

УДК 52-17::521.182::523.44

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ АСТЕРОИДА 3200 PHAETHON ПОД ВЛИЯНИЕМ НАЛОЖЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ РЕЗОНАНСОВ

© 2019 г. Т. Ю. Галушина^а, *, Г. Е. Самбаров^а

^аТомский государственный университет, Томск, Россия

*e-mail: volna@sibmail.com

Поступила в редакцию 05.12.2017 г.

После доработки 05.12.2018 г.

Принята к публикации 05.12.2018 г.

Данная работа посвящена исследованию движения астероида 3200 Phaethon, который испытывал сближение с Землей в декабре 2017 г. Мы рассматриваем динамику астероида 3200 Phaethon, выявляя сближения с планетами, орбитальные и вековые резонансы, и оцениваем время предсказуемости и причины хаотичности. Особенностью динамики рассматриваемого объекта является прохождение через неустойчивый орбитальный резонанс 3/7 с Венерой, наличие целого спектра апсидально-нодальных резонансов с Меркурием, Венерой, Землей, Марсом и Юпитером, а также многочисленные тесные сближения с планетами земной группы. Данные особенности приводят к проявлению хаотичности движения за пределами интервала времени (1780–2350 гг.).

Ключевые слова: 3200 Phaethon, астероид, вековые резонансы, орбитальные резонансы, орбитальная эволюция, OMEGNO

DOI: 10.1134/S0320930X19030010

ВВЕДЕНИЕ

Астероид 3200 Phaethon — небольшой астероид из группы Аполлона, имеющий очень малое (0.14 а. е.) перигелийное расстояние. Интересен необычной крайне вытянутой орбитой, из-за которой в процессе своего движения вокруг Солнца он в проекции на плоскость эклиптики пересекает орбиты всех четырех планет земной группы от Меркурия до Марса (рис. 1). Вследствие близкого к Солнцу прохождения астероид был назван в честь героя греческого мифа о Фатоне, сыне бога солнца Гелиоса.

3200 Phaethon — первый астероид, который был открыт с помощью изображений, полученных с космического корабля. Саймон Ф. Грин и Джон К. Дэвис обнаружили его 11 октября 1983 г. на снимках, полученных с инфракрасного космического спутника IRAS. Это было официально объявлено 14 октября в IAU вместе с оптическим подтверждением Чарльзом Т. Ковалем, который сообщил, что он по внешнему виду похож на астероид. Он получил предварительное обозначение 1983 ТВ, а позднее, и численное обозначение и полноценное название 3200 Phaethon в 1985 г.

Астероид 3200 Phaethon привлекает внимание ученых по ряду причин, в качестве основной из которых следует упомянуть то, что данный астероид является прародителем метеороидного потока Геминид, но его происхождение не совсем

ясно (Whipple, 1983; Fox и др., 1984; Gustafson, 1989; Williams and Wu, 1993; Ryabova, 2007). Однако он никогда не демонстрировал свидетельств продолжающейся потери массы или любой формы кометной деятельности, которая бы указывала на пополнение потока. Кроме того, Японское агентство аэрокосмических исследований рассматривает 3200 Phaethon как потенциальную цель для космической миссии (Krüger и др., 2017). В настоящее время особую актуальность исследованиям его динамики придает недавнее сближение с Землей в декабре 2017 г. (Ye, 2017; Jewitt, 2017), которое будет способствовать уточнению орбиты и физических параметров объекта (Hapii и др., 2016).

Ансамбль малых тел, включающий астероид 3200 Phaethon, вероятно, распространяется на более мелкие объекты, которые еще предстоит обнаружить, иногда его называют комплексом Phaethon-Geminids (Ohtsuka и др., 2006). По-видимому, это продукт дезинтеграции объекта-предшественника, но механизм распада и то, являются ли они продуктом катастрофического события или непрерывного процесса, неизвестны (Kasuga, 2009). Возраст потока Геминид не определен (Рябова, 1999), но он, вероятно, молод. Численные модели, включающие влияния различных возмущающих факторов и планетарных гравитационных возмущений, дают возраст в

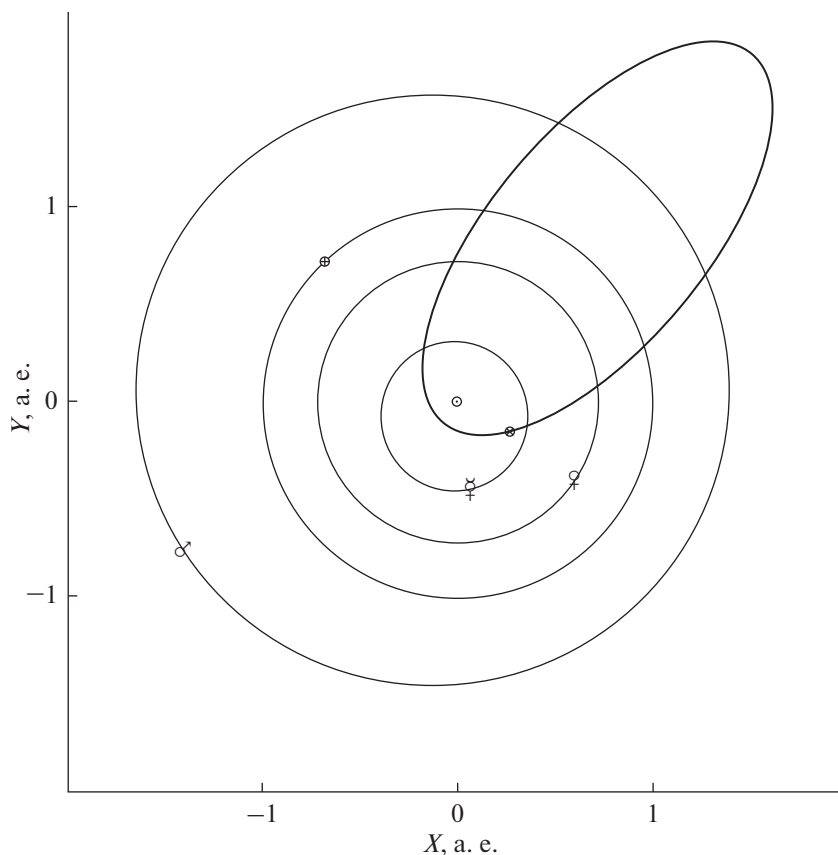


Рис. 1. Проекция орбиты астероида 3200 Phaethon и больших планет (Меркурия, Венеры, Земли и Марса) на плоскость эклиптики в неподвижной гелиоцентрической системе координат.

диапазоне от 600 до 2000 лет (Gustafson, 1989; Williams and Wu, 1993; Ryabova, 2007).

В данной работе планируется рассмотреть динамику астероида 3200 Phaethon, в частности выявить сближения с планетами, орбитальные и вековые резонансы, оценить время предсказуемости и выяснить причины хаотичности.

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследования влияния орбитальных и вековых резонансов на движение астероида 3200 Phaethon был проведен численный эксперимент, состоящий из следующих частей:

- изучение влияния различных возмущающих факторов, действующих на объект (Galushina и др., 2015);
- численное моделирование вероятностной орбитальной эволюции с помощью программного комплекса ИДА (Быкова и др., 2012; Раздымина, 2011);
- выявление тесных сближений астероида с планетами;
- OMEGNO-анализ (Шефер, Коксин, 2013) динамической эволюции объектов;

– выявление орбитальных и апсидально-нодальных резонансов численно-аналитическим способом.

Методика изучения влияния различных возмущающих факторов, действующих на исследуемый астероид, приведена в следующих работах (Скрипниченко, Галушина, 2013; Скрипниченко и др., 2014). В том числе, более подробно об исследовании влияния различных возмущающих факторов на движение 3200 Phaethon написано в работе (Galushina и др., 2015).

Под апсидально-нодальным резонансом обычно понимают соизмеримость, возникающую между скоростями прецессий орбит астероида и планеты ($\dot{\omega}, \dot{\omega}', \dot{\Omega}, \dot{\Omega}'$). Методика выявления таких резонансов подробно рассматривалась нами в (Galushina, Sambarov, 2017). Используемая теория вековых резонансов представлена в (Бордовицына и др., 2012; Бордовицына, Томилова, 2016). Напомним кратко ее суть.

Запишем аргумент возмущающей функции для двукратно осредненной ограниченной задачи трех тел в виде

$$\psi = (l - 2p')\omega' - (l - 2p)\omega - m(\Omega - \Omega'), \quad (1)$$

Таблица 1. Типы апсидально-нодальных резонансных соотношений низких порядков

№	Тип резонансного соотношения	№	Тип резонансного соотношения	№	Тип резонансного соотношения
1	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_j) + \dot{\omega} - \dot{\omega}'_j$	8	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_j) - 2\dot{\omega} - 2\dot{\omega}'_j$	15	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_j) - 2\dot{\omega}'_j$
2	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_j) - \dot{\omega} + \dot{\omega}'_j$	9	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_j) + 2\dot{\omega}$	16	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_j) + 2\dot{\omega}'_j$
3	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_j) + 2\dot{\omega} - 2\dot{\omega}'_j$	10	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_j) - 2\dot{\omega}$	17	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_j)$
4	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_j) - 2\dot{\omega} + 2\dot{\omega}'_j$	11	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_j) + \dot{\omega}$	18	$\dot{\omega} - \dot{\omega}'_j$
5	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_j) + \dot{\omega} + \dot{\omega}'_j$	12	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_j) - \dot{\omega}$	19	$\dot{\omega} + \dot{\omega}'_j$
6	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_j) - \dot{\omega} - \dot{\omega}'_j$	13	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_j) + \dot{\omega}'_j$	20	$\dot{\omega}$
7	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_j) + 2\dot{\omega} + 2\dot{\omega}'_j$	14	$(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}'_j) - \dot{\omega}'_j$		

где $\omega = \omega_0 + \dot{\omega}(t - t_0)$, $\Omega = \Omega_0 + \dot{\Omega}(t - t_0)$ — аргумент перицентра и долгота восходящего узла астероида; $\omega' = \omega'_0 + \dot{\omega}'(t - t_0)$, $\Omega' = \Omega'_0 + \dot{\Omega}'(t - t_0)$ — аргумент перицентра и долгота восходящего узла третьего тела; l, p', l, p, m — целые числа; t, t_0 — текущий и начальный моменты времени.

Тогда условие возникновения резонанса можно записать в следующем виде $\psi = 0$.

Вековые ускорения в движении астероида определяются влиянием третьего тела и вычисляются в процессе численного интегрирования по формулам производной от многочлена Лагранжа.

Полный набор апсидально-нодальных резонансных соотношений до второго порядка приведен в табл. 1. В эту таблицу вошли резонансные соотношения нодальных и апсидальных вековых (Rosengren и др., 2015) частот астероида и возмущающих тел, а также геометрический резонанс собственных частот астероида $\dot{\omega} \approx 0$, являющийся частным случаем апсидально-нодальных резонансов — резонанс Лидова–Козаи (Лидов, 1961; Kozai, 1962). Соотношения 1–16 описывают смешанный апсидально-нодальный вековой резонанс, а соотношение 17 — чисто нодальный резонанс, соотношения 18 и 19 — чисто апсидальный резонанс. Соотношение 20 представляет собой резонанс типа Лидова–Козаи (Shevchenko, 2017), который по своей природе является геометрическим резонансом, так как зависит только от взаимного расположения объектов и не связан с частотами движения возмущающих тел.

В качестве резонансных характеристик для орбитальных резонансов использовались критический (резонансный) аргумент β , определяющий долготу соединения астероида и планеты (Мюррей, Дермотт, 2009),

$$\beta = k_1\lambda_1 - k_2\lambda_2 - (k_1 - k_2)\omega_1, \quad (2)$$

и его производная по времени α (называемая резонансной “щелью” (Гребеников, Рябов, 1978))

$$a \approx k_1n_1 - k_2n_2, \quad (3)$$

где n_1, n_2 — средние движения, λ_1, λ_2 — средние долготы астероида и планеты соответственно, ω_1 — аргумент перицентра астероида, Ω_1 — долгота восходящего узла астероида, k_1, k_2 — целые положительные числа. При $\alpha = 0$ астероид находится в точном резонансе с планетой, обусловленном соизмеримостью k_2/k_1 их средних движений. Астероид движется в окрестности резонанса, если α и β колеблются около значения точной соизмеримости, так что $|\beta - \beta_{\text{cp}}| \leq 180^\circ$ и $|\alpha| \leq \alpha_{\text{max}}$ (β_{cp} — центр либраций критического аргумента). Величина α_{max} характеризует границы резонансного движения и определяется по максимальной амплитуде колебаний критического аргумента β .

Уравнения движения совместно с уравнениями параметров OMEGNO, записанные в инерциальной системе координат, интегрируются численно с помощью интегратора Гаусса–Эверхарта высокого порядка (Авдюшев, 2010). Во всех случаях координаты больших планет, Плутона и Лунных определялись на основании фундаментальных эфемерид DE431 (Planetary Development Ephemeris from the Jet Propulsion Laboratory) (Folkner и др., 2014). Релятивистские эффекты учитываются путем добавления шварцшильдовских членов к уравнениям движения.

УЛУЧШЕНИЕ ОРБИТЫ И ПОСТРОЕНИЕ НАЧАЛЬНОЙ ДОВЕРИТЕЛЬНОЙ ОБЛАСТИ

В данной работе мы рассматриваем долговременную орбитальную эволюцию астероида 3200 Phaethon. Напомним, что ранее была выполнена оценка возмущающих факторов, действующих на объект, и выбрана оптимальная модель сил (Galushina и др., 2015), которая включает в себя влия-

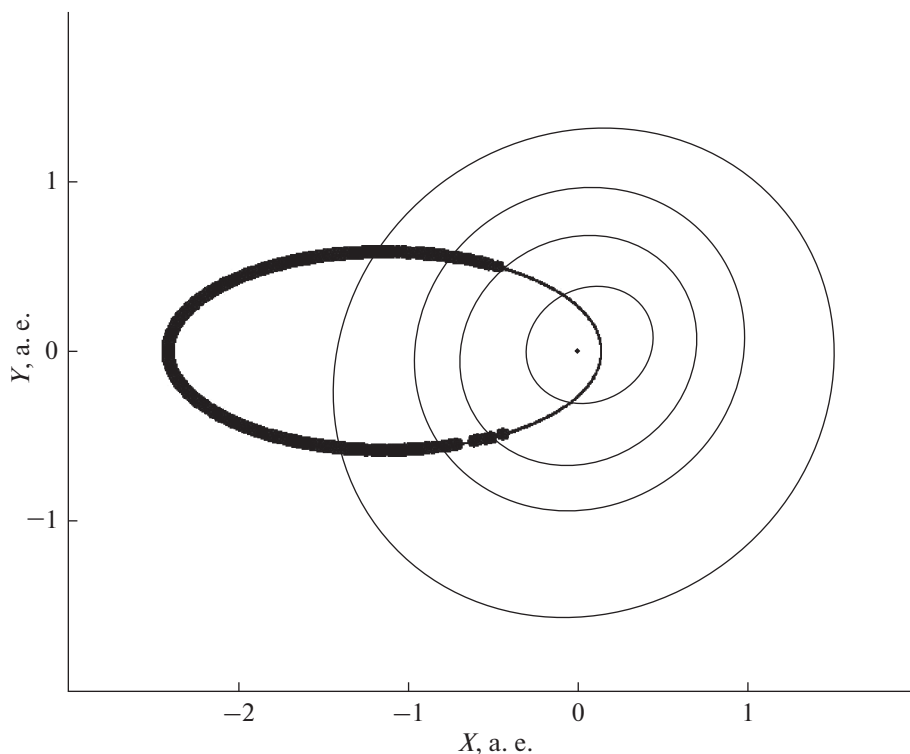


Рис. 2. Проекция орбиты 3200 Phaethon на плоскость орбиты астероида в неподвижной гелиоцентрической системе координат с распределением наблюдений.

ние больших планет, Луны, сжатия Солнца и релятивистских эффектов от Солнца. Остальными силами можно пренебречь без потери точности, поскольку их действие значительно меньше ошибок начальных данных и не оказывает существенного воздействия на орбитальную эволюцию.

На июль 2017 г. в базе данных Центра малых планет доступно 3760 оптических наблюдений объекта, но для улучшения орбиты были исполь-

зованы 3697 наблюдения (рис. 2), полученные после отбраковки. Из рис. 2 видно, что наблюдения покрывают большую часть орбиты, за исключением окрестности перигелия, где наземные наблюдения невозможны. Результаты улучшения орбиты приведены в табл. 2, где N — число наблюдений; Δt — интервал наблюдений в сутках; t_0 — начальная эпоха; σ — среднеквадратическая ошибка представления наблюдений в угловых секундах, Δx — среднеквадратическая ошибка в координатах. В качестве начальной эпохи выбрано среднее арифметическое моментов наблюдений. Представленные результаты подтверждают, что орбита астероида хорошо определена. Кроме того, в табл. 2 представлены элементы орбиты, полученные в результате улучшения: большая полуось a , эксцентриситет e , наклонение плоскости орбиты к эклиптике i , долгота восходящего узла Ω , аргумент перигелия ω и средняя аномалия M .

Коэффициент нелинейности, посчитанный для 3200 Phaethon на момент времени t_0 , не превышает критического значения 0.1 (Сюсина и др., 2012; Авдюшев, 2015), что позволяет применять линейные методы к построению начальных доверительных областей. Начальная доверительная область строилась в виде шестимерного эллипсоида на основе полученной в результате улучшения ковариационной матрицы, в качестве центра эллипсоида использовалась номинальная орбита.

Таблица 2. Данные о наблюдениях и результатах улучшения орбиты 3200 Phaethon

Параметр	Значение
N	3697
Δt , сут	12164 (1983–2017)
t_0	15.01.2008
σ , угл. с	0.547
Δx , а. е.	1.8×10^{-7}
a , а. е.	1.27120790
e	0.88999396
i , град	22.18529429
Ω , град	265.39339165
ω , град	322.01903443
M , град	0.83758333

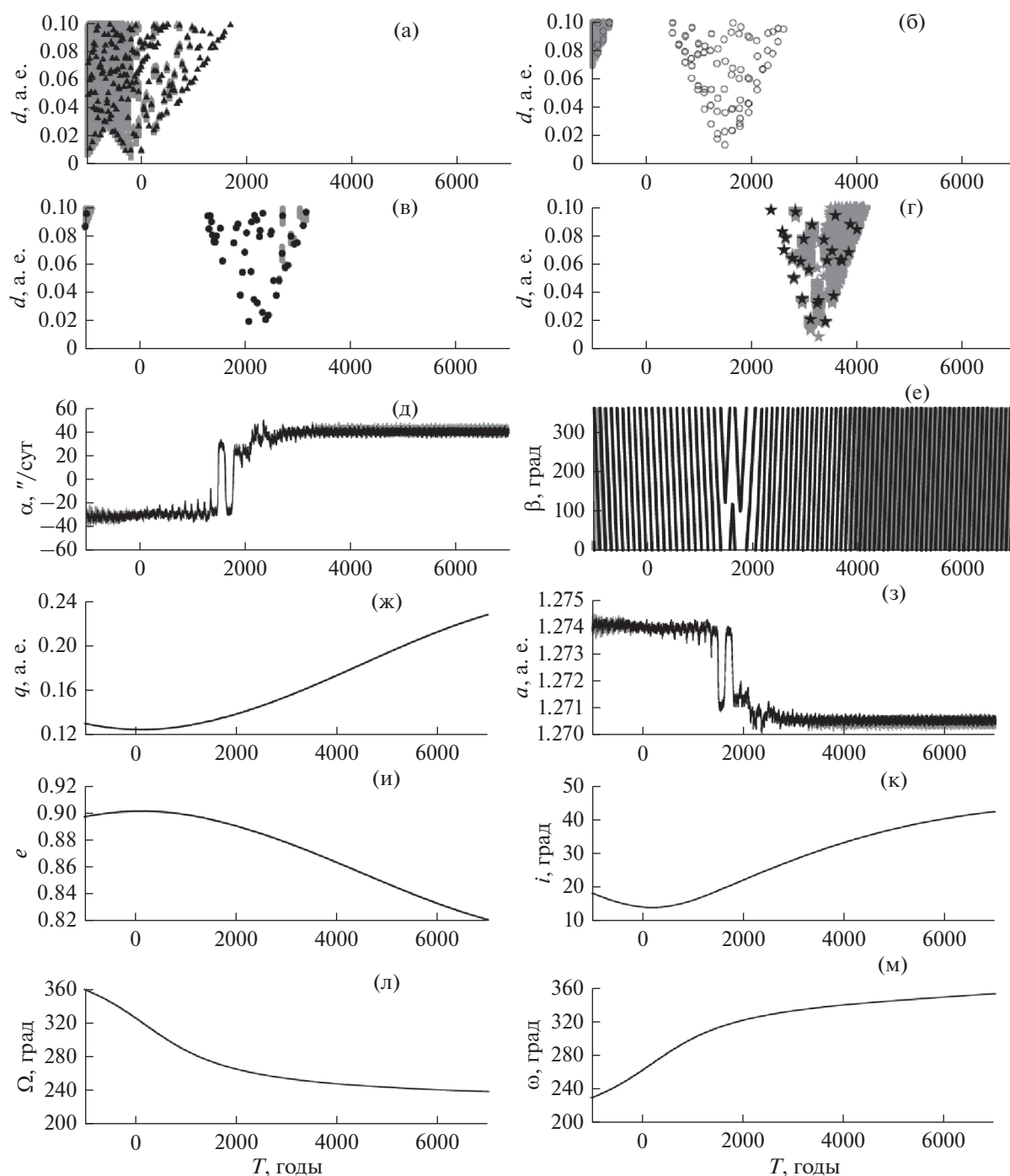


Рис. 3. Сближения астероида 3200 Phaethon с Меркурием (а), Венерой (б), Землей (в) и Марсом (г) (d — расстояние от исследуемого объекта до центра планеты); эволюция резонансной щели α (д), критического аргумента β (е), перигелийного расстояния q (ж), большой полуоси a (з), эксцентриситета e (и), наклона плоскости орбиты к эклиптике i (к), долготы восходящего узла Ω (л) и аргумента перицентра ω (м). Серым фоном показана эволюция для тестовых частиц, черным выделена эволюция для номинальной орбиты.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕРОЯТНОСТНОЙ ОРБИТАЛЬНОЙ ЭВОЛЮЦИИ

Исследование вероятностной орбитальной эволюции проводилось путем численного интегрирования дифференциальных уравнений дви-

жения для номинальной орбиты и 10 тыс. тестовых частиц, положения и компоненты скорости которых распределены по нормальному закону. Интервал определялся точностью интегрирования и составил (–1000 лет, 7000 лет). На рис. 3

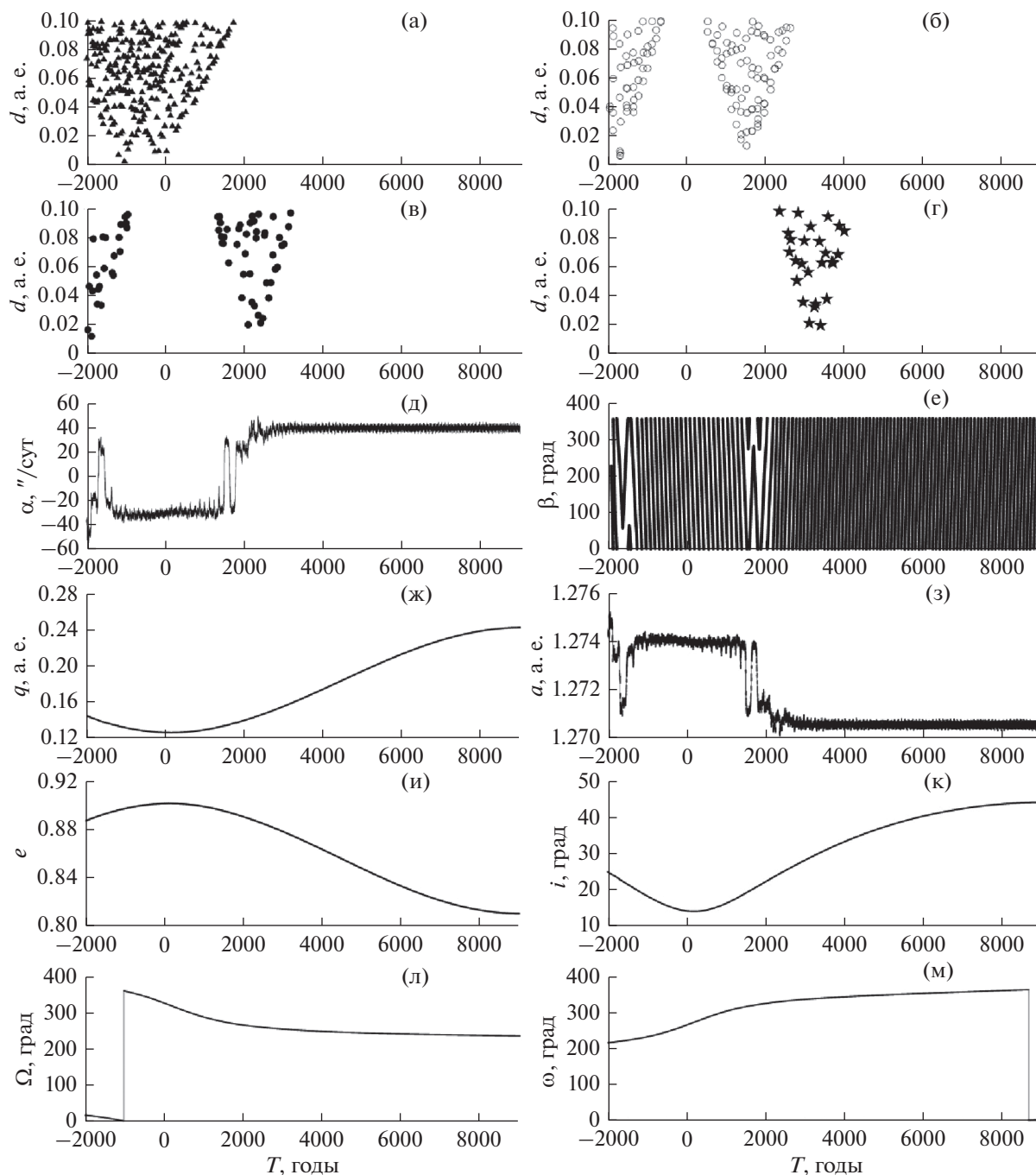


Рис. 4. Сближения астероида 3200 Phaethon с Меркурием (а), Венерой (б), Землей (в) и Марсом (г) (d – расстояние от исследуемого объекта до центра планеты); эволюция резонансной щели α (д), критического аргумента β (е), перигелийного расстояния q (ж), большой полуоси a (з), эксцентриситета e (и), наклонения плоскости орбиты к эклиптике i (к), долготы восходящего узла Ω (л) и аргумента перигелия ω (м). Увеличенный интервал интегрирования для номинальной орбиты от –2000 до 9000 г.

представлены сближения астероида с большими планетами, эволюция резонансных характеристик и элементов орбиты.

Астероид 3200 Phaethon принадлежит к сферической подсистеме Солнечной системы – его на-

клонение увеличивается с 14° до 42° на интервале с 1 года до 7000 лет (рис. 3к). Смещение перигелийного расстояния с 0.126 до 0.228 (рис. 3ж) приводит к последовательным сближениям с Меркурием, Венерой, Землей и Марсом.

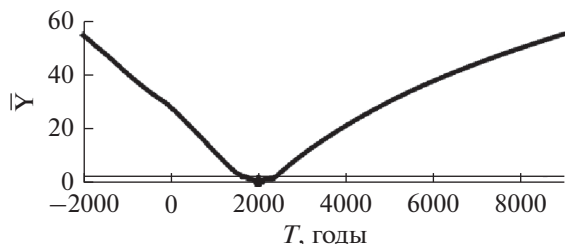


Рис. 5. Эволюция параметра OMEGNO.

При исследовании вероятностной орбитальной эволюции номинальной орбиты и тестовых частиц было выявлено, что доверительная область не сохраняет свою конфигурацию со временем. После 1750 г. (назад) и после 2350 г. (вперед), расхождение тестовых частиц от номинальной орбиты становится заметно, что говорит о нестабильном поведении.

Кроме того, нами было обнаружено, что астероид несколько раз проходит через орбитальный резонанс 3/7 с Венерой на интервале времени от 1500 до 2000 г. (рис. 3д и 3е). На данном интервале происходит либрация резонансной щели $\alpha = 7n_0 - 3n_2$ относительно 0 с большой амплитудой, критический аргумент β при этом переходит в режим либрации из режима циркуляции. За пределами интервала 1500–2000 лет критический аргумент все время циркулирует. Еще замечательной особенностью является то, что центр либраций резонансной характеристики α с малой амплитудой колебаний до 1500 года был смещен в отрицательную сторону ($-35''/\text{сут}$), а после 2000 г. сместился в положительную сторону ($40''/\text{сут}$). То есть Phaethon на всем интервале исследования движется в окрестности резонанса, но проходит через острый резонанс всего несколько раз.

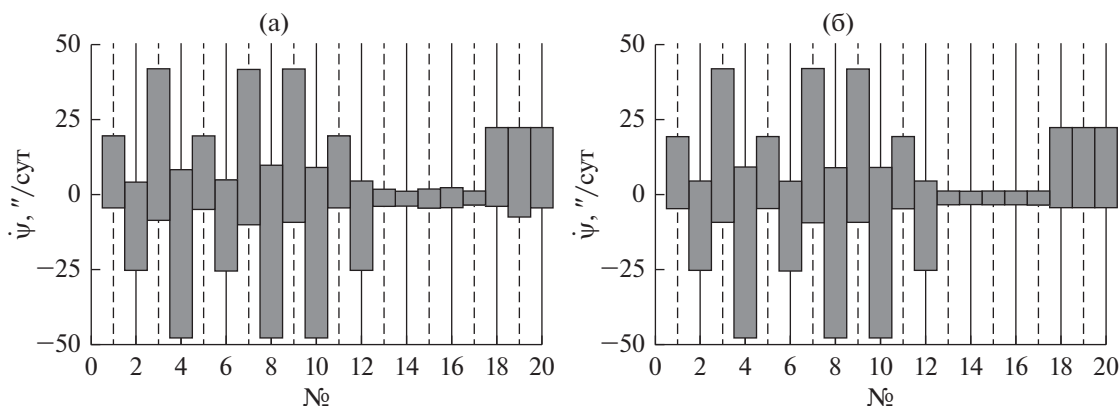
Естественно, возникает вопрос — единственные ли это прохождения через острый резонанс? К сожалению, попытки увеличить интервал ис-

следования вероятностной эволюции привели к неприемлемому падению точности. Однако нам удалось увеличить интервал интегрирования для номинальной орбиты и рассмотреть поведение резонансных характеристик более подробно на этом примере.

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАОТИЧНОЙ И РЕГУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ НАЛОЖЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ РЕЗОНАНСОВ

На рис. 4 представлены результаты исследования орбитальной эволюции номинальной орбиты на интервале времени от -2000 до 9000 г. Дополнительно было обнаружено несколько прохождений через точный орбитальный резонанс с Венерой в промежутке с -1400 до -2000 г. (рис. 4д), на этом же интервале астероид испытывает сближения с Меркурием, Венерой и Землей. При исследовании в будущее после 4000 г. не выявлено ни сближений, ни прохождений через точный резонанс. Данный факт позволяет предположить, что прохождению через соизмеримость способствуют сближения с Венерой.

Как известно, наличие перекрытия резонансов (Чириков, 1977), часть из которых неустойчивые, может приводить к неустойчивости и хаотичности движения (Бордовицына, Томилова, 2016). Поэтому следующим шагом исследования было изучение поведения параметра OMEGNO (рис. 5). Движение астероида является квазипериодическим (рис. 5), близким к устойчивому периодическому, на интервале от 1780 до 2350 г. Таким образом, время предсказуемости движения составляет порядка 340 лет в будущее и 230 — в прошлое. Если обратиться к рис. 3, то можно обнаружить, что от 1780 до 2350 года эволюция для тестовых частиц практически совпадает с эволюцией номинальной орбиты. За пределами же этого интервала отличия становятся заметны, что

Рис. 6. Границы изменения резонансных соотношений для апсидально-нодальных резонансов с Землей (а) и остальными планетами (б) на интервале времени ($-2000, 9000$) года.

особенно явно видно на графиках сближений (рис. 3а, 3б, 3в, 3г).

В прошлом переход от резонансного движения к нерезонансному способствует проявлению хаотичности. Однако сопоставление рис. 4 и 5 не дает ответ на вопрос о причинах быстрого перехода к хаотичности в будущем. Для выяснения причин рассматриваемого явления обратимся к апсидально-нодальным резонансам (табл. 1). Мы рассмотрели резонансы с большими планетами от Меркурия до Сатурна. Для всех 20 резонансов резонансный аргумент на рассматриваемом интервале времени совершает либрационные движения (в некоторых случаях с предельной амплитудой), однако поведение резонансных соотношений немного отличается. Все резонансные соотношения колеблются около нуля, но с разной амплитудой, которая показана на рис. 6. Таким образом, все резонансы являются устойчивыми и не могут быть причиной хаотичности, каковой, судя по результатам, являются сближения с Землей и Марсом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе рассмотрена орбитальная эволюция астероида 3200 Phaethon, который испытал тесное сближение с Землей в декабре 2017 г. Кроме того, исследуемый объект сближается с остальными планетами земной группы на интервале времени (–2000, 9000) годы. Сближения с Венерой приводят к переходу астероида через орбитальный резонанс с данной планетой, однако объект не задерживается в нем надолго. Нестабильная геометрическая конфигурация резонанса 3/7 с Венерой (неудачная попытка захвата объекта в резонанс), а точнее, переход между резонансными и нерезонансными состояниями, может быть причиной столь резкого проявления хаотичности в движении объекта, как это показано на рис. 5, где параметр OMEGNO в 1750 году переходит значение 2 и начинает резко возрастать.

При исследовании движения астероида 3200 Phaethon в будущем прослеживается аналогичная тенденция хаотического поведения. Исследование показало, что причиной хаотичности в данном случае могут выступать тесные сближения с Землей и Марсом.

В заключение следует отметить, что наличие неустойчивых резонансов и большого числа сближений с планетами приводит к тому, что движение астероида 3200 Phaethon можно рассматривать как регулярное только на интервале от 1780 до 2350 года, за пределами которого наблюдаются проявления хаотичности.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы повышения международной конкурентоспособности Томского государственного университета на 2013–2020 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Авдюшев В.А. Интегратор Гаусса–Эверхарта // Вычисл. технологии. 2010. Т. 15. № 4. С. 31–47.
- Авдюшев В.А. Численное моделирование орбит небесных тел. Томск: Издательский дом Томского государственного университета, 2015. 336 с.
- Бордовицына Т.В., Томилова И.В., Чувашов И.Н. Влияние вековых резонансов на долговременную орбитальную эволюцию неуправляемых объектов спутниковых радионавигационных систем в области МЕО // Астрон. вестн. 2012. Т. 46. № 5. С. 356–368. (Bordovitsyna T.V., Tomilova I.V., Chuvashov I.N. The effect of secular resonances on the long-term orbital evolution of uncontrollable objects on satellite radio navigation systems in the MEO region // Sol. Syst. Res. 2012. V. 46. № 5. P. 329–340.)
- Бордовицына Т.В., Томилова И.В. Особенности структуры вековых резонансов в динамике околоземных космических объектов // Изв. вузов. Физика. 2016. Т. 59. № 3. С. 41–48.
- Быкова Л.Е., Галушина Т.Ю., Батулин А.П. Прикладной программный комплекс “ИДА” для исследования динамики астероидов // Изв. вузов. Физика. 2012. Т. 55. № 10/2. С. 89–96.
- Гребеников Е.А., Рябов Ю.А. Резонансы и малые знаменатели в небесной механике. М.: Наука, 1978. 128 с.
- Мюррей К., Дермотт С. Динамика Солнечной системы. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. 588 с.
- Раздымакина О.Н. Алгоритмическое и программное обеспечение для определения параметра хаотичности MEGNO в задачах динамики астероидов // Изв. вузов. Физика. 2011. № 6/2. С. 31–38.
- Рябова Г.О. Возраст метеорного потока Геминид (обзор) // Астрон. вестн. 1999. Т. 33. № 3. С. 258–273. (Ryabova G.O. Age of the Geminid Meteor Stream (Review) // Sol. Syst. Res. 1999. Vol. 33. No. 3. P. 224–238.)
- Скрипниченко П.В., Галушина Т.Ю. Исследование структуры возмущений и вероятностной орбитальной эволюции на примере астероида 99942 Apophis // Изв. вузов. Физика. 2013. Т. 56. № 6/3. С. 229–231.
- Скрипниченко П.В., Галушина Т.Ю., Шагабудинов А.А. Исследование структуры возмущений некоторых АСЗ с малыми перигелийными расстояниями // Изв. вузов. Физика. 2014. Т. 57. Вып. 10/2. С. 21–29.
- Сюсина О.М., Черников А.М., Тамаров В.А. Построение доверительных областей в задаче вероятностного исследования движения малых тел Солнечной системы // Астрон. вестн. 2012. Т. 46. № 3. С. 209–222. (Syusina O.M., Chernitsov A.M., Tamarov V.A. Construction of confidence regions in problem on probabilistic study into motion of minor bodies of the solar system // Sol. Syst. Res. 2012. V. 46. № 3. P. 195–207.)
- Чириков В.В. Нелинейный резонанс. Учебное пособие. Изд-во НГУ, 1977. 82 с.
- Шефер В.А., Коксин А.М. Вычисление показателей хаотичности орбит, основанных на касательных векторах: применение к ограниченной задаче трех тел // Изв. вузов. Физика. 2013. Т. 56. № 6/3. С. 256–258.
- Folkner W.M., Williams J.G., Boggs D.H., Park R.S., Kuchynka P. The planetary and lunar ephemerides

- DE430 and DE431 // IPN Progress Report 42-196. February 15, 2014.
- Fox K., Williams I.P., Hughes D.W.* The “Geminid” asteroid (1983 TB) and its orbital evolution // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 1984. V. 208. P. 11–15.
- Galushina T.Yu., Ryabova G.O., Skripnichenko P.V.* The force model for asteroid (3200) Phaethon // *Planet. and Space Sci.* 2015. V. 118. P. 296–301.
- Galushina T.Yu., Sambarov G.E.* The dynamical evolution and the force model for asteroid (196256) 2003 EH1 // *Planet. and Space Sci.* 2017. V. 142. P. 38–47.
- Gustafson B.A.S.* Geminid meteoroids traced to cometary activity on Phaethon // *Astron. and Astrophys.* 1989. V. 225. P. 533–540.
- Hanuš J., Delbo M., Vokrouhlický D., Pravec P., Emery J.P., Alí-Lagoa V., Bolin B., Devogèle M., Dyvig R., Galád A., Jedicke R., Kornoš L., Kušnirák P., Licandro J., Reddy V., Rivet J.-P., Világi J., Warner B.D.* Near-Earth asteroid (3200) Phaethon: Characterization of its orbit, spin state, and thermophysical parameters // *Astron. and Astrophys.* 2016. V. 592. A34. 15 p.
- Jewitt D.* Phaethon Near Earth // *HST Proposal id.15343.* Cycle 25. 08/2017.
- Kasuga T.* Thermal evolution of the Phaethon–Geminid stream complex // *Earth, Moon, and Planets.* 2009. V. 105. Is. 2–4. P. 321–326.
- Krüger H., Kobayashi M., Arai T., Srama R., Sarli B.V., Kimura H.* Dust analysis on board the Destiny+ mission to 3200 Phaethon // *EPSC Abstracts.* V. 11. EP-SC2017-204, 2017. European Planet. Sci. Congress, 2017.
- Ryabova G.O.* Mathematical modelling of the Geminid meteoroid stream // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2007. V. 375. Is. 4. P. 1371–1380.
- Ohtsuka K., Sekiguchi T., Kinoshita D., Watanabe J.-I., Ito T., Arakida H., Kasuga T.* Apollo asteroid 2005 UD: Split nucleus of (3200) Phaethon? // *Astron. and Astrophys.* 2006. V. 450. L25
- Shevchenko I.I.* The Lidov-Kozai Effect – Applications in Exoplanet Research and Dynamical Astronomy. Springer, 2017. 198 p.
- Whipple F.L.* 1983 TB and the Geminid Meteors // 1983. *IAU Circ.*, No. 3881, 1.
- Williams I.P., Wu Z.* The Geminid meteor stream and asteroid 3200 Phaethon // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 1993. V. 262. P. 231–248.
- Ye Q.-Z.* Active asteroid (3200) Phaethon during its unusually close approach to Earth // *HST Proposal id.15357.* Cycle 25. 08/2017.