

## ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

## Спектральный и спектрально-частотный методы исследования безатмосферных тел Солнечной системы

В.В. Бусарев, В.В. Прокофьева-Михайловская, В.В. Бочков

*Рассматривается метод получения спектров отражения безатмосферных тел Солнечной системы, его специфика и способы устранения основных спектральных помех. Для развития этого метода предлагается объединить его с частотным анализом наблюдательных рядов спектральных данных. Комбинированный спектрально-частотный метод дает возможность идентифицировать на поверхности безатмосферного небесного тела образования, имеющие характерные спектральные особенности, а также оценить их размеры и распределения. Применение спектрально-частотного метода при исследованиях астероидов 21 Лютеция и 4 Веста позволило авторам получить о них принципиально новую информацию.*

PACS numbers: 95.55.Qf, 95.85.Kr, 96.30.Ys

## Содержание

1. Введение (663).
  2. О специфике получения спектров отражения планет (664).
  3. Спектрально-частотный метод исследований (666).
  4. Исследование астероида 21 Лютеция спектрально-частотным методом (668).
  5. Цветовые пятна на поверхности астероида 4 Веста (671).
  6. Заключение (673).
- Список литературы (674).

## 1. Введение

В последнее время в результате значительного роста наблюдательных возможностей в современной астрономии, в частности в планетной, резко увеличилось количество известных объектов. Так, общее число малых планет Солнечной системы, которым присвоены постоянные номера, уже приближается к 150000 [1]. Однако следует заметить, что почти для всех новых малых планет и спутников известны только элементы орбит и оценоч-

ные размеры. Вследствие многочисленности новых объектов их физические и химико-минералогические характеристики будут оставаться неизученными еще длительное время. Вместе с тем такая информация крайне необходима для решения целого ряда космогонических проблем, связанных с эволюцией как малых, так и больших планет Солнечной системы. Более того, решение подобных проблем актуально не только для нашей планетной системы, но и для множества экзопланетных систем, открытых за последние 15–20 лет [2]. Из сказанного следует, что реальный путь быстрого массового изучения указанных объектов — это широкое использование и развитие наземных дистанционных (астрофизических) методов их исследований.

Крупные наземные телескопы с диаметром зеркала порядка 4–10 м позволили бы провести астрофизические исследования малых планет и спутников планет с наибольшей эффективностью. Однако действующих таких телескопов пока мало, а наблюдательное время на них жестко лимитировано. Поэтому рассчитывать на получение большого объема данных о новых объектах с помощью крупных инструментов в настоящее время не приходится. То же можно сказать и по поводу возможности использования для решения указанной задачи телескопов космического базирования ("Hubble", "Spitzer" и др.) и космических миссий. Перечисленные причины заставляют ставить вопрос о необходимости применения для систематических исследований планет небольших и средних по размеру телескопов (с диаметрами в диапазоне 0,5–3 м), оснащенных высокочувствительной аппаратурой. Благодаря большому числу и большей доступности таких инструментов решение рассматриваемой задачи в течение, скажем, двух-трех десятков лет становится реальным. Это время может быть и меньше в случае создания большого количества специализированных обсерваторий, регулярно выполняющих такие иссле-

**В.В. Бусарев.** Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга (ГАИШ),  
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  
119992 Москва, Университетский пр. 13, Российская Федерация  
Тел. (495) 939-10-29  
E-mail: busarev@sai.msu.ru

**В.В. Прокофьева-Михайловская, В.В. Бочков.**  
Научно-исследовательский институт  
"Крымская астрофизическая обсерватория",  
334413 Крым, пос. Научный, Украина  
Тел. (380) 65-54-71-124  
E-mail: prok@crao.crimea.ua; bochkov@crao.crimea.ua

Статья поступила 22 января 2007 г.

дования. Следует подчеркнуть, что использование наземных телескопов при оценке состава и других характеристик поверхности твердых тел может быть эффективным только в отсутствие у них значительной газовой оболочки, искажающей отражаемый ими солнечный свет.

Кроме высокочувствительной приемной аппаратуры, условием успешного изучения безатмосферных планет с помощью небольших телескопов являются эффективные методы исследований. К основным оптическим методам, безусловно, следует отнести фотометрию, спектрометрию и поляриметрию небесных объектов, которые хорошо разработаны, широко используются в астрофизике и поэтому не нуждаются в детальном рассмотрении. Они применяются и для изучения структуры и характеристик поверхностного вещества планет.

В этой статье показано, как комбинация двух названных выше методов и метода частотного анализа (ЧА) позволяет получить новую информацию о твердых небесных телах. Физические основы упомянутых наблюдательных методов состоят в том, что холодное безатмосферное тело отражает падающее солнечное излучение, которое может быть зарегистрировано измерительным прибором. Из-за высокой шероховатости поверхности твердых небесных тел (вплоть до микроуровня, когда размеры шероховатостей сравнимы с длиной световой волны) в выражении "тело отражает" подразумевается тот физический факт, что солнечный свет, отражаемый поверхностью твердого тела, состоит как из зеркальной, так и рассеянной компонент. Следует подчеркнуть, что представляющая для нас интерес рассеянная компонента включает излучение, рассеянное не только поверхностью (определяемое индикатрисой рассеяния), но и внутренним объемом вещества. Как раз последняя составляющая отраженного небесным телом излучения, называемая диффузной, и содержит информацию о составе его вещества.

Если поверхность тела имеет пятнистую структуру или некоторые детали рельефа, различающиеся спектральными характеристиками или индикатрисами рассеяния света, то такое тело при вращении осуществляет модуляцию (спектральную или интегральную) светового потока, отражаемого в направлении наблюдателя. Эта информация содержится в наблюдательных данных, и вопрос состоит в том, как ее правильно извлечь. При полном обороте небесного тела вокруг оси вращения наблюдатель может зарегистрировать все изменения поля отраженного этим телом светового излучения в виде вариаций яркости или блеска. Полученные кривые блеска (иногда употребляется также термин "световые кривые") несут информацию о деталях поверхности изучаемой планеты в форме более высоких гармоник частоты ее вращения. Определяя такие частоты на наблюдаемом интервале фаз кривых блеска планеты, можно оценить характерный размер неоднородностей на соответствующей доле ее поверхности.

Вариант такого ЧА был ранее опробован на массиве фотометрических данных астероида 1620 Географ [3]. Оценка размеров его рельефа осуществлялась по фотометрическим наблюдениям 1994 г., имеющих временное разрешение 0,4 мин и около 1 мин. В результате ЧА данных было обнаружено несколько периодов, которые повторялись при анализе трех рядов данных: 5,4; 7,5 и 15 мин (кратный предыдущему). В области длинных

периодов в первичном максимуме присутствовал период около 40 мин. Амплитуды оказались невелики (около  $0^m,02$ ), но регистрировались достаточно надежно. Отличие величин периодов в различных максимумах кривых блеска астероида указывало на разные размеры деталей с разных сторон. Так, размеры наиболее крупных деталей составили 1–1,2 км, а размеры наиболее мелких оказались в диапазоне 150–250 м.

Сравнение размеров деталей поверхности астероида 1620 Географ, полученных нами на основе ЧА фотометрических данных и радарных исследований астероида Остро и др. [4], показало их полное согласие. Это позволило распространить применение данного метода и на область спектрофотометрических и спектральных исследований астероидов.

## 2. О специфике получения спектров отражения планет

Вначале рассмотрим подробнее особенности метода измерения и расчета спектра отражения планеты, который имеет ряд отличий от известного в астрофизике дифференциального метода регистрации спектров небесных объектов. Кроме того, специалисты из смежных областей астрофизики не всегда точно осознают физический смысл понятия "спектр отражения планеты" и его связь с химико-минеральным составом вещества.

Итак, остановимся на случае (кстати, наиболее типичном при наземных астрономических наблюдениях), когда безатмосферное тело является достаточно малым или удаленным, так что его можно принять за точечный источник света. Кроме того, будем считать, что у планеты нет заметной атмосферы. Очевидно, что к таким телам можно отнести астероиды, тела Эдворта–Койпера и безатмосферные спутники больших планет. Тогда при наличии уже измеренных в некотором спектральном диапазоне наблюдательных данных исследуемой планеты и стандартной звезды монохроматическая освещенность планетой условной верхней границы земной атмосферы  $E_n(\lambda)$  может быть рассчитана по методу дифференциальной фотометрии таким образом:

$$E_n(\lambda) = E_{c.3}(\lambda) \frac{I_n(\lambda)}{I_{c.3}(\lambda)} p(\lambda)^{-\delta M}, \quad (1)$$

где  $E_{c.3}(\lambda)$  — известная, например, из какой-либо опубликованной работы монохроматическая освещенность верхней границы земной атмосферы стандартной звездой, эрг  $\text{см}^{-2}$  с  $\text{\AA}$ ;  $I_n(\lambda)$  и  $I_{c.3}(\lambda)$  — величины отсчетов интенсивности света от планеты и стандартной звезды соответственно на спектральном приемнике (ПЗС или любом другом), исправленных с учетом фона неба;  $p(\lambda)$  — функция спектральной прозрачности атмосферы, рассчитанная для данной наблюдательной ночи;  $\delta M = M_n - M_{c.3}$  — разность воздушных масс, соответствующих планете и стандартной звезде в момент наблюдений.

С другой стороны, согласно выводам работы [5] монохроматическая освещенность планетой верхней границы земной атмосферы (при нормальном падении лучей) может быть выражена через монохроматическую освещенность изучаемой планеты  $E(\lambda)$  солнечным светом:

$$E_n(\lambda) = \pi \Gamma_\lambda F(\alpha, \lambda) E(\lambda) \frac{r^2}{\Delta^2}, \quad (2)$$

где  $\Gamma_\lambda$  — геометрическое альbedo, учитывающее интегральные физико-химические свойства наблюдаемой полусферы планеты,  $F(\alpha, \lambda)$  — фазовая функция планеты (при  $\alpha = 0$   $F(\alpha, \lambda) = 1$ ),  $r$  — радиус планеты,  $\Delta$  — расстояние между планетой и Землей. Но поскольку неизвестную величину  $E(\lambda)$  можно выразить по закону обратных квадратов через известную (из литературных источников) освещенность солнечным светом верхней границы земной атмосферы  $E_0(\lambda)$  как

$$E(\lambda) = E_0(\lambda) \frac{R_0^2}{R^2}$$

( $R_0$  — расстояние от Земли до Солнца,  $R$  — расстояние от планеты до Солнца), то формулу (2) можно представить в следующем виде:

$$E_{\text{п}}(\lambda) = \pi \Gamma_\lambda F(\alpha, \lambda) E_0(\lambda) \frac{r^2 R_0^2}{R^2 \Delta^2}. \quad (3)$$

Введем обозначение  $\rho(\alpha, \lambda) = \pi \Gamma_\lambda F(\alpha, \lambda)$ , которое называется коэффициентом (или фактором) средней спектральной яркости наблюдаемой полусферы планеты (точнее, ее проекции на картинную плоскость наблюдателя) и приравняем правые части формул (3) и (1). Тогда получим формулу для расчета  $\rho(\alpha, \lambda)$  в абсолютных единицах:

$$\rho(\alpha, \lambda) = \frac{k E_{\text{с.з}}(\lambda) I_{\text{п}}(\lambda) p(\lambda)^{-\delta M}}{E_0(\lambda) I_{\text{с.з}}(\lambda)}, \quad (4)$$

где  $k = \Delta^2 R^2 / (r^2 R_0^2)$  — безразмерный множитель. Очевидно, что  $\rho(\alpha, \lambda)$  — также безразмерная величина. Если фактор яркости  $\rho(\alpha, \lambda)$  рассматривать в некотором спектральном диапазоне, то это его распределение и будет спектром отражения. Когда фазовый угол планеты близок к нулю, т.е.  $\alpha \approx 0$ , спектр отражения будет представлять собой спектральную зависимость геометрического альbedo наблюдаемой полусферы планеты.

Из формулы (4) понятен физический смысл спектра отражения, который получается в результате деления спектрального распределения энергии в спектре планеты на ту же характеристику падающего на нее солнечного излучения. Спектр отражения планеты является (по крайней мере, в ближнем УФ-, видимом и ближнем ИК-диапазонах, где отсутствует собственное тепловое излучение планеты) спектральной зависимостью диффузной компоненты светового потока, прошедшей сквозь вещество и несущей информацию о его физико-химических свойствах.

В практике спектральных исследований планет сейчас широко применяется приближенная, но более простая и удобная методика получения их спектров отражения, которая не требует регистрации спектрального распределения энергии в спектре излучения Солнца в момент наблюдений. Если в качестве стандартной звезды использовать звезду класса G0V, которая является солнечным аналогом (например, из списка в [6]) и имеет распределение энергии в спектре излучения, достаточно близкое к солнечному, то в выражении (4) можно считать  $E_{\text{с.з}}(\lambda) \approx E_0(\lambda)$  и представить его как

$$\rho(\alpha, \lambda) = \frac{k I_{\text{п}}(\lambda) p(\lambda)^{-\delta M}}{I_{\text{с.з}}(\lambda)}. \quad (5)$$

Рассчитанные по формуле (5) спектры отражения планеты аппроксимируют реальные с хорошей точностью при использовании лучших спектральных аналогов Солнца. Проконтролировать точность полученных этим способом планетных спектров отражения можно, сравнивая их с подобными спектрами, рассчитанными с использованием наблюдательных характеристик других солнечных аналогов или солнечных спектральных данных. Вместе с тем, несмотря на явные преимущества, такой упрощенный метод имеет и значительные недостатки, связанные чаще всего с невысоким качеством результирующих спектров отражения, т.е. с их зашумленностью. Остановимся несколько подробнее на возможных путях решения этой проблемы.

Очевидно, что важным условием получения качественных спектров отражения планеты является достижение высокого конечного отношения сигнал/шум. Однако если на этапе регистрации спектра объекта снижения уровня статистического шума можно добиться путем простого увеличения времени экспозиции, то последующая процедура деления рядов спектральных данных  $I_{\text{п}}(\lambda)/I_{\text{с.з}}(\lambda)$  для получения спектра отражения (согласно формуле (4) или (5)) вносит в конечный результат дополнительную шумовую компоненту (ДШК). Например, одной из простейших причин возникновения ДШК может быть низкое спектральное разрешение приемной аппаратуры. В этом случае неточное совмещение шкал длин волн спектров планеты и стандартной звезды или звезды-аналога даже при условии их правильной калибровки приводит к появлению ДШК. Причем эта погрешность не может быть меньше спектрального разрешения, задаваемого системой телескоп + спектрограф + приемник. Если полуширина какой-либо полосы поглощения в результирующем спектре отражения оказывается сравнимой с приборным спектральным разрешением, то ее отождествление практически невозможно. Повышение спектрального разрешения регистрирующей системы позволяет в значительной мере устранить этот "источник" ДШК в планетных спектрах отражения. Рассмотрим некоторые другие причины появления ДШК и попытаемся наметить пути их устранения или ограничения.

Наиболее существенным источником ДШК в спектрах отражения планет являются сами звезды-солнечные аналоги. Как известно из теоретической и практической астрофизики, несмотря на огромное число и многообразие звезд, идеальных двойников Солнца среди них нет из-за несовпадения их каких-то физических параметров (эффективной температуры, ускорения силы тяжести в атмосфере, показателей цвета и т. д.) или химического состава. Поэтому тщательные поиски по всему звездному небу привели пока только к составлению списка примерно из десятка звезд (4–6 звездных величин и спектральных классов G0V–G3V), которые можно считать хорошими спектральными аналогами Солнца [7]. Составлен также и более широкий список звезд, которые рассматриваются в качестве кандидатов в солнечные аналоги. Ранее [5] уже анализировались относительные спектральные различия между некоторыми звездами-аналогами и Солнцем. В работе [5] показано, что эти различия наиболее заметны в области бальмеровского скачка (0,38–0,40 мкм), а также вблизи наиболее интенсивных линий поглощения ( $H$  и  $K$  ( $\text{CaII}$ ),  $H_\alpha$ ,  $H_\beta$ ,  $H_\gamma$  и  $H_\delta$ ). Причем различия возникают не только на длинах волн,

соответствующих центрам этих линий, но и в областях их крыльев, протяженность которых значительно возрастает при увеличении интенсивности самих линий (в частности, у звезд ранних спектральных классов при увеличении  $T_{\text{эфф}}$  или содержания водорода). Оказалось также, что более мелкие спектральные неоднородности, порождаемые линиями металлов в спектрах звезд-аналогов более поздних спектральных классов, могут создавать шумовой фон практически во всей видимой области планетных спектров отражения при использовании таких звезд-аналогов. Таким образом, при делении наблюдаемого спектра планеты (отражающей солнечный свет) на спектр солнечного аналога осуществляется последовательное сравнение спектров звезды-аналога и Солнца. При этом выявляются все имеющиеся между ними спектральные различия в виде интенсивной ДШК, которую устранить полностью невозможно. Единственным способом ограничения ДШК в данном случае может быть использование хороших звезд-аналогов.

Еще один значительный источник ДШК, на котором следует остановиться, — это земная атмосфера. Как известно, с одной стороны, водяной пар, кислород, углекислый газ, азот и озон порождают интенсивные теллурические линии и полосы при прохождении света через земную атмосферу (см., например, [8]). С другой стороны, мельчайшие капельки воды и пыли в облаках (даже незначительных), а также ячейки атмосферной турбулентности вызывают рассеяние и флуктуации проходящего сквозь них света. Хотя указанные явления рассеяния в основном спектрально-неселективные, но они приводят к искажениям волнового фронта светового потока, которые передаются его монохроматическим составляющим при разложении в спектр. Поэтому при сравнении (делении) интенсивностей световых потоков от планеты и стандартной звезды, прошедших в земной атмосфере разные оптические пути, случайные флуктуации их монохроматических составляющих приводят к появлению ДШК в результирующем планетном спектре отражения. Проведение наземных наблюдений в хороших астроклиматических условиях, как правило, обеспечивает высокое качество спектров небесных объектов, их низкую зашумленность. Однако для абсолютного большинства астрономических обсерваторий (за исключением всего нескольких) такие атмосферные условия возникают нечасто и на ограниченное время. Поэтому весьма актуален поиск методов, которые позволили бы минимизировать ДШК в спектрах отражения планет, получаемых с земной поверхности при погодных условиях, несколько отличающихся от идеальных. Достаточно действенный способ подавления ДШК в планетных спектрах отражения — это их сглаживание. Имеется ряд методов, например частотной фильтрации, бегущего среднего и других, которые улучшают качество спектров отражения и облегчают идентификацию в них реальных деталей. В качестве примера на рис. 1а представлен спектр отражения астероида 21 Лютеция, рассчитанный по спектрам астероида и звезды — солнечного аналога (HD117176) (5 марта 2006 г., 1,25-м телескоп ГАИШ со спектрографом и ПЗС-матрицей ST-6 SBIG), измеренным при наличии тонкой перистой облачности. На рисунке 1б показан тот же спектр, но после сглаживания методом бегущего среднего (по пяти точкам). Из рисунка 1б видно, что после сглаживания спектр отражения астероида, особенно вблизи синей и красной

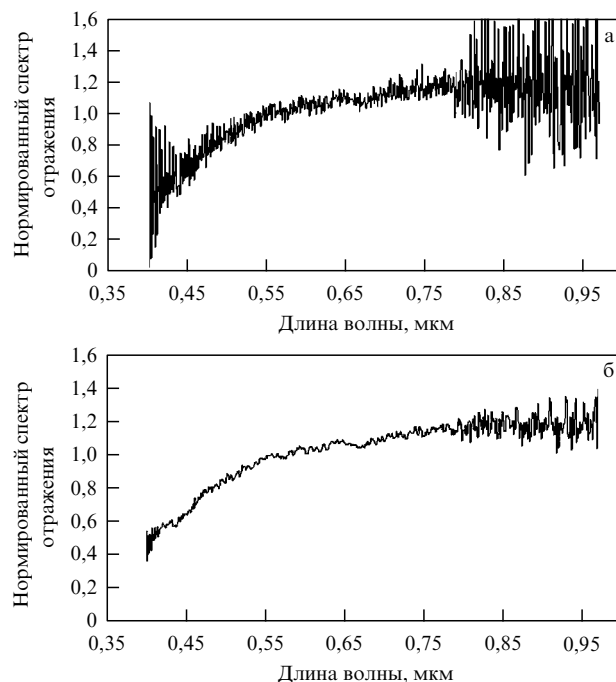


Рис. 1. (а) Пример зашумленного спектра отражения астероида 21 Лютеция. Спектр отражения был рассчитан по спектрам астероида (время накопления 300 с) и солнечного аналога HD117176 (время накопления 10 с), измеренным 5 марта 2006 г. ( $UT\ 01^{\text{h}}31^{\text{m}}$  и  $03^{\text{h}}26^{\text{m}}$  соответственно) на 1,25-м телескопе Крымской лаборатории ГАИШ с ПЗС-спектрографом со спектральным разрешением 0,0009 мкм в диапазоне 0,40–0,96 мкм и нормирован на длину волны 0,55 мкм. (б) Тот же спектр после сглаживания методом бегущего среднего по пяти точкам.

границ, сохраняет шумовую структуру, хотя и значительно меньшей интенсивности.

Ниже остановимся на специальных частотных методах, которые также облегчают отождествление и выделение полезной информации в спектрах отражения безатмосферных планет и спутников.

### 3. Спектрально-частотный метод исследований

Предлагаемый спектрально-частотный метод исследований основан на регистрации достаточно большого ряда спектров какого-либо безатмосферного твердого тела и их ЧА. Цель метода, как уже отмечалось, состоит в том, чтобы, во-первых, обнаружить на поверхности планеты какие-либо образования и, во-вторых, идентифицировать с ними наблюдаемые вариации планетных спектральных характеристик, соответствующие изменениям в физико-химических параметрах вещества. В рассматриваемом методе ЧА используется такое характерное свойство твердого небесного тела, как вращение вокруг собственной оси. Поэтому повторяемость или изменение какой-либо спектральной детали (например, полосы поглощения) в ряде последовательных спектров отражения исследуемого тела с периодом, равным периоду его вращения или какой-то доле последнего, является подтверждением достоверности ее обнаружения. Измерение амплитуды таких периодических вариаций в 2–3 соседних диапазонах спектра отражения позволяет более полно и надежно описать форму спектра и ее вариации

и, следовательно, более детально охарактеризовать неоднородности структуры или состава вещества небесного тела. Таким образом, определение частоты (или частот) периодических спектральных изменений дает возможность оценить размеры и распределение на поверхности планеты спектрально-контрастных пятен вещества, обладающего некоторыми физико-химическими особенностями.

Очевидно, что необходимым условием частотного анализа измеренных спектральных данных является их абсолютизация. То есть данные, полученные в разное время и при разных условиях (аппаратурных, атмосферных и астрономических), должны быть приведены в единую систему с помощью их калибровки, "выноса" за земную атмосферу, привязки к звездным стандартам и перерасчета на стандартные расстояния между Землей, объектом и Солнцем. После такой коррекции исходных данных в соответствующих спектрах исследуемого объекта может быть найдена какая-то характерная деталь (например, полоса поглощения или участок спектра с определенным наклоном), для описания которой рассчитывается одна, две или несколько синтетических фотометрических полос. В частности, для характеристики полосы поглощения достаточно определить ее эквивалентную ширину, а для описания наклона спектра отражения в фиксированном диапазоне достаточно рассчитать показатель цвета, т.е. отношение звездных величин объекта в фотометрических полосах, выбранных на границе этого диапазона.

Современная спектрофотометрическая аппаратура обеспечивает хорошую точность измерений (при высоком отношении сигнал/шум — порядка 1 % и лучше) и высокое временное разрешение (до десятых долей секунды). При фотометрических наблюдениях, когда для измерений выбирается ограниченная спектральная полоса, одновременно со световым потоком от твердого тела регистрируются световые потоки от соседних звезд для контроля изменения атмосферной экстинкции (или прозрачности) в течение ночи. В соответствии с методом абсолютной фотометрии осуществляется также и фотометрическая калибровка всех наблюдательных данных по искусственному фотометрическому стандарту [3], а экстинкция земной атмосферы определяется для каждой наблюдательной ночи. Спектральная полоса при таких исследованиях может быть выбрана любая, но предпочтительна полоса  $V$ , поскольку она обеспечивает довольно высокий уровень отношения сигнал/шум. ЧА проводится по абсолютным звездным величинам твердого тела, приведенным к единичному расстоянию от Солнца и от Земли и к нулевому фазовому углу освещения и наблюдения. Следует отметить, что интересные результаты могут быть получены и при ЧА показателей цвета объекта, которые получаются при делении величин его яркости в двух соседних по спектру фотометрических полосах. Для этого необходима одновременная или квазисовременная регистрация фотометрических величин изучаемого тела в этих спектральных полосах. Такой показатель цвета, с одной стороны, не содержит интегральных изменений объекта яркости, связанных с наблюдаемыми вариациями формы его тела при вращении, а с другой — содержит информацию о размерах и распределении цветных пятен на его поверхности. Например, цветные пятна на разных компонентах двойного объекта порождают частоты в его интеграль-

ных показателях цвета, соответствующие угловым скоростям вращения этих компонент, но не создают частоту, связанную с их орбитальным движением.

Для получения полной информации о небесном объекте при ЧА его наблюдательных данных регистрация ряда его спектров в широком диапазоне (например, во всем видимом и/или в ближнем инфракрасном) является более предпочтительной, чем его фотометрия в одной или нескольких спектральных полосах. Такие спектры, как правило, содержат необходимую дополнительную информацию, которая может быть использована для последующего рационального выбора более узких фотометрических полос. Кроме того, синтетические фотометрические величины объекта в таких полосах могут быть рассчитаны по его известным спектральным данным. Такие фотометрические величины можно вычислить либо в стандартной фотометрической системе (например, Джонсона), либо с учетом положения в спектре объекта каких-то интересных спектральных деталей.

При ЧА наблюдательных данных возможны два подхода в составлении компьютерных программ. Один из них основан на опыте построения кривых блеска с пробными периодами и разработке автоматических приемов выделения наиболее вероятного периода по минимальному рассеянию точек вокруг средней кривой. Разные методы ЧА отличаются способами оценки рассеяния точек, например, Лафлера – Кинмана [9] и Юркевича [10]. Следует отметить, что форма кривой блеска при использовании указанных методов ЧА может быть любой. Они применимы для анализа рядов с большими разрывами, но для обеспечения высокой вероятности выделения верного периода необходимо большое число данных наблюдений. Второй подход основан на фурье-анализе. Он строже математически, но при его использовании встречаются трудности при работе с разрывными рядами. Диминг в 1975 г. [11] предложил метод, позволяющий из ряда данных убирать частоты, модулируемые его скважностью. В последнее время широко распространение для исследований переменности блеска звезд и вращающихся твердых тел получил метод Брегера [12], также основанный на фурье-анализе. Метод Брегера используется обычно для предварительного ЧА рядов данных. Следует отметить, что из перечисленных методов последние применимы при синусоидальной форме колебаний яркости объектов, в случае же кривых блеска, имеющих по два максимума, они не обнаруживают колебаний с реальным периодом, а дают его вторую гармонику.

ЧА фотометрических данных астероидов, полученных в НИИ "Крымская астрофизическая обсерватория", проводится с помощью пакетов программ, позволяющих вести поиск частот в кривых блеска любой формы. Основная программа ("Period"), с помощью которой выполняется обработка наблюдений, была разработана М.Ю. Клепиковым и доработана К.В. Прокофьевой. Вычисления в ней производятся одновременно тремя различными методами: Лафлера – Кинмана, Юркевича, Диминга [9–11]. Программа предоставляет оператору возможность быстро просматривать свертки данных с заданным периодом, а также подбирать степень полинома для аппроксимации медленных изменений в кривой блеска. При вычитании значений такого полинома из соответствующих фотометрических данных удаляются

колебания блеска с выбранным периодом, его гармоники и сопряженные с ним периоды. Так осуществляется процедура отбеливания данных, которая необходима для дальнейшего поиска скрытых периодов меньшей амплитуды [13]. При наличии мультипериодичности отбеливание данных, как правило, производится в порядке уменьшения амплитуды периодических колебаний.

Явление усложнения частотного спектра блеска астрономических объектов при наличии рядов наблюдений с большими разрывами хорошо известно в астрофизике под названием подмены частот [13]. Частоты, появляющиеся в результате взаимодействия истинной частоты колебаний блеска исследуемого объекта с частотами скважности наблюдений, часто называют артефактами. Амплитуды пиков, соответствующих этим частотам, по величине сравнимы с пиками, соответствующими истинной частоте. Кроме того, в частотном спектре наблюдаются так называемые комбинационные или сопряженные частоты, возникающие при сложении сигнала с частотами среды, через которую проходит сигнал [14]. Они представляют собой сумму и разность основной частоты колебания сигнала от исследуемого объекта и частот, присущих среде. В ЧА астрофизических данных роль "среды" может выполнять скважность анализируемого ряда. Она несет частоты, определяемые условиями получения наблюдательного материала — длиной ряда или его частей, суточными, месячными разрывами ряда и другими причинами. Отметим, что привлечение некоторой априорной информации, например наличия двух максимумов на кривых блеска небесного тела, облегчает оценку истинности того или другого периода, обнаруженного при ЧА данных.

Для выявления реальных колебаний блеска астрономического объекта используется, как правило, совокупность признаков. Обнаруженная частота считается реальной при следующих условиях: в спектре имеются ее гармоники и частоты кратных периодов, а также комбинационные частоты, расположенные симметрично относительно исследуемой; фазовые диаграммы (свертки, или кривые блеска), построенные с исследуемым периодом, не имеют пробелов, вызванных скважностью наблюдений, и показывают наличие двух максимумов и двух минимумов примерно одинаковых амплитуд; фазовые зависимости кривых блеска, построенных по различным рядам наблюдений, совпадают; пик, соответствующий частоте обнаруженного периода, присутствует на фазовых диаграммах, полученных различными методами; периодограммы модели, построенной при замещении звездных величин объекта в исследуемых рядах на случайные числа, не имеют особенностей в области частоты, принимаемой за истинную.

#### 4. Исследование астероида 21 Лютеция спектрально-частотным методом

Астероид 21 Лютеция — один из наиболее интересных объектов для исследований с борта КА "Rosetta", сближение которого с астероидом запланировано на 2010 год. Он относится к спектральному типу *M* согласно спектральной классификации Толена, альbedo около 0,22 и диаметр 96–100 км [15]. Астероид движется по эллиптической орбите с эксцентриситетом  $e = 0,163$ .

Наклонение орбиты  $i = 3,1^\circ$ , что позволяет отнести его к плоской составляющей главного пояса астероидов (ГПА). Величина большой полуоси его орбиты, равная 2,4369 а.е., указывает на то, что он расположен во внутренней части ГПА, ближе к его середине [16]. Удаленность от Солнца (местоположение в ГПА) и спектральный тип можно интерпретировать как факты, подтверждающие то, что астероид проходил стадию магматического плавления, по-видимому, при температурах 1000–2000 °C. На возможность этого указывает и достаточно высокое альbedo астероида. Таким образом, можно предполагать, что поверхностное вещество Лютеции состоит в основном из высокотемпературных минералов (типа пироксенов и оливинов) с примесью металлического железа [17]. Тем не менее, вопреки изложенным представлениям, при инфракрасных спектродоиметрических исследованиях Лютеции (в области 3 мкм) был получен необычный результат о наличии в ее поверхностном веществе связанной воды или гидроксильных групп [18]. Этот результат может служить указанием либо на ошибочную классификацию астероида, либо, что более вероятно, на действие еще не изученных или плохо изученных физических и космохимических процессов, которые привели к доставке на его поверхность нетипичных геологических материалов.

Следует подчеркнуть, что при многократных фотометрических наблюдениях Лютеции [19–22] обнаружены нерегулярные изменения блеска с амплитудами в диапазоне от  $0^m,1$  до  $0^m,25$ , а наиболее надежная оценка ее периода вращения составляет  $8^h,172$  [23]. Спектральные наблюдения Лютеции, проведенные Бусаревым на 1,25-м и 0,6-м телескопах в Крымской лаборатории ГАИШ [24] и Бочковым на 0,5-м менисковом телескопе Крымской астрофизической обсерватории (МТМ-500) [25], показали наличие в спектрах отражения астероида заметной полосы поглощения с центром у 0,430–0,440 мкм (с относительной глубиной до 8–10%), а также широкой депрессии в диапазоне 0,60–0,80 мкм (рис. 2). Указанные наблюдения астероида были выполнены с солнечным аналогом HD10307 (*G2V*). Те же спектральные детали присутствуют и на спектре отражения Лютеции, полученном в марте 2006 г. с другим солнечным аналогом, HD117176 [7] (см. рис. 1). На рисунке 2 видно, что в

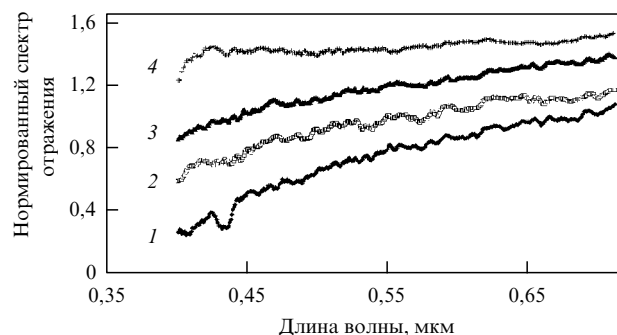


Рис. 2. Нормированные спектры отражения астероида 21 Лютеция, полученные 7 ноября 2004 г. ( $UT\ 22^h21^m38^s - 22^h40^m36^s$ ) с интервалами времени  $\sim 10^m$  в Крымской лаборатории ГАИШ на 1,25-м телескопе с ПЗС-спектрографом (кривые 1, 3 и 4 искусственно сдвинуты по вертикальной оси для лучшего восприятия). Такие быстрые спектральные изменения свидетельствуют о значительной неоднородности вещества астероида.

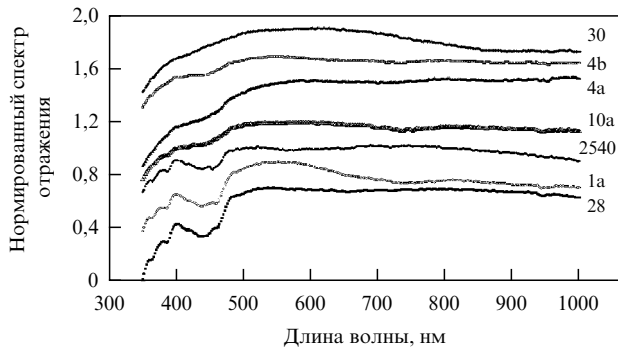


Рис. 3. Лабораторные нормированные спектры отражения (на длине волны 550 нм) порошков земных серпентинитов из разных геологических месторождений России (1а, 4а, 4б, 10а, 28, 30 и 2540 — номера образцов), приведенные в работе [26].

ноябре 2004 г. при предельно малом аспектном угле астероида (около 43°) его спектр отражения значительно менялся даже на интервале времени около 10 мин. Это, вероятно, характеризует высокую неоднородность вещества астероида как по структуре, так и по составу.

Лабораторные исследования спектров отражения порошков земных гидросиликатов (рис. 3) [26] показали, что детали, обнаруженные в спектрах отражения Лютетии (полосы поглощения в диапазонах у 0,41–0,46 и 0,60–0,80 мкм), характерны для серпентинитов или смеси серпентинитов с хлоритами. Это позволило сделать предположение о присутствии на поверхности Лютетии необычной минералогической комбинации высокотемпературных пироксенов и оливинов (если придерживаться общепринятой классификации астероида как объекта М-типа [15]) и низкотемпературных серпентинизированных гидросиликатов.

В период с 31 августа по 20 ноября 2000 г. в НИИ "Крымская астрофизическая обсерватория" было получено около 50 спектров Лютетии и столько же спектров солнечного аналога HD10307 и региональных стандартов с разрешением 0,004 и 0,003 мкм на телевизионном комплексе телескопа МТМ-500. По этим данным были рассчитаны спектры отражения в диапазоне 0,37–0,74 мкм, а затем определены значения эквивалентной ширины полосы поглощения с центром у 0,44 мкм, приписываемой гидросиликатам. Для этого по нормированным спектрам отражения астероида проводилась линия континуума, а эквивалентные ширины полосы поглощения у 0,44 мкм рассчитывались по формуле

$$W = \sum_{i=1}^N [1 - r(\lambda_i)] \Delta\lambda, \quad (6)$$

где  $W$  — эквивалентная ширина,  $\Delta\lambda$  — шаг по спектру,  $r(\lambda_i)$  — остаточные интенсивности в спектре,  $N$  — количество точек в полосе. Случайная ошибка определения значения эквивалентной ширины оказалась равной 0,00013 мкм. Достаточно быстрые изменения эквивалентной ширины этой полосы поглощения происходили на интервалах времени около 1 ч. Такие изменения достигали 0,0012 мкм и на порядок превосходили случайную ошибку. Следовательно, спектральная интенсивность светового потока, отражаемого поверхностью астероида, была сильно промодулирована в области длин волн 0,41–0,47 мкм, соответствующей полосе

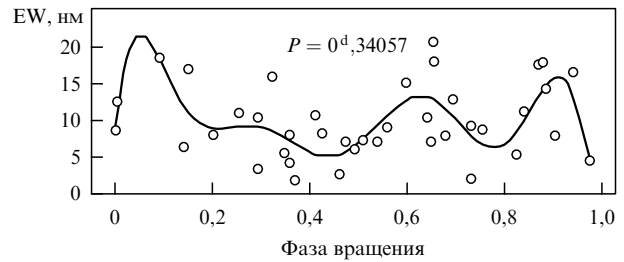


Рис. 4. Свертка величин эквивалентной ширины полосы поглощения гидросиликатов (EW, нм) с центром у 0,44 мкм с периодом вращения  $P = 0^d,34057$  астероида 21 Лютетия. Кривая — полином 10-й степени.

поглощения серпентинитов. Для изучения этих изменений был проведен ЧА 40 величин эквивалентной ширины полосы поглощения у 0,44 мкм и построены свертки (аппроксимирующие кривые) распределения величин эквивалентной ширины данной полосы в зависимости от фазы вращения астероида. Для иллюстрации на рис. 4 приведена одна из таких сверток, которая является полиномом 10-й степени и имеет четыре максимума на фазовом интервале, соответствующем периоду вращения Лютетии.

Для достижения необходимой точности исходных данных ЧА производился по спектрам, усредненным на интервалах времени по 18 мин. Он был выполнен по программе Брегера в диапазоне частот от 5 до 50 цикл сут<sup>-1</sup> и по программе Диминга в диапазоне 40–80 цикл сут<sup>-1</sup>. Для примера на рис. 5 приведены результаты ЧА в диапазоне частот от 5 до 50 цикл сут<sup>-1</sup>. Видно, что наиболее значимая группа частот расположена в диапазоне от 10 до 16 цикл сут<sup>-1</sup>. Группы частот меньшей мощности расположены в области 25–30 и 38–45 цикл сут<sup>-1</sup>. Чтобы найти величины независимых частот, была применена процедура отбеливания данных за наиболее выраженные частоты в порядке уменьшения

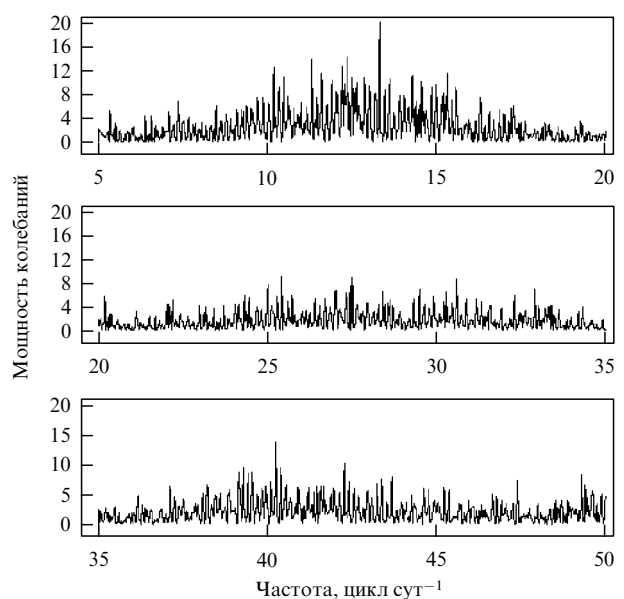
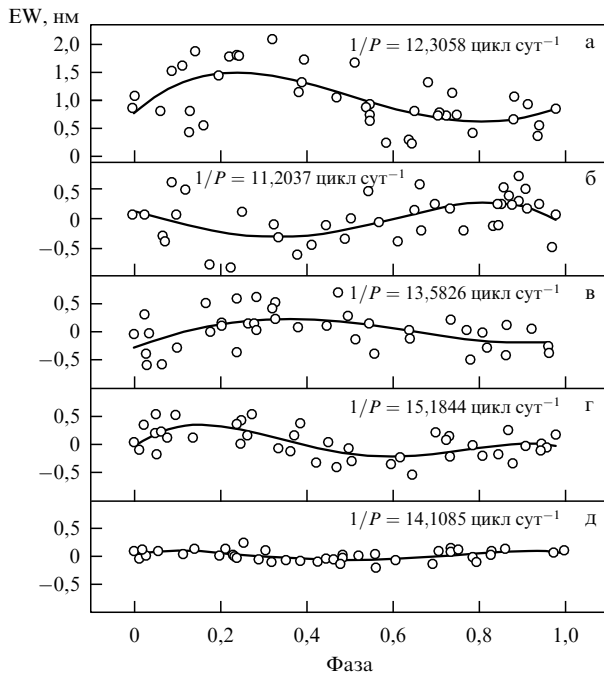


Рис. 5. Спектр мощности, построенный в диапазоне частот от 5 до 50 цикл сут<sup>-1</sup> по данным измерений эквивалентной ширины спектральной полосы поглощения астероида Лютетия у 0,44 мкм.



**Рис. 6.** Свертки величин эквивалентной ширины полосы поглощения Лютетии у 0,44 мкм (EW, нм) с несколькими из найденных периодов. Все графики имеют одинаковый масштаб по обеим осям. Кривые — полиномы 4-й степени.

их амплитуды с одновременным использованием трех методов ЧА: Лафлера – Кинмана, Юркевича и Диминга [27].

Свертки данных, построенные с некоторыми из определенных периодов, приведены в одном масштабе на графиках рис. 6. Первые четыре графика представляют результаты последовательного отбеливания данных за найденные периодические колебания. Видно уменьшение амплитуд колебаний и одновременно уменьшение разброса данных около кривых. В конце процедуры отбеливания точность определения значения эквивалентной ширины рассматриваемой полосы поглоще-

ния у 0,44 мкм в экстремумах достигла 0,0005 мкм и несколько превысила указанную выше среднюю точность данных (0,00013 мкм). Всего было найдено 16 значимых частот, последовательное вычитание которых позволило получить ряд данных, содержащий практически шумовой сигнал. Для всех соответствующих аппроксимирующих кривых (сверток) отношение величин амплитуд к точности их определения ( $S/N$ ) оказалось в диапазоне от 7 до 4, что подтверждает реальность их существования.

Значения обнаруженных частот приведены в табл. 1, где во втором столбце указана частота в единицах количества циклов в сутки, в третьем — период в сутках, в четвертом и пятом — амплитуда частоты и точность ее определения ( $S/N$ ), в шестом — отношение периода вращения астероида к половине каждого найденного периода  $2P_{\text{rot}}/P$ , в седьмом и восьмом — оценки размеров пятен гидросиликатов в градусах и километрах (при этом диаметр астероида полагался равным 100 км). Было принято, что размер каждого пятна определяется примерно половиной расстояния между двумя соседними максимумами на свертке данных с соответствующим периодом. Следует отметить, что при нахождении частоты модуляции светового потока от вращающегося астероида вначале оценивался угловой размер пятен по долготе (столбец 7 табл. 1), затем — их линейные размеры в предположении, что пятна расположены в экваториальной зоне астероида (столбец 8 табл. 1). В действительности они могут находиться на всей его поверхности. Пятна, дающие такую же модуляцию светового потока, как и пятна на экваторе, могут лежать и на более высоких широтах астероида. Очевидно, что длина окружности по долготе зависит от широты. Приблизительно можно полагать, что линейный размер пятен, расположенных в высоких широтах и дающих заметный вклад в измеряемый световой поток, примерно в 2 раза меньше, чем пятен на экваторе. Таким образом, в соответствии с полученными результатами размеры пятен гидросиликатов на поверхности Лютетии находятся преимущественно в диапазоне от 70 до 3 км. В то же время нельзя утверждать, что на

**Таблица 1.** Оценка размеров пятен гидросиликатов на поверхности Лютетии

Частота (обратные сутки), цикл сут <sup>-1</sup>	Период, сут	Амплитуда, нм	$\frac{S}{N}$	$\frac{2P_{\text{rot}}}{P}$	Размер	
					град	км
2	3	4	5	6	7	8
6,267	0,1596	0,35	4	4,26	85	73
11,204	0,0893	0,55	5	7,62	47	41
12,306	0,0813	0,90	7	8,37	43	37
13,582	0,0736	0,50	5	9,25	39	34
14,108	0,0709	0,20	4	9,60	37	33
15,184	0,0659	0,50	5	10,33	35	30
30,909	0,0324	0,24	4	21,02	17	15
38,405	0,0260	0,35	5	26,19	14	12
43,40	0,0230	1,2	4	29,60	12,1	10,6
45,54	0,0219	1,5	5	31,10	11,6	10,0
48,08	0,0207	1,0	5	32,44	11,1	9,6
52,93	0,0189	0,9	5	37,84	10,0	8,7
54,97	0,0182	1,0	5	35,84	9,5	8,3
59,07	0,0169	0,5	4	40,06	9,0	7,8
70,09	0,0142	0,4	4	48,64	7,4	6,4
73,42	0,0136	0,6	4	52,36	7,1	6,1



астероиде нет пятен меньших размеров. Как отмечалось выше, для достижения необходимой точности ЧА было выполнено усреднение исходных спектров астероида (на 18-минутных интервалах), которое и ограничило снизу диапазон частот, найденных в ряду величин эквивалентной ширины полосы поглощения у 0,44 мкм.

Важно подчеркнуть, что в табл. 1 содержится не только оценка размеров пятен гидросиликатов на поверхности Лютетии, но и их приближенная статистика. Вероятно, даже можно говорить о ее бимодальном характере, поскольку один (меньший) максимум количества частот соответствует пятнам с размером 30–40 км, по-видимому, связанным с более старыми кратерами, а второй (большой) — пятнам с размером 6–10 км, образовавшимся, вероятно, при относительно недавних ударных событиях. Пока нельзя сказать, как морфологически связаны обнаруженные пятна и кратеры на поверхности Лютетии, но можно предполагать, что такая связь существует. Поэтому интересно провести сравнение полученных оценок размеров и числа пятен со статистикой размеров старых и молодых кратеров на Луне, Марсе и Меркурии [28]. Всего в [28] было исследовано 11 тысяч кратеров с пересекающимися валами диаметром более 10 км. Статистический анализ показал, что среди молодых кратеров диаметры от 10 до 30 км имеют около 70 % кратеров, диаметры 30–60 км — 20–25 % кратеров, более 60 км — 7–8 % кратеров. Среди старых кратеров диаметры от 10 до 30 км имеют около 20 %, 30–60 км — около 35 %, более 60 км — 40–50 % кратеров. Сравнивая полученные оценки размеров пятен на 21 Лютетии с приведенными статистическими данными, можно сделать предположение, что на астероиде больше пятен, связанных с молодыми кратерами, при условии, если такая корреляция размеров существует.

Один из авторов данной статьи выдвинул и развил гипотезу [29–31, 24, 32] о доставке гидросиликатов на астероиды высокотемпературных типов (*M*, *S* и *E*) фрагментами силикатно-ледяных тел из зоны формирования Юпитера (ТЮЗ). Эта гипотеза основывается на теоретических результатах, полученных Сафроновым и им же с соавторами [33–35], которые показали возможность выброса крупных ТЮЗ с высокими скоростями (до нескольких км с<sup>-1</sup>) из зоны Юпитера его зародышем в период достижения им массы, равной 10–20 массам Земли. Вероятно, что при прямых высокоскоростных столкновениях ТЮЗ и некоторых родительских тел астероидов последние навсегда были удалены из ГПА [34]. Но также возможно, что значительная часть вещества более хрупких и неоднородных по составу по сравнению с астероидами ТЮЗ осталась после таких столкновений в ГПА в виде более мелких фрагментов и пыли, двигавшихся уже с более низкими скоростями. Подобные мелкие тела могли длительное время выпадать на оставшиеся астероиды и соседние планеты и даже сформировать на них слой нетипичного по составу вещества [32]. Здесь важно подчеркнуть, что по сравнению с родительскими телами астероидов, имеющими преимущественно силикатный состав [16, 17], вещество ТЮЗ, изначально обогащенное летучими соединениями (в том числе H<sub>2</sub>O), в период рассматриваемых событий могло уже состоять из готовых гидросиликатов. Благодаря возможности радионуклидного разогрева недр ТЮЗ короткоживущими изотопами (главным образом <sup>26</sup>Al) в течение первых нескольких миллионов лет существо-

вания этих тел, в их недрах, вероятно, существовал водный океан, где водные силикаты могли образоваться из обычных силикатов (оливинов, пироксенов и др.) [36].

Итак, весьма вероятный "сценарий" доставки на астероиды вещества ТЮЗ, оставшегося в ГПА после указанных ударных событий, — это его постепенное выпадение в виде небольших частиц и пыли при относительно невысоких скоростях, что обеспечило сохранение входящих в них водных соединений [32]. Результатом таких вторичных процессов и последовавших за ними более поздних ударных событий может быть пятнообразное распределение гидросиликатов на поверхности тех астероидов, где подобные соединения не могли образоваться по причине магматического происхождения их родительских тел (при температурах до 1000–2000 °С). К ним можно отнести астероиды *E*-, *S*- и *M*-типов, которые, как показывают дистанционные исследования (включая радиолокационные), состоят преимущественно из высокотемпературных силикатов типа пироксенов и оливинов, возможно, с примесью никелистого железа [17]. Это предположение получает наблюдательное подтверждение при исследовании интегральной и спектральной модуляции светового потока, отражаемого поверхностью 21 Лютетии. Таким образом, результаты, полученные авторами, можно рассматривать как подтверждение гипотезы о доставке гидросиликатов на поверхность данного астероида при низкоскоростных соударениях с небольшими гидратированными телами или при гравитационном захвате пылевого вещества, включающего гидросиликаты. Необходимо заметить, что возможны два варианта интерпретации природы таких пятен на поверхности Лютетии: либо они являются кратерами, образовавшимися при низкоскоростных столкновениях астероида с небольшими гидратированными телами, и заполнены веществом таких "ударников", либо, наоборот, представляют собой покрытые гидросиликатной пылью промежутки между более молодыми кратерами, вскрывающие вещество с другим (первоначальным для астероида) составом.

Здесь приведена только часть результатов спектрально-частотных исследований астероида Лютетия. Другие, уже опубликованные [37, 38] результаты его изучения по спектральным, спектрофотометрическим и фотометрическим (*BVR*) данным, которые позволили обнаружить его двойственность, здесь не обсуждаются.

Для сравнения в статье также уместно рассмотреть некоторые новые результаты спектрально-частотных исследований еще одного астероида — 4 Веста, проведенных в НИИ "Крымская астрофизическая обсерватория".

## 5. Цветовые пятна на поверхности астероида 4 Веста

Известно, что поверхности астероидов весьма неоднородны по оптическим характеристикам, которые определяются структурой и составом их вещества. Л.А. Акимов и др. еще в 1983 г. отмечали, что поверхности астероидов значительно более неоднородны, чем считалось ранее [39]. Влияние неоднородностей на поле рассеяния солнечного света видимой полусферой любого астероида определяется количеством отражаемого ими света и может варьировать на разных участках его поверхности

до 10–15 %. Предложенный Акимовым закон хорошо описывает рассеяние света поверхностями с высокой шероховатостью. Такими поверхностями обладают Луна, астероиды и абсолютное большинство других безатмосферных тел Солнечной системы, прошедших интенсивную ударную переработку [40].

Описанный выше метод спектрально-частотных исследований безатмосферных тел также был применен для оценки размеров и изучения природы цветных пятен на астероиде Веста. Сейчас интерес к наблюдениям этого астероида значительно возрос, так как он намечен объектом исследований с борта КА "Dawn". Недавно было сообщено, что запуск аппарата "Dawn" перенесен с 2006 на 2007 г., и по плану он должен будет проводить исследования Весты в 2011 г., находясь на орбите около нее.

Веста — третий по величине и самый яркий из всех астероидов. Его форма почти сферическая, что определяет наличие на кривой блеска только одного максимума и одного минимума [41]. Диаметр астероида оценивается в 555 км [42], хотя опубликованы и другие цифры [43–46]. Большая яркость обусловлена не только значительным размером, но и высоким альбедо поверхности астероида, составляющим около 0,25 [47, 39]. При вращении Весты геометрическое альбедо ее наблюдаемой полусферы изменяется на величину около 7% [48]. Кривая блеска имеет переменную амплитуду от  $0^m,15$  до  $0^m,085$  [49, 50], что вызвано изменениями аспекта астероида при его движении по орбите. Период вращения вокруг оси составляет 5,342 ч [51, 41]. Поверхность астероида неоднородна, о чем свидетельствуют изменения ее цвета и спектра. По *UBV*-фотометрии Весты обнаружено изменение показателей цвета астероида в зависимости от фазы вращения [52]. Спеклинтерферометрические наблюдения показали наличие на диске астероида пятен размером около 100 км [45]. Наблюдения астероида, проведенные с космического телескопа "Hubble", позволили установить, что на его поверхности имеются пятна размером до 80 км. Кроме того, был обнаружен огромный кратер диаметром 460 км, расположенный около южного полюса [46]. По-видимому, астероид имел разрушительное столкновение, в результате которого образовалось семейство Весты, насчитывающее до 200 членов [53]. Имеются данные о генетической связи с Вестой базальтовых ахондритовых метеоритов [54]. Предполагается, что астероид прошел фазу разогрева, плавления и дифференциации вещества, что привело к формированию металлического ядра и базальтовой коры, подобной лунным морям [46]. Считается, что высокотемпературная фаза должна была лишить его водных соединений. Однако наблюдения, проведенные недавно японцами на Гавайских островах, показали присутствие на его поверхности признаков водных соединений [55]. Как и в случае с астероидом 21 Лютеция, вероятно, такие водные соединения могли быть занесены на Весту при ее столкновениях с более примитивными телами.

Спектрофотометрические наблюдения астероида Веста на телевизионном комплексе телескопа МТМ-500 НИИ "Крымская астрофизическая обсерватория" проводились 2–4 и 7 февраля 2002 г. Для получения спектров использовался бесщелевой афокальный спектрограф с прозрачной дифракционной решеткой, имеющей 200 штрихов на миллиметр. Время экспозиции состав-

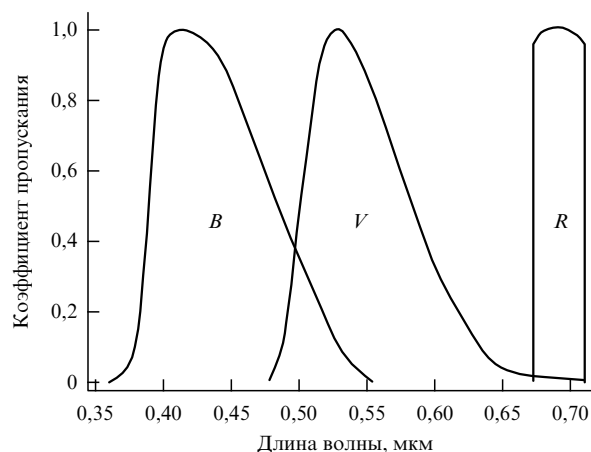
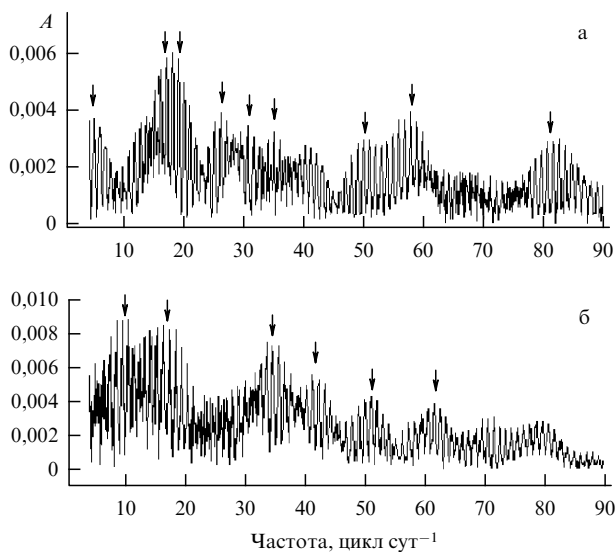


Рис. 7. Нормированные на единицу кривые реакции, использованные для расчета звездных величин астероида Веста в спектральных полосах *B*, *V*, *R* на основе полученных при наблюдениях внеатмосферных спектров.

ляло 30 с. Региональный стандарт BS1201 записывался через каждые 30–55 мин. Всего было измерено 690 спектров астероида. Кроме того, для повышения точности производилось усреднение данных по трем последовательным наблюдениям.

По спектрам были вычислены синтетические звездные величины астероида в спектральных полосах, приведенных на рис. 7. Полоса *R* сужена из-за малой чувствительности приемника света в красной области спектра. Эффективные длины волн полос близки к эффективным длинам волн стандартных полос *B*, *V* и *R* цветовой системы Джонсона–Моргана. По найденным синтетическим величинам были рассчитаны показатели цвета астероида *B-V* и *V-R*. Точность их составила порядка  $0^m,005$ . Частотный анализ показателей цвета подтвердил известный период вращения астероида, равный  $5^h,342$  ( $0^d,2225$ ). Были построены свертки, обнаружившие изменения показателей цвета *B-V* и *V-R* с периодом вращения астероида с амплитудой  $0^m,04$ . Затем данные были отбелены за частоту с указанным периодом и был выполнен последовательный поиск более высоких частот. Общий диапазон определенных колебаний оказался в пределах 4–90 цикл  $\text{сут}^{-1}$ . Следует отметить, что каждый раз при поиске новой частоты применялся метод отбеливания данных за предыдущую найденную частоту. Для этого применялась программа Диминга [12], основанная на методе Фурье. Для всех найденных частот строились свертки данных. В результате было установлено, что амплитуды обнаруженных колебаний лежат в пределах от  $0^m,03$  до  $0^m,005$ , причем последнее значение было получено всего один раз. Поскольку по мере отбеливания данных их разброс постепенно уменьшался, то амплитуды всех свертки, соответствующих найденным частотам, превосходили ошибку их определения в 6–3 раз. Из этого следует, что все эти частоты достаточно значимы. Полученные результаты представлены на рис. 8 для показателей цвета *B-V* и *V-R*.

По найденным частотам была произведена оценка размеров цветных пятен на поверхности астероида методом, описанным выше при анализе эквивалентных ширины полосы поглощения у 0,44 мкм в спектре отраже-



**Рис. 8.** Частотный амплитудный спектр данных показателей цвета *B-V* (а) и *V-R* (б) астероида 4 Веста, отбеленных за период вращения астероида. Представлен диапазон частот от 4 до 90 цикл сут<sup>-1</sup>. Стрелками отмечены положения найденных частот.

ния астероида 21 Лютеция. Поэтому здесь приведем лишь конечные результаты (табл. 2 и 3). Как и для Лютеции, оценки размеров пятен на Весте делались для случая их экваториального расположения. Определенные при анализе показателей цвета Весты частоты указаны на рис. 8 стрелками. Они же приведены в табл. 2 и 3 для показателей цвета *B-V* и *V-R*.

В показателях цвета *B-V* Весты обнаружено девять независимых частот (см. рис. 8а и табл. 2) и по ним оценены размеры соответствующих цветовых пятен. Наибольший размер, приведенный к экватору, составил 650 км, наименьший — 46 км. В случае расположения пятен ближе к полюсу их оценочные размеры уменьшаются в зависимости от широты. Если размер самого большого кратера (диаметром 460 км), обнаруженного у южного полюса Весты, увеличить в 1,4 раза, что соответствует приближенному коэффициенту коррекции линейного масштаба для сферического сегмента, то получим найденный размер наибольшего пятна 650 км. Это позволяет говорить о наличии взаимосвязи между указанными образованиями. Поскольку в красной области наибольшее пятно не проявилось (на рис. 8б в области частоты 5–6 цикл сут<sup>-1</sup> максимумов нет), то можно

**Таблица 2.** Размеры пятен на поверхности астероида Веста, найденные по показателю цвета *B-V*

Частота, цикл сут <sup>-1</sup>	5,9	15	20	26	30	34	51	58	80
Размер, км	650	250	180	150	124	112	72	65	46

**Таблица 3.** Размеры пятен на поверхности астероида Веста, найденные по показателю цвета *V-R*

Частота, цикл сут <sup>-1</sup>	10,6	17,4	35,6	42,4	51,2	61,2
Размер, км	360	220	115	90	70	60

также утверждать о голубоватом цвете наибольшего кратера на Весте, что, вероятно, свидетельствует о сравнительно малом возрасте этого ударного образования. Как стало известно из результатов спектральных исследований доставленных на Землю образцов лунного грунта, для зрелого вещества, прошедшего длительную переработку космогенными факторами, такими, как потоки микрометеоритов и солнечных заряженных частиц (солнечного ветра), характерен красноватый цвет [56]. Тогда был сделан вывод, что красноватый цвет зрелого силикатного вещества или возрастание его отражательной способности с увеличением длины волны в видимом диапазоне является следствием его насыщения переплавленными или остеклованными частицами, обогащенными ионами металлов.

Анализ показателя цвета *V-R* продемонстрировал наличие шести наиболее явных частот. Они обозначены стрелками на рис. 8б и являются центральными в группах частот. Найденные средние частоты и соответствующие им средние размеры пятен, расположенных вблизи экватора астероида, приведены в табл. 3.

Сравнивая размеры цветовых пятен, найденных по показателям цвета *B-V* и *V-R* (табл. 2 и 3), следует отметить наличие деталей, имеющих одинаковые или близкие размеры: 250 и 220 км, 115 и 112 км, 72 и 70 км, 65 и 60 км. В то же время есть детали (с размерами 650, 150, 124 и 46 км), видимые только в коротковолновой области спектра. Общий диапазон размеров пятен на Весте в коротковолновой области спектра оказался почти вдвое больше, чем в длинноволновой. Это обстоятельство также, вероятно, служит указанием на меньший экспозиционный возраст голубых образований на астероиде по сравнению с красными. Как известно, непрерывный процесс метеоритной и микрометеоритной переработки вещества на поверхности безатмосферных тел Солнечной системы приводит к разрушению более древних структур.

Таким образом, частотный анализ показал, что по значениям *B-V* и *V-R* глубина модуляции рассеянного наблюдаемым полушарием Весты солнечного излучения вследствие наличия на ее поверхности цветовых пятен составила примерно 3–2%. Оценочные размеры этих пятен заключены в диапазоне от 650 до 46 км, причем в коротковолновой и длинноволновой областях спектра они имеют различия. Отметим, что приведенные оценки размеров образований на поверхности астероида 4 Веста находятся в согласии с результатами спеклинтерферометрических наблюдений и наблюдений, проведенных с помощью космического телескопа "Hubble".

## 6. Заключение

Развитие методов наблюдений астрономических объектов, в том числе безатмосферных тел Солнечной системы, а также методов анализа полученных спектральных данных позволяет создать новый, спектрально-частотный, метод их исследований.

Имеется прямая возможность изучения твердых безатмосферных тел оптическими методами благодаря тому, что солнечный свет отражается непосредственно их поверхностью. Важно подчеркнуть, что солнечное излучение, рассеянное каждым таким телом, содержит информацию не только о крупномасштабной структуре и степени шероховатости его поверхности, но и о составе

вещества. Из-за наличия собственного вращения у твердых небесных тел отраженное ими излучение (интегральное или монохроматическое) промодулировано по интенсивности, а частоты его модуляции несут информацию о величине и характере неоднородности этих тел. Хотя модуляция бывает невелика и составляет иногда всего единицы процентов, современная наблюдательная аппаратура позволяет надежно зарегистрировать такие изменения.

Опыт изучения астероидов 21 Лютеция и 4 Веста с помощью спектрально-частотного метода показывает, что этот метод весьма эффективен при обнаружении каких-либо особенностей структуры поверхности или состава вещества астероидов, а также при оценке характера распределения соответствующих образований на наблюдаемой поверхности. Использование метода при исследованиях этих астероидов позволило получить принципиально новую информацию. В частности, применение этого метода для обнаружения гидросиликатов на Лютеции дало также возможность установить характер распределения этих материалов на поверхности астероида, определить их размеры и в первом приближении оценить статистику. Оказалось, что пятна гидросиликатов на поверхности Лютеции имеют, в основном, небольшие размеры: от 6 до 10 км, что позволило сделать предположение об их относительном недавнем происхождении. Причем следует подчеркнуть, что найденный минимальный размер этих образований оказался ограниченным временным разрешением наших наблюдательных данных (интервалом их усреднения по времени). Таким образом, перечисленные результаты можно считать подтверждением упомянутой выше гипотезы о доставке гидросиликатов на поверхность Лютеции и других астероидов магматических типов небольшими телами и/или пылью, включающими гидросиликаты.

Исследование одного из самых крупных астероидов, 4 Веста, было проведено авторами в широких спектральных полосах ( $B$ ,  $V$  и  $R$ ). Полученные результаты позволили обнаружить и оценить размеры цветных пятен на поверхности астероида в синей и красной областях спектра. В частности, оказалось, что наибольшее по размеру пятно в синей области спектра соответствует размеру крупнейшего кратера, расположенного в южном полушарии астероида. В то же время данное образование не проявляет себя в красной области спектра. Это может свидетельствовать о его сравнительно молодом возрасте.

Следует также отметить, что предлагаемая авторами новая методика применима для исследований всех безатмосферных тел, включая и искусственные спутники Земли. В настоящее время их количество также достаточно велико, поэтому необходима разработка методов, позволяющих проводить их точную идентификацию, а также решать обратные задачи, связанные, например, с определением их формы и деталей конструкции.

Авторы выражают благодарность А.Н. Абраменко, ведущему инженеру НИИ "Крымская астрофизическая обсерватория", за поддержание работоспособности телевизионного комплекса МТМ-500 на высоком научно-техническом уровне.

## Список литературы

1. Discovery Circumstances: Numbered Minor Planets, <http://www.cfa.harvard.edu/iau/lists/NumberedMPs.html>

2. The Extrasolar Planets Encyclopaedia, <http://exoplanet.eu/catalog.php>
3. Карачкина Л Г, Прокофьева В В, Тарашук В П *Астрон. вестн.* **32** 327 (1998)
4. Ostro S J et al. *Icarus* **121** 46 (1996)
5. Бусарев В В *Астрон. вестн.* **33** 140 (1999)
6. Hardorp J *Astron. Astrophys.* **91** 221 (1980)
7. Cayrel de Strobel G *Astron. Astrophys. Rev.* **7** 243 (1996)
8. Курт В Г, в сб. *Физика космоса: Маленькая энциклопедия*, 2-е изд. (Ред. Р А Сюняев) (М.: Советская энциклопедия, 1986) с. 505
9. Laffer J, Kinman T D *Astrophys. J. Suppl.* **11** 216 (1965)
10. Jurkevich I *Astrophys. Space Sci.* **13** 154 (1971)
11. Deeming T J *Astrophys. Space Sci.* **36** 137 (1975)
12. Breger M *Commun. Astrogeismol.* (111) 1 (1990)
13. Теребиж В Ю *Анализ временных рядов в астрофизике* (М.: Наука, 1992)
14. Горелик Г С *Колебания и волны. Введение в акустику, радиофизику и оптику* 2-е изд. (М.: Физматгиз, 1959) с. 409
15. Tedesco E F, in *Asteroids II* (Eds R P Binzel, T Gehrels, M S Matthews) (Tucson: Univ. of Arizona Press, 1989) p. 1090
16. Bell J F et al., in *Asteroids II* (Eds R P Binzel, T Gehrels, M S Matthews) (Tucson: Univ. of Arizona Press, 1989) p. 921
17. Gaffey M J, Bell J F, Cruikshank D P, in *Asteroids II* (Eds R P Binzel, T Gehrels, M S Matthews) (Tucson: Univ. of Arizona Press, 1989) p. 98
18. Rivkin A S et al. *Icarus* **117** 90 (1995)
19. Лупишко Д Ф и др. *Кинемат. и физ. небес. тел* **3** (5) 36 (1987)
20. Лупишко Д Ф, Величко Ф П *Кинемат. и физ. небес. тел* **3** (1) 57 (1987)
21. Michalowski T *Icarus* **106** 563 (1993)
22. Dotto E et al. *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **95** 195 (1992)
23. Michalowski T *Icarus* **123** 456 (1996)
24. Бусарев В В *Астрон. вестн.* **36** 39 (2002)
25. Bochkov V, Busarev V, Prokof'eva V V *Astron. Astrophys. Trans.* **22** 621 (2003)
26. Busarev V V et al., in *40th Vernadsky Inst. — Brown Univ. Microsymp. on Comparative Planetology, October 11–13, 2004, Moscow, Russia*, Abstract No. 15
27. Прокофьева В В, Тарашук В П, Горькавый Н Н *УФН* **165** 661 (1995)
28. Скобелева Т П *Астрон. вестн.* **21** 221 (1987)
29. Busarev V V *Icarus* **131** 32 (1998)
30. Busarev V V, in *31st Annual Lunar and Planetary Science Conf., March 13–17, 2000, Houston, TX, USA* (LPI Contribution No. 1000), Abstract No. 1428
31. Busarev V V, in *32nd Annual Lunar and Planetary Science Conf., March 12–16, 2001, Houston, TX, USA* (LPI Contribution No. 1080), Abstract No. 1927
32. Busarev V V, in *35th Lunar and Planetary Science Conf., March 15–19, 2004, League City, TX* (LPI Contribution No. 1197), Abstract No. 1026
33. Safronov V S, in *Asteroids* (Ed. T Gehrels) (Tucson: Univ. of Arizona Press, 1979) p. 975
34. Сафронов В С, Зиглина И Н *Астрон. вестн.* **25** 190 (1991)
35. Рускол Е Л, Сафронов В С *Астрон. вестн.* **32** 291 (1998)
36. Busarev V V, Dorofeeva V A, Makalkin A B *Earth, Moon Planets* **92** 345 (2003)
37. Прокофьева В В, Бочков В В, Бусарев В В *Астрон. вестн.* **40** 512 (2006)
38. Busarev V V, Prokof'eva V V, Bochkov V V, in *38th Lunar and Planetary Science Conf., March 12–16, 2007, League City, TX* (LPI Contribution No. 1338), Abstract No. 1016
39. Акимов Л А, Лупишко Д Ф, Бельская И Н *Астрон. журн.* **60** 999 (1983)
40. Акимов Л А, Лупишко Д Ф, Шевченко В Г *Астрон. вестн.* **26** (2) 62 (1992)
41. Аксенов А Н и др. *Письма в Астрон. журн.* **13** 616 (1987)
42. Degewij J, Tedesco E F, Zellner B *Icarus* **40** 364 (1979)
43. Worden S P et al. *Icarus* **32** 450 (1977)
44. Drummond J, Eckart A, Hege E K *Icarus* **73** 1 (1988)
45. Tsvetkova V S et al. *Icarus* **92** 342 (1991)
46. Thomas P C et al. *Science* **277** 1492 (1997)

47. Gehrels T *Astron. J.* **72** 929 (1967)
48. Cellino A et al. *Icarus* **70** 546 (1987)
49. Blanco C, Catalano S *Icarus* **40** 359 (1979)
50. Melillo F J *Minor Planet Bull.* **22** 19 (1995)
51. Taylor R C, Tapia S, Tedesco E F *Icarus* **62** 298 (1985)
52. Reynoldson G et al. *Minor Planet Bull.* **20** 11 (1993)
53. Burbune T H et al., in *Asteroids, Comets Meteors, Cornell Univ., USA, July 26–30, 1999*, Abstract, p. 52
54. Binzel R P, Xu S *Science* **260** 186 (1993)
55. Hasegawa S et al. *Geophys. Res. Lett.* **30** (21) PLA 2 (2003)
56. Charette M P et al. *J. Geophys. Res.* **79** 1605 (1974)

### Spectral and spectral-frequency methods for studying atmosphereless bodies in the solar system

**V.V. Busarev**

*Sternberg Astronomical Institute, Moscow State University,  
Universitetskii prosp. 13, 119992 Moscow, Russian Federation  
Tel. (7-495) 939-10 29  
E-mail: busarev@sai.msu.ru*

**V.V. Prokof'eva-Mikhailovskaya, V.V. Bochkov**

*Research Institute "Crimean Astrophysical Observatory",  
p/o Nauchnyi, 334413 Crimea, Ukraine  
Tel. (380) 65-54-71 124  
E-mail: prok@crao.crimea.ua; bochkov@crao.crimea.ua*

The reflectance spectrophotometry of atmosphereless bodies in the solar system, the method's specific aspects, and how to remove key spectral noise components are discussed. As a development of the method, its joint use with the frequency analysis of the observational series of spectral data is suggested. Using the combined spectral-frequency method, spectrally distinctive formations on the surface of atmosphereless celestial bodies can be identified and estimated for their size and distribution. The application of the spectral-frequency method to the asteroids 21 Lutetia and 4 Vesta enabled fundamentally new information to be obtained by the authors.

PACS numbers: 95.55.Qf, 95.85.Kr, 96.30.Ys

Bibliography — 56 references

*Received 22 January 2007*

*Uspekhi Fizicheskikh Nauk* **177** (6) 663–675 (2007)

*Physics – Uspekhi* **50** (6) (2007)