

ВЛИЯНИЕ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ФОРМЫ АСТЕРОИДА НА ОЦЕНКУ ВЕЛИЧИН ВОЗМУЩЕНИЙ В ЕГО ВРАЩАТЕЛЬНОЙ ДИНАМИКЕ ПРИ СБЛИЖЕНИИ С ЗЕМЛЕЙ

К. С. Лобанова^{1,2}, А. В. Мельников¹

¹Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, ²Санкт-Петербургский государственный университет

Резюме

Форма подавляющего числа малых астероидов неизвестна, для них имеются лишь оценки среднего диаметра, полученные на основе абсолютной звездной величины и альбедо при ряде предположений. Для оценки величин возмущений во вращательной динамике астероида, возникающих при сближении с Землей, путем численного моделирования необходимо знание его моментов инерции, определяемых в том числе фигурой астероида. Посредством проведения массовых численных экспериментов по моделированию тесного сближения астероида с Землей изучено влияние параметров фигуры на величину возмущений во вращательной динамике астероида. Установлено, что при очень быстром вращении (период $P < 1$ ч) даже значительные погрешности в знании фигуры астероида не оказывают существенного влияния на оценку величин возмущений. Напротив, при относительно медленном вращении астероида ($P > 5$ ч) неточное задание параметров фигуры астероида может привести к существенной недооценке в численных экспериментах величин возмущения. Например, для астероида Апофис ($P = 30.6$ ч) погрешность в оценке периода вращения после тесного сближения с Землей в 2029 году может составлять несколько часов, а неопределенность в знании ориентации оси вращения — десяти градусов.

Введение

Вращательная и орбитальная динамика астероида тесно взаимосвязаны. Сближения с планетами, имеющие место в орбитальной динамике, влияют на вращение астероида [1]. В свою очередь, посредством действия эффекта Ярковского вращение влияет на орбитальную динамику астероида. Важной задачей является численное моделирование вращательной динамики астероидов, сближающихся с Землей. Возмущения, возникающие в динамике астероида при сближении, могут привести к катастрофическому столкновению в последующих возвратах [2, 3].

При численном моделировании вращательной динамики астероида в ходе сближения его форму обычно аппроксимируют трехосным эллипсоидом с полуосями $a > b > c$ (см., например, [4, 7]). Моменты инерции астероида (значения A/C и B/C , $A < B < C$), знание которых необходимо для моделирования гравитационного взаимодействия астероида и планеты при сближении, в предположении однородной плотности астероида связаны с параметрами фигуры [5]:

$$\frac{c}{b} = \sqrt{\frac{-1 + A/C + B/C}{1 + A/C - B/C}}, \quad \frac{b}{a} = \sqrt{\frac{1 + A/C - B/C}{1 - A/C + B/C}}.$$

Фигуры астероидов обычно известны с большими погрешностями. Для большинства астероидов имеются лишь оценки диаметра, полученные на основе абсолютной звездной величины астероида при определенных упрощениях. Цель работы заключалась в изучении влияния неопределенности знания фигуры астероида (c/b , b/a) на оценки возмущений в его вращательной динамике, получаемые путем численного моделирования сближения астероида с Землей.

Численные эксперименты

В соответствии с методикой, описанной в [6], проведены численные эксперименты по моделированию сближений с Землей астероидов: (99942) Апофис (диаметр $D \approx 340$ м, период вращения $P \approx 30$ ч), (367943) Дуэнде ($D \approx 30$ м, $P \approx 8$ ч), 2012 TC4 ($D \sim 10$ м, $P \approx 12$ мин) и 2023 BU ($D \sim 10$ м, $P \approx 2$ мин). Для всех исследуемых астероидов были построены и проанализированы диаграммы $\Delta P(c/b, b/a)$ и $\Delta\gamma(c/b, b/a)$, где $0 < c/b, b/a \leq 1$. Значения ΔP и $\Delta\gamma$ характеризуют величины возмущений во вращательной динамике астероида, возникающих из-за сближения с Землей (см. [6]), а именно: ΔP соответствует изменению периода вращения астероида, $\Delta\gamma$ — изменению угла между осью вращения астероида и нормалью к плоскости его орбиты. Принято: $\Delta P = P_{\text{final}} - P_0$, $\Delta\gamma = \gamma_{\text{final}} - \gamma_0$, где нижний индекс «final» соответствует величинам после момента сближения (при удалении астероида от геоцентра на расстояние $100 R_E$, где R_E — радиус Земли), а P_0 и γ_0 — начальные (до сближения) значения указанных параметров.

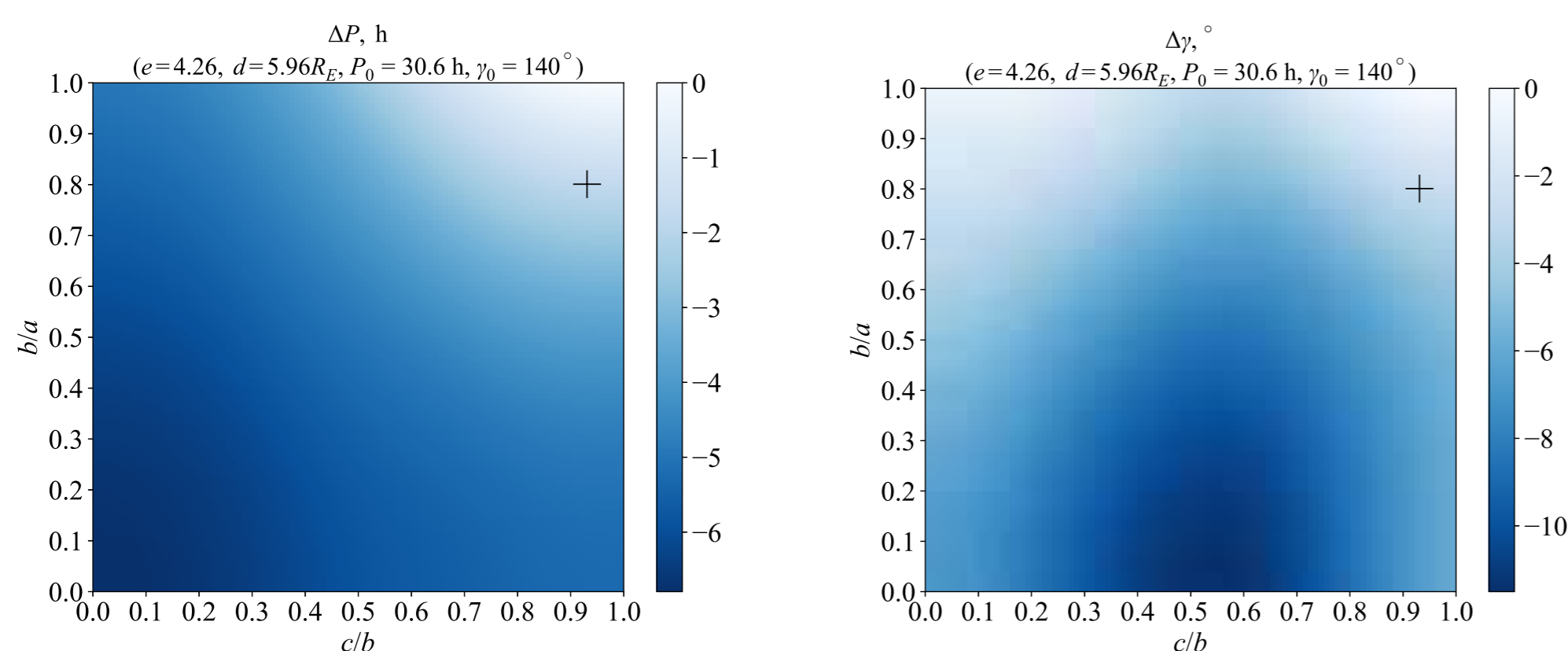


Рис. 1. Зависимости ΔP изменения периода вращения и $\Delta\gamma$ изменения угла, характеризующего отклонение оси вращения от нормали к плоскости орбиты, для астероида Апофис из-за сближения с Землей в 2029 году от параметров c/b и b/a , характеризующих фигуру астероида. Крестиком указано положение Апофиса [7].

На Рис. 1–3 представлены примеры диаграмм для Апофиса, Дуэнде и 2012 TC4. На рисунках указаны принятые начальные (до сближения) значения периода P_0 и угла γ_0 между осью вращения астероида и нормалью к плоскости орбиты, даны параметры геоцентрической орбиты (e , $d = a(e - 1)$, где e — эксцентриситет, a — большая полуось). Видно, что в случае Апофиса неопределенности в знании фигуры (значений c/b , b/a) могут приводить к погрешностям в оценке ΔP , составляющим несколько часов, в оценке $\Delta\gamma$ — десяти градусов. Аналогичный вывод сделан нами из анализа представленных на Рис. 2 диаграмм для Дуэнде. Напротив, для 2012 TC4 из Рис. 3 видно, что значения ΔP и $\Delta\gamma$ чрезвычайно малы, т.е. неопределенности в знании фигуры данного астероида не оказывают влияния на оценки величин возмущений, возникающих во вращательной динамике из-за сближения с Землей. Схожие с 2012 TC4 результаты получены для астероида 2023 BU, также обладающего быстрым вращением.

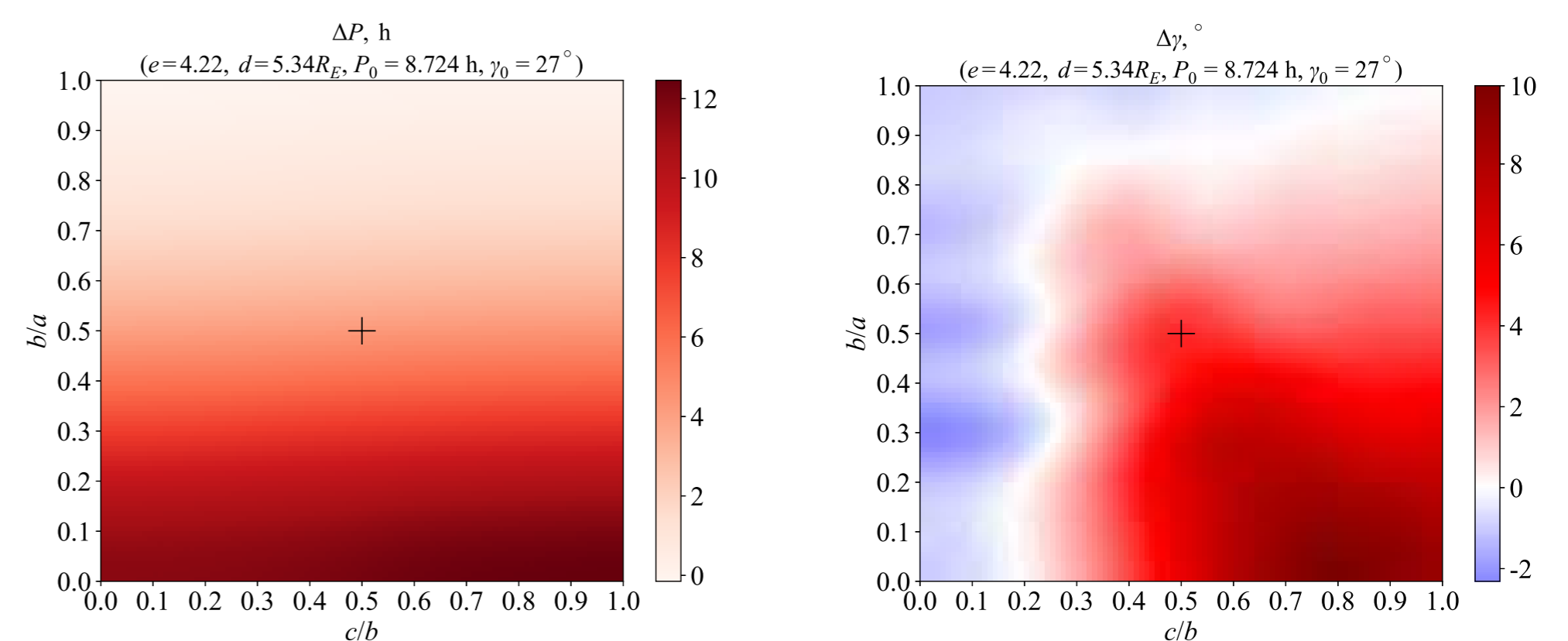


Рис. 2. То же для астероида Дуэнде при его сближении с Землей в 2013 году. Крестиком указано положение астероида [4].

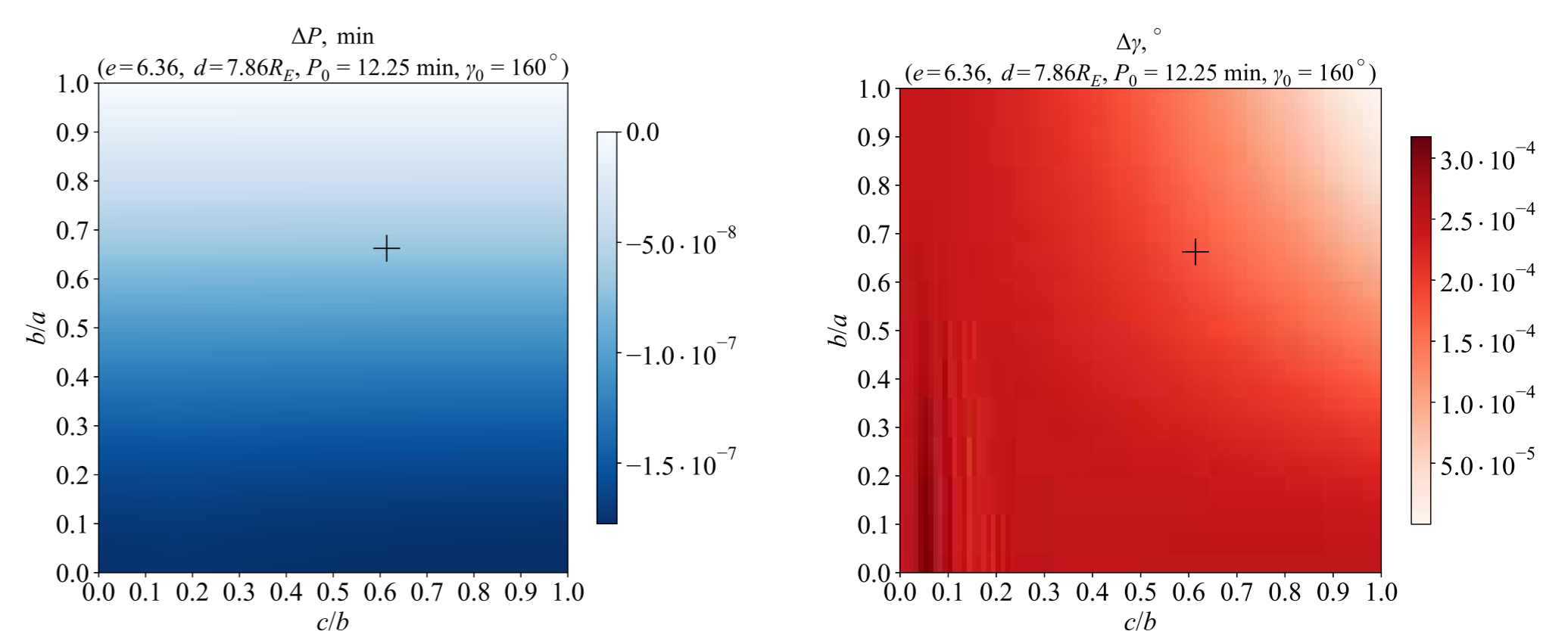


Рис. 3. То же для астероида 2012 TC4 при его сближении с Землей в 2017 году. Крестиком указано положение астероида [8].

Выводы

Мы изучили влияние параметров фигуры астероида на оценки величин возмущений, возникающих во вращательной динамике при сближении с Землей. Показано, что для астероидов Апофис и Дуэнде с относительно медленным вращением (период $P > 5$ ч) погрешности в знании параметров фигуры астероида могут приводить к заметным неточностям в оценке величин возмущений: в оценке изменения P достигают единиц-десятков часов, а в изменении γ достигают десяти градусов. Для малых астероидов 2012 TC4 и 2023 BU с очень быстрым вращением ($P < 1$ ч) неопределенность знания фигуры астероида практически не влияет на оценку возмущений в его вращательной динамике. Отметим, что и сама амплитуда возмущений в этом случае чрезвычайно мала.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-22-00306, <https://rscf.ru/project/23-22-00306/>.

Список литературы

1. Scheeres, D.J., Ostro, S.J., Werner, R.A., et al. 2000, Icarus, v.147, pp.106–118.
2. Sokolov, L.L., Bashakov, A.A., Borisova, T.P., et al. 2012, Solar System Research, v.46, Issue 4, pp.291–300.
3. Giorgini, J.D., Benner, L.A.M., Ostro, S.J., et al. 2008, Icarus, v.193, Issue 1, pp.1–19.
4. Melnikov, A.V. 2022, Solar System Research, v.56, Issue 4, pp.241–251.
5. Kouprianov, V.V., Shevchenko, I.I. 2006, Solar System Research, v.40, Issue 5, pp.393–399.
6. Lobanova, K.S., Melnikov, A.V. 2024, Solar System Research, v.58, Issue 2, pp.208–219.
7. Pravec, P., Scheirich, P., Āurech, J., et al. 2014, Icarus, v.233, pp.48–60.
8. Lee H.-J., Āurech J., Vokrouhlický D., et al. 2021, Astronomical Journal, v.161, Issue 3, id.112.