

УДК 523.4+520.8

Определение размеров кратеров на поверхностях безатмосферных тел Солнечной системы наземным методом

А.И. Клянчин¹, В.В. Прокофьева-Михайловская²

¹Главная астрономическая обсерватория НАН Украины

²Крымская астрофизическая обсерватория Киевского национального университета им. Т.Г. Шевченко

Новая методика определения размеров кратеров на поверхностях безатмосферных тел Солнечной системы под названием спектрально-частотный метод (СЧМ) разработана в Крымской астрофизической обсерватории В.В.Прокофьевой-Михайловской и Н.А.Рублевским совместно с сотрудником ГАИШ (МГУ) В.В. Бусаревым. СЧМ исследований кривых блеска или цвета астероидов позволяет наземными средствами получать информацию о размерах деталей на их поверхностях. Видимость кратеров объясняется обратным когерентным рассеянием солнечного излучения на реголите, выброшенном при столкновении тел.

ВИЗНАЧЕННЯ РОЗМІРІВ КРАТЕРІВ НА ПОВЕРХНЯХ БЕЗАТМОСФЕРНИХ ТІЛ СОЛЯНОЇ СИСТЕМИ НАЗЕМНИМ МЕТОДОМ, Клянчин А.І., Прокоф'єва-Михайловська В.В. — Нова методика визначення розмірів кратерів на поверхнях безатмосферних тіл Сонячної системи, що має назву спектрально-частотний метод (СЧМ), розроблена в Кримській астрофізичній обсерваторії В.В.Прокоф'євою-Михайловською і Н.О.Рублевським разом із співробітником ГАІШ (МДУ) В.В.Бусаревим. СЧМ досліджень кривих блиску або кольора астероїдів дозволяє наземними засобами отримати інформацію про розміри деталей на їх поверхнях. Видимість кратерів пояснюється зворотним когерентним розсіянням сонячного випромінювання на реголіті, викинутому при зіткненні тіл.

DETERMINING THE SIZE OF CRATERS ON THE SURFACES OF ATMOSPHERELESS BODIES IN SOLAR SYSTEM WITH GROUND-BASED METHODS, by Klianichin A.I., Prokof'eva-Mikchailovskaya V.V. — A new method of determining the size of craters on the surfaces of atmosphereless bodies of the Solar system, called spectral-frequency method (SFM), was developed at the Crimean Astrophysical Observatory by V. V. Prokofieva-Mikchailovska, N. A. Rublevsky in collaboration with V. V. Busarev from SAI (MSU). SFM of studying color- or lightcurves of asteroids allows to obtain information about the size of details on their surfaces with ground-based tools. Visibility of craters is explained with the inverse coherent scattering of solar radiation on the regolith ejected during bodies collisions.

Ключевые слова: спектрально-частотный метод; астероид; размеры кратеров; рассеяние света; кривые блеска.

Key words: spectral-frequency method; asteroid; sizes of craters; light dispersion; lightcurves.

1. ВВЕДЕНИЕ

Исследуя малые тела Солнечной системы, астероиды, мы наблюдаем солнечный свет, рассеянный поверхностью твердого безатмосферного тела. Если поверхность тела имеет некоторые детали рельефа, имеющие разные спектральные характеристики или индикатрисы рассеяния света, то такое тело при вращении осуществляет модуляцию светового потока, отражаемого в направлении наблюдателя. При полном обороте небесного тела вокруг оси вращения на интенсивность рассеянного света влияет в первую очередь форма объекта исследований. Чтобы влияние формы объекта исследований исключить строится кривая блеска или цвета с периодом вращения тела и построенная кривая вычитается из данных. Затем проводится дальнейший частотный анализ данных с целью выяснения размеров деталей на поверхности астероида. Исследование рассеянного солнечного излучения несет информацию о свойствах поверхностей этих тел и надо ее правильно понимать.

Методика определения размеров кратеров на поверхностях безатмосферных тел Солнечной системы, называемая спектрально-частотный метод, разработана в Крымской астрофизической обсерватории В.В.Прокофьевой-Михайловской, Н.А.Рублевским совместно с сотрудником ГАИШ в Москве В.В.Бусаревым [6]. В работах также принимал участие сотрудник КрАО В.А.Бочков. С помощью этой методики были определены размеры кратеров на поверхностях трех астероидов: 1620 Географ, 1921 Лютетия, 4 Веста. Проведено сравнение полученных размеров с данными радиолокационных исследований и фотографий, полученных с борта космических кораблей, которое показало, что использование СЧМ дает правильные результаты.

2. ПРЕДПОСЫЛКИ СПЕКТРАЛЬНО-ЧАСТОТНОГО МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЗМЕРОВ ПЯТЕН НА АСТЕРОИДАХ

О фотометрической неоднородности поверхностей астероидов писали харьковские астрономы Л.А.Акимов и др. еще в 1983 г [2]. Авторы считали, что влияние неоднородностей может варьиро-

вать количество отражаемого в направлении Земли света до 10%. При вращении астероида в некоторые моменты времени детали его поверхности могут увеличивать его яркость. Таких деталей на поверхности астероида много, поэтому количество света, наблюдаемое с Земли, становится переменным (см. например, рис. 2). В книге [3] приведена формула, по которой можно определить размер детали L , вызвавшей изменение блеска:

$$L = \pi D \Delta t / P_{\text{rot}}, \quad (1)$$

где D — диаметр астероида, Δt — длительность регистрации детали на кривой блеска, P_{rot} — период вращения астероида. Авторы спектрально-частотного метода заменили Δt на половину величины найденного по наблюдательным данным периода p . В этом случае формула (1) преобразуется в

$$L = \pi D p / 2 P_{\text{rot}}. \quad (2)$$

Для доказательства правомочности использования методов частотного анализа вместо предложенной в 1979 г. формулы (1) для определения размеров деталей на поверхностях астероидов был проведен анализ колориметрических данных, полученных в НИИ «КрАО» при наблюдениях астероида 4 Веста двумя методами. Анализ проведен как по формуле (1), так и частотным методом по формуле (2) с последовательным отбеливанием. Сравнение полученных результатов показало их полное согласие.

3. ОБРАЗОВАНИЕ КРАТЕРОВ НА БЕЗАТМОСФЕРНЫХ ТЕЛАХ

Как известно, Солнечная система включает множество так называемых малых тел: астероидов, комет, спутников планет, метеороидов и более мелких тел, вплоть до пыли. Почти все они лишены атмосферы, а их размеры заключены в диапазоне от сотен километров до микрон.

Взаимодействие потока метеороидов и других малых тел Солнечной системы с поверхностью безатмосферного тела приводит к образованию на ней ударных кратеров. По мере того, как поверхность стареет, на ней возникает все большее число кратеров. Кратеры сильно варьируются по размеру, часть из них — относительно молодые кратеры с четкими валами, в то время как крупные кратеры имеют значительно больший возраст. Ударные кратеры являются главным ландшафто-образующим фактором [7]. При соударениях примитивных тел с астероидами выбрасывается реголит, который частично оседает около места соударения. Вследствие высокой текучести и трясений при соударениях мельчайшая фракция реголита может скапливаться в низменностях, образуя пятна на астероидах. Мы их видим благодаря закону обратного когерентного рассеяния Солнечного света.

Современное состояние исследований кратерообразования описано К.А. Хайдаровом в статье «Происхождение и динамика ударного метаморфизма» [15].

4. НАБЛЮДЕНИЯ И ЧАСТОТНЫЙ АНАЛИЗ

Наблюдения астероидов производились в Крымской астрофизической обсерватории на установленной в фокусе куде полуметрового менискового телескопа МТМ-500 телевизионной высокочувствительной отечественной телевизионной установке [1]. Аналоговый сигнал оцифровывался и поступал в память компьютера. Обычно усреднялось несколько записей. Точность измерения блеска или показателя цвета была лучше 0.01^m . Анализировались либо кривые блеска, полученные в одной из спектральных полос B , V , R , либо кривые $B-V$ и $V-R$, причем последние были получены либо из бесщелевых спектров, либо по одновременным наблюдениям. Это требование вызвано быстрым вращением астероидов.

Отбеливание данных после нахождения очередного периода производилось в порядке уменьшения амплитуды периодических колебаний [13].

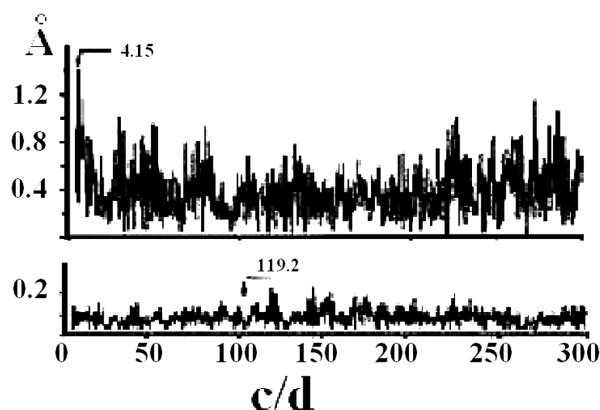


Рис. 1. Пример изменения амплитудного спектра, полученного по данным эквивалентных ширин полосы поглощения, расположенной около 0.44 мкм в спектре Весты (верхний график), и после вычитания 15 найденных периодов (нижний график). На нижнем графике масштаб на вертикальной оси увеличен в 2 раза.

Как показывает опыт, при высокой точности наблюдений можно обнаружить до двух десятков периодов, а значит, и получить оценки около двух десятков различных размеров деталей на поверхности астероида.

5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРОВ КРАТЕРОВ НА ТРЕХ АСТЕРОИДАХ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ, ПОЛУЧЕННЫМ В КРАО

В 1996 г. был проведен частотный анализ данных фотометрических наблюдений астероида 1620 Географ, полученных на телескопе АЗТ-11 и на телевизионном комплексе телескопа МТМ-500 [8]. Результаты анализа показали, что в первичном максимуме были обнаружены крупные детали размером 1–1.2 км. Во вторичном максимуме имели место детали в диапазоне размеров 150–250 м. Оценки размеров деталей на поверхности астероида Географ, сделанные по наземным наблюдениям, были полностью подтверждены размерами кратеров, зарегистрированных по радиолокационным наблюдениям Остро [14].

Осенью 2000 г. с помощью афокального спектрографа было получено 52 внеатмосферных спектра астероида 21 Лютеция. По ним были сделаны оценки пятен гидросиликатов по ширине полосы, расположенной на 410–450 нм [9]. Они дали один размер около 70 км и несколько размеров 30–40 км. 10 июля 2010 г. космический аппарат «Rosetta», получил фотографии этого астероида с пролетной траектории. Фотографии показали один большой кратер 70 км и несколько более мелких. Сравнение наземных данных с данными космического аппарата показало полное согласие.

Спектрофотометрические наблюдения астероида 4 Веста были получены со 2 по 7 февраля 2002 г. в НИИ «КрАО» с бесщелевым спектрографом. Были рассчитаны показатели цвета $B-V$ и $V-R$, приведенные на рис. 2 [4]. При их частотном анализе было обнаружено 19 частот в синей области спектра и 20 — в красной [10]. Самое крупное пятно, найденное по $B-V$, в пересчете на широту астероида 45° оказалось равным размеру известного кратера, расположенного вблизи южного полюса астероида согласно данным наблюдений на телескопе имени Хаббла. Были измерены также эквивалентные ширины полосы поглощения гидросиликатов, расположенной около длины волны 4400\AA [11]. Было найдено 16 периодичностей, по которым были определены размеры гидросиликатных пятен на поверхности астероида. С космического аппарата Dawn, находящегося на орбите около 4 Веста, была получена подробная карта поверхности астероида. Сравнение наземных и космических данных показало совпадение размеров кратеров.

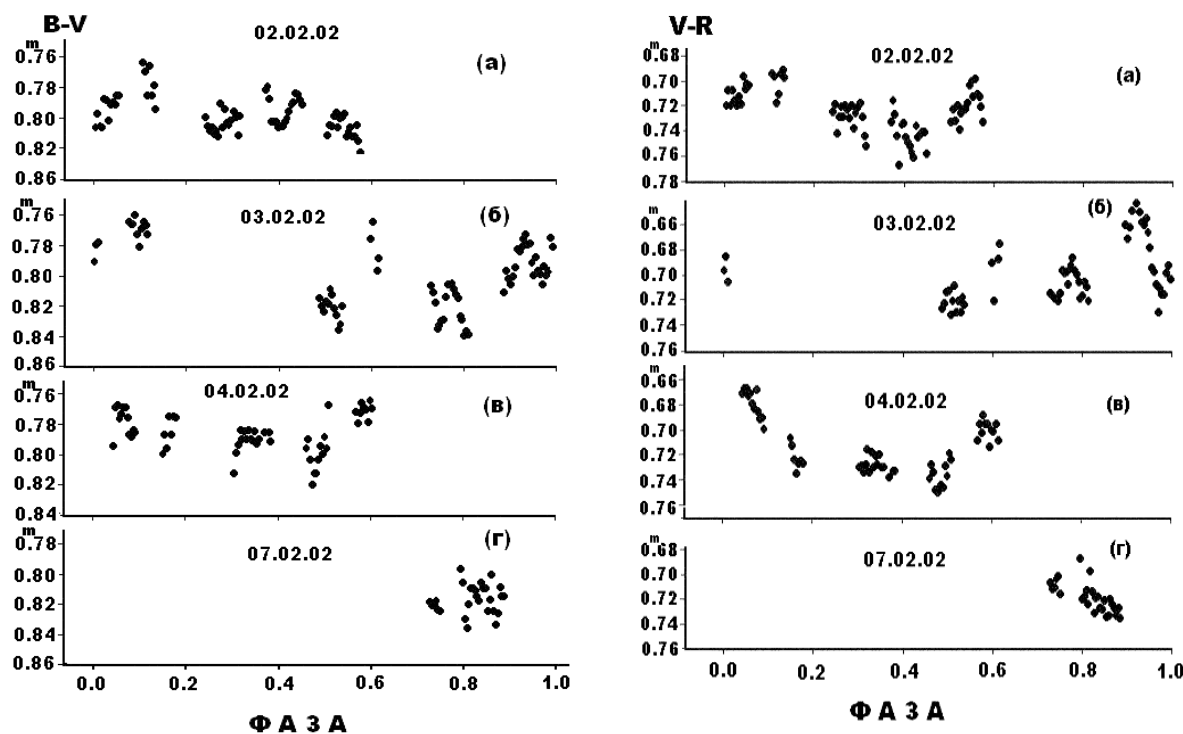


Рис. 2. Значения усредненных данных показателя цвета $B-V$ и $V-R$ астероида 4 Веста в зависимости от фазы вращения астероида для четырех ночей 2002 года: а) 2 февраля (JD 2452308^d), б) 3 февраля (JD 2452309^d), в) 4 февраля (JD 2452310^d), г) 7 февраля (JD 2452313^d). Нулевая фаза JD=2452308^d 19058.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью спектрально частотного метода были определены размеры кратеров на астероидах 1620 Географ, 1921 Лютетия и 4 Веста. Сделанные по данным фотометрии астероида 1620 Географ в 1994 г., оценки размеров кратеров в первичном и вторичном максимумах блеска показали наличие крупной детали размером 1–1.2 км на одной стороне астероида и более мелких, размером до 150–100 м. на другой. Такие же размеры были получены при радиолокации астероида. Оценка размеров кратеров на поверхности астероида 21 Лютетия согласуется с данными, полученными космическим аппаратом при пролете мимо астероида. Сравнение размеров, определенных СЧМ по показателям цвета $B-V$ и $V-R$ астероида 4 Веста, с размерами кратеров, полученных по фотографиям АМС «Dawn», находящегося на орбите около астероида, показало хорошее согласие [12].

Авторами разработки СЧМ сделан вывод, что наиболее вероятной причиной проявления кратеров, регистрируемых СЧМ на астероидах, являются ударные процессы и рассеянный при этом реголит [6]. Размер реголитового пятна близок размеру образовавшегося кратера.

Спектрально частотный метод позволяет при анализе наземных наблюдений получать информацию о размерах кратеров на телах Солнечной системы. Сравнение результатов наземных наблюдений и фотографий, полученных космическими кораблями, позволяет сделать вывод, что при использовании СЧМ определяются размеры кратеров на астероидах.

1. Абраменко А.Н. и др. Телевизионная астрономия / ред. Никонов В.Б. — М.: Наука, 1984. — С. 272.
2. Акимов Л.А., Лупишко Д.Ф., Бельская И.Н. О фотометрической неоднородности поверхностей астероидов // Астрон. журн. — 1983. — **60**, № 5. — Р. 999–1004.
3. Burns J.A., Tedesco E.F. Asteroid light curves: results for rotations and shapes // Asteroids I. / Ed. Gehrels T. — Univ. Ariz. Press., 1979. — Р. 494–527.
4. Бусарев В.В., Прокофьева-Михайловская В.В., Бочков В.В. Спектральный и спектрально-частотный методы исследования безатмосферных тел солнечной системы // Успехи физ. наук. — 2007. — **177**, № 6. — С. 663–675.
5. Бусарев В.В., Прокофьева-Михайловская В.В., Рублевский А.Н. Разработка и применение спектрально-частотного метода для исследований поверхностей безатмосферных тел // Изв. Крым. Астрофиз. Obs. — 2009. — **104**, № 6. — С. 95–102.
6. Бусарев В.В., Прокофьева-Михайловская В.В., Рублевский А.Н., Горькавый Н.Н. Пятна на астероидах и возможность их изучения наземными средствами // Кинем. и физ. неб. тел. — 2012. — **28**, № 1. — С. 3–15.
7. Волощук Ю.И., Кашеев Б.Л., Кручиненко В.Г. Метеоры и метеорное вещество. — К.: Наукова думка, 1989. — 296 с.
8. Карачкина Л.Г., Прокофьева В.В., Таращук В.П. Исследование модуляции блеска астероида 1620 Географ // Астрон. вестн. — 1998. — **32**, № 4. — С. 327–339.
9. Прокофьева В.В., Бочков В.В., Бусарев В.В. Исследование структуры поверхности М-астероида 21 Лютетия спектральным и частотным методами // Астрон. Вестн. — 2005. — **39**, № 5. — С. 457–468.
10. Прокофьева-Михайловская В.В., Рублевский А.Н., Бочков В.В. Размеры цветных пятен на поверхности астероида 4 Веста // Астрон. вестн. — 2008а. — **42**, № 6. — С. 540–556.
11. Прокофьева-Михайловская В.В., Рублевский А.Н., Бочков В.В. Водные соединения на поверхности астероида 4 Веста // Изв. Крым. Астрофиз. Obs. — 2008б. — **104**, № 1. — С. 218–228.
12. Прокофьева-Михайловская В.В., Рублевский А.Н. Сравнение размеров образований на поверхности астероида 4 Веста, определенных из наземных и космических наблюдений // Кинем. и физ. неб. тел. — 2013. — **29**, № 5. — С. 64–74.
13. Тербиж В.Ю. Анализ временных рядов в астрофизике. — М.: Наука, 1992. — 290 с.
14. Ostro S.J., Jurgens R.F., Rosema K.D., et al. Radar observations of asteroid 1620 Geographos // Icarus. — 1996. — **121**. — Р. 46–66.
15. <http://bourabai.narod.ru/impact08.htm>

Поступила в редакцию 30.08.2013