



и математики

# М. А. Васильева, Э. Д. Кузнецов

Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия vasilyeva.maria@urfu.ru, eduard.kuznetsov@urfu.ru

# Эффект Ярковского: связь между ускорением $A_2$ и скоростью дрейфа большой полуоси для астероидов главного пояса

#### Введение

Для надежного исследования орбитальной эволюции астероидов необходимо учитывать негравитационные эффекты. В различных программных комплексах, позволяющих моделировать движение тел Солнечной системы, такие эффекты могут учитываться различными способами. Например, в Orbit9 [1] влияние негравитационных эффектов задается с помощью скорости дрейфа большой полуоси da/dt, в интеграторе Mercury6 [2] — путем задания негравитационного ускорения  $A_2$ .

Скорость дрейфа da/dt может быть оценена на основе физических и динамических параметров астероидов. Также оценки ускорения  $A_2$  и скорости дрейфа da/dt могут быть получены на основе анализа наблюдений.

Для решения некоторых задач возникает необходимость перехода от негравитационного ускорения  $A_2$  к дрейфу большой полуоси. Для осуществления этого перехода необходимо использовать функцию g(r), где r – гелиоцентрическое расстояние астероида.

Для астероидов, сближающихся с Землей, было предложено использовать функцию  $g(r) = \left(\frac{r_0}{r}\right)^d$ , где нормализующий параметр  $r_0 = 1$  а.е., параметр d определяется теплофизическими свойствами астероидов и принимает значения в диапазоне 0.5 < d < 3.5 [3].

Проведенные нами численные эксперименты показывают, что при заданных значениях негравитационного параметра  $A_2$  для астероидов главного пояса скорость дрейфа оказывается на порядок меньше, чем на основе аналитических оценок, использующих функцию g(r). В настоящей работе обсуждается эмпирическая форма записи функции g(r) в виде полинома 3-й степени.

## Моделирование

Динамическая эволюция модельных астероидов рассчитывалась с помощью программного комплекса Метсигуб. Было выполнено численное интегрирование на интервале 1 млн лет для модельных астероидов с круговыми эклиптическими орбитами с большими полуосями орбит от 1.5 до 3.5 а.е. с шагом 0,01 а.е. при значениях параметра  $A_2 = 1 \cdot 10^{-15}$ ,  $1 \cdot 10^{-14}$ ,  $1 \cdot 10^{-13}$  a.e./cyт.<sup>2</sup>.

Для последующего анализа были отобраны «спокойные» решения, т. е. такие модельные астероиды, которые не испытывали сближения с планетами и не проходили через резонансы. Для каждого астероида на основе результатов моделирования проведена оценка скорости дрейфа большой полуоси da/dt. После чего зависимость скорости дрейфа от значений негравитационного ускорения и большой полуоси представлена графически. Выполнена аппроксимация полученной зависимости с помощью полиномиальной модели 3-й степени.

# Модельные астероиды:

- $\triangleright$  эксцентриситет e=0;
- $\succ$  наклонение i=0;
- $\triangleright$  большая полуось a = 1.5, ..., 3.5 a.e. (шаг 0.01 a.e.);
- ightharpoonup негравитационное ускорение  $A_2 = 1 \cdot 10^{-15}$ ,  $1 \cdot 10^{-14}$ ,  $1 \cdot 10^{-13}$  a.e./cy $^2$ .

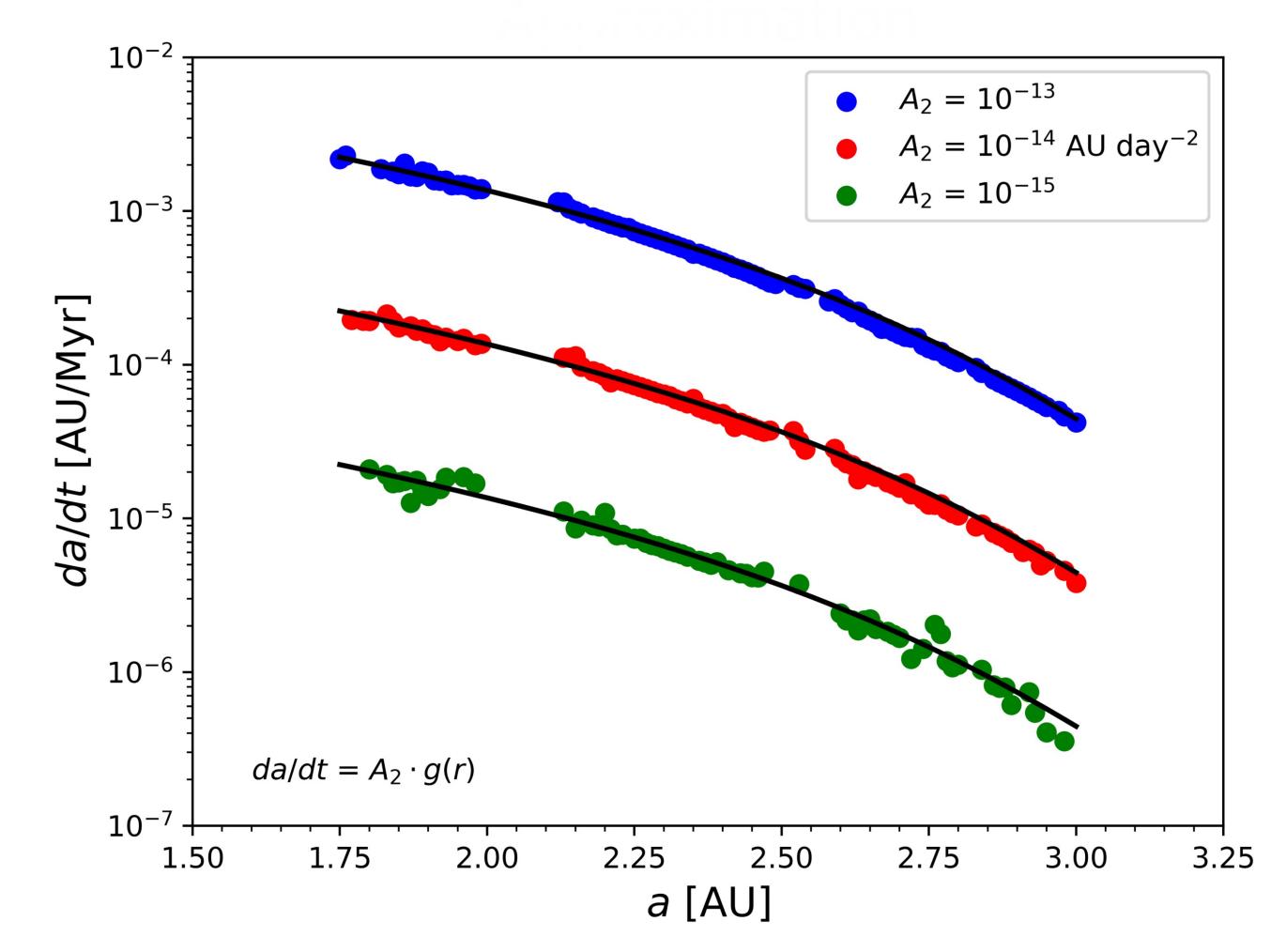
# Результаты

Предложено следующее эмпирическое соотношение между негравитационным ускорением  $A_2$  (в а.е./сут<sup>2</sup>) и скоростью дрейфа большой полуоси da/dt (в а.е./млн лет):

$$\frac{da}{dt} = A_2 \cdot (k_0 + k_1 a + k_2 a^2 + k_3 a^3),\tag{1}$$

где  $k_0 = 20.10$ ,  $k_1 = -17.94$ ,  $k_2 = 5.353$ ,  $k_3 = -0.5338$ .

На рис. 1 показаны зависимости скорости дрейфа da/dt от параметра  $A_2$  для астероидов с большими полуосями орбит от 1.75 до 3.0 а.е. Точками показаны значения скорости дрейфа, полученные по результатам численного моделирования. Линиями — аппроксимация по формуле (1).



**Рис. 1.** Зависимость скорости дрейфа da/dt от параметра  $A_2$ . Точки — значения скорости дрейфа, полученные по результатам численного моделирования. Линии — аппроксимация по формуле (1).

## Заключение

Полученная аппроксимация (1) позволяет формально связать скорость дрейфа da/dt с параметром  $A_2$  для астероидов главного пояса, движущихся по круговым эклиптическим орбитам. В дальнейшем планируется получить аналогичное соотношение для эллиптических орбит.

Выражения, полученные в работе [3], показывают, что скорость дрейфа зависит от большой полуоси как степень от  $a^{-1/2}$ . Поэтому в дальнейшем мы планируем найти зависимость da/dt от параметра  $A_2$  в виде полинома по степеням  $a^{-1/2}$ .

# Благодарности

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации, темы FEUZ-2020-0030 (ЭДК) и FEUZ-2020-0038 (МАВ).

## Список литературы

- 1. Orbfit Consortium (2011) Astrophysics Source Code Library arXiv:1106.015.
- 2. Chambers J. E. A hybrid symplectic integrator that permits close encounters between massive bodies // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 1999. V. 304. №. 4. P. 793-799.
- 3. Farnocchia D. et al. Near-Earth asteroids with measurable Yarkovsky effect // Icarus. -2013. -V. 224. -N0. 1. -P. 1-13.