

УДК 523.44

## Спутники астероидов: современное состояние

*В.В. Прокофьева-Михайловская*

НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория”, 98409, Украина, Крым, Научный

**Аннотация.** Последнее десятилетие прошлого века ознаменовалось открытиями спутников у астероидов. Их изучение дает возможность более точного определения масс астероидов и их плотностей, а также дает информацию для создания средств защиты Земли от столкновения с опасными астероидами. В 1992 г. в Крымской Астрофизической Обсерватории по данным анализа фотометрических и колориметрических наблюдений был обнаружен спутник у астероида 87 Сильвия; сейчас у него зарегистрировано 2 спутника. На 1 декабря 2005 г известно более 80 астероидов со спутниками, открытыми различными наземными и космическими средствами.

SATELLITES OF ASTEROIDS: CURRENT STATE, by *Prokof'eva-Mikhailovskaja V.V.* The last decade was marked by numerous discoveries of the satellites of asteroids. Their researches give the opportunity to detect more exactly decision the masses and densities of asteroids and also give information for creation of means of protection of the Earth from collisions with hazard asteroids. In 1992 at the Crimean Astrophysical Observatory the satellite of asteroid 87 Sylvia was discovered according to analysis of photometrical and colorimetrical observations. Now this asteroid has 2 satellites. By 1 December 2005 more than 80 asteroids are noted as having satellites.

**Ключевые слова :** астероиды, спутники астероидов, солнечная система.

---

### 1 Введение. Открытия спутников у астероидов

Последнее десятилетие прошлого века ознаменовалось многочисленными открытиями спутников у астероидов. Астероиды перестали быть уникальными одиночными телами. Оказалось, что они, как и планеты, имеют спутники.

Предположения о двойственной структуре ряда астероидов обсуждались в научной литературе неоднократно (Прокофьева и др., 1995). Однако были нужны неопровержимые доказательства существования спутников у астероидов. В начале 90-х годов прошлого века наблюдательные сведения о наличии спутников астероидов были получены в Крымской Астрофизической Обсерватории. Тогда на основании данных частотного анализа фотометрических и колориметрических наблюдений астероида 87 Сильвия было сделано заключение о его двойственности (Прокофьева, Демчик, 1992; Прокофьева, 1992). А в 1994 г. в Харькове Л.Г. Карачкиной был сделан доклад о спутнике у астероида 423 Диотима (Прокофьева, Карачкина, 1994).

Окончательно представление об астероидах как о монотелах пошатнулось лишь после сенсационного открытия спутника у астероида 243 Ида, сделанного с борта космического аппарата «Галилей». Спутник, которому впоследствии дали название Дактиль, был

зарегистрирован двумя независимыми экспериментами, и сообщение о его открытии было опубликовано в 1994 г. (Белтон и др., 1994).

Исследование астероидальных спутниковых систем является одной из самых актуальных задач современной астрофизики солнечной системы, так как результаты исследований дают новый материал для космогонии. Повышенный интерес к астероидам определяется следующими перечисленными ниже факторами.

Во-первых, исследования двойных астероидов дают возможность более точного решения задачи определения масс астероидов и их плотностей. Сенсацией оказалось, что двойные астероиды, сближающиеся с Землей, показали низкую плотность –  $1.4 - 1.7 \text{ г/см}^3$ .

Во-вторых, развитие космонавтики ставит целью совершить миссии к ряду комет и астероидов с целью их исследования и оценки перспективы использования минеральных ресурсов для нужд человечества.

В-третьих, бурное развитие новой области науки по предотвращению астероидной опасности, целью которой является создание средств защиты Земли от возможного столкновения с астероидом, требует априорных знаний о структуре опасных объектов.

В-четвертых, исследования астероидов со спутниками позволяет получать данные для проверки моделей образования спутников около безатмосферных тел.

В-пятых, исследования спутниковых систем астероидов дают материал для уточнения космогонических гипотез, что важно для теории происхождения Солнечной системы.

Обнаружение и исследование двойных астероидов становится одной из важнейших проблем астрофизических исследований малых тел солнечной системы (Прокофьева-Михайловская и др. 2005).

## 2 Астероиды со спутниками в Солнечной системе

Сейчас спутники открыты у астероидов, принадлежащих различным динамическим группам астероидов, находящимся на разных расстояниях от Солнца. По сообщению сайта (<http://www.johnstonsarchive.net/astro/asteroidmoons.html>) на 1 декабря 2005 г зарегистрировано более 80 астероидальных спутниковых систем, в том числе: в Главном поясе астероидов (ГПА) – 31, среди астероидов, сближающихся с Землей (АСЗ) – 25, среди пересекающих орбиту Марса – 2, транснептуновых - 22.

Принадлежность астероидов со спутниками к разным динамическим группам приводит к большому разнообразию их характеристик.

Большинство астероидов ГПА имеют спутники диаметром в 5-20 раз меньше, чем диаметр главного компонента. Период обращения компонентов составляет около 4 суток, а расстояние между компонентами – порядка 4-10 диаметров главного компонента. Для большей части двойных астероидов ГПА нередко принадлежность к семействам и связь с резонансами по среднему движению с большими планетами (Прокофьева и др. 2005).

Двойные астероиды АСЗ представляют собой более тесные системы. Расстояния между компонентами от 1.5 до 8 диаметров главного компонента. Среднее значение диаметров для главного компонента около 1 км, диаметры спутников в 2-3 раза меньше диаметров главного тела. Все известные объекты, имеющие размер большей полуоси орбиты более 30 а. е., принадлежат поясу Эйджворта-Койпера и имеют название – транснептуновые (ТНО). Для спутников астероидов характерны размеры, сравнимые с размерами главного компонента, имеют место большие расстояния между компонентами.

Возможно, такие характеристики спутниковых систем обусловлены выборкой данных, в свою очередь обусловленной возможностями современных технических средств, применяющихся для их открытия и наблюдений.

### **3 Методы регистрации астероидальных спутниковых систем. Примеры**

Задача исследований структуры астероидов методами прямой регистрации их изображений является достаточно сложной, так как угловое расстояние между компонентами составляет менее одной угловой секунды, а перепад яркости может достигать значительной величины. Например, у астероида Ида спутник в сотни раз слабее основного тела. Поэтому к применяемой аппаратуре, кроме высокой квантовой эффективности, предъявляются три основных требования: высокое угловое разрешение, широкий динамический диапазон и возможность регистрации изображения слабого объекта рядом с ярким.

Создание в последние десятилетия XX века ряда крупных и оснащенных современным оборудованием обсерваторий на Гавайских и Канарских островах, в Чили и в ряде других мест с превосходными астроклиматическими условиями практически исчерпывает возможности повышения углового разрешения путем выбора наилучшего места. Для успешной регистрации спутников должна использоваться специально подготовленная аппаратура и телескоп с малым рассеянием света. Как правило, ореол рассеяния внутри оптики составляет около одного процента, а рассеяние в атмосфере может быть значительно больше.

Благодаря высокой квантовой эффективности, широкому динамическому диапазону, возможности регистрации малых контрастов и обработке данных в памяти ЭВМ, телевизионные приемники света и современные CCD-матрицы нашли широкое применение для исследования астероидов и поиска у них спутников.

#### **3.1 Адаптивная оптика**

Проблема повышения углового разрешения решается путем исправления светового волнового фронта, искаженного турбуленцией земной атмосферы. Делается это с помощью методов адаптивной оптики (АО). Например, на 10-метровом телескопе Кека удается дойти до разрешения 0.046 угл. сек, уже достаточного для наблюдений спутников у астероидов.

Наблюдения астероидов с адаптивной оптикой активно проводятся на Канадско-Французско-Гавайской обсерватории (CFH), расположенной на горе Мауна-Кеа на Гавайях, и в других обсерваториях. Адаптивная оптика оказалась весьма перспективной для поиска спутников у астероидов и позволила определить двойственность более десяти астероидов ГПА.

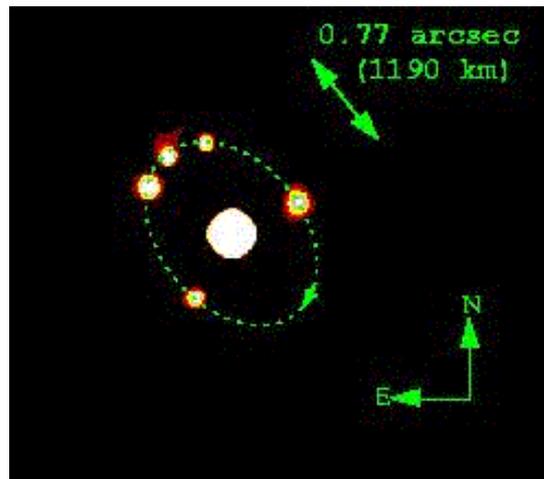
В качестве примера на рис. 1 приведены результаты наблюдений спутника у астероида 45 Евгения, полученные в инфракрасном диапазоне длин волн на 3.6-метровом телескопе.

В ближайшие годы можно ожидать новых открытий двойных и более сложных систем. В 2005 г. с помощью адаптивной оптики был открыт второй небольшой спутник у астероида 87 Сильвия. Полученный снимок приведен на рис. 2. Центральное тело, приведенное в крупном масштабе внизу справа, имеет вытянутую форму с двумя максимумами интенсивности, что может указывать на его двойственность, информация о которой и была опубликована в 1992 г. (Прокофьева, Демчик, 1992; Прокофьева, 1992).

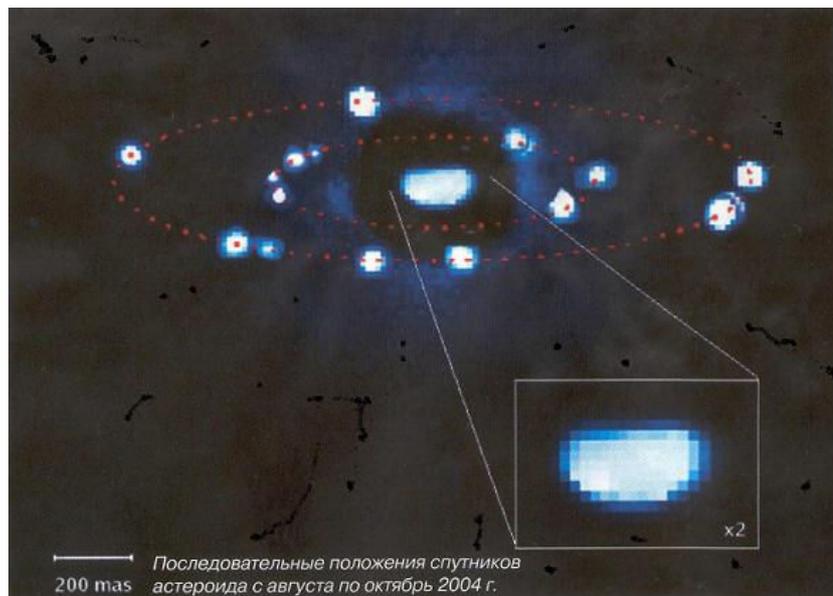
#### **3.2 Регистрация спутников астероидов при покрытиях звезд**

Наблюдения покрытий звезд астероидами (своеобразных затмений, видимых в определенных местах на Земле) с 1975 г. получили широкое развитие (Миллис, Иллиот, 1979).

По результатам этих наблюдений были сделаны предположения о наличии спутников у ряда астероидов, так как звезды затмевались не один раз, а два или даже более. В настоящее



**Рис. 1.** Астероид 45 Евгения со спутником. Положение спутника показано схематически для пяти моментов времени. Масштаб снимка указан вверху справа

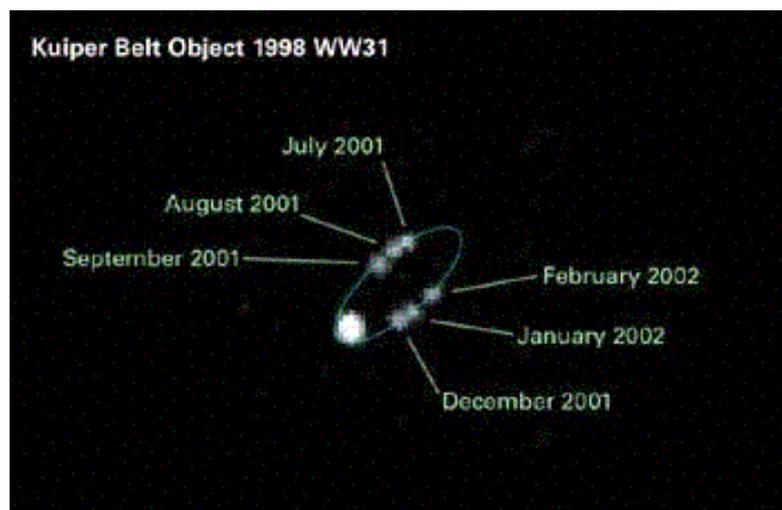


**Рис. 2.** Изображения спутниковой системы астероида 87 Сильвия, полученное с помощью адаптивной оптики

время разными авторами заподозрено, что еще более 300 астероидов могут иметь спутники ([http://www.bdl.fr/observateur/binast/binary\\_ast.php](http://www.bdl.fr/observateur/binast/binary_ast.php)).

### 3. 3 Наблюдения с борта космических аппаратов

Целью таких наблюдений является получение научных данных, которые недоступны для наземных обсерваторий. В качестве примера приведем наблюдения спутника у астероида 1998 WW31 (см. рис. 3). Его двойственность была обнаружена 22 декабря 2000 г. на Канадско-



**Рис. 3.** Схема перемещения изображения спутника двойного астероида 1998 WW31 с июля 2001 г по февраль 2002 г. Снимки получены с помощью телескопа Хаббла

Французско-Гавайском телескопе (CFHT). Астероид 1998 WW31 находится на расстоянии 45,6 астрономических единиц от Земли, его светимость составляла  $23.^m6$ , диаметр – около 150 км. Необычайно большим оказался эксцентриситет орбиты вторичного компонента ( $e = 0.8$ ). Период обращения  $570^d$ , расстояние между компонентами меняется от 4 тыс. до 40 тыс. км. Была определена плотность объекта, равная  $1.5 \text{ г/см}^3$ .

Наблюдения, полученные из космоса с помощью телескопа Хаббла, позволили установить наличие спутников более чем у десяти астероидов.

Планируются дальнейшие исследования астероидов с борта космических аппаратов. Так, космический аппарат (КА) "Rosetta", по пути к комете Чурюмова-Герасименко сблизится с двумя астероидами: 2867 Штейнс (5 сентября 2008 г.), и с крупным астероидом 21 Лютеция (10 июля 2010 г.) В мае 2006 г. запланирован запуск КА Dawn ("Рассвет"), который в 2019 г. будет исследовать крупнейший астероид Веста, а в 2014 г. подлетит к астероиду Церера.

### **3.4 Радиолокационные наблюдения**

Радиолокация астероидов стала реальностью после создания мощных радиопередатчиков и крупных радиотелескопов. С ее помощью были обнаружены спутники у многих астероидов АСЗ. Однако отметим, что современные радиолокационные устройства не могут обнаружить малый по размеру спутник. В статье С. Остро и др. (1996) было указано, что радиолокация не могла зарегистрировать малый спутник астероида 1620 Географ, существование которого было заподозрено по анализу фотометрических наблюдений, проведенных в НИИ "КрАО" (Прокофьева и др. 1997, 1998).

## **4 Исследования двойных астероидов по данным фотометрии и колориметрии в НИИ "Крымская астрофизическая обсерватория"**

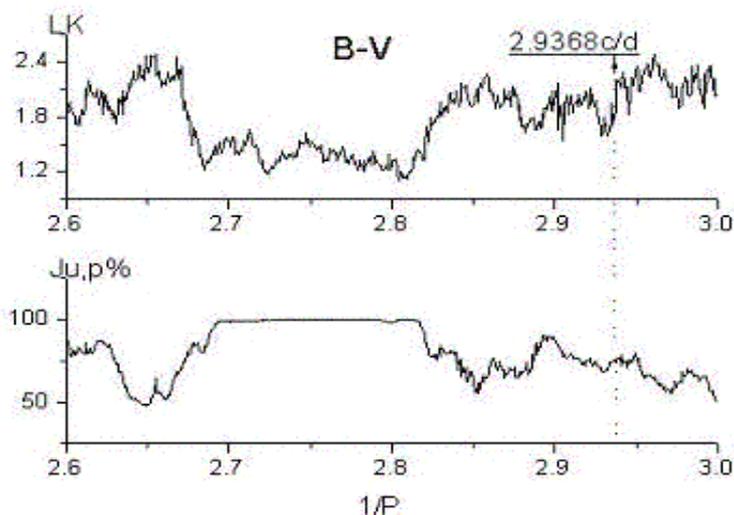
Сложные по композиции астероиды показывают, как правило, несколько периодов: орбитального движения, вращения компонентов, прецессии осей вращения и орбиты и др. Частотный анализ фотометрических наблюдений позволяет выявить скрытые на первый взгляд периодичности и получить информацию о периодах, обусловленных орбитальным и вращательным движением компонентов сложного по структуре астероида. Наличие большого количества значимых частот может свидетельствовать о присутствии у астероида нескольких спутников.

Особенностью фотометрических рядов, получаемых при наземных наблюдениях, является их разрывность, вызванная условиями видимости исследуемого объекта. В астрофизике разработаны несколько методов, позволяющих достаточно уверенно проводить анализ таких рядов, имеющих большую скважность. Они подробно описаны в монографии В. Ю. Теребижа (Теребиж, 1992, 2005). Исследования характеристик компонентов астероидов с помощью частотного анализа плотных фотометрических рядов были начаты автором статьи и др. в НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория” в начале 90-х годов прошлого века. В 1996 г., за цикл работ по исследованию двойных астероидов она была награждена Президиумом АН Украины премией им. академика Н. П. Барабашова.

Отметим, что большое значение для исследований сложной структуры астероидов имеют наблюдения показателей цвета. Надо использовать фотометрические наблюдения, полученные одновременно в двух или более спектральных полосах. Отношение яркости астероида в двух полосах и изменение его со временем несет информацию о распределении цветовых пятен на поверхности астероида или его отдельного компонента. Анализ цветовых наблюдений дает возможность выделить периоды вращения компонентов.

Ниже опишем наиболее интересные исследования спутниковых систем астероидов, выполненные в НИИ “КрАО”. Наблюдения были выполнены на телевизионном комплексе полуметрового менискового телескопа НИИ “КрАО”. Методика измерений блеска астероидов включала принцип повышения надежности получаемых данных за счет одновременного использования двух методов классической фотометрии: дифференциального и фундаментального. Частотный анализ фотометрических данных астероидов проводился с помощью составленных М.Ю. Клепиковым и К.В. Прокофьевой пакетов программ, позволяющих вести поиск частот одновременно тремя методами, из которых два позволяют искать периодичности для любых форм кривых блеска. В программы заложена возможность строить свертки и отбеливать данные за найденные периоды (Прокофьева и др., 1995). Отметим, что широко распространенные сейчас методы, основанные на Фурье-анализе, неудобны в случае исследований астероидов, так как предполагают синусоидальную форму колебаний блеска. Известно, что и для точного описания кривой блеска астероида, имеющей два максимума разной величины, надо использовать большое число синусоид. В случае равных максимумов можно брать вторую гармонику найденного периода, дающую двугорбую кривую блеска.

В качестве примера приведем результаты исследования сложной спутниковой системы астероида 87 Сильвия. Анализ колебаний блеска в полосе В показал наличие периода прецессии и известного периода вращения астероида  $0^{\text{d}}.2159853$ . Частотный анализ дважды отбеленных за эти периоды данных показал присутствие двух значений периодов  $0^{\text{d}}.221$  и  $0^{\text{d}}.12$ . Анализ показателей цвета позволил уточнить значения этих периодов  $0^{\text{d}}.2207$  и  $0^{\text{d}}.120$  и показал полное отсутствие известного периода вращения астероида. Факт отсутствия последнего в цветовых изменениях позволил авторам работы (Прокофьева, Демчик, 1994) предположить, что астероид является тесной двойной системой. Расстояние между поверхностями компонент было оценено всего в несколько десятков километров. На рис. 2. видно, что центральное тело вытянутое и, возможно, двойное. После обнаружения у астероида 87 Сильвия небольшого спутника Ромул, был проведен дополнительный частотный анализ фотометрических данных, который позволил нам обнаружить период прецессии, вызванный этим спутником (Прокофьева и др., 2001), и показать, что астероид Сильвия является тройным или более сложным телом. Действительно, в 2005 г. наблюдения на Южной Европейской обсерватории в Чили позволили обнаружить еще один спутник, получивший название Рэм.



**Рис. 4.** Периодограмма показателей цвета В-В астероида 21 Лютеция, построенная в диапазоне частот 2.6-3.0 с/д методами Лафлера-Кинмана (вверху) и Юркевича (внизу). Справа вверху указана частота известного периода вращения астероида

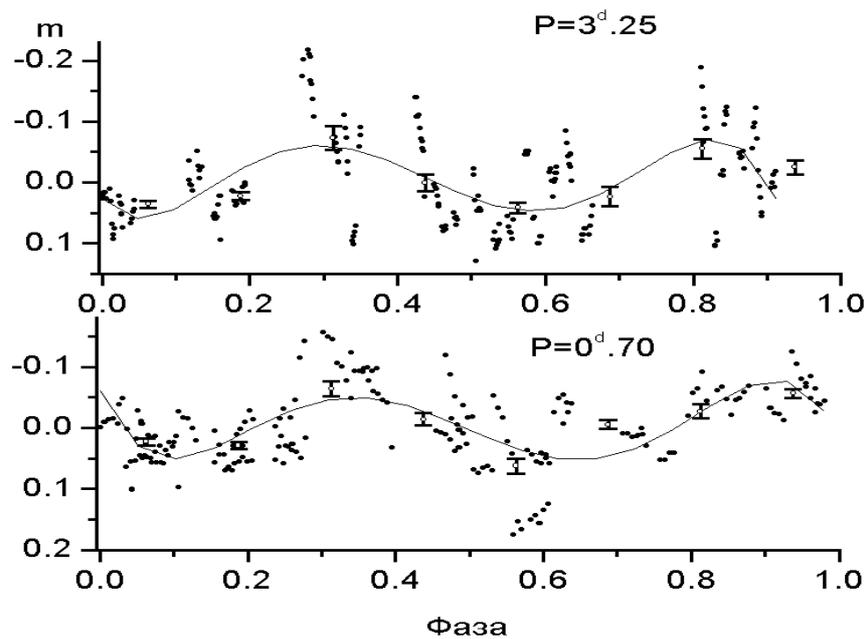
Таким образом, анализ фотометрических и колориметрических наблюдений астероида 87 Сильвия позволил сделать предположение о сложной спутниковой системе, что и было подтверждено наблюдениями, выполненными с помощью адаптивной оптики.

Астероид 423 Диотима наблюдался с 1990 по 2000 гг. Были выделены периоды  $P_1 = 0.^d6206$ , орбитальный,  $P_2 = 0.^d190$  (вращение главного компонента) и период прецессии  $113^d$  или кратный ему  $226^d$ . Большая амплитуда прецессионных колебаний  $0.^m8-1.^m0$  позволила заподозрить линзоподобную форму главного компонента (Прокофьева, Карачкина, 2004).

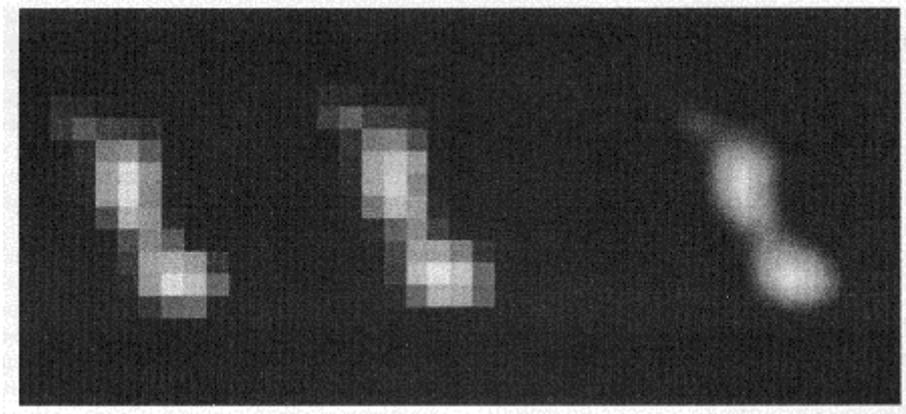
Астероид 1620 Географ наблюдался на телевизионном комплексе в НИИ “КрАО” в 1994 г. Частотный анализ данных подтвердил монолитность астероида: на периодограмме присутствовали только частоты вращения астероида и ее гармоники. После отбеливания данных за изменения блеска, вызванные вращением астероида, анализ показал наличие периода  $P_1 = 0.^d224$ , отличающегося от известного периода вращения  $P_0 = 0.^d2176$  астероида всего на 3%. Сделано предположение, что у астероида имеется небольшой спутник. Частотный анализ данных, полученных разными авторами в 1993-1994 гг., обнаружил периоды  $0.^d8$ ,  $2.^d8$  и кратные им. Первый из них обусловлен нутацией оси вращения астероида, а второй – вынужденной прецессией. Было высказано предположение о существовании у него небольших спутников (Прокофьева и др., 1997). Связь астероида с малыми телами метеорных ливней “Географиды” подтверждает правильность этого предположения (Рябова, 2002).

Около 1000 измерений блеска астероида 21 Лютеция в полосах В, V и R были получены одновременно на телевизионном комплексе в период с 3 по 11 ноября 2004 г. Анализ показателей цвета в широком диапазоне частот показал отсутствие известного периода  $0.^d3405$  (8.172 часа), несмотря на трёхкратное отбеливание данных за другие периоды. На рис. 4. представлен результат анализа данных В-V в области частоты вращения, сделанный в небольшом диапазоне частот. Данные графика указывают на четкое отличие имеющихся частот в диапазоне 2.7-2.8с/д от известной частоты вращения астероида 2.9368с/д.

Анализ данных, полученных в полосе V, показал наличие двух периодов  $P_1 = 0.^d70$  и  $P_2 = 3.^d20$ , причем оба периода дали двугорбые кривые блеска с амплитудами  $0.^m12$  и  $0.^m10$ . Свертки данных с этими периодами приведены на рис. 5.



**Рис. 5.** Кривые блеска астероида 21 Лютеция в полосе V, построенные с найденными периодами, величины которых указаны на графиках



**Рис. 6.** Два снимка астероида 9969 Braille (слева), полученные с космического корабля Deep Space 1, и результат их обработки (справа).

На основании полученных результатов сделано предположение, что астероид 21 Лютеция является двойным (Прокофьева, Бочков, 2006). В 2010 г. космический аппарат “Розетта” пройдет близко от астероида и сфотографирует его. Будет получен однозначный ответ о двойственности или монолитности астероида 21 Лютеция.

### 5 Модель тройного астероида 9969 Braille

Изображения астероида 9969 Braille в полосе R были получены 29 июля 1999 г. при пролете мимо него космического корабля Deep Space 1 на расстоянии 13500 км. Средний блеск астероида составлял  $R = 17.^m04$ , амплитуда изменений блеска –  $0.^m87$ . Был найден период вращения, равный  $9.^d4$ , и оценены размеры астероида  $2.1 \times 1 \times 1 \text{ км}^3$ .

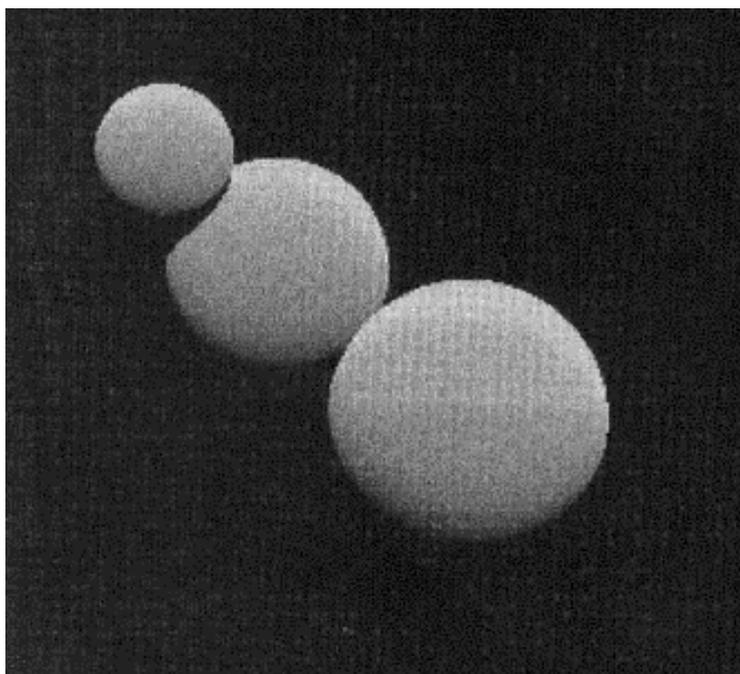


Рис. 7. Модель тройного астероида 9969 Braille.

В результате обработки снимков оказалось, что астероид состоит из трех тел. Оберст и др. (2001), построили модель астероида, предполагая что все три тела сферические (см. рис. 7). Модельная кривая блеска хорошо согласуется с данными наблюдений.

Эта модель представлена как пример моделирования астероидов, имеющих спутники. Быстрое развитие современных методов моделирования, несомненно, позволит в ближайшем будущем построить модели двойных и более сложных астероидальных спутниковых систем.

## 6 Заключение

В Солнечной системе в течение последнего десятилетия обнаружена популяция астероидов со спутниками, составляющая уже более 80 астероидов. Первые данные об открытии спутника у астероида 87 Сильвия были получены в КрАО, а сейчас он известен как сложная спутниковая система. Учитывая, что спутники открывают около хорошо изученных астероидов, и, сделав поправку на селекцию наблюдений, можно предполагать, что процентный состав астероидов, имеющих спутники, составляет более 5%. Если учесть астероиды, заподозренные в двойственности, то эта цифра увеличится до 15%. Можем надеяться, что увеличение числа подробно исследованных астероидов в ближайшее время позволит уточнить процентный состав популяции астероидов со спутниками.

Исследования орбит спутников астероидов позволило в ряде случаев определить плотности этих небесных тел, которые оказались существенно меньше, чем предполагались ранее. Это очень существенно для разработки космогонических гипотез.

Образование двойных астероидов остается важной проблемой космогонии. Предлагались разные модели формирования спутников астероидов. Их преимущества и недостатки кратко описаны в обзоре (Прокофьева-Михайловская и др. 2005).

## Литература

- Белтон и др. (Belton M. J. S., Chapman C. R., Veverka J.) // *Science*. 1994. V. 265. P. 1543.
- Миллис, Иллиот (Millis R. Z., Elliot J. L.) // *Asteroids*/ Ed. T. Gehrels. Tucson: Arizona Univ. Press, 1979. P. 98.
- Оберст и др. (Oberst J., Motola S., Di Martino M. et al.) // *Icarus*. 2001. V. 153. P. 16.
- Остро и др. (Ostro S. J., Jurgens R. F., Rosema K. D. et al.) // *Icarus*. 1996. V. 121. P. 46.
- Прокофьева В. В. // *Комет. циркуляр*. 1992. № 426. С. 13.
- Прокофьева В. В., Демчик М. И. // *Астрон. циркуляр*. 1992. № 1552. С. 27.
- Прокофьева В. В., Демчик М. И. // *Письма в Астрон. журн*. 1994. 20, № 4. С. 299.
- Прокофьева В. В., Карачкина Л. Г. // *Физика Луны и планет: Абстр. Конф., посвящ. 100-летию со дня рожд. акад. М. П. Барабашова*. Харьков. Астрон. обс. Харьков. ун-та, 1994. С. 103.
- Прокофьева В. В., Карачкина Л. Г. // *Астрон. вестник*. 2004. Т. 38. N 2. С. 108.
- Прокофьева В. В., Бочков В. В. // *Астрон. вестник*. 2006. Т. 40. ( в печати).
- Прокофьева В. В., Тарашук В. П., Горькавый Н. Н. // *Успехи физ. наук*. 1995. Т. 165, № 6. С. 661.
- Прокофьева В. В., Карачкина Л. Г., Тарашук В. П. // *Письма в Астрон. журн*. 1997. Т. 23. №11 С. 870.
- Прокофьева В. В., Карачкина Л. Г., Тарашук В. П. // *Астрономич. вестник*. 1998. Т. 32. N 4. С. 327.
- Прокофьева В. В., Карачкина Л. Г., Гафтонюк Н. М. // *Околосемная астрономия XXI века*. 2001. Звенигород. С. 252.
- Прокофьева В. В., Карачкина Л.Г., Батраков Ю.В. // *Всероссийская конференция Астероидно-кометная опасность -2005. 3-7 окт. 2005 г. Санкт-Петербург. Материалы конференции*. 2005. С. 285.
- Прокофьева-Михайловская В. В., Батраков Ю. В., Карачкина Д. Г. // *Кинематика и физика неб. тел*. 2005. Т. 21. №5. С. 323.
- Рябова Г. О. // *Астрон. вестник*. 2002. Т. 36. № 3. С. 234.
- Теребиж В.Ю. // *Анализ временных рядов в астрофизике*. М. Наука 1992. 399 с.
- Теребиж В. Ю. // *Введение в статистическую теорию обратных задач*. Москва. Физматлит. 2005. 375 с.