

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Самбарова Георгия Евгеньевича «Вероятностное моделирование динамики астероидов и метеороидов, движущихся в условиях наложения возмущений различных типов», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.01 – астрометрия и небесная механика

Диссертационная работа Самбарова Георгия Евгеньевича посвящена исследованию сложной вероятностной орбитальной эволюции астероидов, включающей резонансные взаимодействия астероидов с планетами и проявления хаотичности в движении изучаемых малых небесных тел.

Актуальность работы

Выполненное автором исследование орбитальной эволюции астероидов с учетом хаотичности их движения весьма актуально, в силу двух обстоятельств. Это, во-первых, актуальность астероидной тематики вообще, ибо понимание эволюции малых тел необходимо для понимания эволюции Солнечной системы в целом. Изучение динамической эволюции астероидов помогает науке понять пути эволюции всей Солнечной системы. Это важно не только для решения практически значимых вопросов, как проблемы астероидно-кометной опасности для Земли, проблемы обеспечения Земли энергетическими, минеральными и др. ресурсами, проблемы возникновения жизни и т.д., но и для решения ряда теоретически важных задач орбитальной динамики множества небесных тел нашей Солнечной системы. С другой стороны, в последнее время все очевиднее становится тот факт, что орбитальная история тел Солнечной системы не статична, а очень динамична. Хорошим примером является астероид Апофис. Его тесное сближение с Землей в 2029 г. приведет к сильному изменению орбитальных характеристик Апофиса с вероятностными компонентами, что станет причиной некоторой неопределенности дальнейшей его истории.

Представляется, что в этой ситуации весьма актуальными являются как разработанные автором алгоритмы численно-аналитического исследования орбитального движения астероидов с учетом ряда возмущений, приводящих к хаотичности в движении, так и результаты анализа, позволяющие лучше понять конкретные особенности движения исследованных малых тел.

Основное содержание диссертации изложено в четырех главах. В *первой главе* кратко рассмотрена используемая модель движения малых тел Солнечной системы. Приведены уравнения их движения и математическая модель возмущающих сил от притяжения всех больших планет, Плутона, Луны, трех основных малых планет - Цереры, Паллады, Весты (п. 1.1.1); от сжатия Земли и Солнца (1.1.2); от релятивистских эффектов в движении Солнца, планет, Плутона и Луны (п. 1.1.3), от давления солнечной радиации (п. 1.1.4). Рассмотрены алгоритмические вопросы оценки, на основе обработки измерений, начальных параметров орбит по методу Наименьших Квадратов (п. 1.2), выбора способа интегрирования для прогнозирования движения астероидов – на основе метода Эверхарта с модификацией В.А. Авдюшева (п. 1.3), построения доверительных областей в линейном и нелинейном случаях (п. 1.4) и определения показателей точности моделей (1.5). Разработанные алгоритмы показателей точности моделей, а также сравнения моделей возмущающих сил и выбора подходящей модели возмущений в задаче построения областей возможных движений астероида опробованы в численном анализе движения нескольких астероидов: 2007 LQ19, 2007 VK184, 2011 AG5, 367943 Duende (2012 DA14) (1.5). Рассмотрены особенности исследования динамики потенциально опасных астероидов, наблюдавшихся в одной оппозиции (п.1.6). Представлена численно-аналитическая методика выявления вековых резонансов, выписаны 20 апсидально-нодальных резонансных соотношений низких порядков (п. 1.7). Приведено также описание алгоритма вычисления показателя MEGNO, который использовался для оценки хаотичности орбит исследованных малых тел (п. 1.8). Во *второй главе диссертации* автор обсуждает вопросы исследования структуры

возмущений и на основании этого анализа формулирует три подхода, три методики для решения этих вопросов (п. 2.1). С помощью этих методик выполнены численные оценки влияния малых возмущающих ускорений от сжатия Земли и Солнца на движение некоторых конкретных тел - 2011 CQ1 и 2011 MD (п. 2.2), а также 1995 CR и 2011 KE (п. 2.3)). Сделан подробный анализ и показано, что эти малые возмущения могут в некоторых случаях приводить к значительным отклонениям орбиты от номинальной. В *третьей главе* автор выполнил исследование динамики астероида (3200) Phaethon под влиянием наложения различных резонансов. У этого астероида есть целый спектр апсидально-нодальных резонансов с Меркурием, Венерой, Землей, Марсом и Юпитером, а также многочисленные тесные сближения с планетами земной группы, недавно было сближение с Землей. Поэтому, конечно, изучение динамики движения Фазтона очень важно для науки. В *четвертой главе* исследованы особенности динамической эволюции астероида (196256) 2003 EH1. Представлен также возможный сценарий динамического развития потока Квадрантиды, образованного этим астероидом. В *Заключении* даны основные выводы по работе, перспективы дальнейших исследований.

Краткий обзор содержания диссертации показывает, что перед нами – серьезная научная работа. Диссертация многорезультативна. Приведем основные новые научные результаты.

Основные новые научные результаты диссертации состоят, по-моему, в следующем:

1. В работе развит способ оценивания точности построения доверительных областей, позволяющий дать оценку влияния различных возмущающих факторов на вероятностную динамику астероидов со сложной структурой возмущений. Способ показал свою эффективность, позволив выполнить анализ вероятностной эволюции орбит ряда конкретных астероидов. На основе этого способа исследовано влияние слабых возмущающих факторов на орбитальное движение астероидов 1995 CR, 2011 KE (с учетом сжатия Солнца); 2011 MD, 2011 CQ1 (с учетом сжатия Земли). Показано, что малые

возмущения могут оказывать заметное влияние на долговременную эволюцию астероидов.

2. В работе развита численно-аналитическая методика выявления вековых апсидально-нодальных резонансов в движении астероидов и анализа их влияния на орбитальную эволюцию астероидов. Проведено исследование влияния этих резонансов на астероиды (196256) 2003 EH₁ и (3200) Phaethon 1983 TB.

3. Выполнен MEGNO-анализ номинальной орбиты и тестовых частиц доверительной области астероидов (196256) 2003 EH₁ и (3200) Phaethon 1983 TB, и показано, что в окрестности орбитальных резонансов проявляется хаотичность.

4. Исследование орбитальной эволюции метеороидных частиц потока Квадрантиды, выброшенных из астероида (196256) 2003 EH₁, сближающихся с Юпитером и движущихся в окрестности орбитальных резонансов, свидетельствует о том, что хаотичность в движении этих частиц появляется в окрестности границ, разделяющих резонансное и нерезонансное движения, а также при сближении частиц с Юпитером.

Достоверность полученных в диссертации научных результатов обеспечивается, прежде всего, адекватностью примененных и разработанных моделей и методик современным теориям и данным. Достоверность полученных результатов подтверждается также данными наблюдений астероидов, представленными на сайте Центра Малых Планет MPC (Minor Planet Center). Используемое в процессе исследований программное обеспечение протестировано на объектах с заведомо известными особенностями и характером движения. Кроме того, правильность полученных результатов подтверждается сравнением некоторых из них с результатами других авторов.

Практическая и теоретическая значимость диссертационной работы, по моему мнению, состоит в следующем. а) Тот факт, что развитые методики,

алгоритмы и программно-вычислительные комплексы были успешно применены для анализа движения ряда астероидов, показывает, что данный метод численно-аналитического исследования применим к исследованию сложной динамики малых тел Солнечной системы с учетом резонансов и хаотичности в их движении. Б) С практической точки зрения ряд построенных в работе алгоритмов, а также разработанное на их основе программное обеспечение могут быть использованы для исследования разных аспектов динамической эволюции малых тел Солнечной системы, например, построения доверительных областей и оценка их точностей, областей выявления резонансов, областей хаотичности движения околоземных объектов, применения показателя MEGNO и т.д.

Следует отметить, что автор выполнил очень большую работу, сложную и в общетеоретическом, и в техническом отношении, проявив большое трудолюбие и научную эрудицию, высокую квалификацию. Результаты работы получены лично **автором**. Материалы диссертации опубликованы в 17 научных работах. Среди них 8 работ – в рекомендованных ВАК РФ изданиях. Результаты исследований докладывались на 26 научных конференциях. Представленные в диссертации результаты включены в отчеты по трем проектам РФФИ.

Автореферат соответствует диссертации.

В качестве **замечаний** автору отмечу следующее:

- 1) В модели движения астероидов следовало бы учесть влияние эффекта Ярковского.
- 2) Вопросы об учете сжатия Юпитера, а также давления солнечного света по-разному описаны в разных местах диссертации и автореферата.
- 3) Есть ряд погрешностей редакционного характера.

Данные недостатки **не снижают** безусловно положительной оценки всей выполненной работы Самбарова Георгия Евгеньевича, они носят характер пожеланий в дальнейших исследованиях.

Выводы. Диссертация Самбарова Георгия Евгеньевича «Вероятностное моделирование динамики астероидов и метеороидов, движущихся в условиях наложения возмущений различных типов» является завершенной научно-квалификационной работой, содержит результаты, обладающие научной новизной и имеющие теоретическую и практическую значимость. Она удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК РФ к кандидатским диссертациям, соответствует паспорту специальности 01.03.01 – астрометрия и небесная механика, а её автор, Самбаров Георгий Евгеньевич, безусловно заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по данной специальности.

Отзыв составил официальный оппонент

Ивашкин Вячеслав Васильевич

Доктор физико-математических наук по специальности 01.02.01 - Теоретическая механика,
профессор, главный научный сотрудник
Федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук» (ИПМ им. М.В. Келдыша РАН).
125047, Москва, Миусская пл., д. 4
Тел: +7 499-220-78-26 E-mail: ivashkin@keldysh.ru

Ивашкин
24/2-2021

Ивашкин В.В.

Подпись Ивашкина Вячеслава Васильевича удостоверяю:

Ученый секретарь ИПМ им. М.В. Келдыша РАН

К.ф.-м.н.



Маслов А.И.