\bar{v}^2 = 19.9 \cdot 10^4$, $\bar{v} = 446$, что практически совпадает со значением (6.9).

Ниже при расчетах используется датчик случайных чисел, распределенных по закону (6.5), (6.6). Как известно (Ермаков, Михайлов, 1982; Боровков, 1999), для этого нужно обратить строго возрастающую на отрезке $[0, 1]$ функцию (6.6), т.е. найти единственный на указанном отрезке корень уравнения четвертой степени

$$3\xi^4 - 4\xi^3 + \eta_E = 0, \quad (6.10)$$

где η_E – известное число из того же отрезка. При η , равном нулю или единице, ξ также равно нулю или единице. Если $0 < \eta_E < 1$, можно действовать двумя способами.

Во-первых, воспользоваться средствами компьютерной алгебры, дающими явное выражение корней уравнения четвертой степени, и выбрать вещественный корень, лежащий между нулем и единицей. Элементарное исследование уравнения (6.7) показывает, что оно имеет два вещественных корня, один из них расположен между нулем и единицей, а другой больше единицы.

Во-вторых, можно действовать итерациями, записывая уравнение (6.10) в одном из двух видов:

$$\begin{aligned} \xi &= g(\xi), \text{ при } 0 < \xi \leq 1/2, 0 < \eta_E \leq 5/16, \\ \zeta &= g_1(\zeta), \text{ при } 1/2 < \xi < 1, 5/16 < \eta_E < 1, \zeta = 1 - \xi, 0 < \zeta < 1/2. \end{aligned} \quad (6.11)$$

Здесь

$$\begin{aligned} g(\xi) &= \sqrt[3]{\frac{\eta_E}{4} \left(1 - \frac{3}{4}\xi\right)^{-1/3}}, \\ g_1(\zeta) &= \sqrt{\frac{1 - \eta_E}{6 - 8\zeta + 3\zeta^2}}. \end{aligned}$$

Вычислим производные

$$g'(\xi) = \frac{1}{4} \sqrt[3]{\frac{\eta_E}{4} \left(1 - \frac{3}{4}\xi\right)^{-4/3}},$$

$$g'_1(\zeta) = 6\sqrt{1-\eta_E} (4-3\zeta) (6-8\zeta+3\zeta^2)^{-\frac{3}{2}},$$

$$g''_1(\zeta) = 6\sqrt{1-\eta_E} (1-\zeta) (5-3\zeta) (6-8\zeta+3\zeta^2)^{-5/2}.$$

Очевидно, $g'(\xi)$ принимает наибольшее значение при $\xi = 1/2$, $\eta_E = 5/16$. Так как $g''_1(\zeta) > 0$, то $g'_1(\zeta)$ принимает наибольшее значение при $\zeta = 1/2$, $\eta_E = 5/16$. Следовательно, первые производные в указанных промежутках ограничены:

$$0 < g'(\xi) \leq \frac{1}{5}, \quad 0 < g'_1(\zeta) \leq \frac{5}{11}, \quad (6.12)$$

что влечет сходимость итерационного процесса

$$\xi_{n+1} = g(\xi_n), \quad \zeta_{n+1} = g_1(\zeta_n) \quad (6.13)$$

при $\xi_0 = 0$, $\zeta_0 = 0$.

При расчетах мы использовали итерационный метод.

Направление скорости

Как описано выше, центр взрыва находится на глубине около 3–5 м. Ударник нагоняет астероид сзади (в случае подрыва астероида на участке траектории ухода от Земли). Поэтому практически все осколки полетят вперед. Точнее, их вектор скорости образует острый угол с вектором скорости астероида. Летящие назад частицы материи превращены в ионизованный газ, их поведение безразлично для наших целей. Примем для простоты, что направления скоростей частиц равномерно распределены по полусфере с полюсом, соответствующим вектору скорости астероида. Это не совсем верно, как показано в (Григорян, Шапиро, 1971), однако неравномерность распределения и его зависимость от модуля скорости не превышают 50% и на данном этапе этим можно пренебречь. Таким образом, распределение углов подчиняется закону

$$f_3(\varphi_1) = \sin\varphi, \quad f_4(\lambda_1) = 1/(2\pi), \quad \varphi_1 \in [0, \pi/2], \quad \lambda_1 \in [0, 2\pi]. \quad (6.14)$$

Соответственно,

$$F_3(\varphi_1) = 1 - \cos\varphi_1, \quad F_4(\lambda_1) = \lambda_1/(2\pi). \quad (6.15)$$

Обратные к F_3 , F_4 функции элементарны. Если обозначить $F_3(\varphi_1) = \beta_1$, $F_4(\lambda_1) = \gamma$, то

$$\varphi_1 = \arccos(1 - \beta_1), \lambda_1 = 2\pi\gamma. \quad (6.16)$$

Заметим, что если подрыв производится на этапе сближения с Землей, то осколки должны полететь назад (подрыв направлен против направления движения астероида). Формулы (6.12) остаются справедливыми при замене третьего соотношения на $\varphi_1 \in [\pi/2, \pi]$. Распределение λ_1 не меняется. Формулы же (6.15), (6.16) для φ_1 переходят в

$$F_3(\varphi_1) = -\cos\varphi_1, \varphi_1 = \pi - \arccos\beta_1. \quad (6.17)$$

Рассматриваемый метод был апробирован нами на примере модели движения астероида (99942) Apophis. Результаты приведены в подразделе 6.4.

6.4 Тестирование методики предотвращения столкновения астероида с Землей

В разделе 6.3 описан метод предотвращения столкновения астероида с Землей путем превентивного разрушения опасного астероида во время предшествующего столкновению тесного сближения. В данном разделе описываются результаты оценки последствий разрушения на примере модельного объекта из облака неопределенности астероида (99942) Apophis.

Пусть астероид движется по орбите со следующими характеристиками:

- астероид проходит близко от Земли, имея в эпоху t_1 локально минимальное расстояние r_1 от ее центра, где r_1 сравнимо с радиусом лунной орбиты;
- траектория астероида после сближения представляет орбиту резонансного возврата (Chesley, 2006; Соколов и др., 2008). Это значит, что период обращения астероида вокруг Солнца в годах становится почти точно равным k_1/k_2 , где k_1, k_2 – небольшие целые числа. Астероид возвращается к Земле примерно в ту же дату в эпоху t_2 , $t_2 - t_1 = \tau$, где $\tau = k_1$ (в годах), или, что то же, k_2 (в оборотах астероида). Считаем, что номинальная орбита проходит в момент t_2 на локально минимальном расстоянии r_2 от центра Земли, где r_2 меньше радиуса Земли.

В эпоху t_0 в малой окрестности t_1 для предотвращения последующего столкновения астероид подрывается ядерным зарядным устройством. Исследуем траектории осколков от t_0 до t_3 , где t_3 немного больше t_2 , методом численного моделирования.

Была выбрана приводящая к столкновению траектория из облака возможных положений астероида Апофис, полученная на основании наблюдений до 2009 года, для которой $k_1 = 7$, $k_2 = 6$. Объект на данной орбите проходит 13 апреля 2029 года на расстоянии 36830 км от геоцентра, а 13 апреля 2036 года – на расстоянии 3613 км, что фактически соответствует столкновению. Размер астероида в нашем моделировании соответствовал $D = 200$ м, что позволяет считать объект полностью разрушимым на осколки до 10 м в диаметре. Число осколков было принято равным 10^5 .

Нами были рассмотрены шесть моментов взрыва:

- I) за 2 часа 34 мин. до сближения 2029 года;
- II) за 10 минут до сближения 2029 года;
- III) через 4 часа 38 мин. после сближения 2029 года;
- IV) через 9 часов 26 мин. после сближения 2029 года;
- V) через 19 часов после сближения 2029 года;
- VI) за 4 часа до сближения 2036 года.

На рисунке 6.7 звездочками показаны положения астероида в эти моменты времени (за исключением последнего) в геоцентрической системе координат в проекции на плоскость экватора. Линией показана орбита астероида, черными точками – положения астероида на орбите с шагом 0.1 суток, окружностями – положения Луны в эти же моменты времени. Земля показана своим астрономическим значком.

Модель сил, используемая при численном моделировании, включала учет влияния больших планет, Плутона, Луны, сжатия Земли и релятивистских эффектов от Солнца. Исследование орбитальной эволюции осколков выполнялось с помощью подсистемы «Evolution», описанной в разделе 3.8.

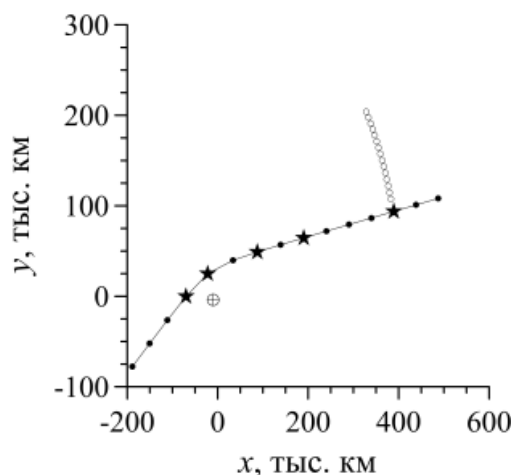


Рисунок 6.7 — Рассматриваемые моменты подрыва астероида

На каждый из указанных выше моментов времени проведено моделирование взрыва. Положение каждого осколка считалось совпадающим с положением астероида, а его скорость выбиралась случайным образом в соответствии с распределением (6.3), (6.14–6.15). Далее эволюция каждого осколка была исследована численно с использованием указанной выше модели сил. В таблице 6.6 для каждого взрыва представлены: номер взрыва (соответствует приведенным выше моментам времени), процент частиц, сталкивающихся с Землей в разные годы N_{col} , минимальное расстояние от геоцентра d_{min} в различные годы. В столбце d_{min} стоит прочерк, если тестовые частицы не входят в сферу тяготения Земли. Общее число осколков во всех случаях составляло 100 тысяч.

Как и следовало ожидать, наиболее опасным является взрыв перед сближением 2036 года (VI), который приводит к падению более половины осколков на Землю. Большинство остальных взрывов приводит к нескольким падениям в различные годы. Оптимальным представляется взрыв объекта сразу после сближения 2029 года (III), поскольку данный вариант приводит к падению минимального числа осколков и только в 2035 году. Далее рассмотрим радиоактивную опасность при этих падениях.

Общая активность Q_E вещества через час после ядерного взрыва энерговыделением 1 Мт чрезвычайно высока и составляет 300 ГКи, но быстро спадает со временем. Скорость распада совокупности большого числа изотопов меняется по сложному закону, однако с хорошим приближением в интервале

от нескольких минут до нескольких лет его можно считать степенным (Бурлаков, Тулинов, 1960):

$$Q_E = q_E t^{-1.2}, \quad (6.18)$$

где $q_E = 5.5$, если активность измерять в мегакюри, а время – в годах.

Таблица 6.6 — Оценка последствий взрыва

Год	$N_{\text{col}}, \%$	$d_{\text{min}}, \text{км}$	$N_{\text{col}}, \%$	$d_{\text{min}}, \text{км}$	$N_{\text{col}}, \%$	$d_{\text{min}}, \text{км}$
	I		II		III	
2029	0	11647	$3 \cdot 10^{-3}$	1183	0	—
2030	$1 \cdot 10^{-3}$	4068	$9 \cdot 10^{-3}$	630	0	—
2031	$2 \cdot 10^{-3}$	1012	$9 \cdot 10^{-3}$	1184	0	—
2032	$1 \cdot 10^{-3}$	408	$8 \cdot 10^{-3}$	321	0	—
2033	0	6580	$7 \cdot 10^{-3}$	1081	0	136708
2034	0	6567	$6 \cdot 10^{-3}$	235	0	38273
2035	$2 \cdot 10^{-3}$	348	$6 \cdot 10^{-3}$	1183	$1 \cdot 10^{-3}$	4554
2036	$4 \cdot 10^{-3}$	674	$12 \cdot 10^{-3}$	493	0	88861
2037	$8 \cdot 10^{-3}$	1372	$8 \cdot 10^{-3}$	1182	0	—
2038	0	8131	$5 \cdot 10^{-3}$	395	0	179212
2039	0	7120	$5 \cdot 10^{-3}$	1180	0	—
	IV		V		VI	
2029	0	94045	0	—	0	—
2031	0	101809	0	—		—
2032	0	11994	0	116136	0	—
2033	0	—	0	23635	0	—
2034	$1 \cdot 10^{-3}$	3135	0	34935	0	—
2035	$2 \cdot 10^{-3}$	2032	$1 \cdot 10^{-3}$	4732	0	—
2036	$5 \cdot 10^{-3}$	829	$2 \cdot 10^{-3}$	1211	$644 \cdot 10^{-3}$	127
2037	0	—	0	—	0	—
2038	$1 \cdot 10^{-3}$	3725	0	—	0	—

Как и ожидалось, подрыв перед падением (VI) ведет к выпадению более половины высокорadioактивных обломков. Данный вариант необходимо признать совершенно неприемлемым: на Землю обрушивается рой тел общей радиоактивностью в 35 ГКи. Даже если это вещество равномерно распылить по всей поверхности Земли, мы получим 70 Ки на квадратный километр. Сейчас принято считать приемлемым уровень заражения не более 5 Ки/км².

Подрыв незадолго до сближения (I и II) уже не катастрофичен, но много опаснее подрыва после сближения. Наиболее благоприятен случай III, когда через 6 лет после взрыва выпадает один осколок из 100 тысяч:

$$t = 6 \text{ лет}, Q_E = 0.64 \text{ МКи}.$$

Если принять, что активность Q_0 выпадающего в 2035 году осколка составляет $10^{-4}Q_E$, то $Q_0 = 64$ Ки. Рассеяние вещества осколка в атмосфере и выпадение продуктов абляции на площадь более 13 км² автоматически устраняет опасность радиации.

Разумеется, лучше всего выбрать момент подрыва, гарантирующий пролет всех осколков мимо Земли. Но такое вряд ли возможно, учитывая вероятностный характер начальных скоростей осколков.

В описанных выше исследованиях предполагается, что ядерное зарядное устройство доставляется на астероид космическим аппаратом, догоняющим его по гелиоцентрической орбите. Как правило, это требует больших геоцентрических скоростей. Например, скорость Апофиса во время тесного сближения 2029 года до расстояния порядка 38 тыс. км достигнет 7 км/с. Поэтому далее рассмотрим еще один вариант подрыва астероида, но уже с небольшой геоцентрической скоростью космического аппарата. В этом случае в гелиоцентрическом движении астероид догоняет космический аппарат, а не наоборот. Таким образом, взрыв придает осколкам не ускорение, а замедление их гелиоцентрической скорости. С точки зрения физики и математики изменение постановки задачи невелико. Преобразуется лишь распределение осколков по скоростям (как по величине, так и по направлению). Подрыв, когда взрыватель догоняет астероид, для краткости будем называть вариантом А, и вариантом В в обратном случае (Галушина и др., 2016).

Для моделирования взрыва был выбран модельный объект из облака неопределенности астероида (99942) Apophis, полученной на основе наблюдений до 2009 года (Быкова, Галушина, 2010). Рассматриваемый объект проходит 13 апреля 2029 года на расстоянии 36838 км от геоцентра, а 13 апреля 2036 года – на расстоянии 1270 км, т.е. фактически сталкивается. Диаметр астероида брался равным 200 м, а плотность $\rho = 2500 \text{ кг/м}^3$ (соответствующая веществу типа монолитного скального гранита), так что астероид в соответствии с заданной моделью распада полностью разрушается на осколки размером до 10 м (реальные астероиды имеют неправильную форму и могут быть как более, так и менее прочными, однако, поскольку задача данного исследования – дать качественную картину, допустима некоторая идеализация модельной задачи).

Результаты исследования орбитальной эволюции фрагментов астероида показаны в таблице 6.7, где представлена статистика тесных сближений и столкновений частиц с Землей. Для каждого года приведены: процент частиц, проходящих через сферу тяготения Земли N_{tyg} (радиус сферы тяготения $\approx 255812 \text{ км}$), падающих на нашу планету N_{col} и минимальное расстояние до геоцентра d_{min} , определяемое по всем осколкам. В данном случае взрыв был произведен через 4 часа 38 минут после сближения 13 апреля 2029 года (JD= 2462240.6). Расстояние до Земли составляет порядка 114 тыс. км, т.е. разрушение астероида происходит в пределах сферы тяготения Земли.

Что касается варианта А, то результаты показывают, что в сумме в разные годы (2032, 2035, 2036) падают всего 0.007% фрагментов. Наибольшее число сближений и столкновений происходит в 2036 году, что соответствует падению исходного объекта. Данный вариант можно считать относительно безопасным и вполне приемлемым. В случае же когда астероид догоняет ударник, ситуация гораздо хуже. В результате второго варианта взрыва существенная часть обломков устремляется назад к Земле, 0.008% из них падают на Землю, неся с собой значительную радиоактивность. Падения продолжаются и в последующие годы. Следует отметить, что даже, когда не падает ни одна частица (2031, 2034, 2035 и 2038 годы), часть обломков проходит очень близко к Земле (на расстоянии меньше 10 тыс. км). Таким образом, второй вариант взрыва необходимо признать совершенно неприемлемым.

Таблица 6.7 — Оценка последствий взрыва через 4 часа 38 минут после сближения

Год	$N_{\text{tyg}}, \%$	$N_{\text{col}}, \%$	$d_{\text{min}}, \text{км}$	$N_{\text{tyg}}, \%$	$N_{\text{col}}, \%$	$d_{\text{min}}, \text{км}$
	Вариант А			Вариант В		
2029	$49 \cdot 10^{-3}$	0	47956	$82 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-3}$	1541
2030	$7 \cdot 10^{-3}$	0	81328	$33 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	6160
2031	$8 \cdot 10^{-3}$	0	43934	$30 \cdot 10^{-3}$	0	8145
2032	$2 \cdot 10^{-3}$	10^{-3}	4433	$25 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	6163
2033	$1 \cdot 10^{-3}$	0	99914	$22 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	6391
2034	$18 \cdot 10^{-3}$	0	12893	$20 \cdot 10^{-3}$	0	9118
2035	$94 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	1905	$21 \cdot 10^{-3}$	0	9266
2036	$143 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$	777	$155 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-3}$	3571
2037	$1 \cdot 10^{-3}$	0	172932	$167 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	2685
2038	$4 \cdot 10^{-3}$	0	61313	$75 \cdot 10^{-3}$	0	8935
2039	—	—	—	$32 \cdot 10^{-3}$	10^{-3}	6141

Поскольку падения радиоактивных осколков сразу после взрыва в 2029 году представляются самыми опасными, то далее был проведен эксперимент, в котором предпринята попытка выяснить, возможно ли избежать столкновений в 2029 году, если сместить взрыв на более позднее время, и соответственно на большее расстояние от Земли. С этой целью рассмотрен момент через 9 часов 26 минут после сближения, на расстоянии 218 тыс. км от геоцентра. Результаты данного моделирования приведены в таблице 6.8, где обозначения аналогичны обозначениям таблицы 6.7.

Как видно из таблицы 6.8, смена момента взрыва мало повлияла на вариант А. В варианте В число столкновений слегка уменьшилось, однако принципиально картина не изменилась.

Рассмотрим подробнее, как распределяются осколки после взрыва. В качестве примера на рисунке 6.8 показано положение частиц через год после взрыва во всех рассмотренных случаях. Рисунки 6.8а и 6.8в соответствуют первому варианту взрыва, а рисунки 6.8б и 6.8г – второму. Взрыв на рисунках 6.8а и 6.8б произведен через 4 часа 38 минут после сближения, а на рисунках 6.8в и 6.8г – через 9 часов

26 минут. Линией показана орбита родительского тела. На всех графиках символом «+» обозначено положение взорванного объекта, Земля отмечена своим астрономическим значком.

Таблица 6.8 — Оценка последствий взрыва через 9 часов 26 минут после сближения

Год	$N_{\text{tyg}}, \%$	$N_{\text{col}}, \%$	d_{min}	$N_{\text{tyg}}, \%$	$N_{\text{col}}, \%$	d_{min}
	Вариант А			Вариант В		
2029	$41 \cdot 10^{-3}$	0	85331	$67 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$	301
2030	0	0	—	$19 \cdot 10^{-3}$	10^{-3}	3400
2031	0	0	—	$15 \cdot 10^{-3}$	0	32336
2032	10^{-3}	0	170854	$9 \cdot 10^{-3}$	0	9721
2033	$6 \cdot 10^{-3}$	0	60674	$13 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	1970
2034	$20 \cdot 10^{-3}$	10^{-3}	5491	$11 \cdot 10^{-3}$	0	13413
2035	$90 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$	1309	$7 \cdot 10^{-3}$	0	28493
2036	$121 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-3}$	1130	$189 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-3}$	227
2037	$3 \cdot 10^{-3}$	0	95365	$142 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	2805
2038	$4 \cdot 10^{-3}$	0	17591	$48 \cdot 10^{-3}$	10^{-3}	2556
2039	0	0	—	$23 \cdot 10^{-3}$	0	8703

Как видно из рисунков 6.8а и 6.8в, при взрыве по ходу движения астероида максимальная концентрация частиц наблюдается в окрестности исходного объекта, остальные отстают, образуя «шлейф». Иная картина характерна для взрыва против направления движения астероида (рисунки 6.8б и 6.8г). В данном случае уже через год осколки распределяются по орбите, что приводит к возможным сближениям и столкновениям с Землей в течение всего года. Следует отметить, что вариант А приводит к увеличению скорости и большой полуоси большинства фрагментов. Вариант В имеет обратный эффект, что, в частности, приводит к сближениям обломков со стороны Солнца. Такие сближения и столкновения могут оказаться незамеченными заранее.

Рисунок 6.8 показывает, что через год происходит замыкание тора частиц астероида только при втором варианте взрыва. Для того, чтобы обнаружить время замыкания при первом варианте, на рисунке 6.9 представлены аналогичные данные

через два года после взрыва, которые показывают, что значительная часть частиц распространились по орбите с большой полуосью большей чем у родительского тела. Данный рисунок соответствует разрушению астероида через 4 часа 38 минут после сближения, графики для второго момента не приводятся, поскольку распределение частиц в рассмотренных случаях не имеет принципиальных отличий.

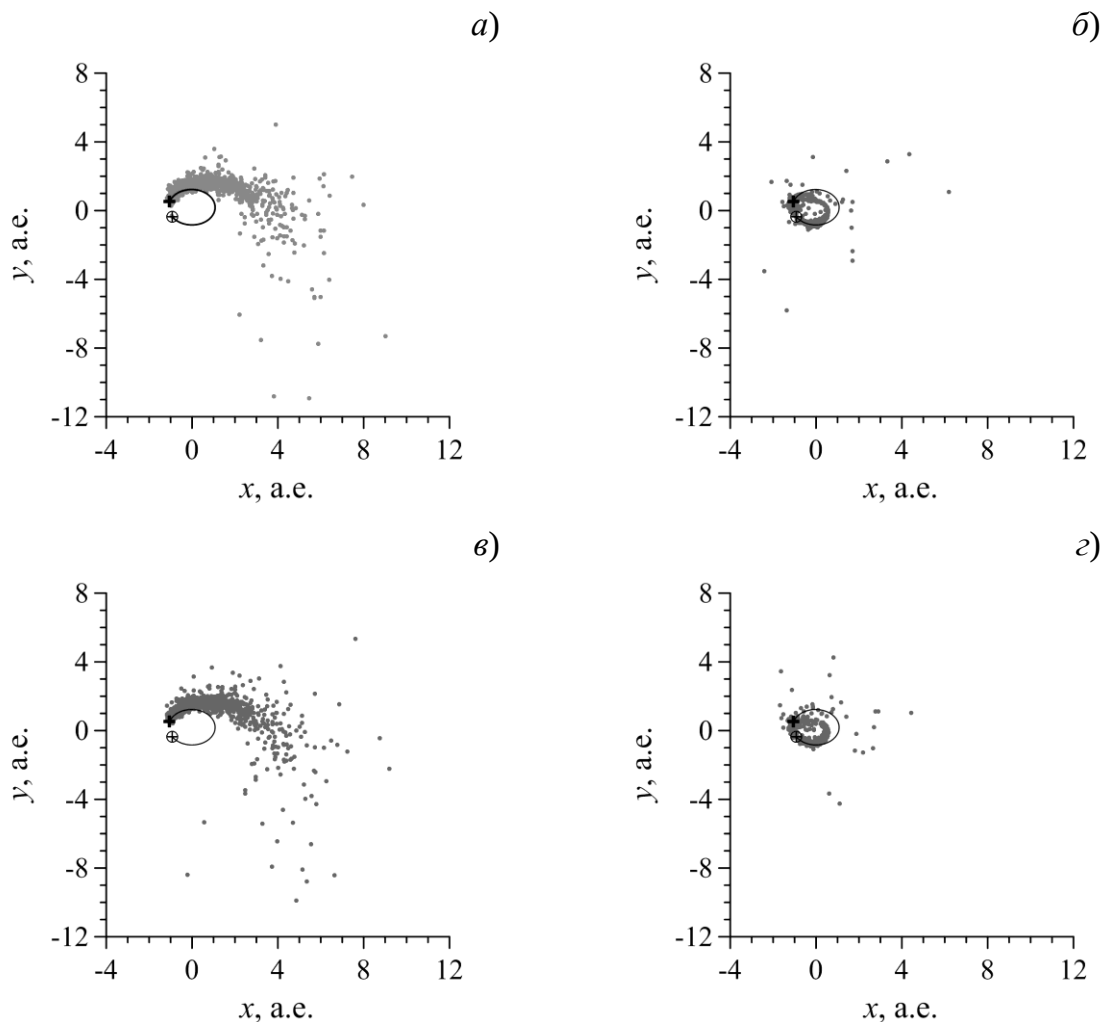


Рисунок 6.8 — Проекция положения частиц («•»), Земли («⊕») и взорванного астероида («+») на плоскость экватора через год после взрыва

Кроме того, была проведена оценка радиоактивности фрагментов астероида, упавших на Землю. Исследования показали, что в наихудшем случае варианта взрыва А Q_E первых выпавших осколков составляет 1.0 МКи ($t = 4$ года), а в варианте взрыва В Q_E даже в лучшем случае составляет 12 МКи, $t = 6$ месяцев, а в худшем – 111.3 МКи, $t \cong 1$ месяц, что также говорит о неприменимости второго варианта.

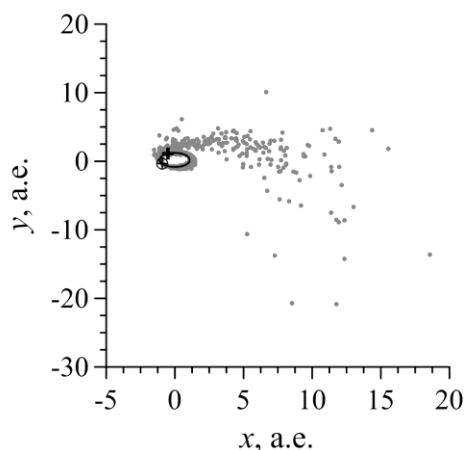


Рисунок 6.9 — Проекция положения частиц («•»), Земли («⊕») и взорванного астероида («+») на плоскость экватора через два года после взрыва

Таким образом, мы рассмотрели задачу уничтожения опасного астероида ядерным зарядом задолго перед предсказанным падением на Землю. Цель исследования — выявить принципиальную возможность (или невозможность без опасных последствий) этого способа защиты от астероидной угрозы. Были сделаны предположения, идеализирующие задачу: шарообразность астероида, дробление на 10^5 осколков, простая функция распределения осколков по компонентам скорости. Результат показал реализуемость способа. При подрыве после сближения на Землю выпадает за 10 лет от $10^{-3}\%$ до $9 \cdot 10^{-3}\%$ осколков. За это время их радиоактивность снижается до приемлемого уровня. Заметим попутно, что взрыв незадолго до падения абсолютно неприемлем: на Землю обрушивается большое число высокорadioактивных осколков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в диссертационной работе решен целый спектр задач астероидной динамики, включающий проведение позиционных наблюдений, разработку программного обеспечения, исследование орбитальной эволюции, оценку вероятности столкновения и его предотвращения. Подробно исследован класс астероидов с малыми перигелийными расстояниями, некоторое внимание уделено другим подклассам АСЗ, в частности потенциально-опасным для Земли объектам.

Полученные результаты состоят в следующем.

Разработан программный комплекс «ИДА», который дает возможность проводить всестороннее исследование динамики астероидов, сближающихся с Землей, путем решения следующих задач: построение численной модели движения астероида с учетом заданных возмущающих факторов, улучшение орбиты астероида по данным позиционных наблюдений, исследование структуры возмущений, построение начального облака неопределенности линейными и нелинейными методами, исследование орбитальной эволюции начального облака неопределенности, выявление сближений и столкновений исследуемого астероида с большими планетами, Луной и Плутоном, оценка вероятности столкновения астероида с большими планетами и Луной, выявление соизмеримостей средних движений астероида и больших планет, выявление и исследование вековых резонансов, исследование хаотичности и оценка времени предсказуемости движения с помощью параметра OMEGNO, демонстрация движения астероида и планет на экране компьютера в различных системах координат. Особенностью программного комплекса является возможность решать перечисленные задачи в автоматическом режиме для большого числа объектов. На большинство подсистем получены свидетельства государственной регистрации, программный комплекс внедрен в учебный процесс и научную деятельность Томского государственного университета и Уральского федерального университета.

Проведены наблюдения десяти астероидов с малыми перигелийными расстояниями и девяти астероидов с плохо определёнными орбитами. Кроме того, в первом тестовом сеансе наблюдался астероид (3753) Cruithne, и особое внимание

было уделено объектам 2023 BU во время тесного сближения с Землей в январе 2023 года и (65803) Didymos после столкновения космического аппарата DART с его спутником. Показано, что при тщательном подборе режима работы телескопа и параметров съемки на телескопе Zeiss-2000 Центра коллективного пользования «Терскольская обсерватория» возможно наблюдение астероидов до 22^m , а также в окрестности тесного сближения с Землей. Обзорные эфемериды облегчают поиск астероида на небесной сфере, однако в большинстве случаев они случайно попадают в поле зрения обзоров. Полученные нами наблюдения различных групп астероидов, сближающихся с Землей, соответствуют мировому уровню и способствуют уменьшению области неопределенности изучаемых астероидов.

Предложенная методика исследования структуры возмущений позволяет провести подробный анализ влияния различных возмущающих факторов на движение астероидов на основе изучения не только номинальной орбиты, но и начального облака неопределенности. Использование данной методики для исследования динамики астероидов с малыми перигелийными расстояниями показало необходимость учитывать влияние больших планет, Луны, релятивистских эффектов от Солнца, и сжатия Солнца, а для объектов с хорошо определенной орбитой и эффекта Ярковского.

Проведены оценки параметра эффекта Ярковского для всех астероидов с малыми перигелийными расстояниями. Для 23 астероидов удалось определить значение параметра эффекта Ярковского с точностью, достаточной для моделирования эволюции. Для остальных изучаемых объектов значение параметра оказалось завышенным, что связано с недостаточным количеством наблюдательного материала. Показано, что эффект Ярковского оказывает существенное влияние на вероятное значение большой полуоси орбит астероидов, что приводит к изменениям в числе и расстоянии сближений; кроме того, в большинстве случаев учет эффекта Ярковского приводит к уменьшению неопределенности положения астероидов. Исследования на основе реальных и модельных наблюдений показали, что точность определения параметра эффекта Ярковского линейно зависит от интервала наблюдений, причем для каждого астероида есть предельный мерный интервал, при достижении которого точность определения параметра перестает улучшаться без увеличения точности наблюдений.

Оценена нелинейность задачи оценивания начальных параметров для всех астероидов с малыми перигелийными расстояниями. На основе полученного коэффициента по состоянию на 2021 год показано, что для 2015 КО120 задача является сильно нелинейной, для 6 объектов – умеренно, и для остальных 46 – слабо нелинейной. Путем исследования орбитальной эволюции начального облака неопределенности, построенного линейным и нелинейным методами, продемонстрировано, что для надежного прогноза в сильно и умеренно нелинейном случае необходимо использовать нелинейные методы.

Среди 60 астероидов с малыми перигелийными расстояниями 33 движутся в окрестности орбитальных резонансов с одной или несколькими планетами одновременно; 16 соизмеримостей из 50 являются устойчивыми. Результаты исследования орбитальной эволюции показали, что влияние эффекта Ярковского на устойчивые резонансные соотношения незначительно: он может несущественно менять амплитуду либрации, но не приводит к разрушению резонанса. В случае же неустойчивого резонанса изменяется число проходов через точную соизмеримость, а для некоторых объектов резонанс становится даже более устойчивым; эффект Ярковского оказывает заметное влияние на неустойчивые резонансные соотношения. Влияния эффекта Ярковского на вековые резонансы замечено не было.

Реализован метод быстрого оценивания вероятности столкновения, основанный на линейных отображениях в окрестности целевой орбиты, в качестве которой выступает близкая к столкновительной орбита. Тестирование на ряде АСЗ показало, что предложенный метод дает тот же результат, что и численное интегрирование уравнений движения тестовых частиц, но требует на порядки меньших временных затрат.

Разработан метод предотвращения столкновения астероида с Землей, основанный на превентивном разрушении астероида во время тесного сближения, предшествующего столкновению. Проведено исследование эффективности метода на примерах различных вариантов взрыва, в результате чего выбран оптимальный. Тестирование продемонстрировало, что метод обеспечивает защиту от падения самого объекта и его осколков.

Следует отметить следующие возможные перспективные направления развития рассмотренной в диссертации тематики. Важной задачей является получение максимально точных наблюдений астероидов, в частности с использованием предложенной в работе методики построения поисковых эфемерид. Представляется перспективным также применение разработанных методик и программного комплекса к исследованию динамики других подклассов АСЗ.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- Абалакин В.К. Основы эфемеридной астрономии. М.: Наука. 1979. – 448 с.
- Авдюшев В.А. Новый метод для статистического моделирования возможных значений параметров в обратных задачах орбитальной динамики // Астрономический вестник. – 2009. – Т. 43. № 6. – С. 565–574.
- Авдюшев В.А. Интегратор Гаусса–Эверхарта // Вычисл. технологии. – 2010. – Т. 15. № 4. – С. 31–47.
- Авдюшев В.А. Линейные отображения в исследовании локальной орбитальной динамики // Изв. вузов. Физика. – 2012. – Т. 55. № 10/2. – С. 5–10.
- Авдюшев В.А., Галушина Т.Ю. Линейные отображения для быстрого численного оценивания вероятности столкновения астероида с Землей // Изв. Вузов. Физика. – 2013. – Т. 56. № 6/3. – С. 182–184.
- Авдюшев В.А., Галушина Т.Ю. Быстрое численное оценивание вероятности столкновения астероида с планетой // Астрономический вестник. – 2014. – Т. 48. № 4. – С. 309 – 317.
- Авдюшев В.А. Численное моделирование орбит небесных тел // Томск: Издательский дом Томского государственного университета. 2015. 336 с.
- Авдюшев В.А., Сюсина О.М., Тамаров В.А. Нелинейность в обратных задачах астероидной динамики // Астрономический вестник. – 2021. – Т. 55. № 1. – С. 84-96.
- Авдюшев В.А. Коллокационный интегратор Lobbié в задачах орбитальной динамики // Астрон. вест. – 2022. – Т. 56. № 1. – С. 36–46.
- Айвазян С.А., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика. Основы моделирования и первичная обработка данных // Справочное изд. М.: Финансы и статистика. 1983. – 471 с.
- Аксенов Е.П. Теория движения искусственных спутников Земли. М.: Наука. 1977. – 360 с.
- Александрова А.Г., Томилова И.В., Бордовицына Т.В. Анализ влияния вековых резонансов на динамическую эволюцию околоземных объектов, движущихся по почти круговым орбитам в области супер-ГЕО // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2014. – Т. 57. № 10/2. – С. 95–102.

- Александрова А.Г., Галушина Т.Ю., Прищепенко А.Б., Холшевников К.В., Чечеткин В.М. О превентивном разрушении опасного астероида // *Астрономический журнал*. – 2016. – Т. 93. № 6. – С. 595–602.
- Александрова А.Г., Галушина Т.Ю., Прищепенко А.Б., Холшевников К.В., Чечеткин В.М. О возможности безопасного разрушения угрожающего Земле астероида // *Астрономический журнал*. – 2019. – Т. 96. № 9. – С. 1–7.
- Алешкина Е.Ю., Куприянов В.В., Девяткин А.В. и др. Астрометрические и фотометрические исследования упавшего на Землю астероида 2008 TC₃ // *Астрон. вестн.* – 2011. – Т. 45. Вып. 1. – С. 36–44.
- Архипов В.Н., Борисов В.А., Будков А.М. и др. Механическое действие ядерного взрыва. М.: Физматлит. 2003. – 384 с.
- Астероидно-кометная опасность: вчера, сегодня, завтра // Под ред. Б.М. Шустова, Л.В. Рыхловой. М.: Физматлит. 2010. – 384 с.
- Астероидно-кометная опасность: стратегия противодействия / Под общ. ред. В.А. Пучкова / М.: ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ). 2015. – 272 стр.
- Батурин А.П. Построение видимых границ областей возможных движений космических объектов способом сечений // *Исследования по баллистике и смежным вопросам механики*. Томск: Изд-во Том. ун-та. 2001. Вып. 4. С. 83–85.
- Батурин А.П. Построение областей возможных движений космических объектов в различных переменных // *Исследования по баллистике и смежным вопросам механики*. Томск: Изд-во Том. ун-та. 2002. Вып. 5. С. 113–117.
- Батурин А.П. Поиск столкновительных орбит астероидов, сближающихся с Землей, с помощью минимизации произведения двух целевых функций // *Изв. Вузов. Физика*. – 2011. – Т. 54. № 6/2. – С. 103–109.
- Батурин А.П. Повышение точности прогнозирования движения космических объектов путем устранения влияния разрывов производных от координат возмущающих тел // *Изв. Вузов. Физика*. – 2012. – Т. 55. № 10/2. – С. 82–88.
- Бордовицына Т.В., Галушина Т.Ю., Авдюшев В.А. Стабилизирующие и регуляризирующие преобразования в задаче численного моделирования движения особых астероидов // *Изв. вузов. Физика*. 2003. Т. 46. № 12. Приложение. С. 23–34.

- Бордовицына Т.В., Авдюшев В.А. Теория движения искусственных спутников Земли. Аналитические и численные методы. Учебное пособие. Томск: Изд-во Том. ун-та. 2007. – 220 с.
- Бордовицына Т.В., Томилова И.В., Чувашов И.Н. Влияние вековых резонансов на долговременную орбитальную эволюцию неуправляемых объектов спутниковых радионавигационных систем в области МЕО // Астрономический вестник. – 2012. – Т. 46. № 5. – С. 356–368.
- Быкова Л.Е., Галушина Т.Ю., Батурин А.П. Построение поисковых эфемерид астероидов на основе областей их возможных движений. I. Алгоритм. // Изв. вузов. Физика. Приложение. Небесная механика и прикладная астрономия. – 2007а. – Т. 50. № 12/2. – С. 5–12.
- Быкова Л.Е., Галушина Т.Ю., Батурин А.П. Построение поисковых эфемерид астероидов на основе областей их возможных движений. II. Программная система. // Изв. вузов. Физика. Приложение. Небесная механика и прикладная астрономия. – 2007б. Т. 50. № 12/2. – С. 13–19.
- Быкова Л.Е., Галушина Т.Ю. Алгоритмическое и программное обеспечение решения задач динамики астероидов, сближающихся с Землей, в среде параллельного программирования // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2009. – Т. 52. № 10/2. – С. 12–19.
- Быкова Л.Е., Галушина Т.Ю. Исследование движения астероида (99942) Апофис с использованием многопроцессорной вычислительной системы СКИФ Cyberia // Космические исследования. – 2010. – Т. 48. № 5. – С. 419–426.
- Быкова Л.Е., Галушина Т.Ю., Батурин А.П. Прикладной программный комплекс «ИДА» для исследования динамики астероидов // Изв. вузов. Физика. – 2012. – Т. 55. № 10/2. – С. 89–96.
- Боровков А.А. Теория вероятностей. М.: Эдиториал. УРСС. 1999. – 472 с.
- Бурлаков В.Д., Тулинов Н.Н. Действие ядерного оружия М.: Воениздат. 1960. – 588 с.
- Брумберг В.А. Релятивистская небесная механика. М.: Наука. 1972. – 382 с.
- Васильев Н.В. Тунгусский метеорит. Космический феномен лета 1908 г. М. Русская панорама. 2004. – 372 с.

- Виноградова Т.А., Кочетова О.М., Чернетенко Ю.А., Шор В.А., Ягудина Э.И. Орбита астероида (99942) Апофис, определенная из оптических и радарных наблюдений // *Астрономический вестник*. – 2008. – Т. 42. № 4. – С. 291–300.
- Галушина Т.Ю. Популяция астероидов, сближающихся с Землей // *Вестник СибГАУ*. – № 4 (56). – 2014. – С. 33–40.
- Галушина Т.Ю., Александрова А.Г., Холшевников К.В. Сравнение эффективности применения различных способов превентивного разрушения опасного астероида // *Изв. Вузов. – Физика*. – 2016. – Т. 59. № 10/2. – С. 70–74.
- Галушина Т.Ю., Летнер О.Н. Исследование влияния эффекта Ярковского на движение астероидов с малыми перигелийными расстояниями // *Изв. Вузов. Физика*. – 2020. – Т. 63. № 1. – С. 63–70.
- Галушина Т.Ю., Летнер О.Н., Сюсина О.М. Оценка точности определения значения параметра эффекта Ярковского на основе реальных и модельных наблюдений астероидов // *Изв. Вузов. Физика*. – 2021. – Т. 64. № 9. – С. 170–174.
- Галушина Т.Ю., Самбаров Г.Е. Исследование динамики астероида 3200 Phaethon под влиянием наложения различных резонансов // *Астрономический вестник*. – 2019. – Т. 53. № 3. – С. 231–239.
- Галушина Т.Ю. Орбитальные и вековые резонансы в движении астероидов, сближающихся с Землей // *Физика космоса: тр. 49-й Международ. студ. науч. конф. Екатеринбург, Россия, 27 – 31 янв. 2020 г.* – Екатеринбург: Изд-во Урал. Ун-та. – 2020. – С. 6–18
- Галушина Т.Ю., Скрипниченко П.В. Апробация методики отбраковки наблюдений астероидов, выполненных на СБГ АО УрФУ // *Изв. Вузов. Физика*. – 2013. – Т. 56. № 10/2. – С. 51–56.
- Галушина Т.Ю., Скрипниченко П.В. Астероидная опасность – от первых представлений до наших дней // *Физика космоса: Труды 43-й международной студенческой научной конференции, 3 – 7 февр. 2014 г.* – Екатеринбург 2014: Изд-во Урал. Ун-та. 2014. С. 237–248.
- Галушина Т.Ю., Сюсина О.М. Сравнительный анализ методик получения параметра эффекта Ярковского из наблюдений // *Изв. Вузов. Физика*. – 2020. – Т. 63. № 3. – С. 65–69.

- Галушина Т.Ю., Летнер О.Н., Сюсина О.М., Ниганова Е.Н. Влияние эффекта Ярковского на орбитальные резонансы астероидов с малыми перигелийными расстояниями // Изв. вузов. Физика. 2022. – Т. 65. № 5. – С. 105–112.
- Гребеников Е.А., Рябов Ю.А. Резонансы и малые знаменатели в небесной механике. М.: Наука. 1978 – 128 с.
- Григорян С.С., Шапиро Г.С. Действие ядерного взрыва. М.: Мир. 1971. – 312 с.
- Девяткин А.В., Горшанов Д.Л., Куприянов В.В., Верещагина И.А. Программные пакеты «Апекс-I» и «Апекс-II» для обработки астрономических ПЗС-наблюдений // Астрономический вестник. Исследования Солнечной системы. – 2010. – Т. 44. № 1. – С. 74–87.
- Десмарс Дж., Арлот Дж.-Е., Венне А. Оценка точности сближения методом bootstrap // Космические исследования. – 2010. – Т. 48. № 5. – С. 484–490.
- Дубошин Г.Н. Небесная механика. Основные задачи и методы. М.: Наука. 1968. – 800 с.
- Емельяненко В.В. и др. Астрономические и физические аспекты Челябинского события 15 февраля 2013 г. // Астрономический вестник. – 2013. – Т. 47. № 4. – С. 262 – 277.
- Емельяненко В.В. Астероиды, сближающиеся с Солнцем // Астрономический вестник. – 2017. – Т. 51. № 1. – С. 67–71.
- Емельяненко В.В., Емельяненко Н.Ю. Долгоживущий околоземный астероид 2013 RB6 // Астрономический вестник. – 2018. – Т. 52. № 1. – С. 70–72.
- Емельяненко В.В., Нароенков С.А. Определение негравитационных эффектов в движении околосолнечных объектов 321P, 322P, 323P и 342P // Астрономический вестник. – 2018. – Т. 52. № 1. – С. 73–78.
- Елькин А.В., Соколов Л.Л., Титов В.Б., Шмыров А.С. Квазислучайные движения в гравитационном поле N планет // Труды астрономической обсерватории СПбГУ. – 2003. – XLV. – С. 73–114.
- Ермаков С.М., Михайлов Г.А. Статистическое моделирование. М.: Наука. 1982. – 296 с.
- Железнов Н.Б. Влияние корреляционных связей между орбитальными параметрами астероида на определение вероятности его столкновения с планетой методом Монте-Карло// Астрономический вестник. – 2010. – Т. 44. № 2. – С.150–157.

- Железнов Н.Б., Новиков Ф.А., Шор В.А. AMPLE 3 – Многоцелевой программный пакет для исследования малых планет и комет // Труды ИПА РАН. Вып. 21. Санкт-Петербург: «Наука». – 2010 – С. 230–235.
- Заботин А.С., Медведев Ю.Д. Определение орбит и эллипсоидов рассеяния потенциально опасных для Земли астероидов // Труды ИПА РАН. – 2008. – вып. 19. – С. 68–78.
- Заусаев А.Ф., Денисов С.С., Деревянка А.Е. Исследование эволюции астероида 2012 DA14 // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки. – 2012. – Вып. 3(28). – Р. 211–214.
- Ивашкин В.В., Стихно К.А. О проблеме коррекции орбиты сближающегося с Землей астероида (99942) Apophis. // Доклады Академии Наук. 2008. – Т. 419. № 5. – С. 624–627.
- Ивашкин В.В., Крылов И.В., Лан А. Оптимальные траектории для экспедиции КА к астероиду Апофис с возвращением к Земле // Астрономический вестник. – 2013. – Т. 47. № 4. – Р. 361–372.
- Ивашкин В.В., Стихно К.А. О предотвращении возможного столкновения астероида Апофис с Землей // Астрономический вестник. – 2009. – Т.43. № 6. – С. 502–516.
- Ивашкин В.В., Гуо П., Стихно К. А. Исследование характеристик вероятной области соударения астероида Апофис с Землей в 2036 г. // Космические исследования. – 2020. – Т. 58. № 1. – С. 27–39.
- Измайлов И.С., Ховричева М.Л., Ховричев М.Ю., Кияева О.В., Хруцкая Е.В., Романенко Л.Г., Грошева Е.А., Масленников К.Л., Калинин О.А. Астрометрические ПЗС-наблюдения визуально-двойных звезд в Пулковской обсерватории. Письма в Астрономический журнал. – 2010. – Т. 36. № 5. – С. 365–371.
- Кочетова О.М. Определение масс малых планет динамическим методом. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Санкт-Петербург. 2004. – 105 с.
- 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. // Астрономический вестник. – 2009. – Т. 43. № 4. – С.338–347.

- Кочетова О.М., Чернетенко Ю.А., Шор В.А. Орбита астероида (99942) Апофис и оценка вероятности его столкновения с Землей в ближайшие десятилетия // Изв. вузов. Физика. – 2013. – Т. 56. № 6-3. – С. 223–225.
- Лидов М.Л. Эволюция искусственных спутников планет под действием гравитационных возмущений от внешнего тела // Искусственные спутники Земли. – 1961. – Т. 8. – С. 5–45.
- Львов В.Н., Цекмейстер С.Д. Использование программного пакета EPOS для исследования объектов Солнечной системы // Астрономический вестник. – 2012. – Т. 46. № 3. – С. 190–192.
- Мещеряков С.А., Липницкий Ю.М. Оценки эффективности отклонения опасного космического объекта с помощью взрыва или удара // Журнал технической физики. – 2015. – Т. 85. № 1. – С. 26–30.
- Мюррей К., Дермотт С. Динамика Солнечной системы. М.: Физматлит. 2009. – 588 с.
- Панасенко А.И., Чернетенко Ю.А. Моделирование влияния эффекта Ярковского на движение астероидов // Труды ИПА РАН. — 2014. — № 31. — С. 59–65.
- Питьева Е.В. Релятивистские эффекты и сжатие Солнца из радарных наблюдений планет и космических аппаратов // Письма в Астрономический журнал: Астрономия и космическая астрофизика. – 2005. – Т. 31. № 5. – С. 378–387.
- Питьева Е.В., Павлов Д.А., Питьев Н.П. Динамическая модель Солнечной системы в эфемеридах планет ЕРМ // Труды Института прикладной астрономии РАН. – 2019. – № 51. – С. 82–92.
- Поль В.Г., Симонов А.В., Суханов К.Г. О миссии разведки астероида Апофис // «Околоземная астрономия–2007». Мат. междунар. конф. Терскол. 3–7 сент. 2007 г. Нальчик. 2008. Р. 200–213.
- Радзиевский В.В. Механизм разрушения астероидов и метеоритов // Астрономический журнал – 1952. – Т. 29. – С. 162–170.
- Симоненко А.Н. Астероиды или тернистые пути исследований. М.: Наука. 1985. 208 с.
- Скрипниченко П.В., Галушина Т.Ю. Исследование структуры возмущений и вероятностной орбитальной эволюции на примере астероида 99942 Apophis // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2013. – Т. 56. № 6/3. – Р. 229–231.

- Скрипниченко П.В., Галушина Т.Ю., Шагабутдинов А.А. Исследование структуры возмущений некоторых АСЗ с малыми перигелийными расстояниями // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2014. – Т. 57. №10-2. – С.25–31.
- Соколов Л.Л., Башаков А.А., Питьев Н.П. Особенности движения астероида 99942 Апофис // Астрономический вестник. – 2008. – Т. 42. № 1. – С. 20–29.
- Соколов Л.Л., Башаков А.А., Борисова Т.П., Петров Н.А., Питьев Н.П., Шайдулин В.Ш. Траектории соударения астероида Апофис с Землей в XXI веке // Астрономический вестник. – 2012. – Т. 46. № 4. – Р. 311–320.
- Соколов Л.Л., Кутеева Г.А., Петров Н.А., Эскин Б.Б., Баляев И.А., Васильев А.А. О характеристиках особых траекторий астероида Апофис и возможности увода его от соударений с Землей // Астрономический вестник. Исследования Солнечной системы. – 2021. – Т. 55. № 3. – С. 265–271.
- Стихно К.А. Метод поиска траекторий опасных небесных тел, приводящих к столкновению с Землей // Вест. СибГАУ. Красноярск. 2011. Т. 6(39). – С. 46–50.
- Сюсина О.М., Черницов А.М., Тамаров В.А. Новые алгоритмы построения методом Монте-Карло начальных доверительных областей движения малых тел // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2009. – Т. 50. № 12/2. – С. 48-55.
- Сюсина О. М., Черницов А. М. Тамаров В.А. Оценивание нелинейности в задачах построения начальных доверительных областей движения малых тел // Изв. вузов. Физика. – 2011. – Т. 52. № 6/2. – С. 71–77.
- Сюсина О.М., Черницов А.М., Тамаров В.А. Построение доверительных областей в задаче вероятностного исследования движения малых тел Солнечной системы // Астрономический вестник. – 2012. – Т. 46. № 3. – С. 209–222.
- Сюсина О.М., Черницов А.М., Тамаров В.А. Анализ способов оценивания нелинейности в задачах построения областей возможных движений астероидов // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2013а. – Т. 56. № 6 (3). – С. 232–234.
- Сюсина О.М., Черницов А.М., Тамаров В.А., Самбаров Г.Е. Способ оценки влияния модели сил на систематическую ошибку определения областей возможных

- движений астероидов // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2013б. – Т. 56. № 6(3). – С.235–237.
- Сюсина О.М., Галушина Т.Ю., Определение значения эффекта Ярковского для астероидов с малыми перигелийными расстояниями // Изв. Вузов. Физика. – 2021. – Т. 64. № 7 – С. 151–156.
- Тукмаков А.В. Бакалаврская выпускная работа «Способы предотвращения астероидной опасности» М.: Национальный исследовательский университет. Высшая школа экономики. Кафедра механики и математического моделирования. 2013. – 52 с.
- Черницов А.М., Батурин А.П., Тамаров В.А. Анализ некоторых методов определения вероятностной эволюции движения малых тел Солнечной системы // Астрономический вестник. – 1998. – Т. 32. № 5. – С. 459–467.
- Черницов А.М., Дубас О.М., Тамаров В.А. Способы уменьшения нелинейности задачи наименьших квадратов при построении областей возможных движений астероидов // Изв. вузов. Физика. – 2006. Приложение. – Т. 49. № 2. – С. 44–51.
- Черницов А.М., Тамаров В.А., Авдюшев В.А., Баньщикова М.А., Дубас О.М. Особенности определения доверительных областей в пространстве начальных параметров движения малых тел Солнечной системы // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2007. – № 12/2. – С. 33–43.
- Чириков В.В. Нелинейный резонанс. Учебное пособие. Изд-во НГУ. 1977. – 82 с.
- Шевченко И.И., Куприянов В.В., Мельников А.В. Хаотическая динамика астероидов и максимальные показатели Ляпунова // Астрономический вестник. – 2003. – Т. 37. № 1. – С. 80–89.
- Шевченко И.И. Резонансы и хаос в динамике тел Солнечной системы // В книге: В.В. Орлов и др. «Астрономия: традиции, настоящее и будущее». СПб: СПбГУ. 2007. – С. 284–314.
- Шефер В.А. Регуляризирующие и стабилизирующие преобразования в задаче исследования движения особых малых планет и комет: Автореф. дис. к.ф.-м.н. Казань. 1986. – 13 с.
- Шефер В.А. Определение показателей хаотичности орбит с аналитически нормированным касательным вектором // Изв. вузов. Физика. 2011. – Т. 54. – № 6/2. – С. 13–21.

- Шефер В.А., Коксин А.М. Вычисление показателей хаотичности орбит, основанных на касательных векторах: применение к ограниченной задаче трех тел // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2013. – Т. 56. № 6/3. – С. 256–258.
- Шефер В.А., Коксин А.М. Быстрые ляпуновские индикаторы OFLI и OMEGNO: связь и отличительные особенности // Изв. вузов. Физика. 2016. – Т. 59. № 1. – С. 58–62.
- Шмыров А.С., Шмыров В.А. Теория вероятностей. СПб.: ВВМ. 2012. – 194 с.
- Шор В.А., Чернетенко Ю.А. Кочетова О. М. Железнов Н.Б. О влиянии эффекта Ярковского на орбиту Апофиса // Астрономический вестник. – 2012. – Т. 46. №. 2. – Р. 131–142.
- Шустов Б.М., Рыхлова Л.В., Кулешов Ю.П. и др. Концепция системы противодействия космическим угрозам: астрономические аспекты // Астрономический вестник. – 2013. – Т. 47. № 4. – Р. 327–340.
- Эльясберг П.Е. Определение движения по результатам измерений. М.: Изд-во «Наука», 1976. – 416 с.
- Ярковский И.О. Плотность светового эфира и оказываемое им сопротивление движению. – Брянск: Тип. Юдина. 1901. – 17 с.
- Aleshkina E.Y., Kupriyanov V.V., Devyatkin A.V., Vereshchagina I.A., Slesarenko V.Yu., L'Vov V.N., Tsekmeyster S.D. Astrometric and photometric studies of the asteroid 2008 TC3 // Solar System Research. – 2011. – Vol. 45. Is. 1. – P. 34–42.
- Avdyushev V.A. Nonlinear methods of statistic simulation of virtual parameter values for investigating uncertainties in orbits determined from observations // Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy. – 2011. – Vol. 110. Is. 4. – P. 369–388.
- Armelin R., Di Lizia P., Bernelli-Zazzera F., Berz M. Asteroid close encounters characterization using differential algebra: the case of Apophis // Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy. – 2010. – Vol. 107. – P. 451–470.
- Benson C.J., Scheeres D. J., Moskovitz N.A. Spin state evolution of asteroid (367943) Duende during its 2013 Earth flyby // Icarus. – 2020. – Vol. 340. – article id. 113518.
- Beekman G. I.O. Yarkovsky and the Discovery of 'his' Effect // Journal for the History of Astronomy. – 2006. – Vol. 37. – P. 71–86.

- Bonsor A., Wyatt M.C. The scattering of small bodies in planetary systems: constraints on the possible orbits of cometary material // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 2012. – Vol. 420. Is. 4. – P. 2990–3002.
- Bottke W.F., Vokrouhlicky D., Rubincam D.P., Nesvorný D. The Yarkovsky and YORP Effects: Implications for Asteroid Dynamics // *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* – 2006. – Vol. 34. – P. 157–91.
- Bowell E., Muinonen K., Wasserman L.H. A public-domain asteroid data base. In *Asteroids, Comets, Meteors*, Kluwer, Dordrecht, Netherlands. – 1994. – P. 477–481.
- Brozovic M., Benner L.A.M., McMichael J.G. et al. Goldstone and Arecibo radar observations of (99942) Apophis in 2012–2013 // *Icarus*. – 2018. – Vol. 300. – P. 115–128.
- Bykova L.E., Galushina T.Yu., Baturin A.P. The algorithms and programs for investigations of near-Earth asteroids // *Astronomical and Astrophysical Transactions*. – 2012. – Vol. 27. № 3. – P. 489–494.
- Carbognani A., Gary B.L., Oey J., Baj G., Bacci P. Physical characterization of NEA Large Super-Fast Rotator (436724) 2011 UW158 // *The European Physical Journal Plus*. – 2017. – Vol. 132. Is. 8. – article id.347. 8 pp.
- Carbognani A., Tanga P., Bernardi F. Is 2021 PH27 an active asteroid with a meteor shower detectable on Venus? // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*. 2022. Vol. 511. Is. 1. – P. L40–L44.
- Carruba V., Aljbaae S., Domingos R.C., Huaman M., Barletta W. Machine learning applied to asteroid dynamics // *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*. – 2022. – Vol. 134. Is. 4. – article id.36.
- Carry B. Density of asteroids // *Planetary and Space Science*. – 2012. – Vol. 73. Is. 1. P. 98–118.
- Chesley S.R. Potential impact detection for near-Earth asteroids: The case of 99942 Apophis (2004 MN4) // *Asteroids, Comets, Meteors: Proc. IAU Symp. 229th / Ets Lazzaro D., Ferraz-Mello S., Fernandes J. A., Cambridge Univ. Press*. – 2006. – P. 215–228.
- Chesley S.R., Baer J., Monet D.G. Treatment of star catalog biases in asteroid astrometric observations // *Icarus*. – 2010. – Vol. 210. – P. 158–181.

- Chesley S.R., Bhaskaran S., Chodas P.W., Grebow D., Landau D., Petropoulos A.E., Sims J.A., Yeomans D.K. Impact Hazard Assessment for 2011 AG5 // American Astronomical Society, DPS meeting. – 2012a. – № 10. – Vol. 44. – P. 305.
- Chesley S.R. et al. The Trajectory Dynamics of Near-Earth Asteroid 101955 (1999 RQ36) // Asteroids, Comets, Meteors 2012b. Proceedings of the conference held May 16-20. 2012 in Niigata. Japan. LPI Contribution No. 1667. – id. 6470.
- Christou A.A., Georgakarakos N. Long-term dynamical survival of deep Earth co-orbitals // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2021. – Vol. 507. Is. 2. – P. 1640–1650.
- Cincotta P.M., Simo C. Simple tools to study global dynamics in non-axisymmetric galactic potentials – I // Astron. Astrophys. Sup. – 2000. – Vol. 147. – P. 205–228.
- Cincotta P.M., Girdano C.M., Simo C. Phase space structure of multi-dimensional systems by means of the mean exponential growth factor of nearby orbits // Physica D. – 2003. – Vol. 182. – P. 151–178.
- de la Fuente Marcos C. & de la Fuente Marcos R. Infrequent visitors of the Kozai kind: the dynamical lives of 2012 FC71, 2014 EK24, 2014 QD364, and 2014 UR // Astronomy & Astrophysics. – 2015. – Vol. 580. – 19 pp.
- de la Fuente Marcos C., de la Fuente Marcos R. Far from random: dynamical groupings among the NEO population // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2016. – Vol. 456. – P. 2946–2956. – 11 pp.
- de la Fuente Marcos C., de la Fuente Marcos R. Dancing with Venus in the shadow of the Earth: a pair of genetically related near-Earth asteroids trapped in a mean-motion resonance // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters. – 2019. – Vol. 483. Is. 1. – P. L37–L41.
- de la Fuente Marcos C. & de la Fuente Marcos R. On the orbital evolution of 2020 AV2, the first asteroid ever observed to go around the Sun inside the orbit of Venus // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters. – 2020. – V. 494. Is. 1. – p. L6–L10
- de la Fuente Marcos C., de la Fuente Marcos R. Roaming the Relativistic Realm: Short-term Dynamical Evolution of Atira 2021 PH27 // Research Notes of the AAS. – 2021. – Vol. 5. – Number 9.

- Del Vigna A., Faggioli L., Milani A., Spoto F., Farnocchia F., Carry B. Detecting the Yarkovsky effect among near-Earth asteroids from astrometric data // 2018. print arXiv: 1805.05947.
- Delbo M., Cellino A., Tedesco E.F. Albedo and size determination of potentially hazardous asteroids: (99942) Apophis // *Icarus*. – 2007. – Vol. 188. – P. 266–269.
- Devogèle M., MacLennan E., Gustafsson A. et al. New Evidence for a Physical Link between Asteroids (155140) 2005 UD and (3200) Phaethon // *The Planetary Science Journal*. – 2020. – Vol. 1. Is. 1. – id. 15.
- Devyatkin A.V., Gorshanov D.L., Yershov V.N., Melnikov A.V., Martyusheva A.A., Petrova S.N., L'vov V.N., Tsekmeister S.D., Naumov K.N. A study of the asteroid (367943) Duende at Pulkovo Observatory // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 2016. – Vol. 459. Is. 4. – P. 3986–3997
- Devyatkin A.V., Gorshanov D.L., Petrova S.N., Martyusheva A.A., L'vov V.N., Tsekmeister S.D. Astrometry and photometry of potentially hazardous asteroid (276033) 2002 AJ129 // *Planetary and Space Science*. – 2022. – Vol. 213. – article id. 105427.
- Emelyanenko V.V. Dynamical evolution of Chelyabinsk-type bodies from sungrazing orbits to near-Earth space // *Planetary and Space Science*. – 2015. – Vol. 118. – P. 302–304.
- Efron B. Bootstrap Methods: Another Look at the Jackknife // *The Annals of Statistics*. – 1979. – Vol. 7. – P. 411–420.
- Everhart E. Implicit Single Sequence Methods for Integrating Orbits // *Celestial Mechanics*. – 1974. – Vol. 10. – P. 35–55.
- Everhart E. An Efficient Integrator That Uses Gauss–Radau Spacings // *Dynamics of Comets: Their Origin and Evolution* (Proc. of IAU Colloq. 83, held in Rome, Italy, June 11–15, 1984) / Eds. A. Carusi and G. B. Valsecchi. Dordrecht: Reidel, – 1985. – P. 185–202.
- Fahnestock E.G., Cheng A.F., Ivanovski S. et al. Pre-encounter Predictions of DART Impact Ejecta Behavior and Observability // *The Planetary Science Journal*. – 2022. – Vol. 3. Is. 9. – id. 206. 21 pp.

- Farnocchia D., Chesley S.R., Chodas P.W., Micheli M., Tholen D.J., Milani A., Elliott G.T., Bernardi F. Yarkovsky-driven impact risk analysis for asteroid (99942) Apophis // *Icarus*. – 2013a. – Vol. 224. Is. 1. – P. 192–200.
- Farnocchia D., Chesley S.R., Vokrouhlicky D., Milani A., Spoto F., Bottke W.E. Near-Earth asteroids with measurable Yarkovsky effect // *Icarus*. — 2013b. — Vol. 224. Is. 1. — P. 1–13.
- Farnocchia D., Chesley S.R., Brown P.G., Chodas P.W. The trajectory and atmospheric impact of asteroid 2014 AA // *Icarus*. – 2016. – Vol. 274. – P. 327–333.
- Fenucci M., Gronchi G.F., Saillenfest M. Proper elements for resonant planet-crossing asteroids // *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*. – 2022. – Vol. 134. – Is. 3. – article id. 23.
- Fernández J.A., Sosa A. Jupiter family comets in near-Earth orbits: Are some of them interlopers from the asteroid belt? // *Planetary and Space Science*. – 2015. – Vol. 118. – P. 14–24
- Folkner W.M., Williams J.G., Boggs D.H., Park R.S., Kuchynka P. The Planetary and Lunar Ephemerides DE430 and DE431 // *The Interplanetary Network Progress Report*. – 2014. – Vol. 42–196. – P. 1–81.
- Froeschle Ch., Scholl H. The three principal secular resonances ν_5 , ν_6 , and ν_{16} in the asteroidal belt // *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*. – 1989. – Vol. 46. Is. 3. – P. 231–251.
- Froeschle Ch., Hahn G., Gonczi R., Morbidelli A., Farinella P. Secular resonances and the dynamics of Mars-crossing and Near-Earth asteroids // *Icarus*. – 1995. – Vol. 117. – Is. 1. – P. 45–61.
- Galushina T.Y., Bykova L.E., Letner O.N., Baturin A.P. IDA software for investigating asteroid dynamics and its application to studying the motion of 2012 MF7 // *Astronomy and Computing*. – 2019. – Vol. 29. – article id. 100301.
- Galushina T.Yu., Letner O.N. Modified version of IDA software and its application to the study of the motion of asteroid 2007 PR10 // *Astronomical and Astrophysical Transactions*. – 2021. – Vol. 32. Is. 4. – P. 355–370.
- Galushina T.Yu., Ryabova G.O., Skripnichenko P.V. The force model for asteroid (3200) Phaethon // *Planetary and Space Science*. – 2015. – Vol. 118. – P. 296–301.

- Galushina T.Yu., Sambarov G.E. The dynamical evolution and the force model for asteroid (196256) 2003 EH // *Planetary and Space Science*. – 2017. – Vol. 142. – P. 38–47.
- Galushina T.Yu., Letner O.N., Niganova E.N. Notes on force models for near-Sun asteroids // *Planetary and Space Science*. – 2021. – Vol. 202. – article id. 105232.
- Gehrels T., Roemer E., Taylor R.C., Zellner B.H. Minor planets and related objects. IV. Asteroid (1566) Icarus // *Astron. J.* – 1970. – Vol. 75. Is. 2. – P. 186–195.
- Geem J., Ishiguro M., Takahashi J., et al. (3200) Phaethon polarimetry in the negative branch: new evidence for the anhydrous nature of the DESTINY+ target asteroid // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*. – 2022. – Vol. 516. Is. 1. – P. L53–L57.
- Giorgini J.D., Benner L.A.M., Ostro S.J., Nolan M.C., Busch M.W. Predicting the Earth encounters of (99942) Apophis // *Icarus*. – 2008. – Vol. 193. Is. 1. – P. 1–19.
- Gozrdziewski K., Bois E., Maciejewski A.J., Kiseleva-Eggleton L. Global dynamics of planetary systems with the MEGNO criterion // *Astron. Astrophys.* – 2001. – Vol. 378. – P. 569–586.
- Greenstreet S. Orbital Dynamics of 2020 AV2: the First Vatira Asteroid // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*. – 2020. – Vol. 493. Is. 1. – P. L129–L131.
- Greenberg A.H., Margot J.L., Verma A.K., Taylor P.A., Naidu Sh.P., Brozovic M., Benner L.A.M. Asteroid 1566 Icarus's Size, Shape, Orbit, and Yarkovsky Drift from Radar Observations // *Astronomical Journal*. – 2017. – Vol. 153. Is. 3. – article id. 108.
- Greenberg A.H., Margot J.-L., Verma A.K., Taylor A.K., Hodge S.E. Yarkovsky Drift Detections for 247 Near-Earth Asteroids // *The Astronomical Journal*. – 2020. Vol. 159. Is. 3. – article id. 92.
- Hairer E., Lubich C., Wanner G. *Geometric Numerical Integration: Structure-Preserving Algorithms for Ordinary Differential Equations*. Springer. 2002. – 659 p.
- Hanuš J., Delbo M., Vokrouhlický D., et al. Near-Earth asteroid (3200) Phaethon: Characterization of its orbit, spin state, and thermophysical parameters // *Astronomy & Astrophysics*. – 2016. – Vol. 592. – article id. A34. 15 pp.
- Hanuš J., Vokrouhlický D., Delbo M., et al. (3200) Phaethon: Bulk density from Yarkovsky drift detection // *Astronomy & Astrophysics*. – 2018. – Vol. 620. – id. L8. – 8 pp.

- Harris A.W. The population of near-Earth asteroids and current survey completion. 2013. In: 3rd IAA planetary defense conference. Flagstaff. abstract IAA-PDC13-02-09P.
- Hudson R.S., Ostro S.J., Scheeres D.J. High-resolution model of Asteroid 4179 Toutatis // *Icarus*. – 2003. – Vol. 161. Is. 2. – P. 346–355.
- Hui M., Jewitt D. Non-gravitational Acceleration of the Active Asteroids // *The Astronomical Journal*. – 2017. – Vol. 153. Is. 2. – article id. 80. – 9 pp.
- Hui M. Perihelion Activity of (3200) Phaethon is Not Dusty: Evidence from STEREO/COR2 Observations // *The Astronomical Journal*. – 2023. – Vol. 165. Is. 3. – article id. 94. 13 pp.
- Izmailov I.S., Khovricheva M.L., Khovrichev M.Yu., Kiyaeva, O.V., Khrutskaya E.V., Romanenko L.G., Grosheva E.A., Maslennikov K.L., Kalinichenko O.A. Astrometric CCD observations of visual double stars at the Pulkovo Observatory // *Astronomy Letters*. 2010. – Vol. 36. Is. 5. – P. 349–354.
- Jenniskens P., Shaddad M. H., Numan D. et al. The impact and recovery of asteroid 2008 TC3 // *Nature*. – 2009. – Vol. 458. Is. 7237. – P. 485–488.
- Jewitt D. Phaethon Near Earth // HST Proposal – article id. 15343. – Cycle 25. – 08/2017.
- Kaplan M., Cengiz S. Horseshoe co-orbitals of Earth: current population and new candidates // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 2020. – Vol. 496. Is. 4. – P. 4420–4432.
- Kareta T., Reddy V., Pearson N., Sanchez J., Harris W.M. Investigating the Relationship between (3200) Phaethon and (155140) 2005 UD through Telescopic and Laboratory Studies // *The Planetary Science Journal*. – 2021. – Vol. 2. Is. 5. – article id.190. – 13 pp.
- Kiselev N.N., Rosenbush V.K., Petrov D., Luk'yanyk I.V., Ivanova O.V., Pit N.V., Antoniuk K.A., Afanasiev V. L. Asteroid (3200) Phaethon: results of polarimetric, photometric, and spectral observations // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 2022. – Vol. 514. Is. 4. – P. 4861–4875.
- Kozai Y. Secular perturbations of asteroids with high inclination and eccentricity // *The Astronomical Journal*. – 1962. – Vol. 67. – P. 591–598.
- Krüger H., Kobayashi M., Arai T., Srama R., Sarli B.V., Kimura H. Dust analysis on board the Destiny+ mission to 3200 Phaethon // *EPSC Abstracts*. – 2017. – Vol. 11.

- Krüger H., Strub P., Srama R., et al. Modelling DESTINY+ interplanetary and interstellar dust measurements en route to the active asteroid (3200) Phaethon // *Planetary and Space Science*. – 2019. – Vol. 172. – P. 22–42.
- Letner O.N., Galushina T.Yu. Motion features of the asteroid 137924 2000 BD19 // *Planetary and Space Science*. – 2020. – Vol. 181. – article id. 104818. – 10 pp.
- Li M., Huang Y., Gong S. Assessing the risk of potentially hazardous asteroids through mean motion resonances analyses // *Astrophysics and Space Science*. – 2019. – Vol. 364. Is. 5. – article id. 78. – 12 pp.
- Lolachi R., Glenar D., Stubbs T.J., Kolokolova L. Optical characterization of the DART impact plume: importance of realistic ejecta scattering properties // *The Planetary Science Journal*. – 2023. – Vol. 4. Is. 2. – article id. 24. – 14 pp.
- MacLennan E., Marshall S., Granvik M. Evidence of surface heterogeneity on active asteroid (3200) Phaethon // *Icarus*. – 2022. – Vol. 388. – article id. 115226. – 18 pp.
- MacLennan E., Toliou A., Granvik M. Dynamical evolution and thermal history of asteroids (3200) Phaethon and (155140) 2005 UD // *Icarus*. – 2021. – Vol. 366. – article id. 114535. – 18 pp.
- Mainzer A., Grav T., Bauer J. et al. NEOWISE observations of near-Earth objects: preliminary results // *The Astrophysical Journal*. 2011. Vol. 743. Is. 2. – article id. 156. – 17 pp.
- Marsden B.G., Sekanina Z., Yeomans D.K. Comets and nongravitational forces. V // *The Astronomical Journal*. – 1973. – Vol. 78. – P. 211–225.
- Masiero J.R., Wright E.L., Mainzer A.K. Thermophysical Modeling of NEOWISE Observations of DESTINY+ Targets Phaethon and 2005 UD // *The Astronomical Journal*. – 2019. – Vol. 158. Is. 3. – article id. 97. – 7 pp.
- Michel P., Froeschle Ch. The Location of Linear Secular Resonances for Semi-major Axes Smaller Than 2 AU // *Icarus*. – 1997. – Vol. 128. – P. 230–240.
- Michel P., Morbidelli A., Bottke W. F. Origin and dynamics of Near-Earth Objects // *Comptes Rendus Physique*. – 2005. – Vol. 6. Is. 3. – P. 291–301.
- Milani A. The asteroid identification problem // *Icarus*. – 1999. – Vol. 137. – P. 269 – 292.
- Milani A., Chesley S.R., Boattini A., Valsecchi G.B. Virtual impactors: search and destroy // *Icarus*. – 2000a. – Vol. 145. – P. 12–24.

- Milani A., Chesley S.R., Valsecchi G.B. Asteroid close encounters with Earth: risk assessment // *Planetary and Space Science*. – 2000b. – Vol. 48. – P. 945–954.
- Milani A., Chesley S.R., Chodas P.W., Valsecchi G.B. Asteroid Close Approaches: Analysis and Potential Impact Detection // *Asteroids III*, W.F. Bottke Jr., A. Cellino, P. Paolicchi, and R.P. Binzel (eds). University of Arizona Press, Tucson. – 2002. – P. 55–69.
- Mommert M., Trilling D.E., Hora J.L., Lejoly C., Gustafsson A., Knight M., Moskovitz N., Smith H.A. Systematic Characterization of and Search for Activity in Potentially Active Asteroids // *The Planetary Science Journal*. – 2020. – Vol. 1. Is. 1. – article id. 10. – 14pp.
- Moskovitz N.A., Benson C.J., Scheeres D. et al. Observational investigation of the 2013 near-Earth encounter by asteroid (367943) Duende // *Icarus*. – 2020. – Vol. 340. – article id. 113519. – 14 pp.
- Moskovitz N., Kareta T., Naidu Sh., et al. Pre- and post-impact observations of Didymos in support of NASA's DART mission // AAS Division of Planetary Science meeting #54, id. 505.02. *Bulletin of the American Astronomical Society*. – 2022. – Vol. 54. – No. 8 e-id 2022n8i505p02
- Morbidelli A. Modern celestial mechanics: aspects of Solar System dynamics // London: Taylor & Francis. – 2002. – 380 p.
- Muironen K. Asteroid and comet encounters with the Earth // *The dynamics of small bodies in the Solar system: A major key to Solar system studies*. NATO ASI Series. C: Math. Phys. Scien. – 1999. – Vol. 522. – Kluwer Acad. Publ. – P. 127–158.
- Muironen K., Virtanen J., Granvik M., Laakso T. Asteroid orbits using phase-space volumes of variation // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 2006. – Vol. 368. Is. 2. – P. 809–818.
- Nugent C.R., Mainzer A., Masiero J., Grav T., Bauer J. The Yarkovsky drift's influence on NEAs: trends and predictions with NEOWISE measurements // *The Astronomical Journal*. – 2012a. – Vol. 144. Is. 3. – article id. 75. – 6 pp.
- Nugent C. R., Margot J. L., Chesley S. R., Vokrouhlicky D. Detection of Semimajor Axis Drifts in 54 Near-Earth Asteroids: New Measurements of the Yarkovsky Effect // *Astronomical Journal*. – 2012b. – Vol. 144. Is. 2. – article id. 60. – 13 pp.

- Opik E.J. Collision probability with the planets and the distribution of planetary matter // Proc. R. Irish Acad. Sect. A. – 1951. – Vol. 54. – P. 165–199.
- Ozaki N., Yamamoto T., Gonzalez-Franquesa F., et al. Mission design of DESTINY+: Toward active asteroid (3200) Phaethon and multiple small bodies // Acta Astronautica. – 2022. – Vol. 196. – P. 42-56.
- Paddack S.J. Rotational bursting of small celestial bodies: Effects of radiation pressure // Journal of Geophysical Research. – 1969. – Vol. 74. Is. 17.– P. 4379–4381.
- Perez-Hernandez J.A., Benet L. Non-zero Yarkovsky acceleration for near-Earth asteroid (99942) Apophis // Communications Earth & environment. – 2022. — P. 3–10.
- Perna D., Barucci M.A., Fulchignoni M. The near-Earth objects and their potential threat to our planet // The Astronomy and Astrophysics Review. – 2013. – Vol. 21. – article id. 65. – 28 pp.
- Pokorny P, Kuchner M. Threat from Within: Excitation of Venus’s Co-orbital Asteroids to Earth-crossing Orbits // The Planetary Science Journal. – 2021. – Vol. 2. Is. 5. – article id. 193. – 13pp.
- Popova O.P., Jenniskens P., Emel'yanenko V., et al. Chelyabinsk Airburst, Damage Assessment, Meteorite Recovery, and Characterization // Science. – 2013. – Vol. 342. Is. 6162. – P. 1069–1073.
- Pravec P., Harris A.W. Binary asteroid population. 1. Angular momentum content // Icarus – 2007. – Vol. 190. P. 250–259.
- Press W.H., Flannery B.P., Teukolsky S.A., Vetterling W.T. Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing. Cambridge: University Press. 1987.
- Qi Y., de Ruiter A. Planar near-Earth asteroids in resonance with the Earth // Icarus. – 2019. – Vol. 333. – P. 52–60.
- Öpik E.J. Collision probabilities with the planets and distribution of interplanetary matter // Proc. R. Irish Acad. – 1951. – Vol. 54. – P. 165.
- Reddy V., Gaffey M.J., Abell P.A., Hardersen P.S. Mineralogical investigation and thermal modeling of near-Earth asteroids (11405) 1999 CV3, 2000 BD19, 2003 SA224, and 2005 YY93 // 38th Lunar and Planetary Science Conference, (Lunar and Planetary Science XXXVIII), held March 12-16, 2007 in League City. – Texas. LPI Contribution – № 1338. – P.1238

- Rivkin A.S., Cheng A.F. Planetary defense with the Double Asteroid Redirection Test (DART) mission and prospects // *Nature Communications*. – 2023. – Vol. 14. – article id. 1003. – 3 pp.
- Robert F. The Origin of Water on Earth // *Science*. – 2001. – Vol. 293. – P. 1056–1058.
- Rosengren A.J., Alessi E.M., Rossi A., Valsecchi G.B. Chaos in navigation satellite orbits caused by the perturbed motion of the Moon // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 2015. – Vol. 449. Is.4. – P. 3522–3526.
- Rozitis B., Green S.F. The influence of rough surface thermal-infrared beaming on the Yarkovsky and YORP effects // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 2012. – Vol. 423. – P. 367–388.
- Rubincam D.P. LAGEOS orbit decay due to infrared radiation from Earth // *Journal of Geophysical Research*. – 1987. – Vol. 92. – P. 1287–1294.
- Rubincam D.P. Yarkovsky thermal drag on LAGEOS // *Journal of Geophysical Research*. – 1988. – Vol. 93. – P. 13805–13810.
- Rubincam D.P. Drag on the LAGEOS satellite // *Journal of Geophysical Research*. – 1990. – Vol. 95. – P. 4881–4886.
- Rubincam D.P. Radiative Spin-up and Spin-down of Small Asteroids // *Icarus*. – 2000. – Vol. 148. – P. 2–11.
- Ryabova G.O., Avdyushev V.A., Williams I.P. Asteroid (3200) Phaethon and the Geminid meteoroid stream complex // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 2019. – Vol. 485. – P. 3378–3385.
- Sitarski G. Motion of the Minor Planet 4179 Toutatis: Can We Predict Its Collision with the Earth // *Acta Astronomica*. – 1998. – Vol. 48. – P. 547–561.
- Sitarski G. How to Find an Impact Orbit for the Earth-Asteroid Collision // *Acta Astronomica*. – 1999. – Vol. 49. – P. 421–431.
- Sitarski G. Generating of “Clones” of an Impact Orbit for the Earth-Asteroid Collision // *Acta Astronomica*. – 2006. – Vol. 56. – P. 283–292.
- Sheppard S.S., Tholen D.J., Pokorný P., et al. A Deep and Wide Twilight Survey for Asteroids Interior to Earth and Venus // *The Astronomical Journal*. – 2022. – Vol. 164. Is. 4. – article id. 168. – 15 pp.
- Sheppard S.S. In the glare of the Sun // *Science*. – 2022. – Vol. 377. Is. 6604. – P. 366 – 367.

- Shevchenko I.I. The Lidov-Kozai Effect – Applications in Exoplanet Research and Dynamical Astronomy. Springer. – 2017. – 198 p.
- Standish E.M. JPL Planetary and Lunar Ephemerides, DE405/LE405 // *Interof. Memor.* – 1998. – Vol. 312. F-98-048. – P. 1–18.
- Tardioli C., Farnocchia D., Rozitis B., Cotto-Figueroa D., Chesley S. R., Statler T.S., Vasile M. Constraints on the near-Earth asteroid obliquity distribution from the Yarkovsky effect // *Astronomy & Astrophysics* – 2017. – Vol. 608. – article id. A61. – 9 pp.
- Thuillot W., Bancelin D., Ivantsov A., et al. The astrometric Gaia-FUN-SSO observation campaign of 99942 Apophis // *Astronomy & Astrophysics*. – 2015. – Vol. 583. – id. A59. – 12 pp.
- Urakawa S., Ohtsuka K., Abe S., Ito T., Nakamura T. Fast rotation of a subkilometer-sized near-Earth object 2011 XA3 // *The Astronomical Journal*. – 2014. – Vol. 147. Is. 5. – article id. 121. – 8 pp.
- Valk S., Delsate N., Lemaître A., Carletti T. Global dynamics of high area-to-mass ratios GEO space debris by means of the MEGNO indicator // *Advances in Space Research*. – 2009. – Vol. 43. Is. 10 – P. 1509–1526.
- Valsecchi G.B., Milani A., Gronchi G.F., Chesley S.R. Resonant returns to close approaches: analytical theory // *Astronomy and Astrophysics* – 2003. – Vol. 408. – P. 1179–1196.
- Vavilov D. E., Medvedev Yu. D. A fast method for estimation of the impact probability of near-Earth objects // *Monthly Notices of the Royal astronomical society*. – 2015. – Vol. 446. P. 705–709.
- Victorino S.B., Kawakatsu Y. Selection and trajectory design to mission secondary targets // *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*. – 2017. – Vol. 127. Is. 2. – P. 233–258.
- Virtanen J., Muinonen K., Bowell E. Statistical Ranging of Asteroid Orbits // *Icarus*. – 2001. – Vol. 154. Is. 2. – P. 412–431.
- Vokrouhlicky D. A complete linear model for the Yarkovsky thermal force on spherical asteroid fragments // *Astronomy & Astrophysics*. – 1999. – Vol. 344. – P. 362–366.

- Vokrouhlicky D., Bottke W.F., Chesley S.R., Scheeres D.J., Statler T.S. The Yarkovsky and YORP Effects // *Asteroids IV* / ed. by P. Michel, F. E. DeMeo, W. F. Bottke. — 2015. — P. 509–531.
- Williams J.G. Secular perturbations in the Solar System. Ph.D. Dissertation. Los Angeles. University of California. 1969.
- Wlodarczyk I. The potentially dangerous asteroid 2012 DA14 // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 2012. – Vol. 427. Is. 2. – P. 1175–1181.
- Wlodarczyk I. The potentially dangerous asteroid (99942) Apophis // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 2013. – Vol. 434. Is. 4. – P. 3055–3060.
- Wlodarczyk I. Possible impact solutions of asteroid (99942) Apophis // *Bulgarian Astronomical Journal*. – 2017. – Vol. 27. – P. 89–100.
- Ye Q.-Z. Active Asteroid (3200) Phaethon during its unusually close approach to Earth // *HST Proposal id. 15357. Cycle 25. 08/2017*
- Ye Q., Knight M.M., Kelley M.S.P., Moskovitz N.A., Gustafsson A., Schleicher D.A Deep Search for Emission from "Rock Comet" (3200) Phaethon at 1 au // *The Planetary Science Journal*. – 2021. – Vol. 2. Is. 1. – article id. 23. – 13 pp.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(Справочное)

Материалы наблюдений астероидов, сближающихся с Землей, на
Терскольской обсерватории в 2022 году

Таблица А.1 — Наблюдения астероида 2008 MG1

Эпоха, г, м, д	Прямое восхождение, h, m, s	Склонение, °, ', "
2022 06 28.99285	23 36 27.89	−16 58 48.7
2022 06 28.99499	23 36 28.22	−16 58 49.3
2022 06 28.99712	23 36 28.56	−16 58 50.2
2022 07 07.98867	00 08 25.36	−17 48 42.9
2022 07 07.99149	00 08 26.20	−17 48 40.6
2022 07 07.99515	00 08 27.20	−17 48 43.5
2022 07 07.99799	00 08 27.96	−17 48 45.5
2022 07 08.00081	00 08 28.62	−17 48 44.4
2022 07 08.00365	00 08 29.49	−17 48 49.8
2022 07 08.00647	00 08 30.31	−17 48 48.6
2022 07 08.00929	00 08 31.06	−17 48 52.4

Таблица А.2 — Наблюдения астероида 2022 SG9

Эпоха, г, м, д	Прямое восхождение, h, m, s	Склонение, °, ', "
2022 10 25.73603	23 46 39.10	+82 03 19.6
2022 10 25.73817	23 46 37.43	+82 03 21.6
2022 10 25.74031	23 46 36.00	+82 03 23.5
2022 10 25.74245	23 46 34.32	+82 03 25.5
2022 10 25.74459	23 46 32.82	+82 03 27.6
2022 10 25.74674	23 46 31.20	+82 03 29.6
2022 10 25.74888	23 46 29.71	+82 03 31.5
2022 10 25.75102	23 46 28.12	+82 03 33.6
2022 10 25.75316	23 46 26.44	+82 03 35.6

Продолжение таблицы А.2

Эпоха, г, м, д	Прямое восхождение, h, m, s	Склонение, °, ', "
2022 10 25.75530	23 46 24.99	+82 03 37.6
2022 10 25.75744	23 46 23.35	+82 03 39.5
2022 10 25.78785	23 46 01.20	+82 04 06.7
2022 10 25.78999	23 45 59.46	+82 04 09.0
2022 10 25.79213	23 45 58.26	+82 04 12.0
2022 10 25.79427	23 45 56.67	+82 04 12.3
2022 10 25.79641	23 45 55.18	+82 04 14.5
2022 10 25.79855	23 45 53.08	+82 04 16.4
2022 10 25.80069	23 45 52.13	+82 04 19.5
2022 10 26.03604	23 42 59.94	+82 07 43.3
2022 10 26.03679	23 42 59.55	+82 07 43.9
2022 10 26.03755	23 42 58.92	+82 07 44.5
2022 10 26.03830	23 42 58.47	+82 07 45.1
2022 10 26.03905	23 42 58.01	+82 07 45.6
2022 10 26.03980	23 42 57.33	+82 07 46.2
2022 10 26.04193	23 42 56.10	+82 07 48.5
2022 10 26.04303	23 42 55.34	+82 07 49.4
2022 10 26.04413	23 42 54.47	+82 07 50.3
2022 10 26.04523	23 42 53.73	+82 07 51.3
2022 10 26.04633	23 42 52.96	+82 07 52.2
2022 10 26.04743	23 42 52.16	+82 07 53.2
2022 10 26.04853	23 42 51.33	+82 07 54.1
2022 10 26.04963	23 42 50.57	+82 07 55.0
2022 10 26.05073	23 42 49.77	+82 07 55.9
2022 10 30.04465	22 50 29.05	+82 51 55.6
2022 10 30.04575	22 50 28.19	+82 51 56.1
2022 10 30.04685	22 50 27.31	+82 51 56.4
2022 10 30.04795	22 50 26.32	+82 51 57.1
2022 10 30.04905	22 50 25.70	+82 51 57.1

Продолжение таблицы А.2

Эпоха, г, м, д	Прямое восхождение, h, m, s	Склонение, °, ', "
2022 10 30.05015	22 50 24.41	+82 51 57.4
2022 10 30.05125	22 50 23.50	+82 51 58.2
2022 10 30.05235	22 50 22.86	+82 51 59.3
2022 10 30.05345	22 50 22.01	+82 51 59.6
2022 11 01.93398	22 09 45.85	+83 04 33.6
2022 11 01.93508	22 09 44.69	+83 04 34.6
2022 11 01.93618	22 09 44.24	+83 04 34.8
2022 11 01.93728	22 09 42.97	+83 04 34.3
2022 11 01.93918	22 09 41.41	+83 04 34.4
2022 11 01.94132	22 09 39.47	+83 04 34.3
2022 11 01.94346	22 09 38.21	+83 04 35.1
2022 11 01.94560	22 09 36.14	+83 04 34.3
2022 11 01.94774	22 09 34.19	+83 04 34.8
2022 11 01.94988	22 09 32.23	+83 04 34.6
2022 11 01.95203	22 09 30.58	+83 04 35.3
2022 11 01.95417	22 09 28.74	+83 04 35.5
2022 11 01.95631	22 09 27.33	+83 04 36.2
2022 11 01.95845	22 09 25.08	+83 04 35.4
2022 11 01.96059	22 09 23.43	+83 04 35.3
2022 11 01.96273	22 09 21.20	+83 04 35.9
2022 11 01.96487	22 09 20.14	+83 04 35.9
2022 11 01.96701	22 09 18.14	+83 04 36.1
2022 11 01.96916	22 09 16.50	+83 04 35.6
2022 11 01.97130	22 09 14.98	+83 04 36.4
2022 11 01.97344	22 09 12.46	+83 04 36.0
2022 11 01.97558	22 09 10.70	+83 04 36.2
2022 11 01.97772	22 09 08.72	+83 04 37.2
2022 11 01.97986	22 09 07.56	+83 04 37.1