

## ОТЗЫВ

председателя диссертационного совета Шевченко Ивана Ивановича на диссертацию Баляева Ивана Алексеевича на тему «Прогнозирование сближений и соударений астероидов с Землей и другими планетами», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия.

Диссертационная работа И.А.Баляева посвящена анализу динамики астероидов, сближающихся с Землей (АСЗ) – теме, которая привлекает внимание многих исследователей в ведущих мировых научных центрах. Ее тема особенно актуальна в наше время в связи с резко возросшим потоком наблюдательных данных о динамике малых тел Солнечной системы, открытием большого количества новых объектов, планированием космических миссий. В последние десятилетия и годы в качестве одних из ведущих методов научного исследования в небесной механике, как и в естественнонаучных дисциплинах в целом, на первый план выдвигаются компьютерное моделирование и численный эксперимент. На использовании этих методов основана и рецензируемая диссертационная работа.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка цитированной литературы и двух приложений. Общий объем диссертации составляет 94 страницы, включая приложения и список литературы, содержащий 50 наименований.

Во Введении обоснована актуальность темы исследования, дан общий обзор развития представлений об астероидной опасности, рассмотрены имевшие место в прошлом импактные события, современное состояние проблемы, кратко описаны исследования, проводившиеся по этой тематике в СПбГУ.

Первая глава «Эксперименты с многомерным варьированием начальных данных» посвящена постановке и формулировке решаемых далее задач, которые включают численно-экспериментальные исследования эволюции взаимного расположения «щелей», развитие методик трехмерного варьирования в пространстве скоростей и шестимерного варьирования по координатам и скоростям.

Далее, во второй главе «Ускорение численного интегрирования» предложенные в первой главе методики применены для разработки нового программного обеспечения. Описаны предпосылки к его созданию. Широко известный эффективный метод Гаусса–Эверхарта модифицирован с учетом жестких требований к расчету траекторий АСЗ. Описаны организация и оптимизация вычислений орбит, а также и результаты успешного тестирования новой программы. В целом получены результаты, представляющие несомненный интерес для специалистов, работающих в данной области.

В третьей, наиболее объемной главе «Эксперименты Монте–Карло» представлены результаты массовых расчетов вероятностей соударения АСЗ с Землей. Несмотря на огромное количество проводимых сегодня в мире численных расчетов в подобных задачах, проблема отнюдь не теряет своей значимости и актуальности, так как ее анализ дает основу для качественного понимания проблемы астероидно-кометной опасности в

целом. Для двухсот астероидов проведено тщательное сканирование пространства элементов орбит; представлены вероятности соударений, полученные в ходе двух массовых расчетов. Представленные в главе результаты являются важным вкладом в изучение динамики АСЗ.

В Заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы. Вероятности соударений для 200 астероидов и разработанный в рамках работы программный код R<sup>0</sup> представлены в двух приложениях.

В ходе работы над диссертацией автором разработаны и успешно протестированы новый алгоритм и программа для быстрого расчета сближений астероидов с Землей (а также и с другими планетами и Луной). Алгоритм обеспечивает высокие производительность, стабильность и точность при расчетах сближений астероидов с планетами. Программа протестирована на предмет обнаружения возможных соударений с Землей опасных астероидов, мониторинг которых ведет NASA. Разработанные алгоритм и программное обеспечение позволяют эффективно моделировать на обычных настольных компьютерах движение миллионов астероидов одновременно, находить сближения и соударения с планетами и Луной, методом Монте–Карло рассчитывать вероятности соударений.

Для реальных астероидов автором определены ограниченные области в пространстве элементов орбит, откуда астероиды могут представлять угрозу для Земли. В пространстве трех орбитальных элементов, – эксцентриситет, перигелийское расстояние, наклонение, – отождествлены области с астероидами, представляющими опасность для Земли в ближайшие сто лет. Проведены массовые расчеты вероятностей соударений, что дает оценку астероидной опасности со стороны всего астероидного населения в целом. Из анализа динамики более чем ста тысяч астероидов выявлено 3200 (из них ~1600 АСЗ), сближающихся с планетами менее чем на сто их радиусов. При этом два десятка из выявленных АСЗ формально не были (до получения данных результатов) отнесены к классу околоземных, поскольку их перигелийское расстояние в настоящее время превышает 1.3 а.е. Соударения с какой-либо из планет (включая Землю) обнаружены для нескольких сотен астероидов. В массовых расчетах динамики модельных астероидов подтверждено, что соударение с планетой предваряется серией сближений.

Таким образом, автором получены важные выводы, которые, несомненно, будут востребованы в будущих исследованиях динамики АСЗ. Среди результатов следует особо отметить получение автором многомерных характеристик ведущих к соударению областей начальных данных, успешные результаты поиска возможных соударений астероидов с Землей (а также и с другими планетами и Луной) и оценки вероятностей соударений.

По диссертации необходимо высказать следующие замечания.

1. На с. 13 автор пишет: «Настоящая работа сосредоточена на актуальных угрозах и не затрагивает вопросы эволюции орбит астероидов на больших временных интервалах. Расчет траекторий производился на 100–200 лет в будущее.» Здесь следует заметить, что на больших интервалах времени расчеты индивидуальных траекторий АСЗ с целью прогнозирования и не имеет смысла проводить, поскольку типичные значения

ляпуновского времени (определяющего временной горизонт предсказуемости движения) для АСЗ составляют не более нескольких десятков лет (см. обзор I.I.Shevchenko "On the Lyapunov exponents of the asteroidal motion subject to resonances and encounters" // In: Near Earth Objects, our Celestial Neighbors: Opportunity and Risk (Proc. IAU Symp. 236) /Ed. by A.Milani, G.B.Valsecchi, and D.Vokrouhlicky, Cambridge: Cambridge Univ. Press, pp. 15–29 (2007), а также приведенные в нем ссылки).

2. На с. 46 упомянуто, что в расчетах NASA для вероятностей соударений «в ряде случаев результат сильно неустойчив по отношению к методике расчета и отличие может достигать нескольких порядков». Выбор и обоснование методики расчета вероятностей соударений являются, таким образом, важнейшими элементами исследования. Автору следовало представить детальное сравнение преимуществ и недостатков существующих методик (NASA, NEODys, СамГТУ, ИПА РАН) и своей собственной, а не ограничиваться упоминанием, что есть и другие. (Как, например, на с. 9, где автор пишет: «В России есть, например сайт СамГТУ (smallbodies.ru), где своим методом определены вероятности соударений нескольких десятков астероидов. Свой метод оценки вероятностей предложили в ИПА РАН [49].»)

3. На с. 15 читаем: «Впервые оценены вероятности соударения большого количества астероидов (>100000) со всеми планетами Солнечной системы и Луной.» Заметим, что значения вероятностей соударений зависят от интервала времени, на котором велось моделирование; например, на с. 46 читаем, что по сравнению с методикой NASA «интервал, взятый для программы R<sup>0</sup>, в большинстве случаев немного больше, поэтому и вероятность должна быть, в среднем, больше.» Поэтому здесь и в других подобных заключениях необходимо указывать величину данного интервала.

4. На с. 10 автор пишет: «Здесь будет рассказано о результатах, полученных в СПбГУ и предшествовавших настоящей диссертации» и далее: «Тема астероидной опасности хотя и не была обделена вниманием в СПбГУ, но все же исследования проводились скорее от случая к случаю. Стоит упомянуть ...». Эта формулировка нуждается в исправлении: необходимо указать, что речь идет о времени до 2008 г.

5. Следует отметить недостатки в составлении и оформлении списка цитированной литературы (с. 61–68). Для столь широко исследуемой в мире темы (темы астероидно-кометной опасности) он слишком краток (50 наименований). Названия статей в списке набраны либо в обычном формате, либо полностью заглавными буквами; следовало придерживаться первой опции.

Сделанные замечания не затрагивают выносимых на защиту выводов и результатов работы и не влияют на ее общую положительную оценку. Автором получены важные и полезные результаты по динамике АСЗ, которые могут быть востребованы специалистами ряда учреждений (СПбГУ, ИПА РАН, ИНАСАН, ГАО РАН, СамГТУ и других). Выносимые на защиту результаты являются новыми, опубликованы в научной печати и прошли апробацию, подтвердившую их значимость и новизну.

Диссертация Балева Ивана Алексеевича на тему: «Прогнозирование сближений и соударений астероидов с Землей и другими планетами» соответствует основным требованиям, установленным Приказом от 19.11.2021 № 11181/1 «О порядке присуждения

ученых степеней в Санкт-Петербургском государственном университете», соискатель Баляев Иван Алексеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия. Нарушения пунктов 9 и 11 указанного Порядка в диссертации не обнаружены.

Председатель диссертационного совета

доктор физ.-мат. наук,

профессор СПбГУ, зав. кафедрой СПбГУ



И. И. Шевченко

5 октября 2023 г.