

УДК 521.1, 521.16, 523.4

ВРАЩАТЕЛЬНАЯ ДИНАМИКА И ЭВОЛЮЦИЯ СПУТНИКОВ ПЛАНЕТ СОЛНЕЧНОЙ И ЭКЗОПЛАНЕТНЫХ СИСТЕМ

© 2022 г. А. В. Мельников^{a, *}, И. И. Шевченко^b

^aГлавная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

^bСанкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: melnikov@gaoran.ru

Поступила в редакцию 06.06.2021 г.

После доработки 21.07.2021 г.

Принята к публикации 23.07.2021 г.

В обзоре рассмотрены основные режимы вращения, имеющие место у спутников планет Солнечной системы, спутников транснептуновых объектов и возможных спутников планет у других звезд. Отражены как выводы классических теоретических исследований наблюдаемой вращательной динамики спутников и ее долговременной динамической приливной эволюции, так и современные результаты. Основное внимание уделено синхронному с движением по орбите режиму вращения спутника, наблюдаемому у всех крупных (радиус фигуры более ~500 км) спутников планет. Рассмотрены малые иррегулярные спутники планет (радиус фигуры менее ~300 км) с существенно более быстрым, чем синхронное, регулярным вращением. Детально рассмотрен режим хаотического вращения (кувыркания), наблюдаемый у седьмого спутника Сатурна — Гипериона. Обсуждена возможность хаотического вращения других малых спутников. Представлены результаты и перспективы исследований вращательной динамики спутников экзопланет.

Ключевые слова: Солнечная система, экзопланетные системы, спутники планет, небесная механика, вращательная динамика, резонансы, динамический хаос, приливное взаимодействие

DOI: 10.31857/S0320930X22010042

ВВЕДЕНИЕ

Все планеты Солнечной системы, за исключением Меркурия и Венеры, обладают естественными спутниками. Общее количество известных спутников в настоящее время уже превышает две сотни (см. сайт NASA JPL, <http://ssd.jpl.nasa.gov/>). Около 90% спутников представляют собой тела неправильной формы с размерами (радиусом) от порядка одного до трехсот километров — это так называемые малые спутники. Для большинства малых спутников параметры фигур, вращательные состояния и физические свойства неизвестны. Параметры вращения хорошо определены лишь для ~25% всех известных спутников (Archinal и др., 2018), в том числе для всех крупных (с радиусом более ~500 км) спутников.

В настоящее время активно развиваются исследования возможности существования спутников (Kipping и др., 2012; 2014; Heller, 2014; 2018; Heller и др., 2014; Sucerquia и др., 2019) и даже субспутников (submoons — спутников у спутников (см. Kollmeier, Raymond, 2019; Rosario-Franco и др., 2020)) у экзопланет — планет вне Солнечной системы. Активные поиски “экзолун” ведутся посредством анализа данных наблюдений

транзитов экзопланет, в частности, в рамках проекта НЕК (“Hunt for Exomoons with Kepler”), см. Kipping и др. (2012; 2014). Исследованиям вращательной динамики и эволюции известных спутников планет Солнечной системы, а также потенциально существующих спутников экзопланет, посвящен настоящий обзор. В обзоре также рассмотрены работы, посвященные исследованию вращательной динамики спутников Плутона (Showalter, Hamilton, 2015; Correia и др., 2015; Weaver и др., 2016) и спутников других крупных транснептуновых объектов (Brown и др., 2006; Brown, Butler, 2018; Kiss и др., 2017; Sheppard и др., 2018; Parker и др., 2016).

В обзоре отражены выводы классических теоретических исследований наблюдаемой вращательной динамики спутников и ее долговременной динамической приливной эволюции (Darwin, 1879; 1880; Kaula, 1964; MacDonald, 1964; Goldreich, 1966; Goldreich, Peale, 1966; Peale, 1977; 1999; Ferraz-Mello и др., 2008). Также рассмотрены современные результаты по теории приливной эволюции (Efroimsky, Williams, 2009; Makarov, Efroimsky, 2013; Makarov, 2015). В ходе долговременной эволюции спутник проходит через различные спин-орби-

Таблица 1. Количество известных спутников у планет Солнечной системы

Планета	Земля	Марс	Юпитер	Сатурн	Уран	Нептун	Всего
Кол-во спутников	1	2	79	82	27	14	205

тальные резонансные состояния и может быть захвачен в одно из них. Наиболее вероятным финальным режимом является вращение синхронное с движением по орбите; в частности, в нем находятся все большие спутники планет. Типологии синхронного вращения спутников иррегулярной формы посвящена часть обзора. Иррегулярная форма должна быть характерна и для субспутников, вероятно существующих в других планетных системах.

Также рассмотрена динамика малых спутников, обладающих быстрым, по сравнению с синхронным, вращением; к настоящему времени такой тип вращения установлен из наблюдений для трех десятков малых спутников. По всей вероятности, он типичен для большинства иррегулярных спутников планет. Помимо регулярного режима вращения, может иметь место хаотический режим. В своем теоретическом исследовании Wisdom и др. (1984) показали, что спутник сильно несферической формы на эллиптической орбите может вращаться хаотическим, непредсказуемым образом. Наиболее вероятным кандидатом на хаотическое вращение, благодаря своей сильно нерегулярной форме и значительному эксцентриситету орбиты, оказался седьмой спутник Сатурна – Гиперион. Анализ результатов по вращательной динамике Гипериона в обзоре уделено особое внимание. Рассмотрены результаты работ, в которых проводилось моделирование вращательной динамики и анализ наблюдаемых кривых блеска Гипериона и других малых спутников, начиная со статей Клаветтера (Klavetter, 1989a, 1989b). В этих наблюдательных работах сделан вывод о хаотическом характере вращения Гипериона в настоящее время. Как было выяснено путем прямого численного моделирования (Melnikov, 2002), ляпуновское время (время предсказуемой динамики) вращения Гипериона составляет порядка месяца. Согласно результатам теоретических исследований последних лет (Showalter, Hamilton, 2015; Correia и др., 2015), динамический хаос возможен также во вращательной динамике спутников Плутона.

Существенное внимание в обзоре уделено современным численно-экспериментальным исследованиям и теоретическим моделям приливной эволюции вращательных состояний спутников. Благодаря приливному взаимодействию спутника и планеты вращательное состояние спутника эволюционирует (о механизмах приливного взаимодействия см., например, Мюррей, Дермотт, 2009); в ходе приливной эволюции быстрое соб-

ственное вращение спутника, которым он обладал в итоге формирования или в момент гравитационного захвата планетой, замедляется.

В обзоре систематизированы результаты исследований возможности существования странных аттракторов в фазовом пространстве вращательного движения спутников, подверженных долговременной приливной эволюции. Рассмотрены вероятности захвата спутников в различные резонансные спин-орбитальные состояния в ходе долговременной приливной эволюции.

Обсуждены различные необычные, редко встречающиеся резонансные спин-орбитальные состояния спутников.

СПУТНИКИ ПЛАНЕТ: ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Спутники планет представляют собой следующую по наблюдаемой численности после астероидов, объектов пояса Койпера и ядер комет популяцию малых тел Солнечной системы. В настоящем разделе мы приводим данные о статистике известных спутников планет Солнечной системы и об их основных физических и орбитальных параметрах, в основном согласно базе данных сайта NASA JPL (<http://ssd.jpl.nasa.gov/>), которая оперативно обновляется. Для значительной части спутников информация о физических параметрах, доступная на 2011 г., представлена в работе Емельянова и Уральской (2011); см. также <http://lnfm1.sai.msu.ru/neb/rw/natsat/index.htm>. Информация о номенклатуре спутников планет их физических и орбитальных параметрах приведена также в монографии Емельянова (2019).

Распределение спутников по принадлежности к планетам приведено в табл. 1. Отметим, что число спутников у планет-гигантов составляет много десятков. У Плутона, который до недавнего времени считался планетой, в настоящее время известно пять спутников (см., например, Showalter, Hamilton, 2015). Спутники и даже спутниковые системы есть и у других крупных транснептуновых объектов (Brown и др., 2006; Brown, Butler, 2018; Kiss и др., 2017; Sheppard и др., 2018; Parker и др., 2016).

Размеры спутника являются одной из наиболее важных его физических характеристик. Гистограмма (дифференциальное распределение) средних радиусов R фигур спутников (рис. 1) показывает, что у 90% известных спутников планет $R < 300$ км. Далее будем называть их малыми спутниками, а спутники с $R > 500$ км – крупными.

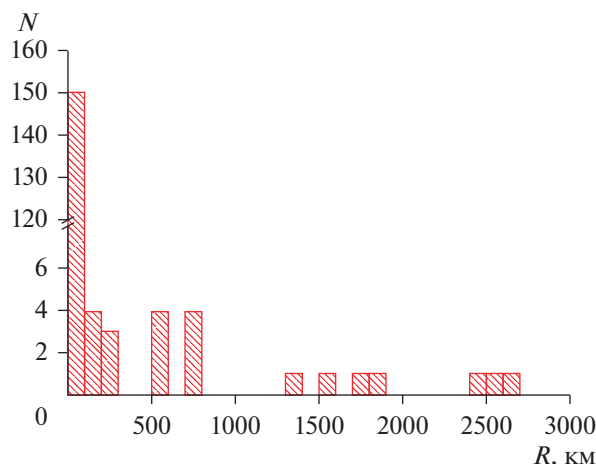


Рис. 1. Дифференциальное распределение (гистограмма) значений средних радиусов фигур известных спутников планет Солнечной системы.

Спутников с R в пределах от 300 до 500 км в настоящее время у планет Солнечной системы не выявлено. Подробный статистический анализ доступных (к 2006 г.) данных о размерах и возможных значениях инерционных параметров известных спутников проведен в работе Куприянова и Шевченко (2006).

Как известно, орбитальное движение спутника вокруг планеты возможно лишь внутри сферы Хилла планеты; радиус сферы Хилла определяется как $r_H = a_p (m_p/3M_S)^{1/3}$, где a_p — большая полуось орбиты планеты, m_p — масса планеты, M_S — масса родительской звезды (Солнца).

Спутники планет разделяют на две большие группы: регулярные и иррегулярные (см. подробнее Sheppard, Jewitt, 2003; Sheppard, 2006; Jewitt,

Haghighipour, 2007; Nicholson и др., 2008). Регулярные спутники находятся глубоко внутри сферы Хилла (большая полуось орбиты спутника $a \leq 0.05r_H$), имеют прямые (проградные) орбиты, малые эксцентриситеты $e \approx 0$ и наклонения орбит $i \approx 0$. Классификация спутников планет на проградные и ретроградные (обратные) проводится обычно исходя из величины наклона орбиты спутника к экваториальной плоскости планеты, причем определяется, что при нулевом наклоне орбиты направление вращения планеты и направление орбитального движения спутника совпадают (а при наклоне в 180° — противоположны; см., например, Sheppard, 2006; Jewitt, Haghighipour, 2007). Для проградных орбит $i \in [0^\circ, 90^\circ]$, а для ретроградных $i \in (90^\circ, 180^\circ]$.

Орбиты иррегулярных спутников, в основном, расположены много дальше от планеты ($0.05r_H < a \leq 0.65r_H$) и могут быть как прямыми, так и обратными. Значения e и i у таких спутников обычно велики; согласно Sheppard (2006) (см. рис. 1 и 2 в его работе), для большинства известных иррегулярных спутников: $e \in [0.1, 0.6]$, $i \in [25^\circ, 60^\circ]$ или $i \in [130^\circ, 180^\circ]$. Данный вывод подтверждают представленные на рис. 2 гистограммы значений e и i , построенные нами для всех известных в настоящее время спутников планет. Иррегулярные спутники распределены по планетам следующим образом: Юпитер — 71, Сатурн — 38, Уран — 9 и Нептун — 6 (Denk, Mottola, 2019). Таким образом, всего известно 124 спутника. Таким образом, около 60% от всех известных спутников планет Солнечной системы представляют иррегулярные спутники.

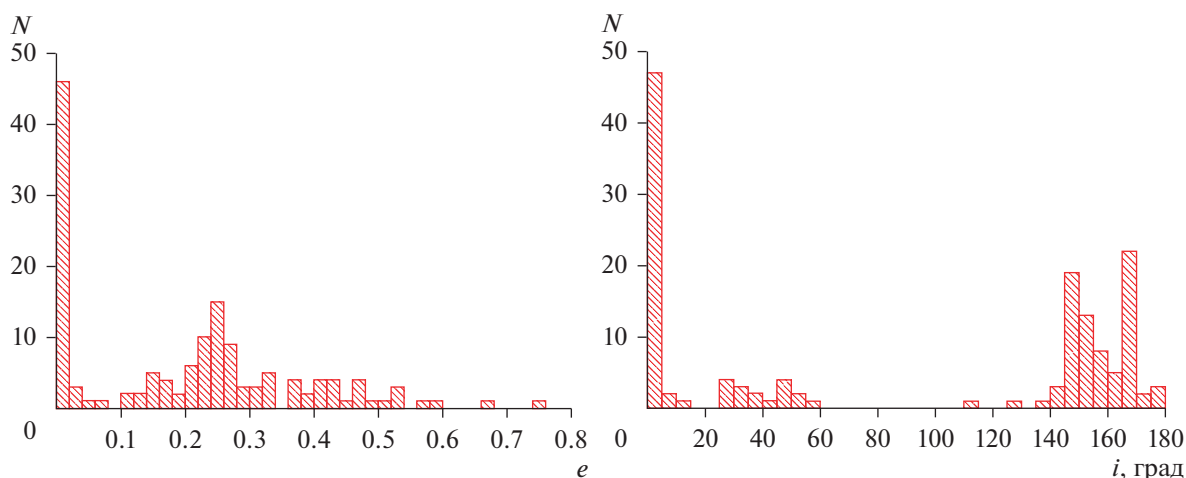


Рис. 2. Дифференциальные распределения (гистограммы) эксцентриситетов и наклонений орбит у известных спутников планет Солнечной системы.

ВРАЩАТЕЛЬНЫЕ СОСТОЯНИЯ СПУТНИКОВ ПЛАНЕТ

Одной из наиболее важных характеристик спутника является его вращательное состояние. В настоящее время вращательные состояния установлены (Archinal и др., 2018; Denk, Mottola, 2019; NASA JPL; Емельянов, 2019) у восьми десятков спутников планет Солнечной системы. Параметры вращения точно определены у всех крупных спутников (Archinal и др., 2018; Емельянов, 2019). Приблизительные выражения для элементов вращения спутников в указанных работах даны в Международной небесной системе координат (International Celestial Reference Frame – ICRF) (см. Ма и др., 1998). Для более 70% малых спутников вращательные состояния неизвестны; более того, обычно имеются лишь оценки размеров спутника, полученные при определенных предположениях на основе его наблюдаемого блеска (см. обсуждение в статье Емельянова и Уральской (2011) и монографии Емельянова (2019)).

Информацию о вращательной динамике и физических свойствах спутников получают как из анализа и теоретического моделирования наблюдаемых кривых блеска, так и из анализа детальных изображений спутников, полученных в ходе межпланетных миссий с космическими аппаратами (КА). Последний метод дает наиболее точные значения параметров фигуры спутника и характеристики отражательных свойств его поверхности, позволяет определить ориентацию спутника в пространстве и, в ряде случаев, угловую скорость вращения. Однако он доступен лишь для ограниченного числа спутников, ввиду малого количества осуществленных космических миссий. Среди последних отметим как наиболее результативные: Voyager-1, -2, Galileo, Cassini-Huygens и New Horizons. Обсуждение различных современных методов изучения орбитальной динамики спутников планет, их открытий и определения физических свойств представлено в работах Емельянова (2018; 2019).

Посредством построения теоретических кривых блеска и их сопоставления с наблюдаемыми кривыми можно изучать вращательную динамику спутников планет, а также их физические свойства. К преимуществам данного подхода относится его потенциально большая и протяженная во времени наблюдательная база исходных данных для анализа: количество точек ряда наблюдений может быть очень велико; его длина может составлять десятилетия. При этом, при необходимости, и временное разрешение ряда наблюдений может быть весьма высоким.

Информация, полученная путем моделирования кривых блеска спутников, позволяет детально планировать космические миссии к спутникам планет, например, заранее определять необходи-

мую периодичность получения снимков спутника с борта КА и выделять на поверхности спутника участки, снимки которых необходимо получить с высоким пространственным разрешением. Предварительное определение из моделирования кривых блеска динамических параметров спутника позволяет точнее рассчитать траекторию КА на участке его сближения со спутником и на орбите вокруг него.

Посредством использования метода трассировки лучей (“ray tracing”, см., например, <http://www.povray.org>) при ряде упрощающих предположений (о форме объекта, отражательных свойствах его поверхности и пр.) можно построить модельную кривую блеска и, сопоставив ее с наблюдаемой кривой блеска, получить данные о параметрах объекта. В работе Lacerda и Jewitt (2007) этим методом получены данные (включая оценки плотности) для нескольких контактных двойных объектов пояса Койпера и одного из двойных астероидов. Обсуждение методов моделирования кривых блеска и определения параметров вращения астероидов посредством сопоставления их теоретических и наблюдаемых кривых блеска содержится в работе Masiero и др. (2009). Заметим, что эти методы моделирования могут с успехом применяться и для получения данных о вращательной динамике и физических параметрах спутников планет.

Среди всех теоретически возможных и наблюдаемых у спутников планет режимов вращения можно выделить три основных – вращение, синхронное с движением по орбите (спин-орбитальный резонанс 1 : 1), быстрое по сравнению с синхронным регулярное вращение, хаотическое вращение (“кувыркание”). Спутники с быстрым или хаотическим вращением пока еще составляют малую часть среди спутников с установленным режимом вращения. Однако наблюдаемое преобладание у спутников синхронного режима вращения явно вызвано эффектом селекции, так как данный режим типичен для крупных спутников планет, у которых режим вращения определяется из наблюдений в первую очередь. В табл. 2 приведен список спутников, для которых в настоящее время установлен режим вращения. Здесь и далее по тексту в скобках после имени спутника указана первая буква названия на русском языке планеты, которой принадлежит спутник, и порядковый номер спутника; например, первый спутник Марса – Фобос (M1).

Отметим, что для всех представленных в табл. 2 спутников, у которых указан синхронный режим вращения, имеются эфемериды вращения (Archinal и др., 2018). Для некоторых из малых спутников из табл. 2 предполагаемый режим синхронного вращения нуждается в дополнительной проверке (см. там же). Например, относительно низкое

Таблица 2. Режимы вращения спутников планет Солнечной системы. Согласно данным из Archinal и др. (2018), Denk и Mottola (2019) и NASA JPL

Вращение	Синхронное	Быстрое (скорость вращения больше синхронной)	Хаотическое	
Название спутника (планета, номер)	Фобос (М1), Деймос (М2)	Гималия (Ю6)	Гиперион (С7)	
	Луна (31)			
	Ио (Ю1), Европа (Ю2), Ганимед (Ю3), Каллисто (Ю4), Амальтея (Ю5), Теба (Ю14), Адрастея (Ю15), Метида (Ю16)	Феба (С9), Имир (С19), Палиак (С20), Тарвос (С21), Иджирак (С22), Суттунг (С23), Кивиок (С24), Мундилфари (С25), Альбиорикс (С26), Скади (С27), Эррипо (С28), Сиарнак (С29), Трюм (С30), Нарви (С31), Бефинд (С37), Бергельмир (С38), Бестла (С39), Форньот (С42), Хати (С43), Гирроккин (С44), Кари (С45), Логи (С46), Сколл (С47), Грейп (С51), Таркек (С52)		
	Мимас (С1), Энцелад (С2), Тефия (С3), Диона (С4), Рея (С5), Титан (С6), Япет (С8), Янус (С10), Эпиметей (С11), Елена (С12), Телесто (С13), Калипсо (С14), Атлас (С15), Прометей (С16), Пандора (С17), Пан (С18)			
	Ариэль (У1), Умбриэль (У2), Титания (У3), Оберон (У4), Миранда (У5), Корделия (У6), Офелия (У7), Бианка (У8), Крессида (У9), Дездемона (У10), Джульетта (У11), Порция (У12), Розалинда (У13), Белинда (У14), Пак (У15)			
	Тритон (Н1), Наяда (Н3), Таласса (Н4), Деспина (Н5), Галатея (Н6), Ларисса (Н7), Протей (Н8)			Калибан (У16), Сикоракса (У17), Просперо (У18), Стебос (У19), Фердинанд (У24)
				Нереида (Н2)
Всего	49	32	1	

разрешение снимков, полученных с КА Galileo, не позволило выяснить режим вращения Адрастеи (Ю15); однако Thomas и др. (1998) полагают, что Адрастея захвачена в синхронный спин-орбитальный резонанс, делая свой вывод на том основании, что теоретическая оценка величины времени приливного замедления первоначально быстрого вращения спутника до синхронного, сделанная на основе теории Peale (1977; 1999), составляет всего несколько тысяч лет.

В последующих разделах мы рассмотрим все три приведенные в табл. 2 режимы вращения, подробно остановимся на динамике спутников, для которых возможны несколько мод синхронного вращения, и на динамике спутников с установленным быстрым режимом вращения. Детально рассмотрим работы, посвященные исследованию хаотической динамики Гипериона (С7). Однако прежде приведем кратко основные выводы совре-

менной теории долговременной приливной эволюции вращения спутников планет, поскольку эти данные требуются для понимания современной картины статистики вращательных состояний спутников в Солнечной системе.

ПРИЛИВНАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ВРАЩЕНИЯ СПУТНИКА

Основы современной теории приливной эволюции планет и спутников заложены в работах Darwin (1879; 1880), где было высказано и обосновано предположение, что наблюдаемая ориентация Луны одной и той же стороной к Земле вызвана рассеянием энергии в ходе долговременной эволюции поступательно-вращательного движения вязкоупругого тела. Детально современная теория приливного спин-орбитального взаимо-

действия спутника и планеты разработана в работах (Kaula, 1964; MacDonald, 1964).

Рассмотрим кратко выводы теории приливного взаимодействия спутника и планеты. Из-за приливного взаимодействия тело спутника деформируется. Образуются так называемые приливные “горбы”. Ось симметрии приливных горбов отклоняется от направления “планета—спутник” на угол, зависящий главным образом от разности угловой скорости вращения спутника относительно своего центра масс и угловой скорости обращения спутника по орбите. Приливное взаимодействие спутника с планетой приводит к изменению угловой скорости вращения планеты; например, приливное взаимодействие Луны и Земли приводит к замедлению вращения Земли. Притяжение приливных горбов спутника планетой приводит либо к уменьшению скорости вращения спутника, если она больше орбитальной, либо к ее увеличению, если она меньше орбитальной. При этом угол между осью собственного вращения спутника и нормалью к плоскости спутниковой орбиты уменьшается. В итоге, при условии, что орбита спутника фиксирована, конечной стадией его приливной вращательной эволюции является синхронное с движением по орбите вращение вокруг оси, перпендикулярной плоскости орбиты. Если учесть прецессию узлов орбиты, то на типичной финальной стадии приливной эволюции ось вращения спутника будет находиться в одном из так называемых *состояний Кассини* с малой величиной облического угла — угла между нормалью к плоскости орбиты и осью вращения (Colombo, 1966; Peale, 1969; 1977; 1999). Захват спутников в синхронное вращение и в различные состояния Кассини подробно обсуждается в работе Gladman и др. (1996).

Установленное в 1965 г. из наблюдений несинхронное вращение Меркурия привлекло внимание исследователей к разработке детальной теории спин-орбитальной приливной эволюции небесных тел, позволяющей объяснить наблюдаемый режим вращения Меркурия. Теория приливной вращательной эволюции небесных тел в дальнейшем успешно применялась и для описания приливной вращательной эволюции спутников планет. Теоретические исследования, проведенные как в рамках классической теории (Kaula, 1964; MacDonald, 1964; Peale, Gold, 1965; Goldreich, 1966; Goldreich, Peale, 1966; Peale, 1977; 1999; Ferraz-Mello и др., 2008), так и посредством ее современных модификаций (Efroimsky, Williams, 2009; Makarov, Efroimsky, 2013; Makarov, 2015), показывают, что в ходе долговременной приливной эволюции спутник проходит через различные спин-орбитальные резонансные состояния, пока не будет захвачен в одно из них. Возможность нахождения спутника в каком-либо из резонансных состояний определяется устойчивостью последнего от

носителю наклона оси вращения. Предполагается, что на конечной стадии вращательной эволюции ось вращения спутника ортогональна плоскости орбиты. Под устойчивостью относительно наклона оси вращения понимается, что малые отклонения оси вращения от нормали не приводят к существенному изменению ориентации фигуры спутника и скорости его вращения. Поэтому для понимания характера долговременной динамической эволюции спутников планет исследование устойчивости движения спутников в различных спин-орбитальных резонансных состояниях, и в первую очередь в синхронном резонансе, имеет важнейшее значение. В работах Batygin и Morbidelli (2015) и Seligman и Batygin (2021) разработана теория спин-орбитальной эволюции сильно асимметричных и двойных объектов, включая малые спутники сильно несферической формы, контактные двойные малые тела, двойные транснептуновые объекты (ТНО).

Важное значение имеют и оценки времени приливного замедления вращения до синхронного состояния. Они определяют, может ли вращение спутника достичь синхронного состояния за время, прошедшее с момента формирования спутника. Для тех спутников, про которые известно, что они захвачены в синхронный резонанс, физические параметры спутника позволяют достичь этого состояния за достаточно короткое время (меньше или много меньше возраста Солнечной системы, см. Peale, 1977; 1999). Согласно выводам, сделанным в работе Peale (1977) на основе оценок времени приливного замедления вращения, большинство иррегулярных спутников (напомним, что к ним относится подавляющее большинство малых спутников), все еще находится во вращательных состояниях, близких к первоначальным.

В работе Алешкиной (2009) рассмотрена приливная спин-орбитальная эволюция ряда крупных ($R > 500$ км) спутников с известными инерционными параметрами. Численное моделирование показало, что крупные спутники в ходе приливной эволюции вращения быстро проходят через различные спин-орбитальные резонансы и оказываются захваченными в синхронный резонанс. Для всех рассмотренных спутников получены теоретические и численные оценки времен приливного замедления первоначально быстрого вращения спутника до синхронного; установлено, что время приливного замедления для всех спутников, за исключением Япета (C8), существенно меньше возраста Солнечной системы. Моделирование долговременной вращательной эволюции Япета, проведенное Castillo-Rogez и др. (2007; 2011) в рамках усовершенствованной модели приливного взаимодействия, позволило теоретически обосновать наблюдаемую у него в настоящее время вращательную динамику (см. также Efroimsky и Williams (2009)).

Иррегулярные спутники обычно имеют весьма малые размеры (менее ~ 10 км) и, соответственно, сильно несферическую форму (см. обсуждение в работе Куприянов и Шевченко (2006)), при этом их орбиты обладают значительными эксцентриситетами ($e > 0.1$). Поэтому, согласно теоретическим выводам Wisdom и др. (1984) и Wisdom (1987), в фазовом пространстве вращательного движения может иметь место перекрытие спин-орбитальных резонансов. Согласно критерию перекрытия нелинейных резонансов Чирикова, динамический хаос проявляется, если расстояние между центрами соседних резонансов по импульсной переменной меньше, чем сумма их полуширин (см. Chirikov, 1979; Лихтенберг, Либерман, 1984; Мюррей и Дермотт, 2009; Морбиделли, 2014). Таким образом, при перекрытии резонансов в фазовом пространстве возникает область динамического хаоса, достигнув которой в ходе приливной вращательной эволюции спутник может оказаться в режиме хаотического вращения. Свойства хаотической вращательной динамики мы обсудим подробно в одном из последующих разделов.

СИНХРОННОЕ ВРАЩЕНИЕ

Как уже отмечено выше, наиболее вероятным финальным режимом вращения спутника является движение, синхронное с движением по орбите. В синхронном вращении находятся все крупные спутники планет, а также и часть малых спутников (см. табл. 2). Для спутников, завершивших приливную эволюцию вращательного движения, этот наблюдательный факт теоретически ожидаем, так как синхронный 1 : 1 резонанс с движением по орбите является наиболее вероятным финальным режимом долговременной приливной вращательной эволюции. В синхронном резонансе угловая скорость вращения спутника относительно своего центра масс совпадает с угловой скоростью движения спутника по орбите, при этом фигура спутника в среднем все время ориентирована одной и той же стороной по направлению на планету, а ось вращения перпендикулярна плоскости орбиты.

При поступательно-вращательном движении спутника по орбите ориентация его фигуры относительно направления на планету испытывает колебания. Белецкий (1959; 1965) вывел уравнение плоских колебаний ориентации фигуры спутника на эллиптической орбите. В случае плоского (в плоскости орбиты) вращения спутника его динамика определяется величиной e и значением параметра $\omega_0 = \sqrt{3(B-A)/C}$, характеризующего асимметрию фигуры спутника, где $A < B < C$ — главные центральные моменты инерции спутника. Теоретические исследования периодических ре-

шений уравнения Белецкого (Торжевский, 1964; Златоустов и др., 1964; Сарычев и др., 1977; Петров и др., 1983; Брюно, 2002) в дальнейшем показали, что при одних и тех же значениях параметров уравнение может иметь несколько устойчивых решений (с разными начальными условиями), соответствующих синхронному вращению спутника, — существует несколько мод синхронного резонанса. Из них можно выделить две основные: при $e = 0$ одна из них существует для всех возможных значений параметра $0 \leq \omega_0 \leq \sqrt{3}$, вторая — имеет место только для спутников с существенно несимметричной фигурой ($\omega_0 \geq 1$). Мельников (2001) детально рассмотрел возможный режим вращения спутника в еще одной моде синхронного резонанса — бифуркационной моде, имеющей место в области параметрического резонанса ($\omega_0 \approx 1/2$). При вращении спутника в бифуркационной моде, на кривую, описывающую изменение ориентации спутника со временем, накладывается длинное колебание с периодом, равным двум периодам обращения спутника на орбите. Это видно на рис. 3, где представлен пример сечения фазового пространства с указанием центров различных мод (α , β и α_{bif}) синхронного резонанса, а также зависимость ориентации фигуры спутника от времени при его вращении в разных модах.

Метод сечений Пуанкаре (сечений фазового пространства) — широко известный инструмент изучения свойств динамических систем. Вкратце, суть его заключается в выборе поверхности в фазовом пространстве системы и фиксации координат фазовой траектории в моменты пересечения ею данной поверхности в одном и том же направлении. Описание алгоритма построения сечений Пуанкаре можно найти, например, в монографии Лихтенберга и Либермана (1984).

Ориентация спутника определяется углом θ — углом между линией апсид и наибольшей осью фигуры спутника. Представленное на рис. 3 сечение строилось следующим образом: при численном интегрировании уравнений вращательного движения спутника, в моменты прохождения перицентра орбиты фиксировались значения угла θ и скорости его изменения со временем $d\theta/dt$. Затем на плоскости $(\theta, d\theta/dt)$ отмечались точки с соответствующими координатами.

Разнообразные примеры сечений фазового пространства, построенных для различных спутников, можно найти в работах Wisdom и др. (1984), Wisdom (1987), Klavetter (1989b), Dobrovolskis (1995), Black и др. (1995), Celletti и др. (2007), Melnikov, Shevchenko (2008), Мюррей, Дермотт (2009).

Далее рассмотрим три основные моды синхронного резонанса (включая бифуркационную моду), согласно работам Мельников и Шевченко (2000; 2007), Мельников (2001). Вероятно, первы-

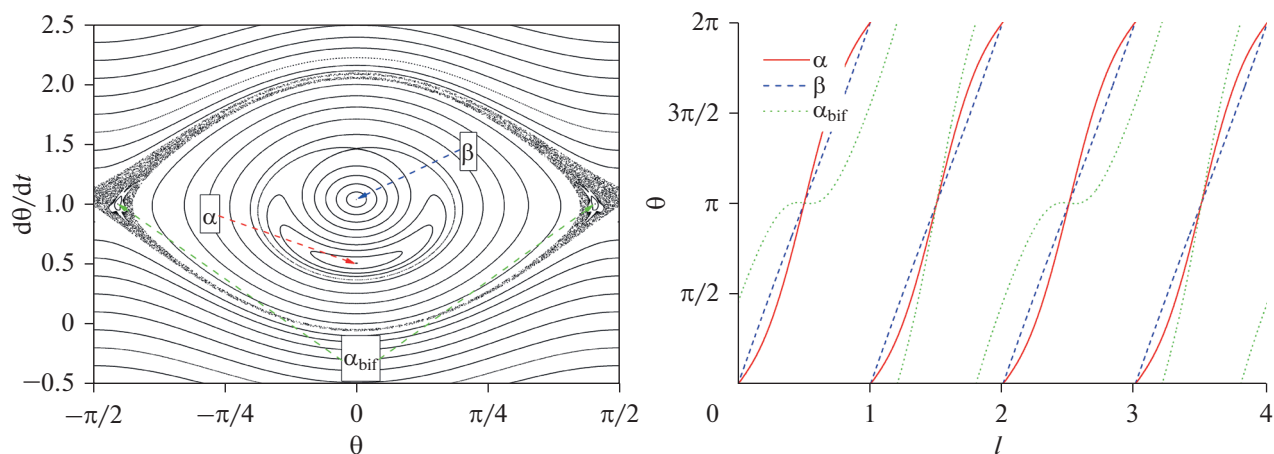


Рис. 3. Панель слева: сечение фазового пространства плоского вращательного движения спутника, определенное в перигеетрии орбиты (таким образом, значения переменных даны на моменты прохождения перигеетрии), для $e = 0.002$, $\omega_0 = 1.058$ (“Прометей”). Указаны центры синхронного α -резонанса, синхронного β -резонанса и моды α_{bif} . Панель справа: ориентация спутника в функции времени при вращении в синхронном α -резонансе (красная кривая), в синхронном β -резонансе (синяя кривая) и моде α_{bif} (зеленая кривая). Через θ обозначен угол между линией апсид и наибольшей осью фигуры спутника. Время l в орбитальных периодах. (Рисунок из работы Мельникова и Шевченко (2007).)

ми, применительно к спутникам планет, факт существования нескольких мод синхронного резонанса отметили Wisdom и др. (1984). В работах Мельникова и Шевченко (2000; 2007), Мельникова (2001) и Куприянова и Шевченко (2006) подробно рассмотрена возможность существования нескольких возможных режимов плоского синхронного вращения у известных спутников планет. Выявлены реальные спутники планет, для которых возможны несколько мод синхронного резонанса. Для некоторых из этих спутников исследована устойчивость плоского синхронного вращения относительно наклона оси вращения (Мельников, Шевченко, 1998; 2000; 2007; Kouprianov, Shevchenko, 2005; Melnikov, Shevchenko, 2008; Пашкевич и др., 2021).

Моду синхронного вращения можно выявить из анализа наблюдательных данных. Например, в случае Амальтеи (Ю5) существуют две моды (Мельников, Шевченко, 2000; 2007; Мельников, 2001; Пашкевич и др., 2021). Исследование устойчивости вращательной динамики Амальтеи позволило установить, что ее вращение в одной из двух мод плоского синхронного вращения является неустойчивым относительно наклона оси вращения, а во второй моде – устойчивым (Мельников, Шевченко, 2000; 2007), см. рис. 4. Амальтея в ходе вращательной эволюции не может быть захвачена в неустойчивую моду синхронного резонанса, поскольку любое малое смещение оси ее вращения от нормали привело бы к выходу из режима плоского синхронного вращения. Наблюдаемая малая ($< 5^\circ$) амплитуда либраций (Thomas и др., 1998) ориентации наибольшей оси фигуры Амальтеи относительно направления на Юпитер

при ее движении по орбите соответствует устойчивой моде. В случае нахождения Амальтеи во второй синхронной моде амплитуда либраций могла бы достигать 30° (Пашкевич и др., 2021).

Таким образом, согласно теоретическим выводам (Мельников, Шевченко, 2000; 2007; Мельников, 2001), резонансная вращательная динамика малых спутников существенно несферической формы может быть разнообразной: в зависимости от параметров спутника и начальных условий спутник захватывается в один из трех динамически существенно различных режимов (мод) синхронного вращения, если движение в этой моде является устойчивым.

В работе Comstock и Bills (2003) разработана аналитическая теория для оценки величины вынужденных либраций различных тел Солнечной системы. Получены численные оценки амплитуды вынужденных либраций для ряда спутников. Теория вынужденных либраций и метод оценки их амплитуды при синхронном вращении планет и спутников (в том числе и сильно асимметричной формы) развиты в работе Makarov и др. (2016). В работах Noyelles (2008) и Noyelles и др. (2008) разработана аналитическая модель пространственного синхронного вращения спутника и на ее основе детально рассмотрены физические либрации в синхронном вращении четырех галилеевых спутников Юпитера, Титана (С6) и Реи (С5). Для всех рассмотренных спутников получены аналитические и численные оценки периодов гармоник (фундаментальных частот) в спектре либраций.

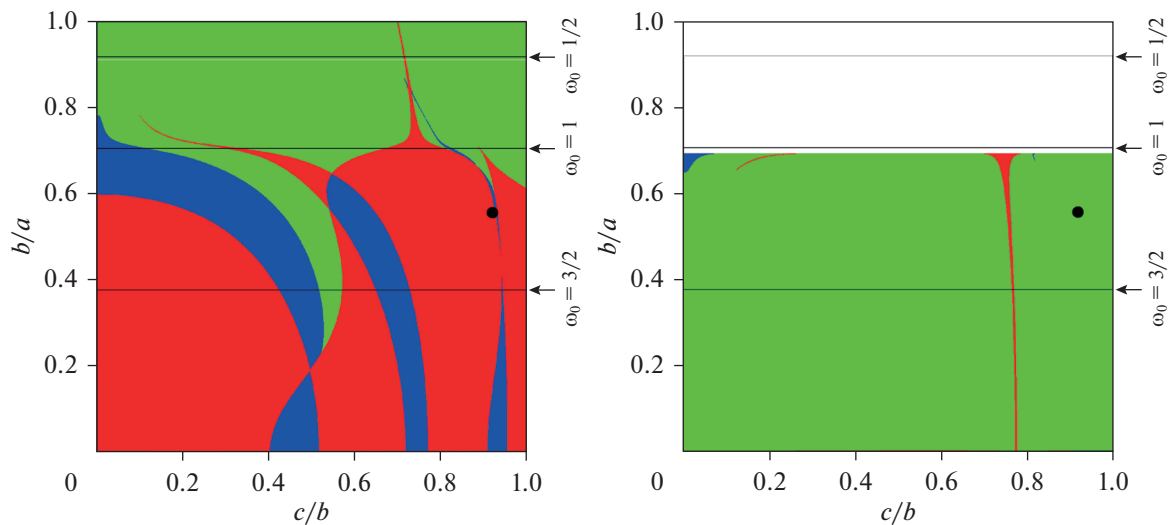


Рис. 4. Области устойчивости (выделены зеленым цветом) и неустойчивости (выделены синим и красным) относительно наклона оси вращения спутника, при $e = 0.003$ (“Амальтея”): центр синхронного α -резонанса (панель слева), центр синхронного β -резонанса (панель справа). Точкой указано положение Амальтеи (Ю5). Штриховые горизонтальные линии соответствуют приведенным на графиках значениям ω_0 ; $a > b > c$ — полуоси трехосного эллипсоида, аппроксимирующего фигуру спутника. Распределение плотности внутри полагается однородным (плотность равна постоянной, не зависящей от координат величине). Вращение Амальтеи неустойчиво в синхронном α -резонансе и устойчиво в синхронном β -резонансе. (Рисунок из работы Мельникова и Шевченко (2007).)

Амплитуда свободных либраций у спутников обычно мала, амплитуда же вынужденных либраций может быть достаточно существенной для возможности определения ее из наблюдений. Сопоставление амплитуд наблюдаемых либраций с их теоретическими значениями позволяет судить об инерционных свойствах спутника — определять его моменты инерции и оценивать плотность. Исследование такого рода для Януса (C10) и Эпиметея (C11) проведено в работе Tiscareno и др. (2009), где для этих спутников вычислены теоретические амплитуды либраций, а на основе анализа снимков спутников, полученных с КА Cassini, определены амплитуды либраций. Для Эпиметея амплитуда наблюдаемых вынужденных либраций оказалась существенной ($\sim 6^\circ$), что позволило улучшить оценки моментов инерции спутника.

В работе Noyelles (2010) на основе результатов, полученных Tiscareno и др. (2009), разработана теория пространственного вращения Януса (C10) и Эпиметея (C11) и на ее основе определены величины периодов либраций спутников; дано теоретическое обоснование для наблюдаемой амплитуды либраций Януса и значительной погрешности в определении амплитуды либраций Эпиметея.

Rambaux и др. (2012) детально рассмотрели либрации по долготе во вращательном движении Фобоса (M1) и показали, что на основе анализа наблюдаемого спектра либраций можно сделать выводы о внутреннем строении этого спутника.

Noyelles (2009) посредством численных и аналитических методов рассмотрел вращательную динамику Каллисто (Ю4) и построил теорию его вращения в системе координат ICRF. На основе сопоставления данных наблюдений с КА Galileo и Cassini и оценок из теории вращения спутников планет продемонстрировано соблюдение для Каллисто законов Кассини (Colombo, 1966; Peale, 1969; 1977; 1999; Gladman и др., 1996).

Noyelles и др. (2011) провели теоретическое исследование вращательной динамики Мимаса (C1) и изучили связь внутренней структуры спутника, определяемой различными моделями, с амплитудой наблюдаемых либраций. В работе Tajeddine и др. (2014) на основе анализа изображений, полученных с КА Cassini–Huygens, изучены физические либрации во вращении Мимаса. Установлено хорошее соответствие большинства амплитуд спектра наблюдаемых либраций с их теоретическими значениями. Как оказалось, одна из амплитуд в два раза больше ее теоретической величины, предсказываемой в рамках модели гидростатического равновесия; Tajeddine и др. (2014) предположили, что спутник либо не находится в состоянии гидростатического равновесия, либо при гидростатическом равновесии у Мимаса под толстой ледяной оболочкой имеется жидкий океан. В работах Noyelles (2012; 2013; 2017; 2018) детально рассмотрены теоретические модели вращения спутников со сложной внутренней структурой.

Либрации спутника влияют на его орбитальные элементы, приводя, в частности, к прецессии перицентра орбиты (Borderies, Yoder, 1990), поэтому из анализа астрометрических наблюдений положений спутников можно оценить величину либраций спутника и получить информацию о его инерционных параметрах. Заметим, что количество астрометрических наблюдений спутника может быть весьма большим (десятки тысяч), в то время как детальные изображения, полученные с борта межпланетных КА и пригодные для выявления либраций, имеются лишь для малого числа объектов. Данный метод развит в работе Lainey и др. (2019), где на основе астрометрических данных, полученных с КА Cassini, о положениях ряда малых спутников Сатурна получены оценки амплитуд либраций и, из сопоставления с теоретическими оценками, на их основе сделаны выводы о физических свойствах спутников.

Отметим, что колебания фигуры спутника относительно направления на планету (описываемые, в частности, уравнением Белецкого) могут приводить к возникновению наблюдаемых на поверхностях некоторых спутников серий параллельных разломов (grooves; см. Veverka, Duxbury, 1977; Morrison и др., 2009; Thomas, Helfenstein, 2020).

У крупных ледяных спутников в синхронном вращении могут наблюдаться регулярные изменения скорости вращения, объясняемые тем, что их вращение не является твердотельным (Van Hoolst и др., 2013; Coeyette и др., 2018). Например, в случае Титана (С6) изменение продолжительности суток на нем (периода синхронного вращения) можно объяснить наличием жидкости под ледяной поверхностью спутника (Lorenz и др., 2008). Как показал Макагов (2015), если спутник моделировать полужидким (semiliquid) телом, то возможен его захват в устойчивое псевдосинхронное вращение, при котором угловая скорость выше, чем скорость обращения по орбите.

БЫСТРОЕ РЕГУЛЯРНОЕ ВРАЩЕНИЕ

Другой качественный тип вращения, присущий малым спутникам и известный из наблюдений, — быстрое (по сравнению с синхронным) регулярное вращение. В настоящее время известно более 30 малых спутников с таким вращением (см. табл. 2), все они являются иррегулярными спутниками. Эти спутники пока еще не завершили приливную вращательную эволюцию.

Спутники Юпитера. На основе анализа длительного ряда наземных фотометрических наблюдений избранных спутников Юпитера Degewij и др. (1980) установили, что период вращения Гималии (Ю6) составляет $P_{\text{rot}} \sim 9.5$ ч, а ее орбитальный период — $P_{\text{orb}} \approx 250$ сут. Позднее Pilcher и др. (2012) посредством анализа наземных на-

блюдений Гималии установили с высокой точностью $P_{\text{rot}} = 7.7819 \pm 0.0005$ ч. Таким образом, вращение Гималии существенно быстрее синхронного: $P_{\text{orb}}/P_{\text{rot}} \approx 630$.

В работе Emelyanov (2005) значение массы Гималии получено посредством оценки гравитационного влияния Гималии на другие малые спутники Юпитера при тесных сближениях. Обычно же массы иррегулярных спутников оценивают по их блеску, предполагая известными значения альбедо поверхности спутника и его плотности (см. обсуждение в Емельянов и др. (2007), Емельянов и Уральская (2011), Емельянов (2019)).

Луи (1991) на основе результатов анализа наземных фотометрических наблюдений получил приближительные оценки периодов вращений для спутников Ю9—Ю12; периоды составляют 8—12 ч. Таким образом, эти спутники должны, по всей вероятности, находиться в режиме быстрого вращения (в табл. 2 они не включены).

Спутники Сатурна. Посредством анализа фотометрических наблюдений девятого спутника Сатурна — Фебы Andersson (1972) установил, что величина периода ее собственного вращения составляет от 9 до 13 ч. Таким образом, угловая скорость вращения Фебы существенно (на три порядка) быстрее скорости ее обращения по орбите.

Орбитальный период Фебы $P_{\text{orb}} \approx 550$ сут, большая полуось орбиты $\approx 220 R_{\text{Saturn}}$, где $R_{\text{Saturn}} \approx 57600$ км — средний радиус Сатурна, наклонение орбиты $i \approx 175^\circ$. Таким образом, Феба представляет собой иррегулярный спутник, движущийся по весьма удаленной от Сатурна орбите и обладающий быстрым несинхронным вращением ($P_{\text{orb}}/P_{\text{rot}} \approx 1400$).

Период вращения Фебы (11.25 ч, либо 21.1 ч) указан в работе Degewij и др. (1980). Анализ изображений Фебы, полученных с КА Voyager-2, позволил Thomas и др. (1983) уточнить период ее собственного вращения; согласно их данным, $P_{\text{rot}} = 9.4 \pm 0.2$ ч. Проведенные Kruse и др. (1986) наземные наблюдения Фебы показали, что кривая блеска спутника имеет форму, близкую к синусоиде с периодом 9.282 ± 0.015 ч. Позднее Bauer и др. (2004) на основе анализа наземных наблюдений Фебы определили период ее собственного вращения с высокой точностью: $P_{\text{rot}} = 9.2735 \pm 0.0006$ ч.

Детальное моделирование вращательной динамики Фебы, выполненное Cottureau и др. (2010), позволило построить аналитическую модель вращения Фебы и определить возможные значения прецессии и нутации оси собственного вращения. Основываясь на модели фигуры Фебы (Gaskell, 2013), построенной посредством анализа ее снимков, полученных с КА Cassini, эфемериде вращения Фебы (Archinal и др., 2018) и анализе профилей покрытий Фебой ряда звезд, Gomes-

Júnior и др. (2020) получили оценку периода вращения с еще более высокой точностью: $P_{\text{rot}} = 9.27365 \pm 0.00002$ ч.

Denk и Mottola (2019) провели детальный анализ наблюдательных данных, полученных с КА Cassini, позволивший установить, что 25 иррегулярных спутников Сатурна вращаются с периодами от 5 до 76 ч, что существенно меньше, чем их орбитальные периоды. Для 20 спутников (включая Фебу) ошибки определения периодов вращения весьма малы (<2%), для трех спутников определенные значения периодов являются неоднозначными, для двух — предварительными. Отметим, что все спутники являются весьма малыми (практически у всех из них $R < 2$ км). Данные, полученные Denk и Mottola (2019), на треть увеличили объем известной ранее информации о вращательных состояниях спутников планет.

Спутник Нептуна — Нереида (H2). Среди всех известных в настоящее время четырнадцати спутников Нептуна наибольший интерес с точки зрения вращательной динамики представляет второй спутник — Нереида. Нереида является иррегулярным спутником с диаметром фигуры около 350 км (Smith и др., 1989; Thomas и др., 1991). Спутник обращается по чрезвычайно вытянутой ($e \approx 0.75$) орбите. Некоторое время полагалось, что вращение Нереиды может быть хаотическим (Dobrovolskis, 1995; Schaefer B.E., Schaefer M.W., 2000). Grav и др. (2003) на основе анализа проведенных ими наземных наблюдений установили, что период вращения Нереиды $P_{\text{rot}} = 11.52 \pm 0.14$ ч ($P_{\text{orb}} = 360$ сут). Таким образом, ее скорость вращения в ~ 750 раз быстрее скорости синхронного вращения. Главной проблемой определения периода вращения Нереиды является тот факт, что установленные разными наблюдателями (в разные эпохи) амплитуды изменения ее кривой блеска отличаются в десятки раз (Schaefer B.E., Schaefer M.W., 2000; Grav и др., 2003; Schaefer и др., 2008). Schaefer и др. (2008) предположили, что эти различия амплитуд можно объяснить ее сильно вытянутой фигурой, значительной прецессией оси собственного вращения, а также сильными вариациями альбедо по поверхности. Детальное численное моделирование вращательной динамики Нереиды проведено в работе Alexander и др. (2011), где, в частности, оценено влияние асимметрии фигуры на вид наблюдаемой кривой блеска. Связь между формой, вращением и наблюдаемой кривой блеска Нереиды подробно изучена в работе Hesselbrock и др. (2013) посредством построения модельных кривых блеска для разных значений параметров, задающих фигуру, ориентацию и параметры вращения спутника. Hesselbrock и др. (2013) провели сопоставление модельных и наблюдаемых наземных кривых блеска и предположили, что вариации амплитуд

кривых блеска Нереиды в разные эпохи наблюдений (см. рис. 4 в Schaefer и др., 2008) можно действительно объяснить ее сильно вытянутой фигурой, также с учетом возможного изменения альбедо по поверхности. Kiss и др. (2016) посредством анализа наблюдений, полученных с двух космических телескопов (Spitzer Space Telescope и Herschel Space Observatory) с большой точностью определили период вращения Нереиды ($P_{\text{rot}} = 11.594 \pm 0.017$ ч), а также уточнили параметры ее фигуры. Согласно их выводам, наблюдаемые особенности кривой блеска Нереиды обусловлены лишь ее вытянутой фигурой; отношение наибольшей и наименьшей полуосей трехосного эллипсоида, аппроксимирующего фигуру Нереиды, близко к 1.3 : 1; также они обусловлены “очень грубой покрытой множеством кратеров поверхностью” спутника (“... and it has a very rough, highly cratered surface”).

Спутники Урана. Maris и др. (2001) на основе анализа проведенных ими наземных наблюдений Калибана (У16) и Сикораксы (У17) установили, что периоды вращения спутников составляют соответственно ~ 3 и ~ 4 ч. Позднее, фотометрические наблюдения Maris и др. (2007) подтвердили величину периода вращения Сикораксы (У17) и позволили определить периоды вращения Просперо (У18) (~ 4.6 ч) и Стебоса (У19) (около 4.4 ч). Согласно Maris и др. (2001; 2007) орбитальные периоды Калибана (У16), Сикораксы (У17), Просперо (У18) и Стебоса (У19) примерно в 5200, 8600, 10300 и 12200 раз больше периодов их собственного вращения. В работе Farkas-Takács и др. (2017) посредством анализа данных наблюдений, выполненных с космического телескопа Kepler, уточнены периоды вращения всех перечисленных выше спутников Урана (их величины оказались чуть выше определенных Maris и др. (2001, 2007)); кроме того, впервые определен период вращения у Фердинанда (У24) (≈ 11.8 ч).

Таким образом, у пяти спутников Урана к настоящему времени выявлено быстрое несинхронное вращение. Согласно Sheppard и др. (2005), наибольший из этих иррегулярных спутников Урана — Сикоракса (У17) — имеет радиус $R \approx 75$ км, а наименьший — Фердинанд (У24) — имеет радиус $R \approx 10$ км.

Можно видеть, что развитие современных методов наблюдений, включая, прежде всего, использование космических телескопов (Farkas-Takács и др., 2017; Kiss и др., 2016), позволяет изучать вращательную динамику весьма малых и удаленных от нас спутников планет.

Что касается вращательной динамики спутников за пределами орбиты Нептуна, у четырех спутников Плутона наблюдается быстрое вращение (Weaver и др., 2016). Вероятно, быстрое вращение имеет место у всех спутников транснептуновых объектов (ТНО) (см. обсуждение времени

приливного замедления спутников крупных ТНО в статье Thirouin и др. (2014)). Вращательная динамика спутников крупных ТНО рассмотрена кратко далее.

ХАОТИЧЕСКОЕ ВРАЩЕНИЕ

Третьим качественным типом вращения спутника, предсказанным теоретически и установленным из наблюдений, является хаотическое вращение (“кувыркание”). Хаотическое поведение может иметь место во вращательной динамике различных небесных тел (планеты, спутники планет, астероиды, ядра комет) (см. Мюррей и Дермотт (2009), Морбиделли (2014), Shevchenko (2020)). Проявлением динамического хаоса (Лихтенберг, Либерман, 1984) является экспоненциальная расходимость близких траекторий фазового пространства системы, поэтому ее динамика является непредсказуемой на временах, больших, чем так называемое ляпуновское время системы (Chirikov, 1979). Для выявления динамического хаоса используют разнообразные численные инструменты, такие как вычисление характеристических показателей Ляпунова, параметра MEGNO, применение частотного анализа (см. обзоры Maffione и др. (2013), Морбиделли (2014), Мельников (2018)).

Индикатором хаоса, имеющим строгое теоретическое обоснование, являются характеристические показатели Ляпунова (ХПЛ). ХПЛ характеризуют скорость экспоненциальной расходимости начально близких траекторий в фазовом пространстве динамической системы (см. Оселедец, 1968; Лихтенберг, Либерман, 1984; Мюррей, Дермотт, 2009; Морбиделли, 2014; Shevchenko, 2020). Спектр ХПЛ для гамильтоновой системы состоит из $2N$ показателей, где N — число степеней свободы системы. В случае регулярной динамики все ХПЛ равны нулю, а при хаотическом движении как минимум максимальный ХПЛ больше нуля. В работах Benettin и др. (1976; 1980) показана эффективность вычисления ХПЛ как инструмента для исследования динамических систем и представлены базовые алгоритмы для вычисления ХПЛ. HQRВ-метод (Householder QR-Based), разработанный von Bremen и др. (1997), основан на QR-разложении матрицы касательного отображения с использованием преобразования Хаусхолдера. В работе Shevchenko и Kouprianov (2002) HQRВ-метод реализован в виде программного комплекса и применен для исследования вращательной динамики спутников планет. Аналитические методы оценивания максимальных показателей Ляпунова представлены в работах Шевченко (2002) и Shevchenko (2020); эти методы основываются главным образом на теории сепаратрисных отображений (см. Shevchenko, 1999; 2020).

В работах Wisdom и др. (1984) и Wisdom (1987) теоретически показано, что спутник несферической формы на эллиптической орбите может вращаться хаотическим (непредсказуемым) образом. Wisdom и др. (1984) впервые указали, что кандидатом на хаотическое вращение, из-за сильной асимметрии фигуры и значительного эксцентриситета орбиты, является Гиперион (С7). Проведенное позднее рядом исследователей (Klavetter, 1989b; Black и др., 1995; Девяткин и др., 2002; Melnikov, 2002; Harbison и др., 2011) моделирование наблюдаемых кривых блеска и вращательной динамики Гипериона, подтвердило хаотический характер его вращения. Результаты изучения вращательной динамики Гипериона подробно рассмотрены далее.

Хаотическая вращательная динамика Гипериона

Впервые на возможность наличия хаоса во вращательной динамике спутников планет было указано в работе Wisdom и др. (1984), а в качестве наиболее вероятного кандидата на нахождение в хаотическом режиме вращения выявлен Гиперион — седьмой спутник Сатурна.

Гиперион (С7) открыт У. Бондом (Bond, 1848), Дж. Бондом и, независимо, У. Ласселлом (Lassell, 1848). Орбита Гипериона имеет заметный эксцентриситет ($e \approx 0.1$) и малый наклон к экватору Сатурна ($i = 0.43^\circ$). Орбитальный период Гипериона $P_{\text{orb}} \approx 21.28$ сут, большая полуось орбиты $a \approx 25R_{\text{Saturn}}$, где $R_{\text{Saturn}} \approx 57600$ км — средний радиус Сатурна. Согласно данным наблюдений с КА Voyager-2 (Thomas, Veverka, 1985; Thomas и др., 1995) и КА Cassini (Thomas и др., 2007; Thomas, 2010), фигура Гипериона сильно вытянута; трехосный эллипсоид, аппроксимирующий его фигуру, имеет полуоси $180 \times 133 \times 103$ км. Согласно Thomas и др. (2007) и Rossignoli и др. (2019) на поверхности Гипериона имеются как множество мелких кратеров, так и несколько крупных, один из которых имеет диаметр 150 км, то есть сопоставим с радиусом фигуры спутника. Гиперион является самым крупным из сферически-несимметричных спутников в Солнечной системе.

Согласно теоретическому исследованию Wisdom и др. (1984), именно сильно несимметричная геометрическая форма Гипериона, в сочетании с существенным эксцентриситетом орбиты, сделали его среди известных спутников планет наиболее вероятным кандидатом на нахождение в режиме хаотического вращения. Кроме того, проведенное Wisdom и др. (1984) численное исследование устойчивости модельного вращения Гипериона в синхронном резонансе показало, что его синхронное вращение является неустойчивым относительно наклона оси вращения к плоскости орбиты. Даже малое смещение оси вращения от

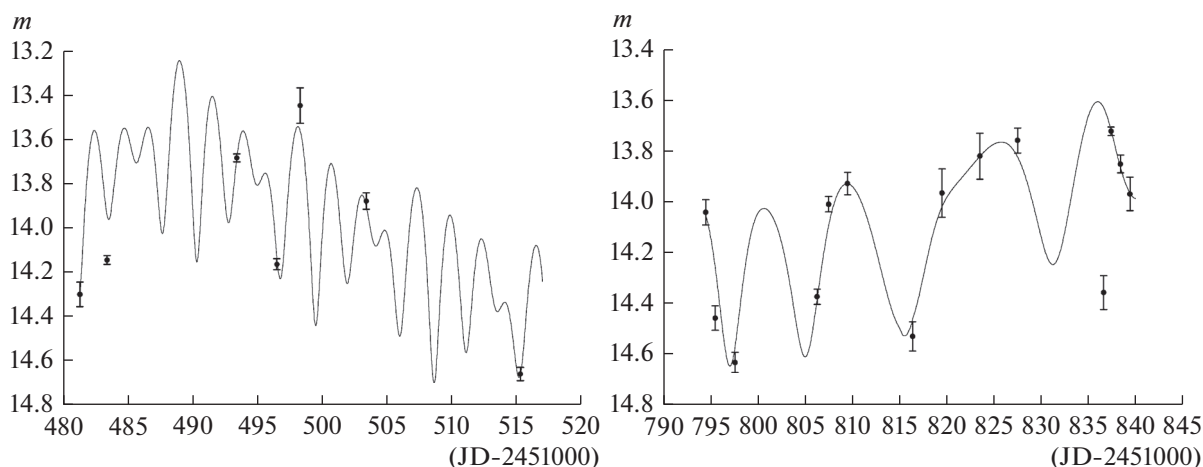


Рис. 5. Модельные кривые блеска Гипериона (C7) для наблюдений, выполненных в Пулковке с сентября по декабрь 1999 г. (панель слева) и с сентября по октябрь 2000 г. (панель справа). Точками с барами указаны наблюдавшиеся значения звездной величины Гипериона. Время указано в юлианских сутках. (Рисунок из работы Девяткина и др. (2002).)

нормали приводит к хаотическому “кувырканию” спутника.

В 1984 г. на основе анализа наблюдательных данных, полученных с КА Voyager-2, Thomas и др. (1984) сделали вывод, что период вращения Гипериона составляет около 13 сут, при этом его ось вращения близка к плоскости орбиты. Такое необычное для спутника вращательное состояние и теоретическое предсказание, сделанное Wisdom и др. (1984), о возможном хаотическом режиме вращения Гипериона привлекли внимание исследователей к изучению его динамики и организации новых наблюдений. Моделирование вращательной динамики и кривых блеска Гипериона провел Klavetter (1989b) на основе полученных им в 1987 г. наблюдательных данных (Klavetter, 1989a). Black и др. (1995) моделировали вращательную динамику Гипериона на основе данных наблюдений с КА Voyager-2 (Thomas и др., 1995). Девяткин и др. (2002) и Melnikov (2002) провели моделирование кривых блеска и вращательной динамики Гипериона на основе пулковских данных наблюдений и данных наблюдений Klavetter (1989a). Моделирование вращательной динамики Гипериона на основе наблюдений с КА Voyager-2 и Cassini было проведено Harbison и др. (2011). Основной целью всех перечисленных выше исследований являлось выяснение характера вращения Гипериона.

Klavetter (1989b) из моделирования полученных им же кривых блеска нашел, что вращение Гипериона является, вероятнее всего, хаотическим. Black и др. (1995) и Harbison и др. (2011) установили, что скорость вращения Гипериона примерно в четыре раза выше скорости его обращения по орбите. При столь высокой частоте вращения, далекой от синхронного резонанса, вра-

щение может быть и регулярным. Однако Black и др. (1995) на основании результатов численного моделирования долговременной вращательной динамики были более склонны считать вращение Гипериона хаотическим.

В работе Девяткина и др. (2002) посредством моделирования наблюдаемых кривых блеска Гипериона (как пулковских, так и построенных Klavetter) оценены значения параметров и начальные условия, задающие его вращательное состояние на эпохи проведения наблюдений (1987, 1999–2000 гг.). Примеры модельных кривых блеска приведены на рис. 5. Данные, полученные из сопоставления сечений фазового пространства вращательного движения и начальных условий, воспроизводящих наблюдаемые кривые блеска, указывали на то, что вращение является хаотическим. Вычисление ХПЛ, проведенное Мельниковым (Melnikov, 2002) для допустимых начальных условий движения, показало, что вращение Гипериона, действительно, является хаотическим, поскольку максимальный ХПЛ оказался больше нуля (см., например, вычисления ХПЛ на рис. 6). Таким образом, в работе Melnikov (2002) хаотический характер вращения Гипериона был строго установлен.

Ляпуновские времена хаотического вращения Гипериона

Wisdom и др. (1984) посредством вычисления ХПЛ для хаотического вращения спутника с параметрами Гипериона оценили величину ляпуновского времени (полагаемого равным $1/L_1$, где L_1 – максимальный ХПЛ), равной примерно двум орбитальным периодам (≈ 42 сут). Согласно Melnikov (2002), ляпуновское время для вращатель-

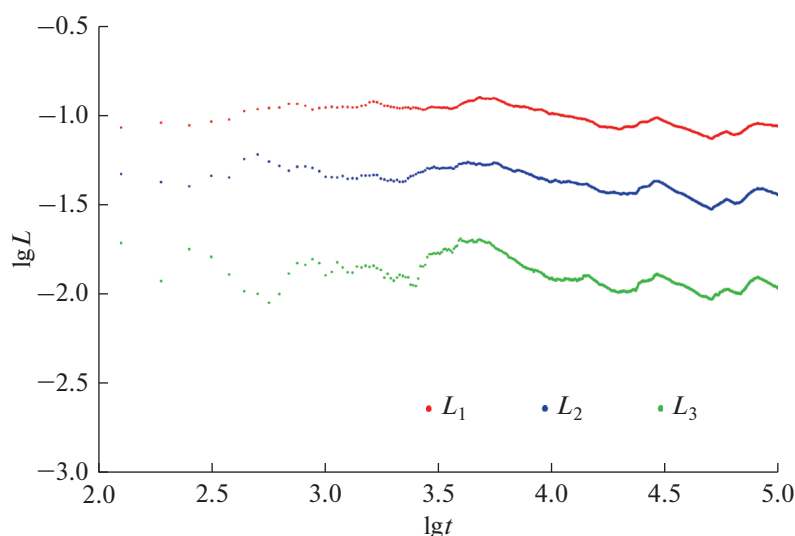


Рис. 6. Зависимость текущих величин ХПЛ ($L_1 > L_2 > L_3$) от времени t , на котором они вычисляются, для начальных условий (из области допустимых значений) вращательного движения Гипериона (С7). Единица времени равна $1/(2\pi)$ орбитального периода. (Рисунок из работы Melnikov (2002).)

ной динамики Гипериона составляет от 38 до 51 сут. Теоретическая оценка ляпуновского времени для Гипериона, полученная Шевченко (2002), составляет ≈ 30 сут. Kourigianov и Shevchenko (2005) оценили ляпуновское время вращения Гипериона в 54 сут.

Полученные Harbison и др. (2011) оценки величины ляпуновского времени для наблюдаемой вращательной динамики Гипериона также указывают на хаотический характер его вращения. Именно, была получена средняя оценка 61.4 ± 3.6 сут.

Таким образом, любая информация о начальных условиях, задающих вращательное движение Гипериона, утрачивается в его динамике на временах в 1–2 мес., т.е. за время в полтора–три орбитальных периода. Соответственно, любая полезная информация о вращательной динамике этого спутника может быть извлечена из его кривой блеска при моделировании отрезков кривой блеска на интервалах времени, меньше указанного.

Хаос во вращении Гипериона можно обнаружить посредством анализа данных, полученных как в наземных наблюдениях, так и в наблюдениях с КА. Дальнейшее моделирование и анализ наблюдаемых кривых блеска и анализ наблюдений с КА позволят уточнить параметры хаотического вращения Гипериона и величину ляпуновского времени.

Tarnopolski (2015) применил метод нелинейного анализа временных рядов к наблюдательным данным, полученным в работах Klavetter (1989b) и Девяткина и др. (2002), чтобы выяснить требования к временному ряду наземных фотометрических наблюдений, анализ которого позволил бы выявить хаотический характер динамики Гипериона путем вычисления максимального показателя Ляпунова непосредственно на основе ряда наблюдений. Согласно Tarnopolski (2015), фотометрические наблюдения Гипериона должны продолжаться не менее года и проводиться при помощи нескольких телескопов для обеспечения непрерывного ряда наблюдений без пропусков во времени.

К настоящему времени Гиперион является единственным спутником планеты в Солнечной системе, для которого строго подтверждена хаотическая вращательная динамика.

Согласно статистике наблюдательных данных, чем меньше спутник, тем более несимметричную форму он может иметь (см., например, Куприянов, Шевченко (2006); Мельников, Шевченко (2007); Melnikov, Shevchenko (2010)). Наблюдаемая зависимость параметра ω_0 , характеризующего асимметрию фигуры спутника, от среднего радиуса спутника, приведена на рис. 7. Зависимость указывает на то, что режим хаотического вращения более вероятен у меньших спутников планет. Обсудим это вопрос далее подробно.

Хаотическое вращение других малых спутников

Могут ли другие, помимо Гипериона, малые спутники планет Солнечной системы находиться в настоящее время в наблюдаемом режиме хаотического вращения? Wisdom (1987) показал, что хаотическое вращение имеет место в ходе приливной эволюции вращательного движения перед захватом в синхронный резонанс у всех спутников с иррегулярной (существенно несферической) фигурой и отличным от нуля эксцентриситетом орбиты.

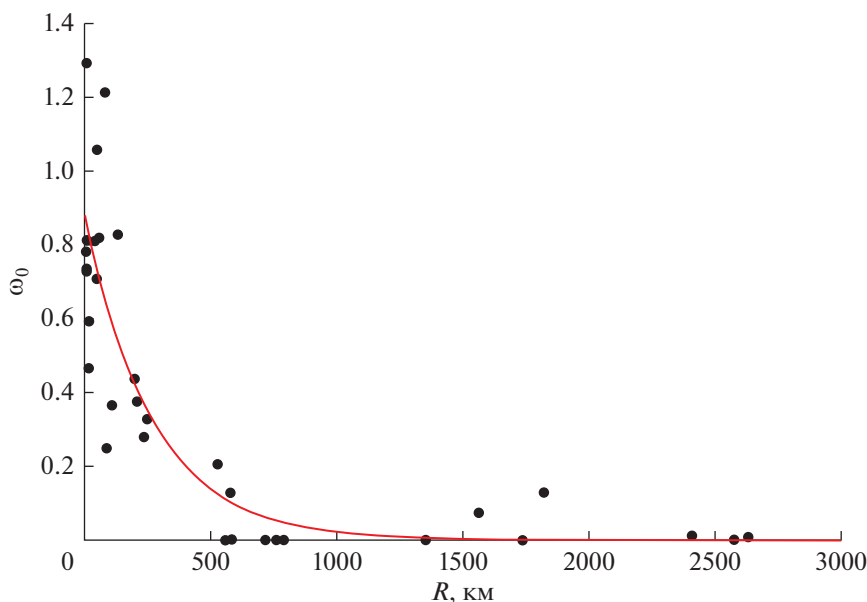


Рис. 7. Диаграмма “средний радиус спутника R —параметр ω_0 ”. Точками отмечено положение спутников с известными данными. Сплошной линией нанесена экспоненциальная аппроксимация. (Рисунок из работы Мельникова и Шевченко (2007).)

Melnikov и Shevchenko (2010) рассмотрели задачу о типичных современных вращательных режимах спутников планет и показали, что более 60% известных малых спутников с неустановленным в настоящее время режимом вращения либо находятся в регулярном (и более быстром, чем синхронное) вращении, либо вращаются хаотически. Хаотическое вращение должно наблюдаться у таких малых спутников, чья приливная эволюция уже завершена — в фазовом пространстве вращательного движения спутник приблизился к области, соответствующей синхронному вращению, однако синхронный резонанс является неустойчивым, либо вовсе не существует. Вывод о быстром современном вращении у значительной части известных малых спутников в работе Melnikov и Shevchenko (2010) сделан с точки зрения динамической устойчивости синхронного вращения для этих спутников.

В работах Kouprianov и Shevchenko (2005) и Melnikov и Shevchenko (2008) показано, что два спутника Сатурна — Прометей (C16) и Пандора (C17) — могут вращаться хаотически, поскольку их плоское синхронное вращательное движение с большой долей вероятности является неустойчивым относительно наклона оси вращения. Ляпуновское время возможного хаотического вращения этих спутников весьма мало — менее суток (Kouprianov, Shevchenko, 2005). Модельные численные эксперименты показали (Melnikov, Shevchenko, 2008; Мельников, 2020), что у некоторых малых спутников, например у Прометея

(C16) и Пандоры (C17), при хаотическом вращении имеет место эффект преимущественной ориентации наибольшей оси фигуры спутника по направлению на планету, поэтому вращение спутника внешне может быть схоже с синхронным вращением. Впервые данный эффект отметил Wisdom (1987) в модельных численных экспериментах по изучению хаотического пространственного вращения Фобоса (M1). Как показал Мельников (2020), эффект преимущественной ориентации фигуры спутника на планету должен быть замечен в хаотической динамике спутников с малой величиной эксцентриситета орбиты ($e < 0.005$), что может затруднить идентификацию хаотического режима вращения для таких спутников, если длина ряда наблюдений недостаточно велика.

Quillen и др. (2020) исследовали долговременную вращательную динамику Фобоса и Деймоса в предположении, что первоначально спутники находились в режиме хаотического кувыркания. Численные эксперименты подтвердили предположения Wisdom (1987) о том, что эти спутники даже при малых начальных эксцентриситетах их орбит могут находиться в хаотическом режиме вращения в течение тысяч орбитальных периодов. После приливного захвата в синхронное вращение вязкоупругие спутники могут еще долго вращаться относительно оси, не совпадающей с осью его наибольшего момента инерции, что сопровождается повышенным рассеянием энергии в теле спутника. При хаотическом кувыркании рассеяние энергии на несколько порядков выше

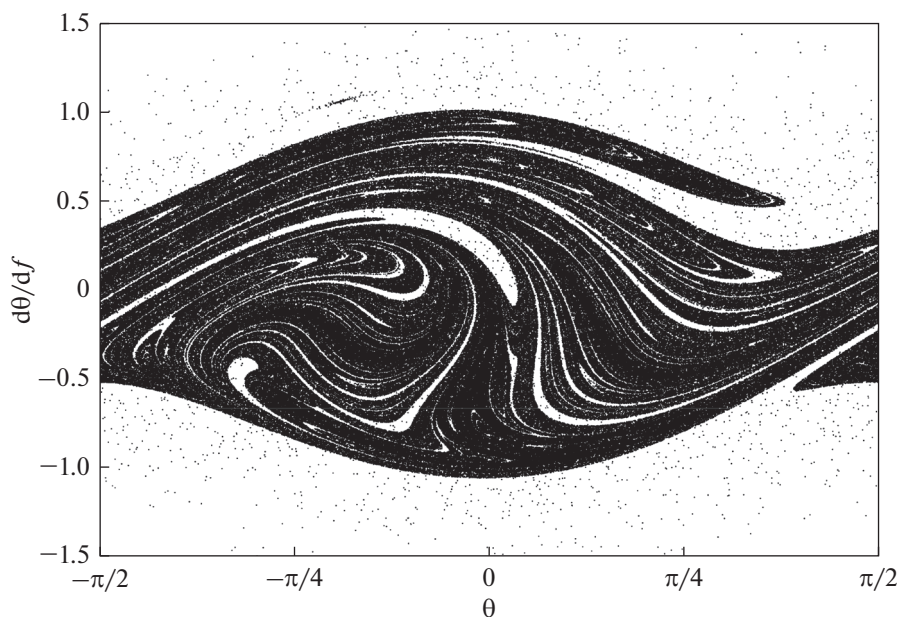


Рис. 8. Пример странного аттрактора на сечении фазового пространства плоского вращательного движения спутника. Через θ обозначен угол между линией апсид и наибольшей осью фигуры спутника; f – истинная аномалия. (Рисунок из работы Мельникова (2014).)

(Quillen и др., 2020), чем при регулярном синхронном вращении. Согласно Wisdom (1987), ряды параллельных разломов на поверхности Фобоса могли возникнуть именно в эпоху его хаотического вращения в прошлом.

Странные аттракторы в хаотической вращательной динамике спутников

В работах (Celletti, MacKay, 2007; Celletti и др., 2007; Celletti, Chierchia, 2008) показано, что при определенных значениях параметров в задаче о вращательном движении спутника с учетом диссипативных сил в фазовом пространстве движения могут существовать периодические и квазипериодические аттракторы (о типах аттракторов см. Лихтенберг и Либерман, 1984). Согласно Celletti и Chierchia (2008), при малой величине эксцентриситета практически все фазовое пространство занято периодическим аттрактором, соответствующим синхронному 1 : 1 резонансу. При больших эксцентриситетах преобладают периодические аттракторы, соответствующие резонансам более высоких порядков, а также квазипериодические аттракторы.

Проведенное Khan и др. (1998) исследование динамики плоского вращательного движения спутника при учете приливных возмущений показало, что при определенных значениях параметров задачи (эксцентриситет, параметр, определяющий асимметрию фигуры спутника, и параметр, определяющий величину приливной

диссипации) на сечениях фазового пространства появляется структура, характерная для странного аттрактора (о теории странных аттракторов см. Лихтенберг и Либерман, 1984). На возникновение странного аттрактора в данной задаче было указано Белецким (2007), чей вывод был сделан на основе анализа сечений фазового пространства.

Учет приливного взаимодействия расширяет номенклатуру возможных режимов вращательного движения спутника в окрестности синхронного резонанса, поскольку в диссипативной системе возможно хаотическое движение на странном аттракторе. Странный аттрактор возникает в том месте на сечении, где располагается хаотический слой в окрестности сепаратрис спин-орбитального резонанса при отсутствии приливного взаимодействия. Пример сечения фазового пространства плоского вращательного движения спутника при учете приливного взаимодействия с планетой представлен на рис. 8. Khan и др. (1998), полагая эксцентриситет орбиты спутника малым, получили аналитическую оценку величины параметра, характеризующего приливную диссипацию, при которой формируется странный аттрактор.

В работе Мельникова (2014) детально рассмотрена задача о возможности существования странного аттрактора во вращательной динамике спутников планет. Посредством вычисления и анализа значений ХПЛ на множестве возможных значений параметров задачи показано, что странный аттрактор может существовать в ходе приливной эволюции вращательного движения некоторых

малых спутников, например, в динамике Гипериона (С7). Напомним, что, согласно (Klavetter, 1989b; Black и др., 1995; Девяткин и др., 2002; Melnikov, 2002; Harbison и др., 2011), в настоящую эпоху вращение Гипериона хаотично.

Вращение близких спутников планет-гигантов в релятивистском приближении

В работах (Biscani и Carloni, 2015; Пашкевич и др., 2021) показано, что при исследовании долговременной эволюции вращательного движения спутников планет-гигантов следует учитывать релятивистские эффекты. Наиболее существенными релятивистскими эффектами во вращении небесных тел являются эффекты геодезической прецессии и нутации, вместе составляющие геодезическое вращение. Эффекты геодезической прецессии (De Sitter, 1916) и нутации (Fukushima, 1991), представляют собой, соответственно, систематическое и периодическое изменения направления оси вращения небесного тела в результате параллельного переноса вектора момента количества движения вдоль орбиты в искривленном пространстве-времени. Поскольку Юпитер является вторым наибольшим по массе объектом в Солнечной системе, следует ожидать, что он будет вызывать релятивистские возмущения в динамике близких к нему тел. Теоретические оценки величины геодезической прецессии двух спутников Юпитера — Ио (Ю1) и Метиды (Ю16) — для упрощенной модели их вращения получены Biscani и Carloni (2015). В работах Пашкевича и Вершкова (2019) и Пашкевича и др. (2021) на основе имеющихся эфемерид (Archinal и др., 2018) проведено детальное исследование вращательной динамики как спутников Марса, так и внутренних спутников Юпитера (Амальтеи (Ю5), Фивы (Ю14), Адрастеи (Ю15) и Метиды (Ю16)) в релятивистском приближении. Оказалось, что величина геодезической прецессии внутренних спутников Юпитера, орбиты которых весьма близки к планете, сопоставима с их прецессией в ньютоновом приближении. Таким образом, учет релятивистских эффектов во вращательной динамике близких спутников планет-гигантов необходим при моделировании их долговременной приливной эволюции. Релятивистские эффекты могут играть важную роль во вращательной динамике возможных спутников экзопланет (см. обсуждение далее).

ВРАЩАТЕЛЬНАЯ ДИНАМИКА СПУТНИКОВ КРУПНЫХ ТРАНСНЕПТУНОВЫХ ОБЪЕКТОВ

Многие транснептуновые объекты (ТНО) обладают спутниками (Brown и др., 2006; Parker и др., 2016; Kiss и др., 2017; Sheppard и др., 2018), либо представляют собой двойные, чьи компо-

ненты сопоставимы по массе (Thirouin и др., 2014; 2016), либо являются контактными двойными (Grishin и др., 2020). К настоящему времени открыто шесть ТНО диаметром более 1000 км (включая Плутон); у всех шести имеются спутники (Arakawa и др., 2019). Согласно результатам численного моделирования, проведенного Arakawa и др. (2019), большинство спутников крупных ТНО образовались в результате столкновений крупных тел на ранних этапах формирования Солнечной системы.

Вращательная динамика циркумбинарных спутников (спутников, обращающихся вокруг гравитирующих двойных), например, у малых спутников в системе Плутон—Харон, может быть хаотической. Showalter и Hamilton (2015) указали на возможность хаотического вращения двух циркумбинарных спутников системы Плутон—Харон—Никса (П2) и Гидры (П3). Потенциально хаотическую вращательную динамику малых спутников системы Плутон—Харон подтвердили путем численных расчетов Correia и др. (2015).

Однако немного позднее Weaver и др. (2016) на основе детального анализа данных полученных с КА New Horizons установили, что четыре малых спутника Плутона (в их числе и Никс с Гидрой) обладают быстрым вращением — в 6–88 раз быстрее синхронного. Факт быстрого вращения малых спутников Плутона подтверждается результатами численного совместного моделирования их орбитальной и вращательной динамики (Quillen и др., 2017). Таким образом, спутники системы Плутон—Харон в ходе долговременной приливной эволюции вращательного движения еще не успели достичь области хаоса.

Быстрое несинхронное вращение, вероятно, характерно и для других известных спутников ТНО (Brown и др., 2006; Brown, Butler, 2018; Čuk и др., 2013; Kiss и др., 2017; Sheppard и др., 2018; Parker и др., 2016) именно из-за пока еще незавершенной приливной эволюции.

ВРАЩАТЕЛЬНАЯ ДИНАМИКА СПУТНИКОВ ЭКЗОПЛАНЕТ

В настоящее время активно развиваются исследования возможности существования спутников экзопланет (Kipping и др., 2012; 2014; Heller, 2014; 2018; Heller и др., 2014; Sucerquia и др., 2019), а также и субспутников спутников экзопланет (submoons, спутников у спутников, см. Kollmeier и Raymond, 2019; Rosario-Franco и др., 2020). Второй тип объектов, как известно, отсутствует в нашей Солнечной системе, но в других системах их наличие не исключено.

Интерес к экзолунам велик, прежде всего, ввиду высокой актуальности проблемы обитаемости экзопланетных систем. Действительно, на спут-

никах экзопланет могут поддерживаться более подходящие для существования жизни условия, чем на их родительских планетах, часто представляющих собой газовые гиганты, хотя и находящиеся в области потенциальной обитаемости у родительской звезды (Williams и др., 1997; Kaltenegger, 2010; Heller и др., 2014).

Экзолуны могут быть обнаружены из наблюдений транзитов, поскольку наличие спутника у планеты вносит специфические вариации в форму кривой блеска транзита, что касается как интервалов между транзитами, так и длительности транзитов, а также и формы кривой при потемнении родительской звезды во время транзита (см. Kipping (2011), Heller (2014)).

Реальный вероятный кандидат в экзолуны представлен в работе Teachey и Kipping (2018). Посредством анализа наблюдений с ИСЗ HST (Hubble Space Telescope) и использованием метода TTV (“Transit Timing Variations”) они получили свидетельства существования у планеты Kepler-1625b спутника. Планета Kepler-1625b по своим размерам близка к Юпитеру, а ее спутник — к Нептуну (Heller, 2018). По поводу обоснованности обнаружения спутника планеты Kepler-1625b возникла дискуссия (Heller и др., 2019; Teachey и др., 2020), подчеркнувшая сложность проблемы.

При помощи метода TTV Kipping (2020) выявил признаки присутствия экзолун в шести планетных системах; Fox и Wiegert (2021) обнаружили еще восемь систем, чьи планеты имеют признаки наличия спутников.

У спутников экзопланет может быть относительно распространена хаотическая вращательная динамика, поскольку конфигурации планетных систем (и соответственно, их спутниковых подсистем) весьма разнообразны: например, есть планеты в кратных звездных системах; эксцентриситеты и наклонения орбит планет бывают весьма значительными. Отметим, что хаос может иметь место во вращательной динамике коорбитальных спутников (к которым относится, например, ряд спутников в системе Сатурна) на квазикруговых орбитах (Correia, Robutel, 2013), а также у коорбитальных экзопланет со значительными эксцентриситетами орбит (Leleu и др., 2016). В экзопланетных системах на вращательную динамику спутников усложняющее влияние могут оказывать возмущения со стороны дополнительных спутников (Tarnopolski, 2017).

Во многих случаях может быть существенно важным учет релятивистских эффектов. Основываясь на результатах исследований вращательной динамики в релятивистском приближении для ряда спутников Юпитера (Biscani, Carloni, 2015; Пашкевич и др., 2021), можно утверждать, что релятивистские эффекты во вращательной динамике, вероятно, существенны для многих экзолун, ко-

торые будут обнаружены в будущем. В работе Iorio (2021) показано, что из-за релятивистских эффектов наклон оси собственного вращения спутников экзопланет может меняться в больших пределах (10° – 100°) на интервале времени менее миллиона лет. Данный вывод согласуется с результатами, полученными Пашкевичем и др. (2021) для спутников планет Солнечной системы.

Большинство работ, посвященных изучению экзолун, пока затрагивает лишь аспекты их возможной орбитальной динамики и вопросы формирования, поскольку данные задачи непосредственно связаны с проблемой их обнаружения. Однако уже сейчас проблема вращательной динамики и эволюции вращения спутников экзопланет стала актуальной, прежде всего в связи с проблемой обитаемости экзосистем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящем обзоре рассмотрены работы, посвященные исследованиям вращательной динамики и эволюции вращения спутников планет Солнечной системы и потенциально существующих спутников экзопланет. Приведены данные о наблюдаемых вращательных состояниях известных спутников. Рассмотрены основные выводы теоретических исследований долговременной динамической приливной эволюции вращательного движения спутников. Обсуждены основные теоретически возможные и наблюдаемые режимы вращения спутника: синхронное с движением по орбите вращение, быстрое, по сравнению с синхронным, вращение; хаотический режим вращения. Подробно рассмотрены результаты исследования хаотической вращательной динамики седьмого спутника Сатурна — Гипериона. Рассмотрены результаты современных исследований вращательной динамики спутников транснептуновых объектов (включая спутников Плутона) и возможных спутников экзопланет.

Авторы благодарны рецензентам за полезные замечания.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-12-50086. Acknowledgments: The reported study was funded by RFBR, project number 20-12-50086.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алешкина Е.Ю. Захват в синхронный спин-орбитальный резонанс крупных спутников планет // Астрон. вестн. 2009. Т. 43. № 1. С. 75–82. (Aleshkina E. Yu. Synchronous spin-orbital resonance locking of large planetary satellites // Sol. Syst. Res. 2009. V. 43. № 1. P. 71–78.)
- Белецкий В.В. О либрации спутника // Искусственные спутники Земли. М.: Изд-во АН СССР, 1959. Вып. 3. С. 13.

- Белецкий В.В. Движение искусственного спутника относительно центра масс. М.: Наука, 1965. 416 с.
- Белецкий В.В. Регулярные и хаотические движения твердых тел. М.—Ижевск: ИКМ, 2007. 132 с.
- Брюно А.Д. Семейства периодических решений уравнения Белецкого // Космич. исслед. 2002. Т. 40. № 3. С. 295–316.
- Девяткин А.В., Горшанов Д.Л., Гришук А.Н., Мельников А.В., Сидоров М.Ю., Шевченко И.И. Наблюдения и теоретический анализ кривых блеска естественных спутников планет // Астрон. вестн. 2002. Т. 36. № 3. С. 269–281. (Devyatkin A.V., Gorshanov D.L., Gritsuk A.N., Melnikov A.V., Sidorov M.Yu., Shevchenko I.I. Observations and theoretical analysis of lightcurves of natural satellites of planets // Sol. Syst. Res. 2002. V. 36. № 3. P. 248–259.)
- Емельянов Н.В. Динамика естественных спутников планет на основе наблюдений // Астрон. журн. 2018. Т. 95. № 12. С. 873–882.
- Емельянов Н.В. Динамика естественных спутников планет на основе наблюдений. ГАИШ МГУ. Фрязино: Век 2, 2019. 575 с.
- Емельянов Н.В., Уральская В.С. Оценки физических параметров далеких спутников планет // Астрон. вестн. 2011. Т. 45. № 5. С. 387–395. (Emelyanov N.V., Uralskaya V.S. Estimates of the physical parameters of remote planetary satellites // Sol. Syst. Res. 2011. V. 45. № 5. P. 377–385.)
<https://doi.org/10.1134/S0038094611050042>
- Емельянов Н.В., Вашковьяк С.Н., Шереметьев К.Ю. Определение масс спутников планет по взаимным гравитационным возмущениям // Астрон. вестн. 2007. Т. 41. № 3. Р. 223–231. (Emelyanov N.V., Vashkovyayak S.N., Sheremetev K.Yu. Determination of the masses of planetary satellites from their mutual gravitational perturbations // Sol. Syst. Res. 2007. V. 41. № 3. P. 203–210.)
<https://doi.org/10.1134/S0038094607030033>
- Златоустов В.А., Охоцимский Д.Е., Сарычев В.А., Торжеский А.П. Исследование колебаний спутника в плоскости эллиптической орбиты // Космич. исслед. 1964. Т. 2. Вып. 5. С. 657–666.
- Куприянов В.В., Шевченко И.И. О форме и вращательной динамике малых спутников планет // Астрон. вестн. 2006. Т. 40. № 5. С. 428–435. (Kouprianov V.V., Shevchenko I.I. The shapes and rotational dynamics of minor planetary satellites // Sol. Syst. Res. 2006. V. 40. № 5. P. 393–399.)
<https://doi.org/10.1134/S0038094606050042>
- Лихтенберг А., Либман М. Регулярная и стохастическая динамика. М.: Мир, 1984. 528 с.
- Мельников А.В. Бифуркационный режим синхронного резонанса в поступательно-вращательном движении несферических естественных спутников планет // Космич. исслед. 2001. Т. 39. № 1. С. 74–84.
- Мельников А.В. Условия возникновения странных аттракторов во вращательной динамике малых спутников планет // Космич. исслед. 2014. Т. 52. № 6. С. 500–511.
- Мельников А.В. Численные инструменты для анализа вековой динамики экзопланетных систем // Астрон. вестн. 2018. Т. 52. № 5. С. 427–436. (Melnikov A.V. Numerical instruments for the analysis of secular dynamics of exoplanetary systems // Sol. Syst. Res. 2018. V. 52. № 5. P. 417–425.)
<https://doi.org/10.1134/S0320930X18050067>
<https://doi.org/10.1134/S0038094618050064>
- Мельников А.В. Ориентация фигур малых спутников планет при хаотическом вращении // Астрон. вестн. 2020. Т. 54. № 5. С. 458–467. (Melnikov A.V. Orientation of figures of small planetary satellites during chaotic rotation // Sol. Syst. Res. 2020. V. 54. № 5. P. 432–441.)
<https://doi.org/10.31857/S0320930X20050060>
<https://doi.org/10.1134/S0038094620050068>
- Мельников А.В., Шевченко И.И. Об устойчивости вращательного движения несферических естественных спутников относительно наклона оси вращения // Астрон. вестн. 1998. Т. 32. № 6. С. 548–559. (Melnikov A.V., Shevchenko I.I. The stability of the rotational motion of nonspherical natural satellites with respect to tilting the axis of rotation // Sol. Syst. Res. 1998. V. 32. № 6. P. 480–490.)
- Мельников А.В., Шевченко И.И. Об устойчивости вращения несферических естественных спутников в синхронном резонансе // Астрон. вестн. 2000. Т. 34. № 5. С. 478–486. (Melnikov A.V., Shevchenko I.I. On the stability of the rotational motion of nonspherical natural satellites in a synchronous resonance // Sol. Syst. Res. 2000. V. 34. № 5. P. 434–442.)
- Мельников А.В., Шевченко И.И. Необычные режимы вращения малых спутников планет // Астрон. вестн. 2007. Т. 41. № 6. С. 521–530. (Melnikov A.V., Shevchenko I.I. Unusual rotation modes of minor planetary satellites // Sol. Syst. Res. 2007. V. 41. № 6. P. 483–491.)
<https://doi.org/10.1134/S0038094607060032>
- Морбиделли А. Современная небесная механика. Аспекты динамики Солнечной системы. М.—Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2014. 432 с.
- Мюррей К., Дермотт С. Динамика Солнечной системы. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. 588 с.
- Оседец В.И. Мультипликативная эргодическая теорема. Характеристические показатели Ляпунова динамических систем // Тр. Московского математического общества. 1968. Т. 19. С. 179–210.
- Пашкевич В.В., Вершков А.Н. Учет релятивистских эффектов во вращении Марса и его спутников // Астрон. вестн. 2019. Т. 53. № 6. С. 423–427. (Pashkevich V.V., Vershkov A.N. Consideration of relativistic effects in the rotation of Mars and its satellites // Sol. Syst. Res. 2019. V. 53. № 6. P. 431–435.)
<https://doi.org/10.1134/S0320930X19060069>
<https://doi.org/10.1134/S0038094619060066>
- Пашкевич В.В., Вершков А.Н., Мельников А.В. Динамика вращения внутренних спутников Юпитера // Астрон. вестн. 2021. Т. 55. № 1. С. 50–64. (Pashkevich V.V., Vershkov A.N., Melnikov A.V. Rotational dynamics of the inner satellites of Jupiter // Sol. Syst. Res. 2021. V. 55. № 1. P. 47–60.)
<https://doi.org/10.31857/S0320930X20330038>
<https://doi.org/10.1134/S0038094620330035>
- Петров А.Л., Сазонов В.В., Сарычев В.А. Устойчивость периодических колебаний спутника, близкого к осесимметричному, в плоскости эллиптической

- орбиты // Механика твердого тела. 1983. № 4. С. 41–50.
- Сарычев В.А., Сазонов В.В., Златоустов В.А. Периодические колебания спутника в плоскости эллиптической орбиты // Космич. исслед. 1977. Т. 15. Вып. 6. С. 809–834.
- Торжевский А.П. Периодические решения уравнения плоских колебаний спутника на эллиптической орбите // Космич. исслед. 1964. Т. 2. Вып. 5. С. 667–678.
- Шевченко И.И. О максимальных показателях Ляпунова хаотического вращения естественных спутников планет // Космич. исслед. 2002. Т. 40. № 3. С. 317–326.
- Alexander S.G., Hesselbrock A.J., Wu T., Marshall M.D., Abel N.P. On the Rotational behavior of Nereid // Astron. J. 2011. V. 142. № 1. id. 1.
- Andersson L. Photometry of Jupiter VI and Phoebe (Saturn IX) // Bull. Am. Astron. Soc. 1972. V. 4. P. 313.
- Arakawa S., Hyodo R., Genda H. Early formation of moons around large trans-Neptunian objects via giant impacts // Nature Astron. 2019. V. 3. P. 802–807.
- Archinal B.A., Acton C.H., A'Hearn M.F., Conrad A., Consolmagno G.J., Duxbury T., Hestroffer D., Hilton J.L., Kirk R.L., Klioner S.A., McCarthy D., Meech K., Oberst J., Ping J., Seidelmann P.K., Tholen D.J., Thomas P.C., Williams I.P. Report of the IAU Working Group on Cartographic Coordinates and Rotational Elements: 2015 // Celest. Mech. and Dyn. Astron. 2018. V. 130. № 22. P. 1–46.
- Batygin K., Morbidelli A. Spin-Spin Coupling in the Solar System // Astrophys. J. 2015. V. 810. № 2. id. 110.
- Bauer J.M., Buratti B.J., Simonelli D.P., Owen W.M., Jr. Recovering the rotational light curve of Phoebe // Astrophys. J. 2004. V. 610. P. L57–L60.
- Benettin G., Galgani L., Strelcyn J.-M. Kolmogorov entropy and numerical experiments // Phys. Rev. A. 1976. V. 14. № 6. P. 2338–2345.
- Benettin G., Galgani L., Giorgilli A., Strelcyn J.-M. Lyapunov characteristic exponents for smooth dynamical systems and for Hamiltonian systems – A method for computing all of them. I – Theory. II – Numerical application // Meccanica. 1980. V. 15. P. 9–30.
- Biscani F., Carloni S. A first-order secular theory for the post-Newtonian two-body problem with spin. II. A complete solution for the angular coordinates in the restricted case // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. 2015. V. 446. P. 3062–3077.
- Black G.J., Nicholson P.D., Thomas P.C. Hyperion: rotational dynamics // Icarus. 1995. V. 117. № 1. P. 149–161.
- von Bremen H.F., Udvardi F.E., Proskurowski W. An efficient QR based method for the computation of Lyapunov exponents // Physica D. 1997. V. 101. P. 1–16.
- Brown M.E., van Dam M.A., Bouchez A.H., Le Mignant D., Campbell R.D., Chin J.C.Y., Conrad A., Hartman S.K., Johansson E.M., Lafon R.E., Rabinowitz D.L., Stomski P.J. Jr., Summers D.M., Trujillo C.A., Wizinowich P.L. Satellites of the largest Kuiper Belt objects // Astrophys. J. 2006. V. 639. № 1. P. L43–L46.
- Brown M.E., Butler B.J. Medium-sized satellites of large Kuiper Belt objects // Astron. J. 2018. V. 156. № 4. id. 164.
- Bond W.C. Discovery of a new satellite of Saturn // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. 1848. V. 9. P. 1.
- Borderies N., Yoder C.F. Phobos' gravity field and its influence on its orbit and physical librations // Astron. and Astrophys. 1990. V. 233. P. 235–251.
- Castillo-Rogez J.C., Matson D.L., Sotin C., Johnson T.V., Lunine J.I., Thomas P.C. Iapetus' geophysics: Rotation rate, shape, and equatorial ridge // Icarus. 2007. V. 190. P. 179–202.
- Castillo-Rogez J.C., Efroimsky M., Lainey V. The tidal history of Iapetus: Spin dynamics in the light of a refined dissipation model // J. Geophys. Res. 2011. V. 116. id. E09008.
- Celletti A., Froeschlé C., Lega E. Dynamics of the conservative and dissipative spin-orbit problem // Planet. and Space Sci. 2007. V. 55. P. 889–899.
- Celletti A., MacKay R. Regions of nonexistence of invariant tori for spin-orbit models // Chaos. 2007. V. 17. id. 043119.
- Celletti A., Chierchia L. Measures of basins of attraction in spin-orbit dynamics // Celes. Mech. and Dyn. Astron. 2008. V. 101. № 1–2. P. 159–170.
- Chirikov B.V. A universal instability of many-dimensional oscillator systems // Phys. Reports. 1979. V. 52. № 5. P. 263–379.
- Colombo G. Cassini's second and third laws // Astron. J. 1966. V. 71. P. 891–896.
- Comstock R.L., Bills B.G. A Solar system survey of forced librations in longitude // J. Geophys. Res. 2003. V. 108. № E9. id. 5100.
- Cottureau L., Aleshkina E., Souchay J. A precise modeling of Phoebe's rotation // Astron. and Astrophys. 2010. V. 523. id. A87.
- Coyette A., Baland R.-M., Van Hoolst T. Variations in rotation rate and polar motion of a non-hydrostatic Titan // Icarus. 2018. V. 307. P. 83–105.
- Correia A.C.M., Robutel P. Spin-orbit coupling and chaotic rotation for coorbital bodies in quasi-circular orbits // Astrophys. J. 2013. V. 779. № 1. id. 20.
- Correia A.C.M., Leleu A., Rambaux N., Robutel P. Spin-orbit coupling and chaotic rotation for circumbinary bodies. Application to the small satellites of the Pluto-Charon system // Astron. and Astrophys. 2015. V. 580. id. L14.
- Čuk M., Ragozzine D., Nesvorný D. On the dynamics and origin of Haumea's moons // Astron. J. 2013. V. 146. № 4. id. 89.
- Darwin G.H. A tidal theory of the evolution of satellites // The Observatory. 1879. V. 3. P. 79–84.
- Darwin G.H. On the secular changes in the elements of the orbit of a satellite revolving about a planet distorted by tides // Nature. 1880. V. 21. P. 235–237.
- De Sitter W. On Einstein's theory of gravitation and its astronomical consequences // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. 1916. № 77. P. 155–184.
- Degewij J., Andersson L.E., Zellner B. Photometric properties of outer planetary satellites // Icarus. 1980. V. 44. № 2. P. 520–540.
- Denk T., Mottola S. Studies of irregular satellites: I. Light curves and rotation periods of 25 Saturnian moons from Cassini observations // Icarus. 2019. V. 322. P. 80–102.

- Dobrovolskis A.R.* Chaotic rotation of Nereid? // *Icarus*. 1995. V. 118. P. 181–198.
- Emelyanov N.V.* The mass of Himalia from the perturbations on other satellites // *Astron. and Astrophys.* 2005. V. 438. P. L33–L36.
- Efroimsky M., Williams J.G.* Tidal torques: a critical review of some techniques // *Celest. Mech. and Dyn. Astron.* 2009. V. 104. P. 257–289.
- Farkas-Takács A., Kiss Cs., Pál A., Molnár L., Szabó Gy.M., Hanyecz O., Sárneczky K., Szabó R., Marton G., Mommert M., Szakáts R., Müller T., Kiss L.L.* Properties of the irregular satellite system around Uranus inferred from K2, Herschel, and Spitzer observations // *Astron. J.* 2017. V. 154. № 3. id. 119.
- Ferraz-Mello S., Rodríguez A., Hussmann H.* Tidal friction in close-in satellites and exoplanets: The Darwin theory re-visited // *Celest. Mech. and Dyn. Astron.* 2008. V. 101. № 1–2. P. 171–201.
- Fox C., Wiegert P.* Exomoon candidates from transit timing variations: eight Kepler systems with TTVs explainable by photometrically unseen exomoons // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2021. V. 501. P. 2378–2393.
- Fukushima T.* Geodesic nutation // *Astron. and Astrophys.* 1991. V. 244. № 1. P. L11–L12.
- Gaskell R.W.* Gaskell Phoebe Shape Model V2.0 // *NASA Planetary Data System*. 2013. id. CO-SA-ISSNA-5-PHOEBESHAPE-V2.0.
- Gladman B., Quinn D.D., Nicholson P., Rand R.* Synchronous locking of tidally evolving satellites // *Icarus*. 1996. V. 122. № 1. P. 166–192.
- Grav T., Holman M.J., Kavelaars J.J.* The short rotation period of Nereid // *Astrophys. J.* 2003. V. 591. P. L71–L74.
- Grishin E., Malamud U., Perets H.B., Wandel O., Schäfer C.M.* The wide-binary origin of (2014) MU₆₉-like Kuiper belt contact binaries // *Nature*. 2020. V. 580. P. 463–466.
- Goldreich P.* Final spin states of planets and satellites // *Astron. J.* 1966. V. 71. № 1. P. 1–7.
- Goldreich P., Peale S.* Spin-orbit coupling in the Solar system // *Astron. J.* 1966. V. 71. № 6. P. 425–438.
- Gomes-Júnior A.R., Assafin M., Braga-Ribas F., Benedetti-Rossi G., Morgado B.E., Camargo J.I.B., Vieira-Martins R., Desmars J., Sicardy B., Barry T., Campbell-White J., Fernández-Lajús E., Giles D., Hanna W., Hayamizu T., Hirose T., De Horta A., Horvat R., Hosoi K., Jehin E., Kerr S., Machado D.I., Mammana L.A., Maybour D., Owada M., Rahvar S., Snodgrass C.* The first observed stellar occultations by the irregular satellite Phoebe (Saturn IX) and improved rotational period // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2020. V. 492. № 1. P. 770–781.
- Iorio L.* The effect of post-Newtonian spin precessions on the evolution of exomoons' obliquity // *arXiv:2012.14245*. 2021.
- Jewitt D., Haghighipour N.* Irregular satellites of the planets: products of capture in the early Solar system // *Ann. Rev. Astron. and Astrophys.* 2007. V. 45. P. 261–295.
- Harbison R.A., Thomas P.C., Nicholson P.C.* Rotational modeling of Hyperion // *Celest. Mech. and Dyn. Astron.* 2011. V. 110. P. 1–16.
- Heller R., Williams D., Kipping D., Limbach M.A., Turner E., Greenberg R., Sasaki T., Bolmont É., Grasset O., Lewis K., Barnes R., Zuluaga J.I.* Formation, habitability, and detection of extrasolar moons // *Astrobiology*. 2014. V. 14. № 9. P. 798–835.
- Heller R.* Detecting extrasolar moons akin to Solar System satellites with an orbital sampling effect // *Astrophys. J.* 2014. V. 787. id. 14.
- Heller R.* The nature of the giant exomoon candidate Kepler-1625 b-i // *Astron. and Astrophys.* 2018. V. 610. id. A39.
- Heller R., Rodenbeck K., Bruno G.* An alternative interpretation of the exomoon candidate signal in the combined Kepler and Hubble data of Kepler-1625 // *Astron. and Astrophys.* 2019. V. 624. id. A95.
- Hesselbrock A.J., Alexander S.G., Harp T.W., Abel N.P.* An investigation of the relationship between shape and rotation to explain the light curve of Nereid // *Astron. J.* 2013. V. 145. № 6. id. 144.
- Kaltenegger L.* Characterizing habitable exomoons // *Astrophys. J.* 2010. V. 712. № 2. P. L125–L130.
- Kaula W.M.* Tidal dissipation by solid friction and the resulting orbital evolution // *Rev. Geophys. and Space Phys.* 1964. V. 2. № 4. P. 661–685.
- Khan A., Sharma R., Saha L.M.* Chaotic motion of an ellipsoidal satellite. I // *Astron. J.* 1998. V. 116. № 4. P. 2058–2066.
- Kipping D.M.* LUNA: an algorithm for generating dynamic planet-moon transits // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2011. V. 416. P. 689–709.
- Kipping D.M.* An independent analysis of the six recently claimed exomoon candidates // *Astrophys. J. Lett.* 2020. V. 900. № 2. id. L44.
- Kipping D.M., Bakos G.Á., Buchhave L.A., Nesvorný D., Schmitt A.* The hunt for exomoons with Kepler (HEK). I. Description of a new observational project // *Astrophys. J.* 2012. V. 750. id. 115.
- Kipping D.M., Nesvorný D., Buchhave L.A., Hartman J., Bakos G.Á., Schmitt A.R.* The hunt for exomoons with Kepler (HEK). IV. A search for moons around eight M dwarfs // *Astrophys. J.* 2014. V. 784. № 1. id. 28.
- Kiss C., Pál A., Farkas-Takács A.I., Szabó G.M., Szabó R., Kiss L.L., Molnár L., Sárneczky K., Müller T.G., Mommert M., Stansberry J.* Nereid from space: rotation, size and shape analysis from K2, Herschel and Spitzer observations // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2016. V. 457. № 3. P. 2908–2917.
- Kiss C., Marton G., Farkas-Takács A., Stansberry J., Müller T., Vinkó J., Balog Z., Ortiz J.-L., Pál A.* Discovery of a satellite of the large trans-Neptunian object (225088) 2007 OR₁₀ // *Astrophys. J. Lett.* 2017. V. 838. № 1. id. L1.
- Klavetter J.J.* Rotation of Hyperion. 1. Observations // *Astron. J.* 1989a. V. 97. № 2. P. 570–579.
- Klavetter J.J.* Rotation of Hyperion. 2. Dynamics // *Astron. J.* 1989b. V. 98. № 5. P. 1855–1874.
- Kollmeier J.A., Raymond S.N.* Can moons have moons? // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2019. V. 483. № 1. P. L80–L84.
- Kouprianov V.V., Shevchenko I.I.* Rotational dynamics of planetary satellites: A survey of regular and chaotic behavior // *Icarus*. 2005. V. 176. P. 224–234.
- Kruse S., Klavetter J.J., Dunham E.W.* Photometry of Phoebe // *Icarus*. 1986. V. 68. P. 167.

- Lacerda P., Jewitt D.C.* Densities of Solar System objects from their rotational light curves // *Astron. J.* 2007. V. 133. № 4. P. 1393–1408.
- Lainey V., Noyelles B., Cooper N., Rambaux N., Murray C., Park R.S.* Interior properties of the inner Saturnian moons from space astrometry data // *Icarus.* 2019. V. 326. P. 48–62.
- Lassell W.* Discovery of a new satellite of Saturn // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 1848. V. 8. № 9. P. 195–197.
- Leleu A., Robutel P., Correia A.C.M.* On the rotation of co-orbital bodies in eccentric orbits // *Celest. Mech. and Dyn. Astron.* 2016. V. 125. № 2. P. 223–246.
- Lorenz R.D., Stiles B.W., Kirk R.L., Allison M.D., Persi del Marmo P., Iess L., Lunine J.I., Ostro S.J., Hensley S.* Titan's rotation reveals an internal ocean and changing zonal winds // *Science.* 2008. V. 319. P. 1649–1651.
- Luu J.* CCD photometry and spectroscopy of the outer Jovian satellites // *Astron. J.* 1991. V. 102. P. 1213–1225.
- Ma C., Arias E.F., Eubanks T.M., Fey A.L., Gontier A.-M., Jacobs C.S., Sovers O.J., Archinal B.A., Charlot P.* The International Celestial Reference Frame as realized by very long baseline interferometry // *Astron. J.* 1998. V. 116. P. 516–546.
- MacDonald G.J.F.* Tidal friction // *Rev. Geophys. and Space Phys.* 1964. V. 2. P. 467–541.
- Maffione N.P., Darriba L.A., Cincotta P. M., Giordano C.M.* Chaos detection tools: application to a self-consistent triaxial model // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2013. V. 429. № 3. P. 2700–2717.
- Makarov V.V., Efroimsky M.* No pseudosynchronous rotation for terrestrial planets and moons // *Astrophys. J.* 2013. V. 764. id. 27.
- Makarov V.V.* Equilibrium rotation of semiliquid exoplanets and satellites // *Astrophys. J.* 2015. V. 810. id. 12.
- Makarov V.V., Frouard J., Dorland B.* Forced libration of tidally synchronized planets and moons // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2016. V. 456. № 1. P. 665–671.
- Maris M., Carraro G., Cremonese G., Fulle M.* Multicolor photometry of the Uranus irregular satellites Sycorax and Caliban // *Astron. J.* 2001. V. 121. № 5. P. 2800–2803.
- Maris M., Carraro G., Parisi M.G.* Light curves and colours of the faint Uranian irregular satellites Sycorax, Prospero, Stephano, Setebos, and Trinculo // *Astron. and Astrophys.* 2007. V. 472. P. 311–319.
- Masiero J., Jedicke R., Ďurech J., Gwyn S., Denneau L., Larsen J.* The thousand asteroid light curve survey // *Icarus.* 2009. V. 204. № 1. P. 145–171.
- Melnikov A.V.* Modelling of lightcurves of minor planetary satellites // *Тр. ИПА РАН.* 2002. Вып. 8. С. 131–132.
- Melnikov A.V., Shevchenko I.I.* On the rotational dynamics of Prometheus and Pandora // *Celest. Mech. and Dyn. Astron.* 2008. V. 101. № 1–2. P. 31–47.
- Melnikov A.V., Shevchenko I.I.* The rotation states predominant among the planetary satellites // *Icarus.* 2010. V. 209. P. 786–794.
- Morrison S.J., Thomas P.C., Tiscareno M.S., Burns J.A., Veverka J.* Grooves on small saturnian satellites and other objects: Characteristics and significance // *Icarus.* 2009. V. 204. P. 262–270.
- Nicholson P.D., Ćuk M., Sheppard S.S., Nesvorný D., Johnson T.V.* Irregular satellites of the giant planets // *The Solar System beyond Neptune* / Eds Barucci M.A., Boehnhardt H., Cruikshank D.P., Morbidelli A. Tucson: Univ. Arizona Press, 2008. P. 411–424.
- Noyelles B.* Titan's rotational state. The effects of a forced “free” resonant wobble // *Celest. Mech. and Dyn. Astron.* 2008. V. 101. № 1–2. P. 13–30.
- Noyelles B.* Expression of Cassini's third law for Callisto, and theory of its rotation // *Icarus.* 2009. V. 202. № 1. P. 225–239.
- Noyelles B.* Theory of the rotation of Janus and Epimetheus // *Icarus.* 2010. V. 207. № 2. P. 887–902.
- Noyelles B.* Behavior of nearby synchronous rotations of a Poincaré–Hough satellite at low eccentricity // *Celest. Mech. and Dyn. Astron.* 2012. V. 112. № 4. P. 353–383.
- Noyelles B.* The rotation of Io predicted by the Poincaré–Hough model // *Icarus.* 2013. V. 223. № 1. P. 621–624.
- Noyelles B.* Interpreting the librations of a synchronous satellite – How their phase assesses Mimas' global ocean // *Icarus.* 2017. V. 282. P. 276–289.
- Noyelles B.* Rotation of a synchronous viscoelastic shell // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2018. V. 474. № 4. P. 5614–5644.
- Noyelles B., Lemaître A., Vienne A.* Titan's rotation. A 3-dimensional theory // *Astron. and Astrophys.* 2008. V. 478. № 3. P. 959–970.
- Noyelles B., Karatekin Ö., Rambaux N.* The rotation of Mimas // *Astron. and Astrophys.* 2011. V. 536. id. A61.
- Parker A.H., Buie M.W., Grundy W.M., Noll K.S.* Discovery of a Makemakean moon // *Astrophys. J. Lett.* 2016. V. 825. № 1. id. L9.
- Pilcher F., Mottola S., Denk T.* Photometric lightcurve and rotation period of Himalia (Jupiter VI) // *Icarus.* 2012. V. 219. № 2. P. 741–742.
- Peale S.J.* Generalized Cassini's laws // *Astrophys. J.* 1969. V. 74. P. 483–489.
- Peale S.J.* Rotation histories of the natural satellites // *Planetary satellites* / Ed. Burns J.A. Tucson: Univ. Arizona Press, 1977. P. 87–112.
- Peale S.J.* Origin and evolution of the natural satellites // *Ann. Rev. Astron. and Astrophys.* 1999. V. 37. P. 533–602.
- Peale S., Gold T.* Rotation of the planet Mercury // *Nature.* 1965. V. 206. P. 1240–1241.
- Quillen A.C., Nichols-Fleming F., Chen Y.-Y., Noyelles B.* Obliquity evolution of the minor satellites of Pluto and Charon // *Icarus.* 2017. V. 293. P. 94–113.
- Quillen A.C., Lane M., Nakajima M., Wright E.* Excitation of tumbling in Phobos and Deimos // *Icarus.* 2020. V. 340. id. 113641.
- Rambaux N., Castillo-Rogez J.C., Le Maistre S., Rosenblatt P.* Rotational motion of Phobos // *Astron. and Astrophys.* 2012. V. 548. id. A14.
- Rosario-Franco M., Quarles B., Musielak Z.E., Cuntz M.* Orbital stability of exomoons and submoons with applications to Kepler 1625b-I // *Astron. J.* 2020. V. 159. № 6. id. 260.
- Rossignoli N.L., Di Sisto R.P., Zanardi M., Dugaro A.* Cratering and age of the small Saturnian satellites // *Astron. and Astrophys.* 2019. V. 627. id. A12.

- Schaefer B.E., Tourtellotte S.W., Rabinowitz D.L., Schaefer M.W.* Nereid: Light curve for 1999–2006 and a scenario for its variations // *Icarus*. 2008. V. 196. № 1. P. 225–240.
- Schaefer B.E., Schaefer M.W.* Nereid has complex large-amplitude photometric variability // *Icarus*. 2000. V. 146. № 2. P. 541–555.
- Seligman D., Batygin K.* The onset of chaos in permanently deformed binaries from spin-orbit and spin-spin coupling // *Astrophys. J.* 2021. V. 913. № 1. id. 31.
- Sheppard S.S.* Outer irregular satellites of the planets and their relationship with asteroids, comets and Kuiper Belt objects // *Proc. IAU Symp.* No. 229 “Asteroids, Comets, Meteors” / Eds Lazzaro D., Ferraz-Mello S., Fernández J.A. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2006. P. 319–334.
- Sheppard S.S., Fernandez Y.R., Moullet A.* The albedos, sizes, colors, and satellites of dwarf planets compared with newly measured dwarf planet 2013 FY27 // *Astron. J.* 2018. V. 156. id. 270
- Sheppard S.S., Jewitt D.C.* An abundant population of small irregular satellites around Jupiter // *Nature*. 2003. V. 423. P. 261.
- Sheppard S.S., Jewitt D., Kleya J.* An ultra-deep survey for irregular satellites of Uranus: Limits to completeness // *Astron. J.* 2005. V. 129. P. 518–525.
- Sheppard S.S., Jewitt D., Kleya J.* A survey for “normal” irregular satellites around Neptune: Limits to completeness // *Astron. J.* 2006. V. 132. P. 171.
- Shevchenko I.I.* The separatrix algorithmic map: Application to the spin-orbit motion // *Celest. Mech. and Dyn. Astron.* 1999. V. 73. P. 259–268.
- Shevchenko I.I.* Dynamical Chaos in Planetary Systems. Springer Nature, 2020. 401 p.
- Shevchenko I.I., Kouprianov V.V.* On the chaotic rotation of planetary satellites: the Lyapunov spectra and the maximum Lyapunov exponents // *Astron. and Astrophys.* 2002. V. 394. P. 663–674.
- Showalter M.R., Hamilton D.P.* Resonant interactions and chaotic rotation of Pluto’s small moons // *Nature*. 2015. V. 522. № 7554. P. 45–49.
- Seligman D., Batygin K.* The onset of chaos in permanently deformed binaries from spin-orbit and spin-spin coupling // *Astrophys. J.* 2021. V. 913. № 1. id. 31.
- Smith B.A., Soderblom L.A., Banfield D., Barnet C., Basilevsky A.T., Beebe R.F., Bollinger K., Boyce J.M., Brahic A., Briggs G.A., Brown R.H., Chyba C., Collins S.A., Colvin T., Cook A.F., Crisp D., Croft S.K., Cruikshank D., Cuzzi J.N., Danielson G.E., Davies M.E., de Jong E., Dones L., Godfrey D., Goguen J., Grenier I., Haemmerle V.R., Hammel H., Hansen C.J., Helfenstein C.P., Howell C., Hunt G.E., Ingersoll A.P., Johnson T.V., Kargel J., Kirk R., Kuehn D.I., Limaye S., Masursky H., McEwen A., Morrison D., Owen T., Owen W., Pollack J.B., Porco C.C., Rages K., Rogers P., Rudy D., Sagan C., Schwartz J., Shoemaker E.M., Showalter M., Sicardy B., Simonelli D., Spencer J., Sromovsky L.A., Stoker C., Strom R.G., Suomi V.E., Synnott S.P., Terrile R.J., Thomas P., Thompson W.R., Verbiscer A., Veverka J.* Voyager 2 at Neptune: imaging science results // *Science*. 1989. V. 246. № 4936. P. 1422–1449.
- Sucerquia M., Alvarado-Montes J.A., Zuluaga J.I., Cuervo N., Giuppone C.* Ploonets: formation, evolution, and detectability of tidally detached exomoons // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2018. 2019. V. 489. P. 2313–2322.
- Tajeddine R., Rambaux N., Lainey V., Charnoz S., Richard A., Rivoldini A., Noyelles B.* Constraints on Mimas’ interior from Cassini ISS libration measurements // *Science*. 2014. V. 346. № 6207. P. 322–324.
- Tarnopolski M.* Nonlinear time-series analysis of Hyperion’s lightcurves // *Astrophys. Space Sci.* 2015. V. 357. id. 160.
- Tarnopolski M.* Influence of a second satellite on the rotational dynamics of an oblate moon // *Celest. Mech. and Dyn. Astron.* 2017. V. 127. P. 121–138.
- Teachey A., Kipping D.M.* Evidence for a large exomoon orbiting Kepler-1625b // *Sci. Adv.* 2018. V. 4. id. eaav1784.
- Teachey A., Kipping D., Burke C.J., Angus R., Howard A.W.* Loose ends for the exomoon candidate host Kepler-1625b // *Astron. J.* 2020. V. 159. № 4. id. 142.
- Thirouin A., Noll K.S., Ortiz J.L., Morales N.* Rotational properties of the binary and non-binary populations in the trans-Neptunian belt // *Astron. and Astrophys.* 2014. V. 569. id. A3.
- Thirouin A., Sheppard S.S., Noll K.S., Moskovitz N.A., Ortiz J.L., Doressoundiram A.* Rotational properties of the Haumea Family members and candidates: Short-term variability // *Astron. J.* 2016. V. 151. № 6. id. 148.
- Thomas P.C.* Sizes, shapes, and derived properties of the Saturnian satellites after the Cassini nominal mission // *Icarus*. 2010. V. 208. P. 395–401.
- Thomas P.C., Armstrong J.W., Asmar S.W., Burns J.A., Denk T., Giese B., Helfenstein P., Iess L., Johnson T.V., McEwen A., Nicolaisen L., Porco C., Rappaport N., Richardson J., Somenzi L., Tortora P., Turtle E.P., Veverka J.* Hyperion’s sponge-like appearance // *Nature*. 2007. V. 448. № 7149. P. 50–56.
- Thomas P.C., Black G.J., Nicholson P.D.* Hyperion: rotation, shape and geology from Voyager images // *Icarus*. 1995. V. 117. № 1. P. 128–148.
- Thomas P.C., Burns J.A., Rossier L., Simonelli D., Veverka J., Chapman C.R., Klaasen K., Johnson T.V., Belton M.J.S., Galileo Solid State Imaging Team.* The small inner satellites of Jupiter // *Icarus*. 1998. V. 135. P. 360–371.
- Thomas P., Helfenstein P.* The small inner satellites of Saturn: Shapes, structures and some implications // *Icarus*. 2020. V. 344. id. 113355.
- Thomas P., Veverka J.* Hyperion – analysis of Voyager observations // *Icarus*. 1985. V. 64. № 12. P. 414.
- Thomas P., Veverka J., Helfenstein P.* Voyager observations of Nereid // *J. Geophys. Res.* 1991. V. 96. P. 19253–19259.
- Thomas P., Veverka J., Morrison D., Davies M., Johnson T.V.* Phoebe – Voyager 2 observations // *J. Geophys. Res.* 1983. V. 88. P. 8736.
- Thomas P., Veverka J., Wenkert D., Danielson G.E., Davies M.E.* Hyperion: 13-day rotation from Voyager data // *Nature*. 1984. V. 307. № 5953. P. 716–717.
- Tiscareno M.S., Thomas P.C., Burns J.A.* The rotation of Janus and Epimetheus // *Icarus*. 2009. V. 204. P. 254–261.
- Van Hoolst T., Baland R.-M., Trinh A.* On the librations and tides of large icy satellites // *Icarus*. 2013. V. 226. № 1. P. 299–315.

- Veverka J., Duxbury T.C.* Viking observations of Phobos and Deimos – Preliminary results // *J. Geophys. Res.* 1977. V. 82. P. 4213–4223.
- Williams D.M., Kasting J.F., Wade R.A.* Habitable moons around extrasolar giant planets // *Nature*. 1997. V. 385. № 6613. P. 234–236.
- Weaver H.A., Buie M.W., Buratti B.J., Grundy W.M., Lauer T.R., Olkin C.B., Parker A.H., Porter S.B., Showalter M.R., Spencer J.R., Stern S.A., Verbiscer A.J., McKinnon W.B., Moore J.M., Robbins S.J., Schenk P., Singer K.N., Barnouin O.S., Cheng A.F., Ernst C.M., Lisse C.M., Jennings D.E., Lunsford A.W., Reuter D.C., Hamilton D.P., Kaufmann D.E., Ennico K., Young L.A., Beyer R.A., Binzel R.P., Bray V.J., Chaikin A.L., Cook J.C., Cruikshank D.P., Dalle Ore C.M., Earle A.M., Gladstone G.R., Howett C.J.A., Linscott I.R., Nimmo F., Parker J.Wm., Philippe S., Protopapa S., Reitsema H.J., Schmitt B., Stryk T., Summers M.E., Tsang C.C.C., Throop H.H.B., White O.L., Zangari A.M.* The small satellites of Pluto as observed by New Horizons // *Science*. 2016. V. 351. № 6279. id. aae0030.
- Wisdom J.* Rotation dynamics of irregularly shaped natural satellites // *Astron. J.* 1987. V. 94. № 5. P. 1350–1360.
- Wisdom J., Peale S.J., Mignard F.* The chaotic rotation of Hyperion // *Icarus*. 1984. V. 58. № 2. P. 137–152.