

ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертацию на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук
Галушиной Татьяны Юрьевны
на тему «Исследование орбитальной динамики
избранных групп астероидов, сближающихся с Землей»
по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия

Диссертация Т.Ю. Галушиной посвящена решению одной из фундаментальных задач небесной механики, имеющей важное прикладное значение — исследованию орбитальной динамики астероидов, сближающихся с Землей (АСЗ). Непрерывный рост числа открываемых АСЗ, сложная структура возмущений, комплексные резонансные взаимодействия с реализующейся короткой шкалой времени Ляпунова, а также возможные переходы между различными динамическими группами делают задачу изучения динамической эволюции АСЗ важной и **актуальной**.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка использованных источников, включающего 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.

В **первой главе** описана популяция астероидов, сближающихся с Землей, представлены основные методы исследования их динамики, освещена проблема астероидной опасности.

Во **второй главе** представлены используемые в диссертации методы исследования динамики астероидов. Дано описание численной модели движения малых тел Солнечной системы, рассматриваются уравнения

движения и математическая модель возмущающих сил. Излагаются вопросы определения оценок начальных параметров орбит, приводится краткий обзор методов построения начального облака неопределенности параметров орбит астероидов. Представлена численно-аналитическая методика выявления орбитальных и вековых резонансов, описан метод оценки времени предсказуемости движения с помощью параметра OMEGNO и способ выявления тесных сближений. Описаны методика исследования структуры возмущений и метод быстрого оценивания вероятности столкновения астероида с планетами.

В **третьей главе** дано описание программного комплекса ИДА, в разработку которого диссертантом внесен решающий вклад. Именно с помощью этого комплекса получены основные результаты диссертации.

В **четвертой главе** описаны методы и представлены результаты наблюдений астероидов на телескопе Zeiss-2000 Центра коллективного пользования «Герскольская обсерватория». Представлены результаты семи сеансов наблюдений, выполненных в 2020–2023 гг., в течение которых были проведены наблюдения десяти астероидов с малыми перигелийными расстояниями и девяти астероидов с плохо определёнными орбитами.

В **пятой главе** приведены результаты исследования динамики астероидов с малыми перигелийными расстояниями, описана структура возмущений и даны оценки нелинейности задачи оценивания начальных параметров. Для ряда АСЗ получены оценки трансверсального ускорения, вызываемого влиянием эффекта Ярковского. Для АСЗ с малыми перигелийными расстояниями представлены результаты исследования вероятностной орбитальной эволюции. Приводится информация о выявленных орбитальных резонансах и оценки влияния светового давления и эффекта Ярковского на резонансные соотношения и аргументы.

В **шестой главе** описаны результаты тестирования метода быстрого оценивания вероятности столкновения астероида с Землей, а также

представлен метод предотвращения столкновения, основанный на превентивном разрушении, и результаты его тестирования.

В **заключении** перечислены основные результаты, представленные в диссертационной работе и сформулированы выводы.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации. Обоснованность результатов диссертационного исследования подтверждена публикациями в высокорейтинговых журналах и выступлениями на всероссийских и международных конференциях. Все выводы подкреплены ссылками на научные статьи диссертанта. Для сравнения полученных результатов используются опубликованные источники, авторитетность которых не подвергается сомнению.

Основные научные положения, выводы и рекомендации опубликованы автором в научных изданиях, рекомендованных ВАК для защиты по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия, а именно: «Астрономический вестник», «Астрономический журнал», «Известия высших учебных заведений. Физика», «Planetary and Space Science» и др.

Достоверность полученных результатов подтверждается данными наблюдений АСЗ, представленными на сайте Центра малых планет. Используемое программное обеспечение протестировано на объектах с заведомо известными особенностями и характером движения. Для части полученных в диссертации результатов доступно сравнение с выводами других авторов.

Новизна диссертационной работы заключается 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 тангенциального ускорения, обусловленного влиянием 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.

Научная и практическая значимость диссертации: предложена вероятностная методика исследования структуры возмущений; разработан и исследован эффективный метод оценивания вероятности столкновения астероида с Землей; изучена динамика группы АСЗ с малыми перигелийными расстояниями и выявлены резонансные структуры в орбитальном движении этих объектов; разработана численная модель движения астероидов с учетом необходимых действующих на них сил и реализована в виде программно-алгоритмического комплекса «ИДА». Несомненным достоинством работы является гармоничное сочетание

практической части, связанной с проведением наблюдений АСЗ, обработкой и интерпретацией этих наблюдений на основе теоретических исследований.

Автореферат в полной мере соответствует содержанию диссертации.

Есть несколько замечаний к выполненному исследованию и его описанию в диссертации.

1. Страница 8. При описании работ, посвященных потенциально опасному астероиду (99942) Apophis, желательно было упомянуть международную кампанию по наблюдению этого астероида, организованную Международной сетью предупреждения об астероидах (International Asteroid Warning Network — IAWN), в рамках которой были проведены учения по планетарной защите (Reddy V., Kelley M.S., Dotson J. et al. Apophis planetary defense campaign // The Planetary Science Journal. 2022. V. 3. Article id. 123. 16 p.)
2. В главе 3 описание сторонних программных продуктов желательно дополнить сведениями о программах для численного моделирования: OrbFit, Rebound, Reboundx.
3. В разделе 3.4 дано описание модуля «Ассоль». Возникает вопрос, можно ли в этом модуле настроить использование численной эфемериды EPM? Модуль также использует каталог Боуэла, доступ к которому в настоящее время затруднен. Возможна ли замена этого каталога?
4. В разделе 3.10 приведено описание подсистемы «Вековые резонансы». Имеет смысл добавить в систему анализ второго интеграла Лидова-Козаи для надежного определения условий либрации аргумента перигелия.
5. В главе 5 при обсуждении физических и динамических параметров астероидов, необходимых для описания влияния эффекта Ярковского, ничего не сказано о наклонах осей вращения астероидов.
6. Страница 207. Чем можно объяснить, что мерный интервал, на котором стабилизируется точность определения тангенциального ускорения, обусловленного влиянием эффекта Ярковского, различается в два раза для

рассматриваемых астероидов? Исследовалось ли влияние тесных сближений с планетами на точность получаемых оценок?

7. Результаты по анализу влияния эффекта Ярковского на резонансные свойства, приведенные в разделе 5.5.3, желательно сравнить с результатами М.Житник (Zitnik M. Interaction Between Yarkovsky Force and Mean-Motion Resonances: Some Specific Properties // Serb. Astron. J. 2016. V. 193. P. 19–26. DOI: 10.2298/SAJ160613007Z).
8. Страница 290. Использование сферы тяготения для выделения области в окрестности Земли при решении динамических задач выглядит спорно, так как сфера тяготения не является динамической гравитационной сферой. Лучше было бы использовать сферу действия или сферу влияния.

Есть ряд замечаний, относящихся к оформлению диссертации:

1. Замечание по таблице 4.19. Точность оценки стандартного отклонения обычно составляет 1–2 значащих цифры, поэтому различие оценок в четвертом знаке является несущественной.
2. Страница 252. Требуется пояснения или корректировки фраза: «До 1960 года у орбиты астероида проявляются признаки хаотичности», т.к. для объекта 2007 PR10 на рисунке 5.34аб значение параметра OMEGNO для момента 1960 г. отрицательное.

Несколько примеров, в которых требуется корректировка стиля изложения.

1. Страница 61. Используется неудачная формулировка: «вековой распад орбиты спутника LAGEOS». См. также страницу 63.
2. Страница 63. «Яркость Солнца» следует заменить на «светимость Солнца».
3. Страница 81. Предложение «Вторая зональная гармоника от Солнца и Юпитера вычисляется по аналогичным формулам» требует уточнения, т.к. по формуле (2.4) вычисляется не гармоника, а ускорение, обусловленное влиянием второй зональной гармоник.
4. Страница 81. При описании формулы (2.5) используется неудачная формулировка: « s' – площадь эффективного поперечного сечения

астероида, представляющая собой отношение площади поперечного сечения астероида к его массе». Требуется уточнения способ определения площади поперечного сечения астероида. Параметр s' — это отношение площади миделева сечения астероида (площадь тени, отбрасываемой астероидом, на площадку, установленную в непосредственной близости от астероида перпендикулярно световому потоку) к его массе. В случае сферического объекта (это предположение используется в диссертации) площадь миделева сечения действительно равна площади сечения, проходящего через центр сферы.

5. В таблице 5.11 значения ускорения для объектов, наблюдавшихся менее 30 суток, скорее всего оказываются завышенными по модулю на несколько порядков. При обсуждении результатов этот факт отмечается. Достаточно было ограничиться несколькими примерами, а в таблицу включить только надежные оценки.
6. Страница 264. Фраза о перекачке энергии между эксцентриситетом и наклоном в резонансе Лидова-Козаи требует пояснения. Как интеграл Лидова-Козаи связан с энергией?

В диссертации обнаружено несколько опечаток.

1. Страница 162: «обработке» заменить на «обработки».
2. Страница 162: «в течении» заменить на «в течение».
3. Страница 170: «В данное главе» заменить на «В данной главе».
4. В таблице 5.4 диаметр астероида 276033 приведен в метрах, в то время как для остальных астероидов — в километрах.
5. Страница 190: «от Солнца и сжатия Солнца» заменить на «от Солнца и сжатие Солнца».
6. Страница 292: «5 Ки/км⁻²» заменить на «5 Ки/км²».

Вместе с тем, указанные замечания ни в коей мере не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного постановлением правительства РФ №842 от

24.09.2013 г. Содержание диссертации соответствует специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия (по физико-математическим наукам).

Таким образом, соискатель Галушина Татьяна Юрьевна безусловно заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, доцент,
ЗАВЕДУЮЩИЙ КАФЕДРОЙ астрономии, геодезии, экологии и
мониторинга окружающей среды Института естественных наук и математики
федерального государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б.Н. Ельцина»,
ВЕДУЩИЙ НАУЧНЫЙ СОТРУДНИК Научной лаборатории
астрохимических исследований кафедры астрономии, геодезии, экологии и
мониторинга окружающей среды Института естественных наук и математики
федерального государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б.Н. Ельцина»

КУЗНЕЦОВ Эдуард Дмитриевич

06 сентября 2024 г.

Контактные данные:

тел.: 7(343)3899587, e-mail: eduard.kuznetsov@urfu.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация:

01.03.01 — Астрометрия и небесная механика

Адрес места работы:

620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19,
УРАЛЬСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ ПЕРВОГО
ПРЕЗИДЕНТА РОССИИ Б.Н. ЕЛЬЦИНА, Институт естественных наук и
математики, кафедра астрономии, геодезии, экологии и мониторинга
окружающей среды

Тел.: 88001005044; e-mail: contact@urfu.ru

Подпись сотрудника УрФУ Э. Д. Кузнецова удостоверяю:



Начальник
000Д ИЕНИМ
Фалько НВ