

## ОТЗЫВ

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

Астероиды представляют собой наиболее обширный класс объектов Солнечной системы. Особенный интерес представляют астероиды, сближающиеся с Землей (АСЗ). 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 этих 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. Эти исследования важны также с учетом особой роли этих тел в задаче взаимодействия Земли с этими объектами, а также в защите Земли от потенциально опасных астероидов (ПОА). Важными являются задачи прогноза реального положения астероида в пространстве, исследования эволюции орбит астероидов на большом интервале времени. 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, поэтому создаваемые численные модели движения астероидов должны иметь в своей структуре алгоритмы выявления хаотичности. В данной работе большое внимание уделено астероидам с малыми перигелийными расстояниями,  $q \leq 0.15$  а.е. Особенностью орбит этих небесных тел являются большие эксцентриситеты и наклонения, а прохождение рядом с Солнцем накладывает особые требования на модель сил и затрудняет получение новых наблюдений.

Рассмотренный в настоящей диссертации широкий спектр задач позволяет сделать вывод об актуальности и несомненной научной важности и ценности выполненных исследований, результаты которых представлены в настоящей диссертации.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка использованных источников (244 наименования) и одного приложения, содержит 89 рисунков и 61 таблицу. Общий объем диссертации составляет 326 страниц. По теме диссертации автором опубликовано 30 работ, из них 18 статей в журналах, включенных в международные базы данных научного цитирования Scopus/Web of Science. Для 28 работ, написанных в соавторстве, указан вклад диссертанта. Кроме того, 32 работы опубликованы в материалах конференций. 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.

Во введении формулируются цели и задачи исследования и дается их обоснование, приводятся полученные результаты, приводятся выносимые на защиту положения и результаты, описывается структура диссертации. Кроме того, приводится список опубликованных автором работ и указывается участие автора.

В первой главе, являющейся обзорной, описана популяция АСЗ, представлены основные методы исследования их динамики, освещена проблема астероидной опасности.

Во второй главе описаны методы исследования динамики астероидов, используемые в данной работе. Описываются возмущающие силы, приведены алгоритмы вычисления их влияния, кратко представлены методы интегрирования, описываются используемые способы

построения начального облака неопределенности в линейном и нелинейном случаях, представлена численно-аналитическая методика выявления орбитальных и вековых резонансов, описание методики исследования структуры возмущений.

В третьей главе представляется программный комплекс ИДА, разработанный, в том числе и автором диссертации, для изучения движения астероидов, с помощью которого выполнено большинство исследований в настоящей работе.

В четвертой главе описаны процедура наблюдений некоторых из исследуемых астероидов на телескопе Zeiss-2000 Центра коллективного пользования «Терскольская обсерватория» ИНАСАН и полученные результаты.

В пятой главе приводятся результаты исследования динамики астероидов с малыми перигелийными расстояниями в окрестностях орбитальных и вековых резонансов, оценено влияние светового давления и эффекта Ярковского, описываются результаты исследований вероятностной орбитальной эволюции ряда астероидов.

В шестой главе описывается метод быстрого оценивания вероятности столкновения астероида с Землей и результаты его сравнения с другими методами. Представлен также метод предотвращения столкновения, основанного на превентивном разрушении, и результаты его тестирования.

В заключении приводятся основные полученные результаты и выводы.

Представленный Т.Ю. Галушиной к защите комплекс научно-методических разработок и исследований с использованием реальных наблюдательных данных вносит значительный вклад в развитие актуального направления астрономии, а именно, орбитальной динамики астероидов с малыми перигелийными расстояниями ( $q > a.e.$ ). Автор использует в работе, в основном, достаточно широкий спектр собственных разработок (выполненных в соавторстве), методик и программ. Это позволило автору успешно рассмотреть целый ряд задач и получить новые результаты. Необходимо отметить, что в работе обращено большое внимание на сравнение получаемых результатов с результатами других авторов и анализ расхождений, если они выявляются. Автор хорошо знаком с научной литературой по теме исследования, о чем говорит также обширный список литературы, и использует в своей работе самые новые результаты других авторов. В работе используются также и все наблюдения рассматриваемых небесных тел.

Такой подход позволил Т.Ю. Галушиной получить целый ряд новых результатов, как для отдельных изучаемых астероидов, так всей группы этих малых тел. Отметим некоторые из них:

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 рассмотренных 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. 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.
5. Модельная оценка последствий превентивного разрушения астероида демонстрирует, что предложенный метод предотвращения столкновения обеспечивает защиту от падения на Землю самого объекта и его осколков.
6. Созданное программно-алгоритмическое обеспечение дает возможность проводить детальное исследование динамики астероидов, сближающихся с Землей.
7. Разработанная и опробованная на реальных наблюдениях методика построения обзорных эфемерид показала высокую эффективность при работе с астероидами с плохо определенными орбитами.

Достоверность и обоснованность полученных результатов подтверждается тем, что 1) программное обеспечение протестировано на объектах с известными особенностями и характером движения; 2) полученные результаты (везде, где это возможно) сравнивались с результатами других авторов и/или с данными основных сайтов (Международного центра малых планет, Лаборатории реактивного движения НАСА; 3) результаты докладывались и обсуждались на 40 научных конференциях, представлены в 30 статьях.

По данной работе можно высказать следующие замечания:

1. Как уже отмечалось, четвертая глава посвящена процедуре и результатам наблюдений, выполненных на телескопе Zeiss-2000 Центра коллективного пользования «Терскольская обсерватория» ИНАСАН. Содержание главы изобилует деталями и подробностями, выходящими за пределы темы диссертации. Так, представляется излишней и избыточной информация о погодных обстоятельствах наблюдений, очевидные выводы о том, что “для уточнения орбит малых тел Солнечной системы желательно получение нескольких точек за ночь несколько ночей подряд” (стр. 140) , “чем слабее объект и хуже условия наблюдений, тем меньше измерений будет принято MPC” (стр. 150).
2. Следующая группа замечаний относится к гл. 5. Представляется излишним рассмотрение вопроса о влиянии отбраковки наблюдений на полученное значение параметра эффекта Ярковского, приведшее к очевидному выводу о наличии такого влияния (раздел 5.3.4). Это относится также к выводам “уменьшение интервала и числа наблюдений приводит к потере точности определяемого параметра” (стр. 211); “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  $\sigma$ ” (стр. 211).
3. В разделе 5.5.4 рассмотрена оценка влияния светового давления на орбитальные и вековые резонансы астероидов с малыми перигелийными расстояниями. Между тем, световое давление представляет только радиальную составляющую ускорения, которая вековым образом не изменяет углы ориентации орбиты. Т.е. в рассмотрении влияния светового давления на вековые резонансы нет необходимости. Не изменяет вековым образом долготу восходящего узла,  $\Omega$ , и аргумент перицентра,  $\omega$ , и

трансверсальная составляющая  $A_2$  эффекта Ярковского (это следует из уравнений Эйлера (М.Ф. Субботин, 1968, «Введение в теоретическую астрономию»)).

4. Желателен комментарий к рис. 1.10 (стр. 71). Без комментария не понятно, почему из рисунка следует, что один способ вычисления параметра MEGNO лучше другого.

Диссертация хорошо оформлена и структурирована. Изложение логично и содержит всю необходимую для понимания информацию. Рисунки в достаточной мере иллюстрируют и дополняют изложение. Опечатки и неточности присутствуют в незначительном количестве. Можно отметить такие: на стр. 11 – Главный пояс, а на стр. 12 – главный пояс; на стр. 142, рис. 4.2 – отсутствуют размерности по осям  $Y$ ; на рис. 5.9 (стр. 191) нуль обозначен как -2E-28.

Высказанные замечания ни в коей мере не снижают высокой оценки работы, выполненной Т.Ю. Галушиной. Подводя итог, можно сказать, что автором диссертации Т. Ю. Галушиной проведена значительная исследовательская работа, которая представляет собой оригинальное завершённое исследование и вносит существенный вклад в раздел астрономии, изучающий орбитальную динамику астероидов, сближающихся с Землей. Применяемые автором методики и полученные результаты могут быть использованы при решении широкого круга задач, связанных с определением орбит астероидов, исследованием их эволюции, оценкам влияния на их движение различных факторов, оценке вероятности столкновения малого тела с Землей. Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Диссертация Т.Ю. Галушиной «Исследование орбитальной динамики избранных групп астероидов, сближающихся с Землей» удовлетворяет критериям, установленным «Положением о порядке присуждения ученых степеней от 24.09.2013», а ее автор Галушина Татьяна Юрьевна заслуживает присуждения ей степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.1, «Физика космоса, астрономия».

Ведущий научный сотрудник  
доктор физ.-мат. наук



Ю.А.Чернетенко

Подпись Ю.А.Чернетенко удостоверяю,  
ученый секретарь ИПА РАН,  
доктор тех. наук



Л.В. Федотов

24.10.2024 г.

Чернетенко Юлия Андреевна  
доктор физико-математических наук  
старший научный сотрудник  
тел. +7 921 883 9048  
сл.т. 275 10 90  
email: cya@iaaras.ru  
ведущий научный сотрудник

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт прикладной астрономии Российской академии наук

196140, Санкт-Петербург, Пулковское шоссе, 86, 69