

Н.В.Емельянов

**ДИНАМИКА ЕСТЕСТВЕННЫХ СПУТНИКОВ ПЛАНЕТ
НА ОСНОВЕ НАБЛЮДЕНИЙ**

ГАИШ МГУ - 2019

ФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ СПУТНИКОВ ПЛАНЕТ

Резюме

Физические параметры спутников планет определяют непосредственно, если это возможно, например, при наблюдениях с космических аппаратов (КА) с помощью оптических и радиотехнических средств измерений. Это довольно дорогостоящий путь. Здесь мы рассмотрим несколько других способов. Светоотражательные свойства поверхностей спутников определяются некоторыми физическими параметрами, например, альбедо. Для определения параметров выполняют моделирование этих свойств по результатам наземных фотометрических наблюдений. В данной главе мы рассмотрим, как это делается.

Измерение звездных величин спутников не дает нам точного представления ни о размерах, ни о массах этих загадочных тел. Однако, принимая смелые гипотезы об альбедо поверхности и о плотности вещества спутников, можно давать оценки их рамеров и масс. Из-за приближенности принимаемых гипотез можно сильно ошибиться. В разных справочных источниках информации часто именно такие данные приводятся за неимением более достоверных. Определение физических параметров можно делать косвенно, по проявлениям физических свойств спутников в их движении. Пример таких действий рассмотрен в конце этой главы.

Уаакжем здесь еще, что значения некоторых физических параметров естественных спутников планет собраны и приводятся в Приложении 7. Данные обязательно снабжаются ссылками на источники.

Совершенно особый случай детектирования вулканов на спутнике Юпитера Ио по фотометрии спутника во время его покрытий и затмений другим спутником описан кратко в следующем здесь специальном разделе.

11.1. Введение

Существует несколько источников знания физических параметров спутников планет. До начала космических миссий к другим планетам исследования велись с помощью наземных наблюдений. Наблюдения с помощью космических аппаратов (КА) дают огромное количество новой информации о физических свойствах спутников. Для этого на борту устанавливают оптические и радиотехнические средства измерений. Наземные определения положения КА выполняются с очень высокой точностью. Это позволяет определять массы спутников по их гравитационному влиянию на движение КА. Каждая новая космическая миссия дает новую версию физических параметров спутников. Недостатком таких исследований является кратковременность измерений с помощью КА. Однако некоторые данные могут быть получены только путем долговременных систематических измерений. В противоположность кратковременным измерениям с борта КА наземные наблюдения могут проводиться постоянно.

Существуют два принципиально разных способа получения данных о физических свойствах спутников. Первый — непосредственное измерение физических параметров. Так измеряют, например, яркость или звездную величину объекта. Фотометрия с использованием различных фильтров и спектральные измерения дают информацию о свойствах вещества поверхности. Другой способ определения физических параметров — косвенный, по проявлениям физических свойств спутников в их движении. Астрометрические наблюдения одного спутника позволяют определять массу другого, который влияет на движение своим гравитационным притяжением. Практически поступают так: при определении параметров движения по наблюдениям в число уточняемых параметров включают массы спутников. Необходимые для этого уравнения приводятся в Главе 6 настоящей книги. Заметим, что фактически из-за очень малых масс спутников проявление их взаимного притяжения в результатах наблюдений находится на пределе точности наблюдений.

Единственный удачный случай определения массы одного спутника по астрометрическим наблюдениям другого описан здесь ниже в специальном разделе.

Определение движения спутников по астрометрическим наблюдениям позволяет получать также физические параметры планеты: ее массу, параметры ее гравитационного поля. Это также делается путем включения искомым параметров в число уточняемых. При этом необходим учет всех существенных возмущающих факторов, чтобы влияние неучтенного возмущения не привело к искажениям в определении искомым параметров. По астрометрическим наблюдениям спутников можно определять не только параметры гравитационного поля планеты, но и параметры, характеризующие вязкоупругие свойства тел планеты и спутника. Необходимые для этого уравнения приводятся в конце Главы 3.

Светоотражательные свойства поверхностей спутников также относятся к физическим параметрам. Моделирование этих свойств по результатам фотометрических наблюдений — сложная задача. Параметры светоотражательных свойств некоторых спутников приводятся в Главе 7, где описан процесс, в котором светоотражательные свойства используются.

Физические параметры спутников планет в рамках данной книги являются справочной информацией. Эти данные должны постоянно обновляться по мере появления новых сведений. В Приложении 7 дается некоторая текущая версия параметров. Все значения снабжены ссылками на источники информации.

Определение фотометрических параметров спутников не относится непосредственно к их динамике. Однако, поскольку фотометрические данные обычно сопутствуют результатам астрометрических измерений и публикуются вместе с ними, то определение звездных величин спутников иногда сопутствует изучению динамики. Пример такой деятельности описан ниже в этой главе в отдельном разделе.

11.2. Справочник по физическим параметрам спутников планет

В Приложении 7 даются следующие физические параметры почти всех известных спутников планет: радиусы или полуоси эллипсоида, приближающего форму, гравитационный параметр спутни-

ка, звездная величина видимого с Земли спутника в среднюю оппозицию планеты. Каждое приведенное значение снабжено цитированием источника данных, а соответствующие библиографические ссылки даны в конце приложения.

Приведенные значения происходят из различных способов определения. Это наземные измерения размеров, измерения с помощью космических аппаратов, а также косвенные определения параметров по влиянию спутников на движение космического аппарата или на другой спутник. Способ измерения можно найти в цитируемой литературе.

Заметим, что для многих далеких спутников планет размеры и массы известны весьма приближенно. Они определены по звездным величинам в некоторых предположениях об альбедо и плотности вещества спутников.

Для каждой группы сходных по свойствам спутников данные приводятся в отдельных таблицах.

11.3. Детектирование вулканов на спутнике Юпитера Ио с помощью наземной фотометрии

Известен и хорошо изучен эффект уменьшения яркости спутников во время их взаимных покрытий и затмений. Этому посвящена Глава 7 настоящей книги. В результате фотометрических наблюдений спутника Юпитера Ио однажды был обнаружен необычный эффект резкого уменьшения яркости с последующим восстановлением предшествующего уровня. Это было в процессе покрытия спутника Ио другим спутником Юпитера — Европой 20 февраля 1991 года при наблюдениях на обсерватории European Southern Observatory (ESO). Измерение светового потока делалось с фильтром, пропускающим инфракрасный свет с длиной волны $3.8 \mu m$. На рис. 11.1 воспроизведен график результатов этих измерений из публикации (Descamps et al., 1992). Измерялся суммарный световой поток от спутников Ио и Европа. Интерпретация наблюдаемого явления была найдена. Предшествующие наблюдения с космического аппарата Вояджер показали, что на спутнике Ио имеются действующие вулканы. Самый крупный из них, Локи, в инфракрасном свете «сияет» на спутнике, как крупный фонарь. В моменты его заслонения другим спутником, световой поток уменьшается резко и также резко затем восстанавливается. На графике заметны так-

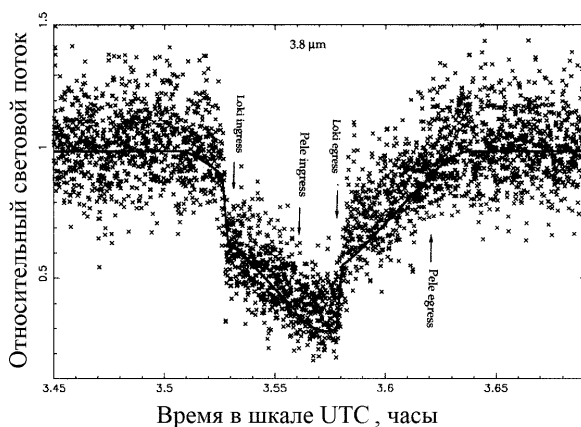


Рис. 11.1. Результаты фотометрии спутников Юпитера во время покрытия спутника Ио спутником Европа. Рисунок из работы (Descamps et al., 1992).

же изменения блеска при покрытии другого вулкана на спутнике — Пеле.

Заметим, что проявление вулканов на спутнике Ио в фотометрических наблюдениях было замечено еще ранее и опубликовано в работе (Goguen et al., 1988). В работе (Descamps et al., 1992) по построенной кривой блеска спутников были уточнены координаты вулкана Локи.

Более подробно об описанных исследованиях можно узнать из цитированных здесь работ.

11.4. Оценки физических параметров далеких спутников планет

11.4.1. Особенности далеких спутников планет

Далекие спутники планет — совершенно особенные объекты Солнечной системы. Это ясно по ряду обстоятельств. Первое: из 128 известных к настоящему времени далеких спутников Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна 118 (92%) открыты после 1998 года. Второе: для 11 далеких спутников планет к настоящему времени эфемериды известны с точностью до половины оборота спутника вокруг планеты (Emelyanov, 2010; Brozovic, Jacobson, 2017). Поэтому

их можно считать потерянными. Третье: за исключением спутника Сатурна Фебы и спутника Юпитера Гималии, ни к одному из далеких спутников не приближались космические аппараты настолько, чтобы можно было увидеть их размеры или определить массу спутника по его гравитационному влиянию на движение космического аппарата. Четвертое: в отличие от регулярных спутников, которые образовались из протопланетного газо-пылевого диска вместе с планетой и имеют почти круговые орбиты с малым наклоном к плоскости экватора планеты, орбиты далеких спутников имеют значительные эксцентриситеты и весьма разнообразные наклоны к плоскости орбиты планеты. Поэтому далекие спутники часто называют нерегулярными спутниками. Большинство из них имеет движение, обратное по отношению к орбитальному движению планеты. Нерегулярные спутники не могли образоваться из протопланетного облака на современных орбитах. Поэтому предполагается, что они захвачены с орбит вокруг Солнца в раннюю эпоху формирования Солнечной системы.

За исключением спутника Юпитера Гималии и спутника Сатурна Фебы, размеры и массы далеких спутников непосредственно никак не измерялись. Никакие наблюдения не дают нам таких данных. Впрочем, в некоторых справочных источниках информации, например, JPL Solar System Dynamics (<https://ssd.jpl.nasa.gov/>), можно найти значения диаметров и масс всех далеких спутников больших планет. Как же были найдены эти значения? Непосредственно из наблюдений мы имеем только измерения их яркости (звездной величины). Однако, если принять очень смелую гипотезу о светоотражательных свойствах поверхности спутников (альбедо), то можно вычислить их размеры. А если принять еще более смелую гипотезу о плотности вещества, из которого они состоят, то можно вычислить и массы спутников. В итоге значения масс получаются с точностью не лучше, чем 100–200%. Если взять массу далекого спутника из справочника, то можно ошибиться в несколько раз.

Единственный случай, когда масса спутника была определена непосредственно по его гравитационному влиянию на другой спутник, движение которого наблюдалось с Земли, это определение массы спутника Юпитера Гималии, сделанное в работе (Emelyanov, 2005). Гравитационный параметр Гималии получился равным $0.28 \pm 0.04 \text{ км}^3/\text{с}^2$, что существенно отличается от значения $0.45 \text{ км}^3/\text{с}^2$, данного в JPL Solar System Dynamics (<https://ssd.jpl.nasa.gov/>). По-

дробнее эта работа изложена ниже в специальном разделе. В работе (Емельянов, Вашковьяк, Шереметьев, 2007) показано, что по наземным наблюдениям невозможно таким же образом получить массу никакого другого спутника.

Для ряда нерегулярных спутников выполнены специальные фотометрические наблюдения, в результате которых получены светоотражательные характеристики поверхностей. Эти результаты опубликованы в доступных научных журналах. Однако эти данные касаются лишь небольшой доли (31%) всех открытых к настоящему времени далеких спутников планет. Для большинства спутников, открытых после 1998 года, абсолютные звездные величины и другие фотометрические параметры, основанные на наблюдениях, в научных журналах не опубликованы.

Ввиду недостаточности опубликованных результатов фотометрии далеких спутников планет в работе (Емельянов, Уральская, 2011) была предпринята попытка определить фотометрические параметры спутников по тем фотометрическим данным, которыми снабжаются астрометрические результаты наблюдений, публикуемые в Minor Planet Circulars (MPC). Ценность этих данных состоит в том, что они имеются для всех далеких спутников.

В настоящей главе представлены методы и результаты определения фотометрических параметров всех далеких спутников Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна по данным наблюдений, опубликованным в MPC. В работе (Grav, Bauer, 2007) указывается, что эти результаты «не очень надежны для серьезных приложений», но, за неимением других источников данных для всех далеких спутников планет, можно довольствоваться тем, что получилось в работе (Емельянов, Уральская, 2011).

В следующем разделе дается краткий обзор публикаций фотометрических параметров далеких спутников планет.

11.4.2. Обзор имеющихся фотометрических данных для далеких спутников планет

Воспроизведем здесь обзор, представленный в статье (Емельянов, Уральская, 2011).

Физические характеристики 10-ти далеких спутников планет, известных еще до 1998 года, опубликованы во многих работах.

Два нерегулярных спутника J6 Гималия и S9 Феба оказались в поле зрения космических аппаратов (КА). Рассмотрим кратко

найденные физические свойства этих двух спутников. Космический аппарат «Кассини» получил изображения Гималии, из которых Группа обработки наблюдений Кассини во главе с К. Порко определила ее размеры по двум осям 150 ± 20 и 120 ± 20 км (Porco et al., 2003). Отражательная способность Гималии, альbedo, оказалась очень низкой: 0.05 ± 0.01 . Эта величина сравнима с альbedo крупных астероидов-троянец Юпитера, определенных в работе (Fernandez et al., 2003), и в сочетании с серым цветом спутника (Degewij, Zellner, Andersson, 1980; Degewij, Cruikshank, Hartmann, 1980) позволяет предположить, что поверхность богата углеродом. Это свойственно астероидам С-типа, которые распространены главным образом во внешней части Главного пояса астероидов.

Из нерегулярных спутников системы Сатурна хорошо исследован спутник Феба. Пролет космических аппаратов Voyager и Cassini позволил определить его гравитационный параметр, который оказался равным $0.5517 \pm 0.0007 \text{ км}^3/\text{с}^2$ (Rappaport et al., 2005). Поверхность Фебы достаточно темная со средним геометрическим альbedo в спектральной полосе V равным 0.081 ± 0.002 (Simonelli et al., 1999). Однако альbedo меняется вдоль поверхности примерно вдвое, показывая существенное различие материалов, из которых сложен этот спутник. Комбинируя эти данные с известными размерами, полученными с помощью космического аппарата Voyager (средний радиус 110 км), была определена плотность Фебы, которая оказалась равной $1630 \pm 45 \text{ кг/м}^3$. Это намного больше, чем плотность регулярных спутников Сатурна, которая составляет примерно 1300 кг/м^3 , но меньше плотности Тритона и Плутона 1900 кг/м^3 .

Такая средняя плотность характерна для смеси водяного льда и камня. Другие исследования показывают наличие железосодержащих и кремниевых минералов, углекислоты и органических соединений в составе Фебы (Buratti et al., 2008). На фотографиях Фебы видна сильно кратерированная древнейшая поверхность, значительно отличающаяся от поверхности астероидов, что указывает на ее происхождение вне системы Сатурна. По-видимому, захват спутника произошел из внешних областей Солнечной системы, возможно, из пояса Койпера.

В работе (Grav et al., 2003) проведена BVRI фотометрия 13 далеких спутников Юпитера, из которых только 8 являются новыми, открытыми после 1998 года. Используя полученные из наблюдений спектры, авторы цитированной работы идентифицировали Пасифе

и Гималию как астероиды С-типа, Ананке и Фемисто как астероиды Р-типа, в то время как Карме, Синопе и Каллирое подобны астероидам D-типа. Астероиды с низким альбедо и красноватым цветом, отнесенные к D- и Р-типам (D-тела более красные), являются наиболее древними, малоизмененными телами Солнечной системы. Такие свойства имеют силикаты, богатые углеродом или органическими веществами. Эти типы астероидов характерны для внешней части Главного пояса астероидов и имеют низкие альбедо $0.04 - 0.06$, так же как и астероиды-тройяцы Юпитера и «мертвые» кометы. Цвета самых ярких внешних спутников Юпитера показывают, что группа спутников с прямым движением краснее и более компактна в цвете, чем спутники с обратным движением. Инфракрасная фотометрия также показала, что 4 члена семейства Гималии (Гималия, Элара, Леда и Лиситея) имеют однородные цвета со средними показателями цветов $J - H = 0.34 \pm 0.02$, $H - K = 0.27 \pm 0.02$, $J - K = 0.65 \pm 0.02$. Для слабых спутников со звездной величиной более 24 невозможно получить точные фотометрические данные, так как для них известны только их звездные величины.

Уникальный ряд фотометрических наблюдений 7-ми далеких спутников Сатурна (S9, S19, S20, S21, S22, S26 и S29) получен в работе (Вауер et al., 2006) в январе 2005 г. на 200-дюймовом Паломарском телескопе (Palomar 200-inch telescope) и 4-метровом телескопе Бланко (Cerro Tololo Inter-American Observatory's 4-m Blanco telescope) в двух фильтрах В и R.

Результаты фотометрических наблюдений 13-ти далеких спутников Сатурна, включая Фебу, даются в работах (Grav et al., 2003; Grav, Вауер, 2007). Это спутники S9, S19, S20, S21, S22, S23, S24, S25, S26, S27, S28, S29 и S30. Исследования нерегулярных спутников Сатурна показали значительные различия в цветах от нейтрального цвета S9 Фебы и S25 Мундилфари до умеренно красного цвета S26 Альбиорикса и S22 Иджирака. В среднем они являются более красными, чем нерегулярные спутники Юпитера, но не показывают присутствия на поверхности очень красного материала, который наблюдается в Поясе Койпера. Их цвета подобны активным кометным ядрам и «мертвым» кометам.

К настоящему времени известны 9 далеких спутников Урана. Фотометрия исследована только для 6-ти из них (U16, U17, U18, U19, U20, U21). Эти нерегулярные спутники Урана имеют широкий диапазон цветов от самого синего к самому красному. В рабо-

те (Maris et al., 2001) исследованы U16 Калибан и U17 Сикоракса. Оба спутника оказались в среднем красного цвета, причем U17 Сикоракса немного голубее, чем U16 Калибан. В работе (Romon et al., 2001) показано, что спутник U17 Сикоракса более похож на транснептуновые объекты и Кентавров, чем на «троянецв» и нерегулярные спутники Юпитера. Фотометрические исследования далеких спутников Урана были продолжены также в работе (Maris, Carraro, Parisi, 2007).

В работе (Grav et al., 2004) авторы определили абсолютную звездную величину в спектральной полосе V и показатели цвета B–V и V–R для 6-ти далеких спутников Урана, которые оказались похожими на такие же величины спутников Юпитера и Сатурна. Их цвета делятся на две группы. Одна группа нейтрального цвета содержит U18 Просперо и U19 Сетевос. Другая группа слабо красная и содержит два больших спутника Урана – U17 Калибан и U17 Сикораксу.

Из 6-ти нерегулярных спутников Нептуна только для N2 Нереиды, открытой в 1949 году, имеются надежные фотометрические данные. Альbedo N2 Нереиды оказалось равным 0.2 (Thomas, Veverka, Helfenstein, 1991). Это значительно выше, чем альbedo внутренних спутников Нептуна (0.06), малых внутренних спутников Урана (0.07), J6 Гималии (0.05) и S9 Фебы (0.08). В работе (Schaefer, Schaefer, 2000) авторы на основе 224 фотометрических измерений N2 Нереиды в полосах VBRI определили цвет спутника, а Brown et al. (1999), используя инфракрасные спектры, показали, что N2 Нереида имеет водяной лед.

В работе (Grav et al., 2004) определены фотометрические параметры N2 Нереиды и одного из 5-ти новых нерегулярных спутников Нептуна N9 Галимеды. Наблюдаемые цвета N2 Нереиды и N9 Галимеды приблизительно одинаковы и позволяют предположить, что составы их поверхностей подобны. Изучение возможности столкновений между нерегулярными спутниками Нептуна показывает, что N2 Нереида и N9 Галимеда имели высокую вероятность столкновения около 4.5 млрд лет назад и, вероятно, N9 Галимеда является фрагментом N2 Нереиды (Grav, Holman, 2004). Оба спутника имеют нейтральный цвет, а цвета, альbedo и спектры подобны этим же характеристикам U4 Оберона и U2 Умбриэля и некоторым объектам пояса Койпера.

В итоге данного обзора видно, что фотометрические параметры

известны только для 8-ми из 46 (17%) новых нерегулярных спутников Юпитера, для 12-ти из 37 (32%) новых нерегулярных спутников Сатурна, для 6-ти из 9-ти нерегулярных спутников Урана и одного из 5-ти новых нерегулярных спутников Нептуна. Для 97 далеких спутников планет, не считая спутников Плутона, публикации фотометрических параметров пока не обнаружены.

Ввиду такой ограниченности имеющихся данных по фотометрии далеких спутников планет в работе (Емельянов, Уральская, 2011) была предпринята попытка определить фотометрические параметры всех спутников по фотометрическим данным, публикуемым в *Minor Planet Circulars* (MPC).

11.4.3. Фотометрическая модель для далеких спутников планет

В процессе астрометрических наблюдений спутников планет может выполняться также и фотометрия спутников. В таблицах, публикуемых в *Minor Planet Circulars* (MPC), даются астрометрические координаты спутников. Кроме того, в специальной колонке наблюдатели сообщают оценки видимых звездных величин спутников. Эти оценки даются далеко не для всех моментов времени, для которых измерены координаты. Звездные величины снабжаются также признаком той спектральной полосы, в которой велись наблюдения. В основном используются фильтры с полосой пропускания R, но для некоторых наблюдений — с полосой V.

Таким образом, из наблюдений получают звездную величину спутника m , измеренную в некоторой спектральной полосе. Эта величина зависит от расстояния наблюдателя до спутника Δ , расстояния спутника до Солнца r и угла фазы α (объектоцентрический угол между направлениями на наблюдателя и на источник света). Поэтому измеренную звездную величину спутника следует записать как функцию трех аргументов $m(r, \Delta, \alpha)$. Абсолютная звездная величина спутника $m(1, 1, \alpha)$, независимая от расстояний, может быть вычислена по формуле

$$m(1, 1, \alpha) = m(r, \Delta, \alpha) - 5 \log(r \Delta), \quad (11.1)$$

где расстояния r и Δ выражены в астрономических единицах.

Напомним здесь о соотношении между разностью звездных ве-

личин m_1 и m_2 любых двух объектов и отношением соответствующих световых потоков E_1 и E_2

$$m_1 - m_2 = -2.5 \log \frac{E_1}{E_2}, \quad (11.2)$$

которое может быть полезным при фотометрических исследованиях. Заметим одно интересное свойство, следующее из соотношения (11.2). Если увеличить световой поток E_1 в $1 + \varepsilon$ раз, то при достаточно малых ε разность звездных величин $m_1 - m_2$ уменьшится на ε .

Зависимость абсолютной звездной величины спутника от угла фазы определяется долей неосвещенной части видимого диска, а также светоотражательными свойствами поверхности. Тела Солнечной системы имеют разнообразные физические свойства. Для планет и спутников, имеющих атмосферу, интенсивность отраженного света слабо зависит от угла фазы. Для шероховатых поверхностей характерен резкий всплеск яркости спутника при нулевом угле фазы.

Относительно происхождения далеких спутников планет в основном рассматривается гипотеза об их захвате с гелиоцентрических орбит (Gladman et al., 2001; Grav, Bauer, 2007). Если эта гипотеза верна, то физические свойства спутников можно считать аналогичными свойствам астероидов. Тогда для спутников можно применить двухпараметрическую фотометрическую систему, принятую Комиссией 20 Международного Астрономического Союза в 1985 году (Marsden, 1986) для астероидов. Функция, описывающая эту модель, имеет вид (Bowell et al., 1989):

$$m(1, 1, \alpha) = H - 2.5 \log[(1 - G)\Phi_1(\alpha) + G\Phi_2(\alpha)]. \quad (11.3)$$

Два параметра H и G характеризуют конкретный спутник. При этом предполагается, что светоотражательные свойства спутника не зависят от угла вращения. Если поверхность спутника неоднородна, то принимают некоторые средние по углу вращения значения параметров.

Функция $\Phi_1(\alpha)$ соответствует резкой зависимости яркости спутника от угла фазы (обычно это тела с низким значением альбедо), а функция $\Phi_2(\alpha)$ — слабой зависимости (с высоким значением альбедо). Эти функции вычисляются из следующих соотношений:

$$\Phi_i = W\Phi'_i + (1 - W)\Phi''_i \quad (i = 1, 2),$$

$$W = \exp[-90.56 \operatorname{tg}^2(\alpha/2)],$$

$$\Phi'_i = 1 - \frac{C_i \sin \alpha}{0.119 + 1.341 \sin \alpha - 0.754 \sin^2 \alpha},$$

$$\Phi''_i = \exp \left\{ -A_i [\operatorname{tg}(\alpha/2)]^{B_i} \right\},$$

$$A_1 = 3.332, \quad B_1 = 0.631, \quad C_1 = 0.986,$$

$$A_2 = 1.862, \quad B_2 = 1.218, \quad C_2 = 0.238.$$

Функции Φ_1, Φ_2 определены эмпирически.

При данных параметрах H и G фотометрическая модель позволяет вычислить звездную величину спутника при любом угле фазы.

Для наглядного представления рассматриваемой фотометрической модели на рис. 11.2 даются графики зависимости приращения звездной величины как функции от угла фазы α

$$\Delta m = -2.5 \log [(1 - G)\Phi_1(\alpha) + G\Phi_2(\alpha)]$$

при различных значениях параметра G .

Если измерения звездной величины $m(r, \Delta, \alpha)$ делались в спектральных полосах R, V или B, то параметрам H и G , найденным согласно фотометрической модели (11.3), будут присвоены соответствующие индексы — H_R, G_R, H_V, G_V или H_B, G_B .

11.4.4. Определение фотометрических параметров спутников по результатам фотометрии

Параметры G и H можно определить по результатам фотометрических наблюдений спутников. Формально для этого достаточно два измерения звездной величины при разных углах фазы. На практике фотометрические измерения делаются с погрешностью. Поэтому желательно иметь как можно больше измерений при равномерном распределении по значениям угла фазы. Чтобы определить параметры G и H из множества наблюдений, по каждому измерению составляют условное уравнение относительно искомых параметров, чтобы найти оценки параметров по методу наименьших квадратов (МНК). Относительно параметров G и H условные уравнения получатся нелинейными. Можно составить линейные условные уравнения, если определять параметры a_1, a_2 , связанные с G и H соотношениями

$$H = -2.5 \log(a_1 + a_2), \quad G = \frac{a_2}{a_1 + a_2}. \quad (11.4)$$

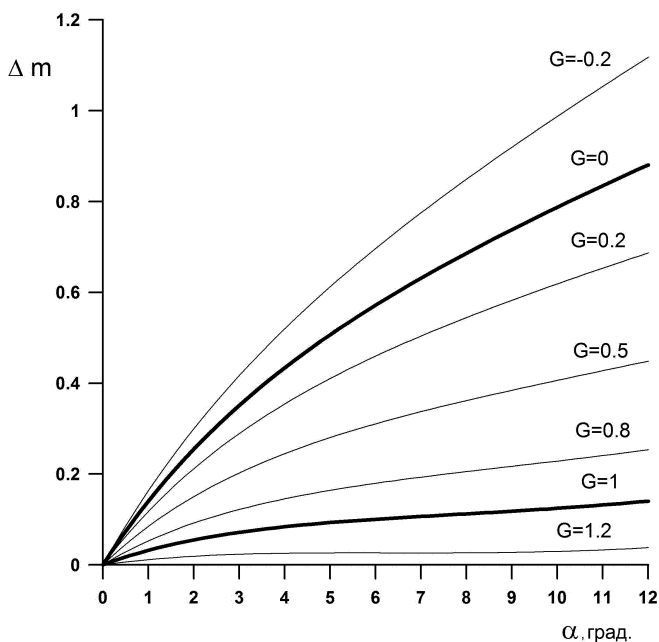


Рис. 11.2. Принятая фотометрическая модель: зависимость приращения абсолютной звездной величины спутника от угла фазы при различных значениях параметра G .

Относительно a_1, a_2 условные уравнения запишутся в виде

$$10^{-0.4m(1,1,\alpha^{(i)})} = a_1\Phi_1(\alpha^{(i)}) + a_2\Phi_2(\alpha^{(i)}) \quad (i = 1, 2, \dots, N),$$

где $m(1, 1, \alpha^{(i)})$ — абсолютная звездная величина спутника, полученная при угле фазы $\alpha^{(i)}$, а N — число измерений. Абсолютная звездная величина вычисляется по результату каждого измерения по формуле (11.1).

После того, как составлены все условные уравнения, находят оценки параметров по МНК. При этом получают не только значения параметров, но также среднеквадратичная величина отклонений измеренной абсолютной звездной величины от ее модельного значения по всем наблюдениям. Эту величину, обозначаемую через σ , можно считать точностью определения звездной величины спутника из фотометрических наблюдений для данного спутника.

После определения параметров a_1 , a_2 по МНК, фотометрические параметры спутника G и H можно вычислить по формулам (11.4). При этом σ будет характеризовать точность определения параметра H , а также получаемых из модели значений абсолютной звездной величины.

11.4.5. Исходные данные и результаты определения фотометрических параметров спутников

Астрометрические наблюдения всех далеких спутников планет опубликованы в Minor Planet Circulars (MPC). Эти наблюдения собраны также в базе данных NSDC (Natural Satellites Data Center) (Arlot, Emelyanov, 2009). База данных NSDC расположена в интернете по адресам:

<http://www.sai.msu.ru/neb/nss/html/obspos/index.html>,

<http://nsdb.imcce.fr/obspos/>.

Часть астрометрических измерений снабжена значениями наблюдаемой звездной величины спутника. Из данных наблюдений были выбраны оценки звездных величин спутников. Каждое значение привязано к моменту наблюдения. Оценки сделаны в основном в спектральной полосе R. Имеется небольшое количество измерений в спектральной полосе V. Однако они весьма малочисленны и поэтому непригодны для определения искомых параметров. Поэтому все наши результаты относятся к спектральной полосе R. Для каждого наблюдения по заданному моменту времени из эфемерид определялись расстояния r , Δ и угол фазы α , вычислялась абсолютная звездная величина спутника и составлялось условное уравнение, как описано выше. Затем по МНК получались оценки фотометрических параметров.

Для спутников Юпитера J6 – J13, спутника Сатурна S9 Фебы, спутника Нептуна N2 Нереиды в публикациях имеются достаточно надежные значения фотометрических параметров. Для этих спутников оценки параметров не делались.

Для части спутников определить параметры не удалось из-за недостаточного количества фотометрических измерений для разных значений угла фазы. В этих случаях мы определяли только среднюю абсолютную звездную величину спутника по имеющимся данным.

В итоге параметры G и H определены для 70 далеких спутников

Юпитера, Сатурна и Урана. Для остальных 27 далеких спутников определена средняя абсолютная звездная величина.

Анализ различных наблюдений спутников планет показывает, что максимальное количество наблюдений делается при некоторых средних значениях угла фазы α^* . Для Юпитера этот угол приближенно равен 6 град., для Сатурна — 3 град., для Урана — 1 град., для Нептуна — 0.8 град. Поэтому, с использованием построенных фотометрических моделей спутников вычислялись также абсолютные звездные величины $m(1, 1, \alpha^*)$ для указанных средних углов фазы, а также видимые звездные величины спутников, приведенные к планетным расстояниям в среднюю оппозицию $m_0(\alpha^*)$. Последнее значение удобно иметь для простой оценки наиболее вероятной видимой звездной величины спутника.

Для спутников, у которых вместо параметров была определена средняя абсолютная звездная величина, она отождествлялась с $m(1, 1, \alpha^*)$, по которой также вычислялась величина $m_0(\alpha^*)$ — значение $m(r, \Delta, \alpha)$ в среднюю оппозицию.

Все полученные фотометрические параметры 97 далеких спутников Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна размещены на сайте NSDC по адресам:

<http://www.sai.msu.ru/neb/nss/html/multisat/index.html>

<http://nsdb.imcce.fr/multisat/index.html>

в разделе «Параметры и константы».

Заметим, что указанное здесь количество спутников с определенными параметрами, как описано выше, соответствует публикации (Емельянов, Уральская, 2011). В дальнейшем, по мере обновления данных на сайте NSDC, число спутников с определенными параметрами может увеличиться.

Примеры сравнения модельных зависимостей $m(1, 1, \alpha)$ с результатами наблюдений, по которым они получены, приводятся на рис. 11.3–11.6.

Если имеются независимо определенные значения альбедо спутников, то по фотометрическому параметру H можно найти оценки их размеров. Для оценки радиусов сферических тел в работе (Bowell et al., 1989) предлагаются соотношения

$$\log p_B = 6.521 - 2 \log(2R_s) - 0.4H_B,$$

$$\log p_V = 6.259 - 2 \log(2R_s) - 0.4H_V,$$

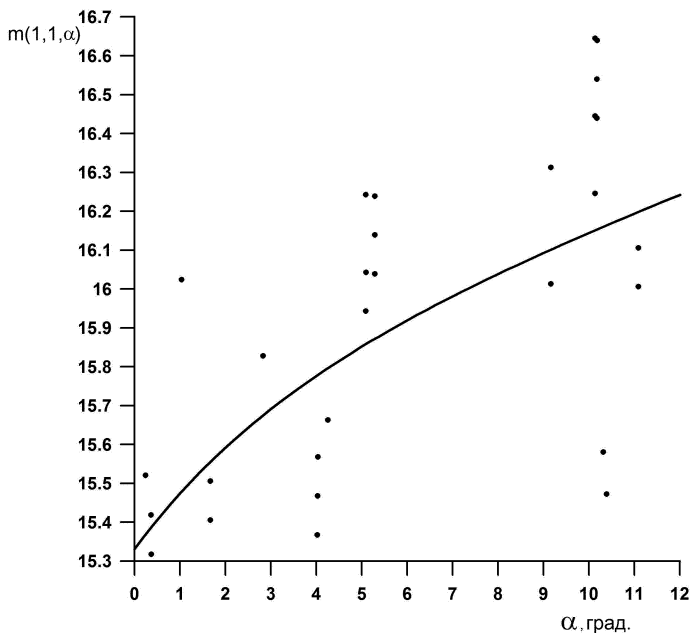


Рис. 11.3. Абсолютные звездные величины спутника J22 Гарпалике, выведенные из данных MPC (точки) для разных значений угла фазы, и уточненная фотометрическая модель этого спутника (линия).

где R_s — радиус спутника, p_B и p_V — принимаемые значения геометрического альbedo спутника в спектральных полосах В и V, а H_B и H_R — фотометрические параметры в соответствующих спектральных полосах. В этих формулах следует задавать геометрическое альbedo, определенное для нулевого угла фазы.

В случаях, когда наблюдения выполняются в спектральной полосе R, можно использовать аналогичное соотношение

$$\log p_R = 6.114 - 2 \log(2R_s) - 0.4H_R, \quad (11.5)$$

которое легко выводится из соответствующей формулы, предложенной в работе (Jewitt, Naghhipour, 2007).

По найденным значениям радиусов спутников можно определить их гравитационные параметры или массы, если принять неко-

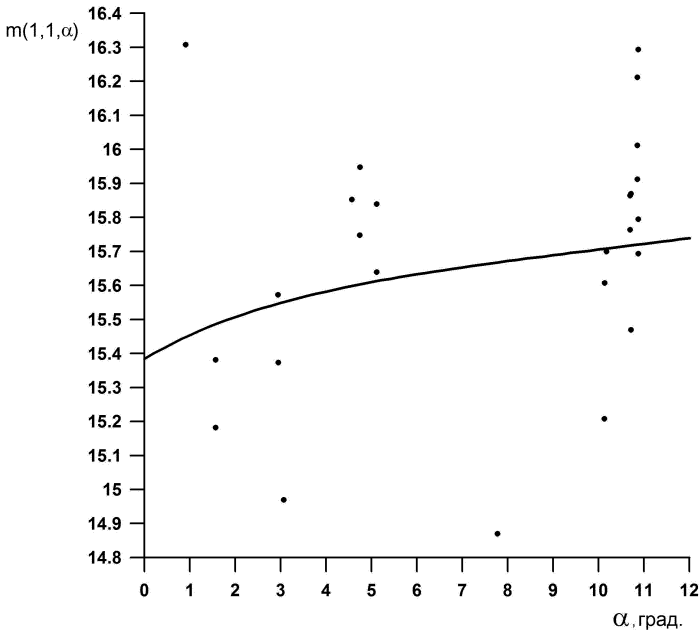


Рис. 11.4. Абсолютные звездные величины спутника J28 Автоное, выведенные из данных MPC (точки) для разных значений угла фазы, и уточненная фотометрическая модель этого спутника (линия).

торые гипотетические значения плотности вещества спутников ρ . Гравитационный параметр спутника Gm можно найти по формуле

$$Gm = \frac{4}{3}G\rho\pi R_s^3, \quad (11.6)$$

где G — гравитационная постоянная.

Следуя описанным здесь возможностям для оценки размеров и гравитационных параметров спутников, нами были предприняты соответствующие вычисления по формулам (11.5), (11.6). Поскольку значения p_R и ρ могут быть только гипотетическими, мы приняли некоторые встречающиеся в литературе значения. Для спутников Юпитера мы взяли $p_R = 0.04$, $\rho = 2.6 \text{ г/см}^3$, для спутников Сатурна $p_R = 0.06$, $\rho = 2.3 \text{ г/см}^3$, для спутников Урана $p_R = 0.04$, $\rho = 1.5 \text{ г/см}^3$, для спутников Нептуна $p_R = 0.04$, $\rho = 1.5 \text{ г/см}^3$. Если

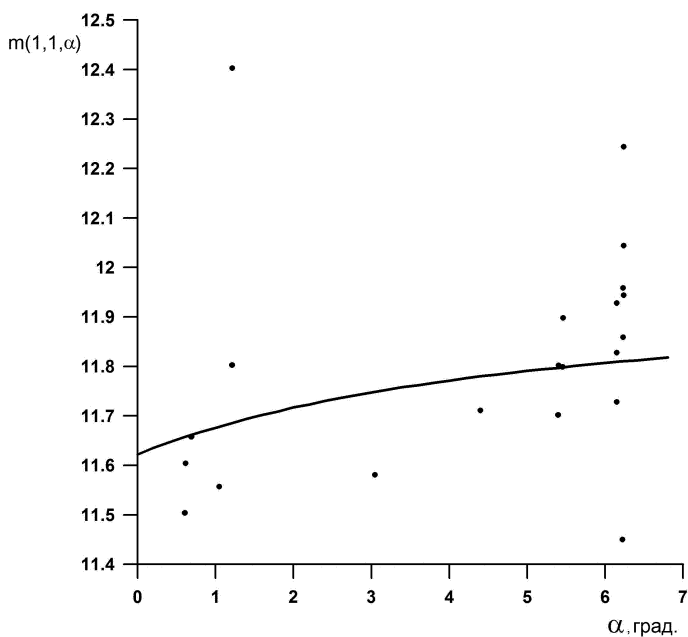


Рис. 11.5. Абсолютные звездные величины спутника S20 Палиак, выведенные из данных MPC (точки) для разных значений угла фазы, и уточненная фотометрическая модель этого спутника (линия).

возникнет необходимость получить размеры и гравитационные параметры каких-либо спутников для других гипотетических значений p_R и ρ , их можно легко перевычислить по приведенным выше формулам.

Все полученные результаты размещены в базе данных естественных спутников планет NSDC (Arlot, Emelyanov, 2009), доступной через интернет по адресам:

<http://www.sai.msu.ru/neb/nss/html/multisat/paramhr.htm>

<http://nsdb.imcce.fr/multisat/paramhr.htm>

11.4.6. Сравнение результатов, полученных разными авторами

Из астрометрических наблюдений далеких спутников больших планет, опубликованных в MPC, в работе (Емельянов, Уральская, 2011) были определены параметры G и H для 70 далеких спутни-

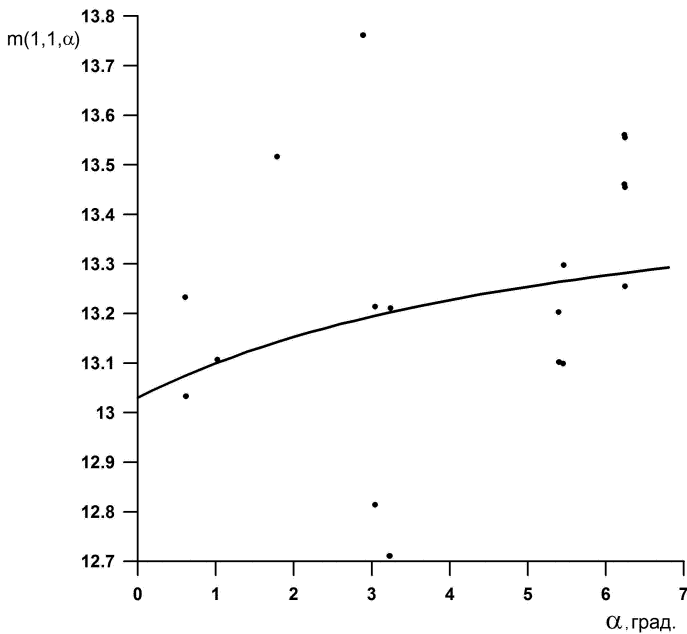


Рис. 11.6. Абсолютные звездные величины спутника S22 Иджирак, выведенные из данных MPC (точки) для разных значений угла фазы, и уточненная фотометрическая модель этого спутника (линия).

ков Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна. Еще для 27 далеких спутников из наблюдений найдены их средние абсолютные звездные величины.

Фотометрические параметры были найдены для 46 далеких спутников Юпитера. Только для 8 из них имеются фотометрические данные в работе (Grav et al., 2003). В этой работе параметр H определен для спектральной полосы V . Для сравнения результатов в табл. 11.1 даются значения H_V и показателя цвета $V - R$ из работы (Grav et al., 2003) и найденные в работе (Емельянов, Уральская, 2011) значения параметров H_R и G_R для 8 далеких спутников Юпитера. Приведенные в этой и следующих таблицах погрешности являются среднеквадратичными ошибками (1σ) соответствующих параметров.

Из 37 далеких спутников Сатурна, для которых были опреде-

Таблица 11.1. Фотометрические параметры восьми далеких спутников Юпитера, опубликованные в работе (Grav et al., 2003), и результаты работы (Емельянов, Уральская, 2011) для этих спутников. Для сравнения результатов значения H_V можно привести к спектральной полосе R с помощью показателей цвета $V - R$.

Спутники N название	Grav et al. 2003		Емельянов, Уральская, 2011	
	H_V	$V - R$	H_R	G_R
J17 Callirrhoe	13.92 ± 0.02	0.50 ± 0.02	14.00 ± 0.17	0.40
J18 Themisto	12.94 ± 0.01	0.46 ± 0.01	$14.30 \pm 0.40^*$	—
J19 Megaclite	15.12 ± 0.05	0.41 ± 0.07	14.65 ± 0.18	0.17
J20 Taygete	15.63 ± 0.04	0.52 ± 0.04	15.10 ± 0.25	0.21
J22 Harpalyke	16.03 ± 0.12	0.62 ± 0.22	15.33 ± 0.29	-0.03
J23 Kalyke	15.28 ± 0.04	0.70 ± 0.05	14.88 ± 0.21	-0.08
J26 Iocaste	15.27 ± 0.03	0.36 ± 0.04	14.96 ± 0.21	0.03
J27 Praxidike	15.24 ± 0.03	0.34 ± 0.03	14.44 ± 0.45	-0.20

лены фотометрические параметры, только для 12 имеются аналогичные данные в работах (Grav et al., 2003; Bauer et al., 2006; Grav, Bauer, 2007). Данные работы (Grav, Bauer, 2007) вместе с результатами работы (Емельянов, Уральская, 2011) приведены в табл. 11.2.

Из наблюдений, содержащихся в МРС, были определили фотометрические параметры для 9 далеких спутников Урана и 5 далеких спутников Нептуна. Из этих спутников только для 6 спутников Урана и одного спутника Нептуна в работе (Grav et al., 2004) даются значения H_V и показателя цвета V-R. Эти данные вместе с результатами работы (Емельянов, Уральская, 2011) даются в табл. 11.3. Для спутника N9 Галимеда в работе (Grav et al., 2004) опубликованы два варианта параметров. Первый из них получен из наблюдений, выполненных на 6.5-метровом телескопе Clay в обсерватории Magellan. Второй вариант (помечен в таблице значком **) получен с помощью 10-метрового телескопа Keck II.

В табл. 11.1 и 11.3 звездочкой помечены случаи, когда параметр G не определялся, и вместо H_R даны значения $m(1, 1, \alpha^*)$.

Из сравнения данных в Табл. 11.1, 11.2 и 11.3 можно сделать вывод, что результаты определения параметра H_R для рассмотренных

Таблица 11.2. Фотометрические параметры 12-ти далеких спутников Сатурна, опубликованные в двух работах. Для сравнения результатов значения H_V можно привести к спектральной полосе R с помощью показателей цвета $V - R$.

Спутники <i>N</i> название	Grav and Bauer 2007		Емельянов, Уральская, 2011	
	H_R	G_R	H_R	G_R
S19 Ymir	11.81 ± 0.02	0.01 ± 0.06	11.97 ± 0.14	0.25
S20 Paaliaq	11.27 ± 0.04	-0.04 ± 0.12	11.62 ± 0.20	0.78
S21 Tarvos	12.61 ± 0.07	0.19 ± 0.15	12.65 ± 0.22	0.77
S22 Ijiraq	12.85 ± 0.12	-0.14 ± 0.22	13.03 ± 0.27	0.64
S23 Suttungr	14.08 ± 0.08	0.68 ± 0.46	14.50 ± 0.22	1.69
S24 Kiviuq	12.43 ± 0.16	0.27 ± 0.32	12.32 ± 0.29	0.61
S25 Mundilfari	14.28 ± 0.08	0.95 ± 0.52	14.43 ± 0.29	1.48
S26 Albiorix	10.87 ± 0.01	0.42 ± 0.06	11.15 ± 0.39	0.81
S27 Skathi	14.04 ± 0.11	0.64 ± 0.52	14.26 ± 0.14	1.20
S28 Erriapo	13.27 ± 0.15	0.57 ± 0.34	13.28 ± 0.25	0.27
S29 Siarnaq	10.24 ± 0.02	0.27 ± 0.04	9.91 ± 0.10	-0.30
S30 Thrymr	13.73 ± 0.08	-0.22 ± 0.30	14.01 ± 0.19	0.48

спутников в работах разных авторов в основном согласуются в пределах ошибок 3σ . Что касается параметра G_R , то он в работе (Емельянов, Уральская, 2011) служил согласующим параметром модели. Его значения в большинстве случаев не могут использоваться для выводов о свойствах поверхностей спутников. Из графиков, показывающих примеры согласования модели с наблюдениями, видно, что точности используемых фотометрических измерений явно недостаточно для уверенного определения параметра G .

11.4.7. Выводы об оценках фотометрических параметров далеких спутников планет

В результате работы, выполненной авторами статьи (Емельянов, Уральская, 2011), из наблюдений, опубликованных в МРС, получены параметры фотометрической модели, т.е. абсолютная звездная величина H при нулевом угле фазы и согласующий параметр G для всех 97 далеких спутников Юпитера, Сатурна, Урана и Непту-

Таблица 11.3. Фотометрические параметры шести далеких спутников Урана и одного спутника Нептуна, опубликованные в работах (Grav et al., 2004) и (Емельянов, Уральская, 2011). Для сравнения значения H_V можно привести к спектральной полосе R с помощью показателей цвета $V - R$.

Спутники N название	Grav et al. 2003		Емельянов, Уральская, 2011	
	H_V	$V - R$	H_R	G_R
U16 Caliban	9.16 ± 0.04	0.57 ± 0.03	8.86 ± 0.21	1.14
U17 Sycorax	7.50 ± 0.04	0.62 ± 0.01	7.59 ± 0.19	1.45
U18 Prospero	10.56 ± 0.05	0.39 ± 0.04	10.28 ± 0.14	1.22
U19 Setebos	10.57 ± 0.05	0.35 ± 0.03	10.12 ± 0.21	-0.28
U20 Stephano	11.69 ± 0.17	0.67 ± 0.22	11.13 ± 0.20	-0.13
U21 Trinculo	11.92 ± 0.18	0.35 ± 0.19	12.42 ± 0.22	1.25
N9 Halimede	9.01 ± 0.07	0.29 ± 0.08	$9.44 \pm 0.29^*$	-
-	9.74 ± 0.08	$0.47 \pm 0.12^{**}$	-	-

на. Найденные параметры относятся к спектральной полосе R. Точность определения абсолютных звездных величин для большинства спутников составляет 0.1–0.3. Точности использованных наблюдений оказывается недостаточно для уверенного определения параметра G . Сравнение полученных значений H с результатами фотометрии, опубликованными другими авторами для 27 спутников, показывает различия, не превышающие 3σ . По найденным значениям параметра H , гипотетическим значениям альbedo и плотности вещества определены размеры спутников и их гравитационные параметры.

11.5. Определение массы Гималии по астрометрическим наблюдениям других спутников

Чтобы решать проблемы происхождения и эволюции Солнечной системы, нам необходимо знать физические параметры планет и спутников, а также свойства их орбитальных движений.

Далекие спутники планет — очень малые небесные тела. По наблюдениям с Земли для них можно определить только звездные

величины. Массы далеких спутников, их размеры и альbedo остаются неизвестными. Однако, если принять какую-либо гипотезу о светоотражательных свойствах поверхности спутников, то можно вычислить их размеры. Если принять еще и гипотезу о плотности вещества, из которого они состоят, то можно вычислить и массы спутников.

Знание физических свойств далеких спутников становится весьма важным, учитывая массовое открытие новых таких спутников в конце XX и начале XXI веков. Масса только одного далекого спутника Сатурна — S9 Фебы была определена непосредственно при пролете вблизи Сатурна космического аппарата «Кассини» в июне 2004 года (Jacobson, 2004).

Масса далекого спутника Юпитера Гималии была предметом особого внимания в работе (Christou, 2005). Автор этой работы продемонстрировал способность Гималии рассеивать группу спутников с близкими орбитами на большом интервале времени и показал, что это рассеивание критически зависит от массы Гималии.

Исследователям известен независимый метод для определения масс спутников, движение которых подвержено влиянию притяжения других спутников. Такой общий подход был, в частности, применен с целью определения масс астероидов во время их взаимных сближений (Michalak, 2001). Возможность определения масс таким способом существенно зависит от соотношения между точностью наблюдений и величиной взаимных возмущений небесных тел.

Попытка определения массы спутника Юпитера Гималии непосредственно по его гравитационному влиянию на другой спутник, движение которого наблюдалось с Земли, была сделана в работе (Emelyanov, 2005a).

Сначала была принципиально оценена возможность определения масс далеких спутников Юпитера рассматриваемым способом. Из рассмотрения были исключены сравнительно недавно открытые спутники, так как по оценкам их звездных величин было ясно, что они имеют весьма малые массы. Были взяты две независимые группы спутников. Первая группа — спутники на расстояниях 10–13 млн км от планеты. Это спутники Гималия (J6), Элара (J7), Лиситея (J10) и Леда (J13). Вторую группу составляют спутники на расстояниях 20–25 млн км, это Пасифе (J8), Синопе (J9), Карме (J11) и Ананке (J12). Рассматривалась задача определения массы самого массивного в каждой группе спутника по его возмущени-

ям, оказываемым на движение остальных. В первой группе это был спутник Гималия (J6), а во второй — спутник Пасифе (J8).

Далее были проведены исследования на основе результатов искусственно созданных наблюдений, так называемых «симуляций». Использовалась модель движения далеких спутников Юпитера, построенная на основе всех имеющихся наблюдений и опубликованная в статье (Emelyanov, 2005б).

Для спутников каждой из двух групп на основе модели движения были вычислены геоцентрические прямые восхождения и склонения спутников на интервале времени с 1905 по 2003 год с шагом 90 суток. К результатам таких искусственных наблюдений прибавлялись случайные ошибки, полученные датчиком случайных чисел, с нулевым математическим ожиданием и заданной дисперсией. Масса только самого массивного спутника полагалась отличной от нуля. Для Гималии (J6) было взято значение гравитационного параметра, равное $0.45 \text{ км}^3/\text{с}^2$, для Пасифе (J8) — $0.013 \text{ км}^3/\text{с}^2$. Это те значения, которые были известны в то время из публикаций.

Применялся метод дифференциального уточнения параметров движения из наблюдений, описанный в Главе 6. В число уточняемых параметров включались начальные условия решения дифференциальных уравнений движения спутников и гравитационный параметр Gm наиболее массивного из них. Совместно уточнялись параметры для четырех спутников в каждой группе. Варьировалась дисперсия ошибок наблюдений в пределах 0.2 секунды дуги. По методу наименьших квадратов (МНК) вычислялась оценка точности определения параметров.

На основе таких «симуляций» получились следующие результаты. Найденные значения масс спутников отличались от их модельных значений меньше, чем их ошибки, оцененные по МНК. Было определено соотношение между модельными ошибками наблюдений и ошибкой определения массы возмущаемого спутника. Ошибка наблюдений определялась как угловое расстояние между точным и ошибочным геоцентрическими положениями спутника. Вычислялась среднеквадратичная величина σ_d этих ошибок. По МНК определялась среднеквадратичная величина σ_{Gm} ошибок гравитационных параметров возмущающих спутников. Получились следующие численные соотношения: для Гималии (J6)

$$\sigma_{Gm} = 0.031 \sigma_d,$$

для Пасифе (J8)

$$\sigma_{Gm} = 0.32 \sigma_d.$$

Здесь σ_d выражены в секундах дуги, а σ_{Gm} в $\text{км}^3/\text{с}^2$.

Из этих соотношений следует, что если, например, ошибка наблюдений составляет 0.2 секунды дуги, то ошибка определения гравитационного параметра Гималии (J6) будет $0.0062 \text{ км}^3/\text{с}^2$, что составляет 1.4 % от модельного значения. Для Пасифе (J8) в этом случае ошибка будет $0.064 \text{ км}^3/\text{с}^2$, что в пять раз больше предполагаемого значения Gm .

Исследования, проведенные на «симуляциях», представляют идеальный случай решения проблемы. При определении параметров на основе реальных наблюдений следует ожидать более грубых результатов. Учитывая, что точность сегодняшних наземных наблюдений далеких спутников составляет примерно 0.2 секунды дуги, становится ясно, что определение массы Пасифе (J8) таким путем невозможно. Однако для Гималии (J6) остается надежда это сделать.

Далее в работе (Emelyanov, 2005a) выполнено исследование чувствительности наблюдений к вариации массы возмущающего спутника. Определена функция чувствительности $\Phi(t)$ в зависимости от времени t

$$\Phi(t) = \sqrt{\left(\frac{\partial \alpha}{\partial m}\right)^2 + \left(\frac{\partial \delta}{\partial m}\right)^2}. \quad (11.7)$$

Большие значения функции чувствительности означают улучшение точности определения искомой массы. Оказалось, что резкий рост функции чувствительности возникает после случаев сближения двух спутников. Наиболее значительный рост функции возник, когда расстояние между Гималией (J6) и Эларой (J7) упало до значения 65031 км. Это произошло 15 июля 1949 года. Это значительное сближение, если учитывать, что среднее расстояние обоих спутников до планеты составляет около 12 млн км. Спутник Лиситея (J10) после его открытия в 1938 году испытывает два резких сближения с Гималией (J6): 9 июля 1954 года — на расстояние 454216 км и 19 ноября 1954 года — на расстояние 168891 км.

Эксперименты на искусственных наблюдениях показали, что наилучший состав наблюдений для определения массы возмущающего спутника получается тогда, когда интервалы времени наблюдений до и после сближения одинаковы. Точность определения

Таблица 11.4. Результаты определения гравитационного параметра Gm Гималии (J6) при различных составах наблюдений. Обозначения: $NJ7$ — общее число использованных наблюдений Эллары (J7); $N'J7$ — число использованных наблюдений Эллары (J7), выполненных до 1949 года; $NJ10$ — число использованных наблюдений Лиситеи (J10).

N	N'	N	σ_d	σ_{Gm}	Gm
J7	J7	J10	сек.дуги	км ³ /с ²	км ³ /с ²
326	38	143	0.564	0.039	0.270
326	38	-	0.551	0.041	0.310
315	36	136	0.529	0.038	0.278
315	36	-	0.521	0.039	0.297
280	24	120	0.454	0.037	0.278
280	24	-	0.442	0.039	0.284

массы улучшается с ростом величины этих интервалов. Очевидно, что при меньших расстояниях тесного сближения получается более точный результат определения массы.

Что касается определения массы Гималии (J6), то точность оказалась неизменной при добавлении наблюдений Лиситеи (J10) к наблюдениям Эллары (J7). Решающим оказалось исключительное сближение Гималии (J6) и Эллары (J7) 15 июля 1949 года.

База данных наблюдений для определения массы Гималии (J6) была та же, что и при определении параметров орбит спутников в работе (Emelyanov, 2005b). Из ряда наблюдений были исключены некоторые явно неточные данные. Было предпринято исследование зависимости результата определения массы спутника от состава используемых наблюдений. Рассматривались несколько вариантов состава данных. Результаты показаны в табл. 11.4. Здесь можно сделать вывод, что зависимость получаемого значения от состава наблюдений достаточно слабая по сравнению с ошибкой, что свидетельствует о надежности полученного результата.

По результатам работы (Emelyanov, 2005a) было сделано заключение, что наиболее достоверным значением гравитационного параметра далекого спутника Юпитера Гималии (J6), найденным из наблюдений, является следующее: 0.28 ± 0.04 км³/с². Полученное зна-

чение существенно отличается от значения $0.45 \text{ км}^3/\text{с}^2$, данного в JPL Solar System Dynamics (<https://ssd.jpl.nasa.gov/>).

В работе (Емельянов, Вашковьяк, Шереметьев, 2007) показано, что по наземным наблюдениям невозможно таким же образом получить массу никакого другого далекого спутника Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна.

После работы (Emelyanov, 2005a) спустя 12 лет появилась работа (Brozovic, Jacobson, 2017) по определению массы далекого спутника Юпитера Гималии (J6). Использован обширный набор наблюдений на значительно большем интервале времени, чем это было сделано в работе (Emelyanov, 2005a). Были взяты 129 наблюдений Эларты (J7), выполненных до 1949 года и 1876 наблюдений всего на интервале времени между 1905 и 2016 годами. Использовались 44 наблюдений Лиситеи (J10) до ее сближения с Гималией (J6) и 772 наблюдений всего на интервале времени между 1938 и 2016 годами. Получено следующее формальное значение гравитационного параметра Гималии (J6): $Gm = 0.13 \pm 0.02 \text{ км}^3/\text{с}^2$ (оценка точности по правилу 1σ). Однако в работе (Brozovic, Jacobson, 2017) сделано заключение, что гравитационный параметр Гималии (J6) может заключаться в пределах $0.13 - 0.28 \text{ км}^3/\text{с}^2$.

В этой работе сделана также оценка плотности вещества спутника Юпитера Гималии (J6) на основе средних размеров спутника по результатам наблюдений с космического аппарата «Кассини» (Rogco et al., 2003). Радиус Гималии (J6) был принят равным 67.5 км. Оказалось, что если взять $Gm = 0.13 \text{ км}^3/\text{с}^2$, то плотность получится равной $1.55 \text{ г}/\text{см}^3$. При $Gm = 0.28 \text{ км}^3/\text{с}^2$, плотность равна $2.26 \text{ г}/\text{см}^3$.

Литература к Главе 11

(См. далее отдельный список литературы для раздела 11.5)

Емельянов Н.В., Вашковьяк С.Н., Шереметьев К.Ю. Определение масс спутников планет по взаимным гравитационным возмущениям. *Астрономический вестник*. 2007. Т. 41. № 3. Р. 223–231.

Емельянов Н. В., Уральская В. С. Оценки физических параметров да-

- леких спутников планет. *Астрономический вестник*. 2011. Т. 45. № 5. С. 387–395.
- Arlot J.-E., Emelyanov N.V.* The NSDB natural satellites astrometric database. *Astronomy and Astrophysics*. 2009. V. 503. P. 631–638.
- Bauer J.M., Grav T., Buratti B.J., Hicks M.D.* The phase curve survey of the irregular saturnian satellites: A possible method of physical classification. *Icarus*. 2006. V. 184. P. 181–197.
- Bowell E., Hapke B., Domingue D., Lumme K., Peltoniemi J., Harris A.W.* Application of photometric models to asteroids. *Asteroids II*. Ed. Binzel R.P. Tucson: Univ. Arizona Press. 1989. P. 524–556.
- Brown R. H., Cruikshank D. P., Pendleton Y., Veeder G.J.* NOTE: Water Ice on Nereid. *Icarus*. 1999. V. 139. Issue 2. P. 374–378.
- Buratti B.J., Soderlund K., Bauer J. et al.* Infrared (0.83-5.1 μm) photometry of Phoebe from the Cassini Visual Infrared Mapping Spectrometer. *Icarus*. 2008. V. 193. Issue 2. P. 309–322.
- Degewij J., Zellner B., Andersson L. E.* Photometric properties of outer planetary satellites. *Icarus*. 1980. V. 44. P. 520–540.
- Degewij J., Cruikshank D. P., Hartmann W. K.* Near-infrared colorimetry of J6 Himalia and S9 Phoebe - A summary of 0.3- to 2.2-micron reflectances. *Icarus*. 1980. V. 44. P. 541–547.
- Descamps P., Arlot J. E., Thuillot W., Colas F., Vu D. T., Bouchet P., Hainaut O.* Observations of the volcanoes of Io, Loki and Pele, made in 1991 at the ESO during an occultation by Europa. *Icarus*. 1992. V. 100. No. 1. P. 235–244.
- Emelyanov N.V.* The mass of Himalia from the perturbations on other satellites. *Astronomy and Astrophysics*. 2005a. V. 438. P. L33–L36.
- Emelyanov N. V.* Ephemerides of the outer Jovian satellites. *Astronomy and Astrophysics*. 2005b. V. 435. P. 1173–1179.
- Emelyanov N.* Precision of the ephemerides of outer planetary satellites. *Planetary and Space Science*. 2010. V. 58. Issue 3. P. 411–420.
- Fernandez Y. R., Sheppard S. S., Jewitt D.C.* The Albedo Distribution of Jovian Trojan Asteroids. *Astronomical Journal*. 2003. V. 126. Issue 3. P. 1563–1574.

- Gladman B., Kavelaars J.J., Holman M., et al.* Discovery of 12 satellites of Saturn exhibiting orbital clustering. *Nature*. 2001. V. 412. Issue 6843. P. 163–166.
- Goguen J. D., Sinton W. M., Matson D. L., Howell R. R., Dick H. M., Johnson T. V., Brown R. H., Veeder G. J., Lane A. L., Nelson R. M., Mclarren R. A.* Io hot spots: Infrared photometry of satellite occultations. *Icarus*. 1988. V. 76. P. 465–484.
- Grav T., Holman M.J., Gladman B.J., Aksnes K.* Photometric Survey of the Irregular Satellites. *Icarus*. 2003. V. 166. Issue 1. P. 33–45.
- Grav T., Holman M.J.* Near-Infrared Photometry of the Irregular Satellites of Jupiter and Saturn. *Astrophysical Journal*. 2004. V. 605. Issue 2. P. L141–L144.
- Grav T., Holman M.J., Fraser W. C.* Photometry of Irregular Satellites of Uranus and Neptune. *Astrophysical Journal*. 2004. V. 613. Issue 1. P. L77–L80.
- Grav T., Bauer J.* A deeper look at the colors of the saturnian irregular satellites. *Icarus*. 2007. V. 191. Issue 1. P. 267–285.
- Jewitt D., Haghighipour N.* Irregular Satellites of the planets: Products of Capture in the Early Solar System. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*. 2007. V. 45. Issue 1. P. 261–295.
- Maris M., Carraro G., Cremonese G., Fulle M.* Multicolor Photometry of the Uranus Irregular Satellites Sycorax and Caliban. *Astronomical Journal*. 2001. V. 121. 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. *Astronomy and Astrophysics*. 2007. V. 472. Issue 1. P. 311–319.
- Marsden B.G.* Notes from the IAU General Assembly. *Minor Planet Circulars*. 1986. Nos. 10193 and 10194.
- Porco C., West R. A., McEwen A. et al.* Cassini Imaging of Jupiter's Atmosphere, Satellites, and Rings. *Science*. 2003. V. 299. Issue 5612. P. 1541–1547.
- Rappaport N.J., Iess L., Tortora P. et al.* Gravity Science In The Saturnian System: The Masses of Phoebe, Iapetus, Dione, and Enceladus.

Bulletin of the American Astronomical Society. 2005. V. 37. P. 704–704.

Romon J., Bergh C., Barucci M.A. et al. Photometric and spectroscopic observations of Sycorax, satellite of Uranus. *Astronomy and Astrophysics*. 2001. V. 376. P. 310–315.

Schaefer B. E., Schaefer M. W. Nereid Has Complex Large-Amplitude Photometric Variability. *Icarus*. 2000. V. 146. Issue 2. P. 541–555.

Simonelli D. P., Kay J., Adinolfi D., Veverka J., Thomas P. C., Helfenstein P. Phoebe: Albedo Map and Photometric Properties. *Icarus*. 1999. V. 138. P. 249–258.

Thomas P., Veverka J., Helfenstein P. Voyager observations of Nereid. *Journal of Geophysical Research Supplement*. 1991. V. 96. P. 19253–19259.

Литература для раздела 11.5 — Определение массы Гималии по астрометрическим наблюдениям других спутников.

Емельянов Н.В., Вашковьяк С.Н., Шереметьев К.Ю. Определение масс спутников планет по взаимным гравитационным возмущениям. *Астрономический вестник*. 2007. Т. 41. N 3. P. 223–231.

Brozovic M., Jacobson R. The Orbits of Jupiter's Irregular Satellites. *Astronomical Journal*. 2017. V. 153. Issue 4. Article id. 147, 10 pp.

Christou A. A. Gravitational scattering within the Himalia group of jovian prograde irregular satellites. *Icarus*. 2005. V. 174. Issue 1. P. 215–229.

Emelyanov N.V. The mass of Himalia from the perturbations on other satellites. *Astronomy and Astrophysics*. 2005a. V. 438. P. L33–L36.

Emelyanov N.V. Ephemerides of the outer Jovian satellites. *Astronomy and Astrophysics*. 2005b. V. 43., P. 1173–1179.

- Jacobson R. A., Antreasian P. G., Bordi J. J., Criddle K. E., Ionasescu R., Jones J. B., Meek M. C., Owen W. M., Jr., Roth D. C., Roundhill I. M., Stauch J. R.* The Orbits of the Major Saturnian Satellites and the Gravity Field of the Saturnian System. American Astronomical Society, DPS meeting N36, id.15.02. Bulletin of the American Astronomical Society. 2004. V. 36. P. 1097.
- Michalak G.* Determination of asteroid masses. II. (6) Hebe, (10) Hygiea, (15) Eunomia, (52) Europa, (88) Thisbe, (444) Gyptis, (511) Davida and (704) Interamnia. Astronomy and Astrophysics. 2001. V. 374. P. 703–711.
- Porco C. C., Wes, R. A., McEven A., et al.* Cassini Imaging of Jupiter's Atmosphere, Satellites, and Rings. Science. 2003. V. 299. P. 1541–1547.