

# Использование параллельных вычислений в задачах динамики естественных и искусственных малых тел Солнечной системы



## 26 Использование параллельных вычислений в задачах динамики естественных и искусственных малых тел Солнечной системы

В статье представлено краткое описание алгоритмического и программного обеспечения, предназначенного для решения задач динамики малых тел Солнечной системы с использованием параллельных вычислений. Показано, что применение параллельных вычислений открывает новые возможности в исследовании динамики таких сложных космических систем, как класс астероидов, сближающихся с Землей и большими планетами, и совокупность околоземных объектов искусственного происхождения.

### АВТОРЫ:

**Т.В. Бордовицына** – Т.В. Бордовицына - докт. физ.-мат. наук, профессор, заслуженный работник высшей школы, член-корреспондент РАН,  
e-mail: tvbord@sibmail.com

**Т.Ю. Галушина** – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры астрономии и космической геодезии ФФ ТГУ,  
e-mail: volna@sibmail.com

**И.Н. Чувашов** – м.н.с. отдела небесной механики и астрометрии НИИ ПММ ТГУ,  
e-mail: chuvashov@sibmail.com

### Введение

Исследование динамики малых тел Солнечной системы представляет как сугубо научный, так и вполне конкретный практический интерес. Изучение динамических особенностей движения, орбитальной эволюции и распределения малых тел в Солнечной системе способно пролить свет на эволюцию Солнечной системы в целом. С другой стороны, знание особенностей движения таких, например, малых объектов, как астероиды, сближающиеся с Землей (АСЗ), необходимо с чисто практической точки зрения, поскольку позволяет прогнозировать возможные тесные сближения этих объектов с Землей. По данным каталога Боуэла на 6 октября 2011 г. зарегистрировано 8526 АСЗ.

За 50 лет использования космических аппаратов для научных исследований и хозяйственной деятельности в околоземном пространстве образовалась искусственная динамическая система малых тел, состоящая из космического мусора разнообразных размеров и форм. Дальнейшая работа в околоземном космосе требует знания особенностей динамики этой системы и развития методов прогнозирования сближений и столкновений объектов космического мусора с функционирующими космическими аппаратами (КА) и друг с другом. По данным объединенного стратегического командования США, на 2 сентября 2011 г. на околоземных орбитах находилось более 22 тысяч объектов размером до 10 см. НАСА предполагает, что меньших по размеру частиц могут существовать сотни тысяч или даже миллионы.

Очевидно, что прогнозирование движения таких больших совокупностей малых тел Солнечной системы невозможно без привлечения высокопроизводительных вычислительных систем. Такие возможности предоставляются многопроцессорными вычислительными системами, например, системами типа кластера СКИФ-Cyberia Томского государственного университета (режим доступа: <http://skif.tsu.ru/>).

### Алгоритмическое и программное обеспечение

*Численная модель движения астероида.* Движение астероидов рассматривается в рамках возмущенной задачи двух тел в прямоугольной гелиоцентрической системе координат, отнесенной к эклиптике и равноденствию 2000.0. В модель сил включается влияние всех больших планет, Плутона и Луны, а также трех наиболее крупных астероидов: Цереры, Паллады и Весты. Координаты больших планет, Плутона и Луны на заданный момент времени опреде-



ляются по коэффициентам чебышевских разложений, полученных из фонда DE405/LE405 (режим доступа: <http://ssd.jpl.nasa.gov/horizons.html>). Координаты Цереры, Паллады и Весты определяются численным интегрированием уравнений их движения с начальными параметрами, взятыми из каталога Е. Боуэлла. Кроме того, в зависимости от исследуемого объекта и решаемой задачи в модель сил включается также влияние сжатия Земли, светового давления и релятивистских эффектов от Солнца. Подробное описание программного комплекса, реализующего в среде параллельных вычислений численную модель движения астероида, можно найти в [1,2].

*Численная модель движения систем околоземных объектов.* Уравнения движения околоземного объекта, записанные в инерциальной системе координат, интегрируются численно с помощью интегратора Гаусса – Эверхарта, модифицированного В.А. Авдюшевым [3]. Потенциал гравитационного поля Земли представлен в виде разложения по шаровым функциям в системе координат, жестко связанной с Землей. Шаровые функции и их частные производные вычисляются по рекуррентному алгоритму Каннингема [4]. В соответствии с рекомендациями Международной службы вращения Земли (IERS), все параметры разложения потенциала Земли берутся из модели геопотенциала EGM96, имеющей 360 порядок и степень. Влияние приливных деформаций, происходящих в теле Земли под действием притяжения от Луны и Солнца, вводится в виде добавок в мгновенные значения коэффициентов разложения гравитационного поля Земли. Учитываются: твердый прилив, модель Лява и отклонение модели Лява от модели Вара, полюсный и океанический приливы. При вычислении возмущений от Луны, Солнца и больших планет используются фонды координат больших планет: DE405 – для высокоточных вычислений; DE406 – для исследования долговременной орбитальной эволюции околоземных космических объектов. При учете возмущений от светового давления вводится функция тени. Аналитические условия вхождения в тень, имеющую коническую форму, вычисляются через прямоугольные координаты спутника и Солнца [4]. Комплекс программ, предназначенных для прямого прогнозирования движения, дополнен программой решения обратных задач динамики по данным измерений и программой исследования хаотичности движения по вычислению параметра MEGNO. Подробное описание программных комплексов, реализующих в среде параллельных вычислений решение задач динамики околоземных искусственных объектов можно найти в [5-7].

*Алгоритм построения вероятностной области движения объекта.* Область возможных движений каждого объекта строится как ансамбль траек-

торий некоторого множества тестовых частиц, выбираемых в рамках вероятной начальной области. Начальная область определяется с помощью эллипсоида ошибок, получаемого из наблюдений астероида методом наименьших квадратов. Множество тестовых частиц формируется с помощью датчика случайных чисел относительно выбранного центра на основе нормального закона распределения и полной ковариационной матрицы ошибок. В качестве центра области выбирается так называемая номинальная орбита – орбита, получаемая в результате улучшения начальных параметров. Начальная область строится на момент наилучшей обусловленности задачи для имеющейся совокупности наблюдений.

*Способ вероятностной оценки возможных столкновений объектов.* Для предварительного поиска пересекающихся областей возможных движений может быть использован метод приближенного задания области ее граничной поверхностью как более экономичный [9]. В случае пересечения доверительных областей движения, построенных в виде граничных поверхностей, предлагается строить для этих объектов повторно доверительные области классическим способом, с заполнением начальной вероятностной области методом Монте-Карло, и отслеживать их эволюцию до момента пересечения; А оценку вероятности столкновения объектов космического мусора определять как отношение числа траекторий, попавших в область пересечения, к их общему числу.

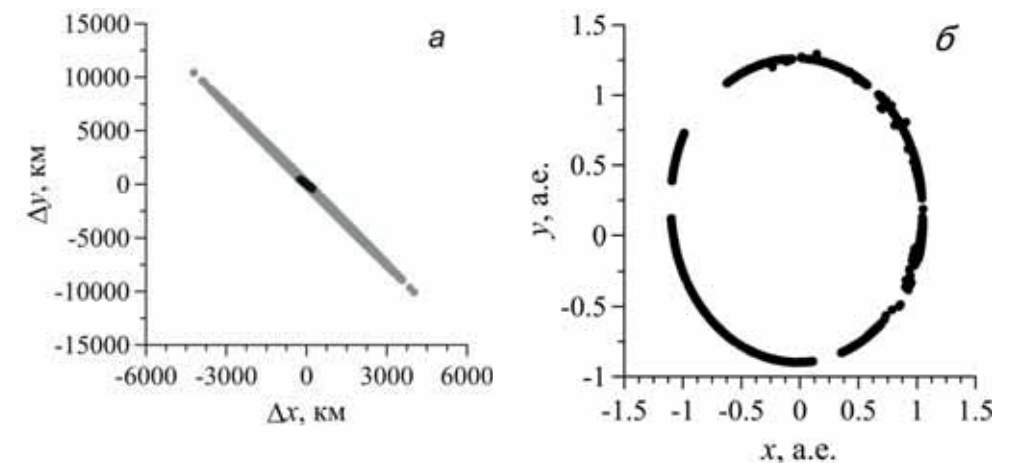


Рис. 1. Проекция области возможных положений на плоскость эклиптики 8 апреля 2029 года (а – черным цветом), 18 апреля 2029 года (а – серым цветом), 3 декабря 2054 года (б)

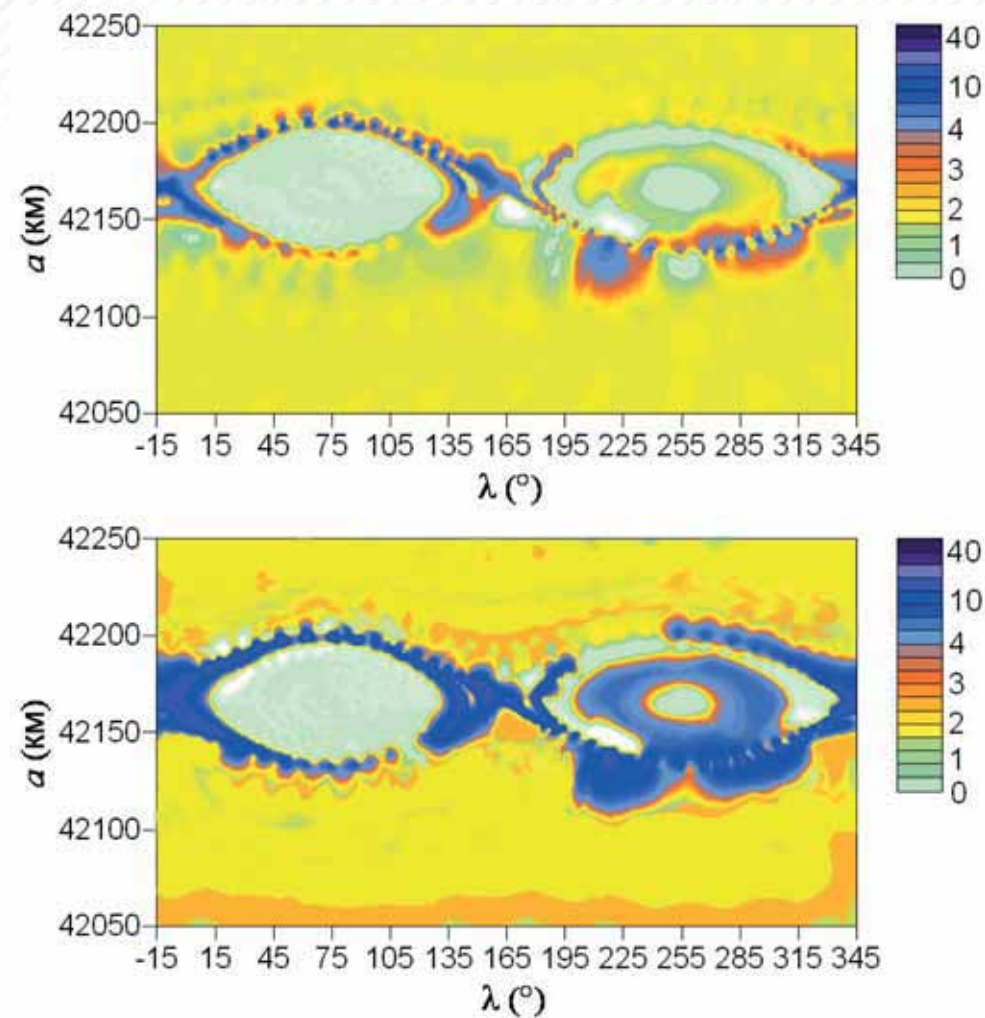


Рис. 2. Усредненный параметр MEGNO для объектов каталога ESA: а) на интервале времени 30 лет, б) на интервале времени 100 лет

### Примеры применения

*Исследование орбитальной эволюции АСЗ.* Астероид (99942) Апофис в настоящее время является объектом пристального внимания в связи с наличием ненулевой вероятности столкновения с Землей в 2036 г. и последующие

годы. Причем эта вероятность существенным образом зависит от обстоятельств тесного сближения объекта с Землей 13 апреля 2029 г. На рис. 1 представлена эволюция рассчитанной по 100 тысячам тестовых частиц области возможных движений Апофиса до и после сближения 2029 г. Результаты показывают, что после сближения область возможных движений расширяется и уже к 2054 г. охватывает всю орбиту. Это говорит о том, что на основании наблюдений, полученных до сближения Апофиса с Землей, нельзя делать выводы о его орбитальной эволюции после сближения

*Исследование орбитальной эволюции совокупности объектов геостационарной зоны.* На рис. 2 представлены результаты MEGNO – анализа орбитальной эволюции на интервалах времени 30 и 100 лет всех неуправляемых на 1 января 2009 г. КА объектов геостационарной зоны, приведенных в каталоге ESA Classification of geosynchronous objects.

На графиках хорошо видно, что со временем все большее количество КА оказывается на неустойчивых орбитах. И если на интервале времени 30 лет неустойчивых объектов относительно немного, то через 100 лет их число возрастает в несколько раз. Особенно ярко это проявляется в окрестности точки либрации с долготой 255 градусов. Как показано в нашей работе [10], это объясняется несимметричностью влияния на спутник потенциала Земли в точках либрации 75 и 255 градусов и соответственно большим влиянием резонансов высоких порядков на расширение зон хаотичности.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Быкова Л.Е., Галушина Т.Ю. // Изв. вузов. Физика. – 2009. – Т. 52. – № 10/2. – С. 12–19.
2. Раздымакина О.Н. // Изв. Вузов. Физика. – 2011. № 6/2. – С. 31–38.
3. Авдюшев В.А. // Вычисл. Технологии. – 2010. – Т. 15. – № 4. – С. 31–47.
4. Бордовицына Т.В., Авдюшев В.А. Теория движения ИСЗ. Аналитические и численные методы. – Томск: Изд-во ТГУ, 2007. – 105 с.
5. Бордовицына Т.В., Авдюшев В.А., Чувашов И.Н., Александрова А.Г., Томилова И.В. // Изв. вузов. Физика. – 2009. – С. 5–11.
6. Чувашов И.Н. // Изв. вузов Физика. – 2011. – № 6\2. – С. 5–12.
7. Бордовицына Т.В., Александрова А.Г., Чувашов И.Н. // Изв. вузов. Физика. – 2010. – № 8/2. – С. 14–21.
8. Сюсина О.М., Черницов А.М., Тамаров В.А. // Изв. вузов. Физика. – 2010. – Т. 53. – № 8/2. – С. 77–83.
9. Александрова А.Г., Бордовицына Т.В., Чувашов И.Н. // Изв. вузов. Физика. – 2009. № 10/2. – С. 20–25.
10. Александрова А.Г., Чувашов И.Н., Бордовицына Т.В. // Изв. Вузов. Физика. – 2011. № 6/2. – С. 47–54.