

УДК 523.44

В. В. Прокофьева-Михайловская, А. Н. Рублевский

Научно-исследовательский институт «Крымская астрофизическая обсерватория»
Министерства образования и науки, молодежи и спорта Украины
пгт. Научный, Бахчисарайский район, АР Крым, 98409
prok@crao.crimea.ua, anr@crao.crimea.ua

Сравнение размеров образований на поверхности астероида 4 Веста, определенных из наземных и космических наблюдений

Сравниваются значения размеров кратеров, определенные по снимкам зонда «Dawn» с орбит вокруг астероида 4 Веста, и размеров пятен на его поверхности, полученные спектрально-частотным методом из наземных спектрофотометрических наблюдений эквивалентных ширин полосы гидросиликатов и показателей цвета астероида $B - V$ и $V - R$. Оказалось, что размеры кратеров и пятен, находящихся на полюсах астероида, соответствуют размерам пятен в предположении их расположения на $40...45$ северной и южной широты. Приведена сравнительная таблица для кратеров размерами $10...100$ км. Сделан вывод, что использование спектрально-частотного метода позволяет определить размеры кратеров на поверхностях астероидов.

ПОРІВНЯННЯ РОЗМІРІВ ДЕТАЛЕЙ НА ПОВЕРХНІ АСТЕРОЇДА 4 ВЕСТА, ВИЗНАЧЕНИХ ІЗ НАЗЕМНИХ ТА КОСМІЧНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ, Прокоф'єва-Михайловська В. В., Рублевський О. М. — Порівнюються значення розмірів кратерів, визначені по знімках зонда «Dawn» з орбіт навколо астероїда 4 Веста, і розмірів плям на його поверхні, отримані спектрально-частотним методом із наземних спектрофотометричних спостережень еквівалентних ширин смуги гідросилікатів і показників кольору астероїда $B - V$ і $V - R$. Виявилось, що розміри кратерів і плям, що лежать на полюсах астероїда, відповідають розмірам плям, у припущенні їхнього розташування приблизно на $40...45$ північної і південної широти. Приведено порівняльну таблицю для кратерів з розмірами $10...100$ км. Зроблено висновок, що використання спектрально-частотного методу дозволяє визначити розміри кратерів на поверхнях астероїдів.

A COMPARISON OF SPOT SIZES ON THE ASTEROID 4 VESTA SURFACE FROM GROUND-BASED AND SPACE OBSERVATIONS, by Prokofieva-Mikhailovskaia V. V., Rublevskii A. N. — Crater sizes determined from photographs obtained by the Dawn spacecraft from its orbits around the asteroid 4 Vesta were compared with ones obtained with the use of ground-based spectrophotometric observations and spectral-frequency method (SFM). All the sizes of craters on Vesta were determined with the use of SFM for the processing of equivalent widths of hydrosilicate bands and color indices $B - V$ and $V - R$. It turns out that the sizes of craters and spots located at the asteroid's poles correspond to the sizes of spots if it is granted that they are located at $40-45^\circ$ north and south latitudes. The comparison results for sizes from 10 to 100 km are given in the table. We concluded that SFM allows one to determine sizes of craters on surfaces of asteroids.

ВВЕДЕНИЕ

В Научно-исследовательском институте «Крымская астрофизическая обсерватория» развит и применяется спектрально-частотный метод (СЧМ) исследования поверхностей астероидов из наземных наблюдений [2, 3, 5]. Спектры отражения астероида 4 Веста и частотный анализ полученных из них данных позволили дистанционным методом оценить размеры пятен различной природы на его поверхности [6, 7]. При оценивании размеров пятен с помощью СЧМ делаются следующие упрощающие предположения: 1) исследуемые тела имеют сферическую форму, 2) пятна на их поверхности расположены в экваториальной зоне тела. В последнее время появилась возможность сравнить данные таких оценок с подробными снимками нескольких астероидов, полученных с помощью космических аппаратов. В данной работе проведено такое сравнение для астероида 4 Веста, вокруг которого более года (2011—2012 гг.) вращался на различных орбитах американский космический аппарат «Dawn». Целью аппарата было исследование астероида и получение фотографий его поверхности с различных расстояний.

При сравнении с данными космических кораблей в случае известных деталей, например на поверхности астероида 4 Веста, делался пересчет найденного размера на местоположение известного кратера на южном полюсе Весты [7].

ХАРАКТЕРИСТИКИ АСТЕРОИДА 4 ВЕСТА

Астероид 4 Веста является третьим по размеру и самым ярким астероидом Солнечной системы. Он был открыт Ольберсом в 1802 г. Наблюдения и исследования этого астероида были проведены на многих

обсерваториях мира различными методами. Астероид является главным объектом спектрального типа V [8].

Наземные оценки координат полюса Весты показывают различия, достигающие 20—30′. Например, согласно работе [11] эклиптическая долгота полюса равна $126 \pm 5^\circ$, а эклиптическая широта равна $+65 \pm 4^\circ$. По данным [18] они составляют $103 \pm 6^\circ$ и $+43 \pm 6^\circ$ соответственно. Величины координат полюса отличаются значительно. В работе [15] по наблюдениям телескопа Хаббла получены уточненные координаты северного полюса: прямое восхождение $20^h 32^m$ (308°), склонение $+48^\circ$ с неопределенностью около 10° . Наклон оси вращения к эклиптике составляет около 29° . Большой наклон оси вращения приводит к тому, что полюса некоторое время в течение года Весты не освещаются Солнцем.

Орбита Весты лежит во внутренней части пояса астероидов, в пределах основной щели Кирквуда на расстоянии 2.5 а. е. от Солнца. Орбита слабоэллиптическая с небольшим наклоном к плоскости эклиптики. Астероид оборачивается вокруг Солнца за 3.628 юлианских года ([http://ru.wikipedia.org/wiki/\(4\)_Веста#](http://ru.wikipedia.org/wiki/(4)_Веста#)). Форма астероида близка к сферической, вращение прямое. На основе анализа 13 кривых блеска был получен период вращения Весты, равный 5 ч 20 мин 31.66 с. Использование данных 15 циклов наблюдений, полученных с 1950 г. по 1982 г., позволило определить сидерический период вращения астероида, равный 0.2225889^d [13].

Кривая блеска астероида в полосе V имеет один максимум и один минимум. Ее амплитуда изменяется от 0.08 до 0.15^m согласно 35-летним наблюдениям (см. [1]). Переменность амплитуды вызвана в основном большим наклоном его оси вращения к плоскости орбиты, хотя может влиять и изменение угла фазы освещения астероида Солнцем.

Диаметр астероида оценивался несколько раз [9, 10, 18]. На сайте <http://news.pravda.ru/science/2003/> приводится значение 576 км, а в работе [13] — значение 468.3 км, определенное по инфракрасным наблюдениям IRAS. Для оценок размеров цветковых пятен на астероиде [6, 7] мы использовали величину диаметра астероида 550 км.

По спекл-интерферометрическим наблюдениям на поверхности астероида обнаружены высококонтрастные пятна размером в сотни километров. Друммонд с сотрудниками [9] предположили, что альbedo астероида различно в разных местах его поверхности. В оппозицию 1988 г. были проведены спекл-интерферометрические наблюдения Весты на 1-м телескопе на горе Майданак. Обработка 300 снимков, сделанных с короткой экспозицией, позволила зарегистрировать на астероиде ряд пятен размером до 100 км [16].

Наблюдения астероида, проведенные в 1997 г. с космического телескопа Хаббла, позволили оценить размеры деталей поверхности [15]. На ней виден кратер, имеющий 460 км в поперечнике и занимающий весь южный полюс астероида. Предполагается, что астероид

испытал мощное разрушительное соударение около миллиарда лет назад. Спектрометрический анализ показывает, что кратер обнажил несколько слоев коры Весты и частично ее мантию. Есть предположение, что после такого катастрофического столкновения образовалось семейство астероидов Вестоиды [17]. Около 5 % метеоритов, обнаруженных на нашей планете, имеют связь с астероидом 4 Веста.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ АСТЕРОИДА 4 ВЕСТА МЕЖПЛАНЕТНОЙ СТАНЦИЕЙ «DAWN»

Запуск американской автоматической межпланетной станции (АМС) «Dawn» состоялся 27 сентября 2007 г., а 16 июля 2011 г. она вышла на орбиту вокруг астероида 4 Веста. Между астероидом и АМС было примерно 16000 км. На этом расстоянии астероид имеет видимый диаметр почти 2°. Интересно, что северный полюс не был освещен Солнцем и практически на фотографиях невидим. На орбите около Весты АМС пробыла немногим более года.

Аппарат оснащен фотокамерами высокого разрешения, инфракрасным спектрометром, детекторами нейтронов и гамма-излучения. Среди задач, стоящих перед АМС «Dawn», было детальное исследование южного полушария Весты, где находится огромный кратер.

После 20 сут работы орбита АМС была понижена до высоты 680 км. В этой части миссии (длительностью 30 сут) «Dawn» мог получать стереоснимки астероида, по которым можно составить точную карту его высот. Затем зонд снизился до 180...200 км, и тогда период обращения вокруг Весты составил примерно четыре часа. На такой орбите «Dawn» изучил выбросы, возникающие при ударах космических частиц о поверхность астероида, а также прозондировал его структуру. На этой орбите АМС провела около 70 сут (<http://galspace.spb.ru/index249.html>).

На южном полюсе астероида, судя по полученным с «Dawn» фотографиям, находится крупный кратер, получивший название Реясильвия, имеющий диаметр 458 км и глубину 12 км. Он имеет центральный пик, который образовался, когда скальная порода при мощном ударе инородного тела была выброшена вверх. Высота пика составляет около 22 км (см. рис. 1). Измерения «Dawn» показывают, что астероид Веста подвергся двум ударам, которые пришлось почти в одно и то же место в районе южного полюса. Эти два удара выбросили породу астероида в окружающее пространство и образовали кратеры. Анализ данных аппарата «Dawn» показал, что кратер Реясильвия перекрывает другой, более старый след столкновения с космическим телом, и этот кратер лишь незначительно меньше в размере — около 375 км в поперечнике. Согласно более точной информации Реясильвия находится в верхней части старого кратера, а его возраст может достигать 2.5 млрд лет (<http://cometasite.ru/asteroid-vesta-2/>).



Рис. 1. Южный полюс астероида 4 Веста, полученный МАС «Dawn» (взято с сайта <http://kp.ua/daily/070212/323617/>)

Эти два основных удара выбросили породу астероида в окружающее пространство и, как предполагается, вызвали рябь и полосы в экваториальной части Весты (рис. 2). Особый интерес вызвала система углублений на поверхности, опоясывающих астероид около экватора. Экваториальная система углублений выглядит в виде канавок с крутыми стенками. Мелкие кратеры, которые образовались позже, видны на желобах. Самый большой желоб имеет протяженность 380 км в длину и 15 км в ширину. Система желобов, которые находятся севернее, старше, их рельеф более сглажен. Анализ структуры этих желобов и их формирование показывает на возможную их связь с катастрофическими событиями на южном и северном полюсах.

Съемка поверхности Весты с низкой орбиты 180—200 км позволила получить большое число снимков крупным планом. На рис. 3 приведен снимок кратера, вокруг которого наблюдается светлое пят-

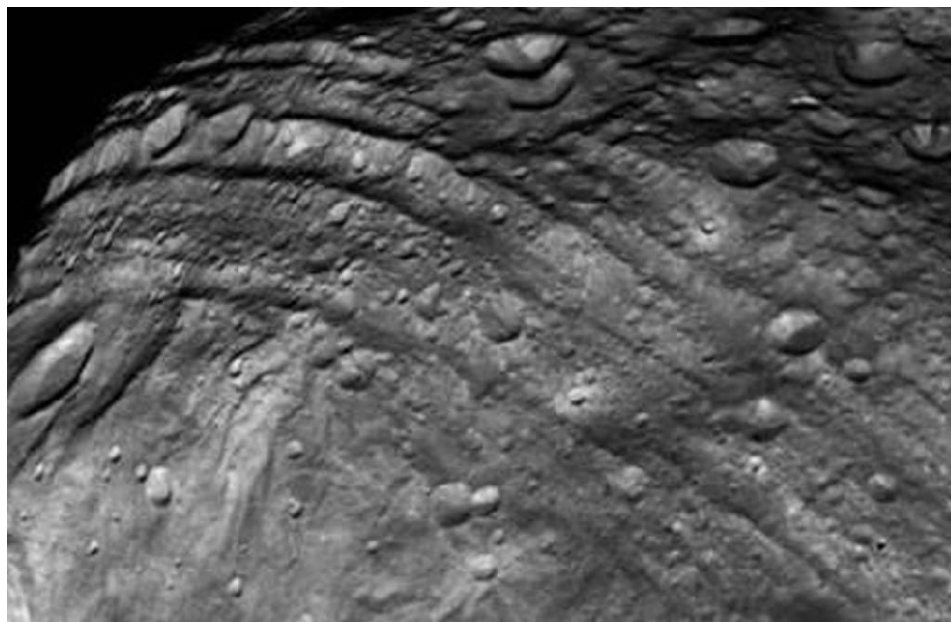


Рис. 2. Желоба на поверхности Весты около ее экватора (взято с сайта <http://cometasite.ru/asteroid-vesta-2/>)

но. Такие пятна наблюдались многократно. Вполне возможно, что диаметры этих пятен при наблюдениях с Земли с применением СЧМ мы и измеряли. По-видимому, они вызваны усилением излучения благодаря обратному когерентному рассеянию, которое становится заметным при малых фазовых углах Солнца. Как видно из рисунка, размер светлого пятна может превосходить размер кратера [12]. Но нельзя забывать, что мы регистрировали с Земли только наиболее яркую часть таких пятен. А они могли соответствовать размерам кратеров.

Группа ученых под руководством Кристофера Расселла из университета штата Калифорния в городе Лос-Анджелес (США) представила общие выводы, которые были получены несколькими коллективами астрономов, задействованных в работе научной миссии «Dawn». Они полагают, что Веста является так и не развившимся «зародышем» планеты, и наиболее существенным доказательством этому есть крупный кратер Реяильвия на южном полюсе астероида, диаметр которого составляет примерно 500 км, глубина — 24—25 км (<http://2012over.ru/asteroid-vesta-javljaetsja-mertvim-zarodishem-.html>).

Согласно Шенку на севере также видно несколько очень старых больших кратеров. Один имеет размеры 275 км в поперечнике, а другой — 150 км (<http://www.vesti.ru/doc.html?id=792468&cid=2161>).

Зонд «Dawn» ищет также воду с помощью нейтронного и гамма-спектрометра (GRAND), который может идентифицировать богатые водородом отложения, которые могут быть связаны с водяным льдом.

Все данные, полученные при помощи «Dawn», очень важны для понимания механизма формирования Солнечной системы. Заплани-

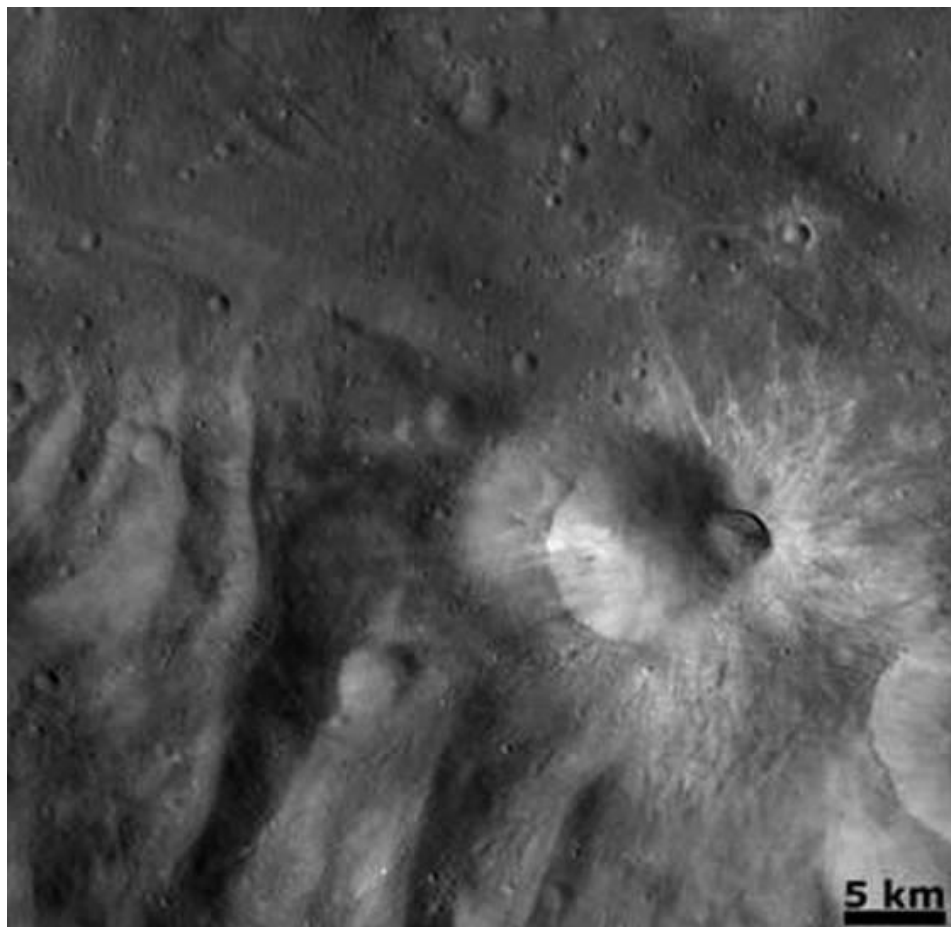


Рис. 3. Разрешение снимка 46 м/пкл (фото NASA/JPL-Caltech/UCLA/MPS/DLR/IDA)

рован уход «Dawn» от астероида Веста на 26 августа 2012 г. Далее он отправится в трёхлетний полёт к астероиду Церера.

СОПОСТАВЛЕНИЕ РАЗМЕРОВ КРАТЕРОВ, ПОЛУЧЕННЫХ НАЗЕМНЫМ МЕТОДОМ И С ПОМОЩЬЮ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ

Спектрофотометрические наблюдения 4 Весты проводились в феврале 2002 г. в НИИ «Крымская астрофизическая обсерватория». Размеры деталей получены при использовании спектрально-частотного метода и опубликованы в работах [6, 7]. 2 февраля 2002 г. астероид 4 Веста имел прямое восхождение $3^{\text{h}}50^{\text{m}}$ и склонение $+16^{\circ}$. В 2011 г., когда «Dawn» начинал свою работу около Весты, видимость южного полушария была полной, а северное полушарие было видно примерно до $30...35^{\circ}$ с. ш. Таким образом, можно считать, что наши наблюдения

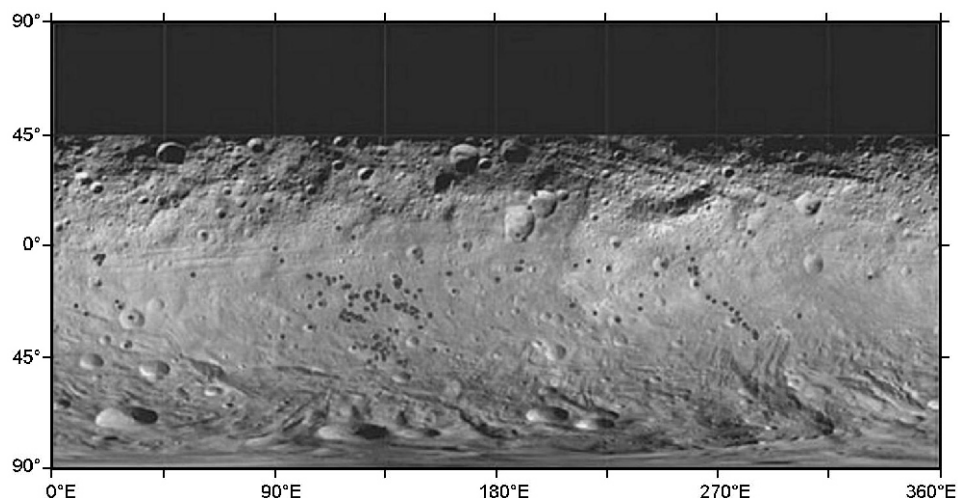


Рис. 4. Карта астероида 4 Веста, построенная по данным комического аппарата «Dawn» (<http://astrotema.com/topic100.html>)

и наблюдения АМС «Dawn» были получены при близком освещении астероида Солнцем. Поэтому можно проводить сравнение оценок размеров образований на его поверхности, полученных разными методами.

По эквивалентной ширине полосы поглощения гидросиликатов 440 нм было определено 16 размеров образований, а по показателям цвета $B - V$ и $V - R$ — 19 и 20 размеров соответственно. Поскольку современная оценка диаметра астероида составляет 530 км, а мы использовали значение 550 км, то все определенные нами размеры были уменьшены на соответствующую величину. Точность оценки размеров составляла около 10 %.

Измерения диаметров кратеров, полученных миссией «Dawn», были произведены по карте астероида 4 Веста, представленной на сайте <http://astrotema.com/topic100.html> (рис. 4). Точность оценки размеров составила также около 10 %. Отметим, что на карте нет данных о кратерах, расположенных севернее 45°. Поэтому пришлось сравнивать размеры кратеров на южном и северном полюсах Весты по опубликованным данным.

К сожалению, широта кратеров, расположенных вблизи полюсов, в публикациях не приводится. Поэтому предполагаем, как это было сделано в работе [6], что широта достигает 45°. Тогда, если определенные нами по полосе 440 нм размеры 768 и 720 км пересчитать с экваториальной зоны на широту 45°, где расположен кратер на южном полюсе, то получаются размеры 548 и 514 км. Поскольку широта может быть меньше, можно считать, что определенный нами размер достаточно близок к размеру известного кратера на южном полюсе, размер которого около 500 км.

Сравнение значений размеров кратеров в километрах, полученные по карте «Dawn», и значений, полученных спектрально-частотным методом

«Dawn»	440 нм	$B - V$	$V - R$
110	127	108	110, 103
85	86	—	82
62	67	65	68
57	—	60.5	—
56, 55, 51	—	—	55, 51
48, 47, 45	46.1	46.1	44
43	—	42.2	—
37, 38	36.4	—	37
33, 32+	35.5	32.6	32.6
30	31.6	—	—
26, 25.5, 25+	—	25.9	—
24+, 23+	—	24.0	23
22, 21+	22.1	—	—
20+	—	—	20
19, 17+	—	18.6, 17.9	—
16	—	16.4	—
15, 14.5	14.4	—	—
14+	13.4	13.2	—
12+	12.5	—	12.6, 12.1
11+, 10	—	10.4	10.8

На северном полюсе имеются два кратера диаметрами 275 и 150 км. В пересчете на 45° мы получили размеры 244 и 124 км. Они примерно на 15 % меньше размеров, определенных АМС «Dawn».

Таким образом, наши наземные данные подтверждают наличие двух больших кратеров на южном полюсе астероида 4 Веста и двух кратеров меньших размеров на северном полюсе.

Сравнение оценок размеров кратеров в диапазоне 10...100 км приведено в таблице. В первой графе приведены оценки, полученные с карты АМС «Dawn» (рис. 4). В трех следующих графах представлены результаты частотного анализа наземных спектрофотометрических наблюдений. Близкие значения, находящиеся в пределах точности, приведены в одной строчке. Например, есть много размеров 25, 24, 23 км. Такие размеры в таблице приводятся один раз и обозначаются знаком «+». Отметим также, что при частотном анализе данных наблюдений мы не могли находить одинаковые размеры, поэтому одинаковые размеры, полученные из карт, из таблицы убраны. Видно, что практически все размеры, полученные по карте «Dawn», были нами зарегистрированы при наблюдениях с Земли в 2002 г.

Зная физическую природу кратеров, наблюдавшихся с Земли, можно сделать следующее предположение: кратеры, представленные во второй графе, являются результатом бомбардировки Весты малыми телами, содержащими водные соединения, а кратеры, представленные в третьей графе, являются более молодыми образованиями, чем кратеры из четвертой графы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сравнение космических данных о размерах пятен (кратеров) на поверхностях астероидов и оценок, полученных из наземных наблюдений с использованием спектрально-частотного метода, производится не первый раз. В работе [4] использовались снимки, полученные с пролетной траектории и только с одной стороны астероида 21 Лютеция. Результаты сравнения показали эффективность применения СЧМ для определения размеров образований на поверхностях малых тел Солнечной системы.

АМС «Dawn» стал спутником астероида 4 Веста и снимал его поверхность с разных высот. Многократно публиковались его снимки. Было построено несколько карт поверхности астероида. Использование приведенной в работе карты позволило нам определить размеры кратеров на поверхности астероидов и сравнить их с размерами пятен, найденных нами при наземных наблюдениях астероида. При этом было сделано допущение, что с помощью СЧМ мы определяли размеры кратеров на поверхности астероида. Сравнение данных таблицы показывает, что нами при наблюдениях с Земли были получены все размеры имеющихся на поверхности астероида кратеров в диапазоне от крупных кратеров на его полюсах до 10—100 км.

Авторы благодарят В. В. Бусареву за постоянное внимание к работе и ценные замечания.

1. Аксенов А. Н., Егоров Ю. А., Тейфель В. Г., Харитонова Г. А. О периоде вращения астероида 4 Веста // Письма в Астрон. журн.—1987.—**13**, № 7.—С. 616—620.
2. Бусарев В. В., Прокофьева-Михайловская В. В., Рублевский А. Н. Разработка и применение спектрально-частотного метода для исследований поверхностей безатмосферных тел // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—2008.—**104**, № 6.—С. 95—102.
3. Бусарев В. В., Прокофьева-Михайловская В. В., Рублевский А. Н., Горькавый Н. Н. Пятна на астероидах и возможность их изучения наземными средствами // Кинематика и физика небес. тел.—2012.—**28**, № 1.—С. 3—15.
4. Прокофьева-Михайловская В. В., Бусарев В. В., Горькавый Н. Н., Рублевский А. Н. Реальность оценок размеров пятен на поверхностях астероидов, сделанных спектрально-частотным методом // Кинематика и физика небес. тел.—2011.—**27**, № 6.—С. 31—43.
5. Прокофьева-Михайловская В. В., Бусарев В. В., Рублевский А. Н. От спектральных наблюдений астрономических объектов к спектрально-частотному методу s20 // Кинематика и физика небес. тел. Приложение.—2009.—№ 6.—С. 434—438.
6. Прокофьева-Михайловская В. В., Рублевский А. Н., Бочков В. В. Размеры цветowych пятен на поверхности астероида 4 Веста // Астрон. вестн.—2008.—**42**, № 6.—С. 540—556.
7. Прокофьева-Михайловская В. В., Рублевский А. Н., Бочков В. В. Водные соединения на поверхности астероида 4 Веста // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—2008.—**104**, № 1.—С. 218—228.

8. *Bus S. J., Vilas F., Barucci M. A.* Visible-wavelength spectroscopy of asteroids // Asteroid III / Eds W. F. Bottke, A. Cellin, P. Paolicchi, R. Binzel. — Tucson: Univ. of Arizona press, 2002.—P. 169—182.
9. *Drummond J. D., Eckart A., Hege E. K.* Speckle interferometry of asteroids. IV. Reconstructed images of 4 Vesta // *Icarus*.—1988.—**73**.—P. 1—14.
10. *Hansen O. L.* Radii and albedos of 84 asteroids from visual and infrared photometry // *Astron. J.*—1976.—**81**.—P. 74—84.
11. *Gehrels T.* Minor planets. I. The rotation of Vesta // *Astron. J.*—1967.—**72**.—P. 929—938.
12. *Gorkavyy N. N., Rublevsky A. N., Prokofjeva-Mikhajlovskaya V. V.* The sizes of impact craters and ejecta spots on asteroids // Protecting the Earth against collisions with asteroids and comet nuclei / Eds A. M. Finkelstein, W. F. Huebner, V. A. Shor. — St. Petersburg: Nauka, 2010.—P. 62—64.—(Proc. of the Intern. Conf. ACH-2009, St. Petersburg, 21—25 Sept. 2009).
13. *Taylor R. C., Tapia S., Tedesco E. F.* The rotation period and pole orientation of asteroid 4 Vesta // *Icarus*.—1985.—**62**.—P. 298—304.
14. *Tedesco E. F., Noah P. V., Noah M., Price S. D.* A supplement IRAS minor planet survey // *Astron. J.*—2002.—**123**, N 2.—P. 1056—1085.
15. *Thomas P. G., Binzel R. P., Gaffey M. J., et al.* Impact excavation on asteroid 4 Vesta: Hubble space telescope results // *Science*.—1997.—**277**.—P. 1492—1495.
16. *Tsvetkova V. S., Dudinov V. N., Novikov S. B., et al.* Shape and size of asteroid 4 Vesta: speckle interferometry and polarimetry // *Icarus*.—1991.—**92**.—P. 342—349.
17. *Vilas F., Cochran A. L., Jarvis K. S.* Vesta and the Vestoids: A new rock group? // *Icarus*.—2000.—**147**.—P. 119—128.
18. *Worden S. P., Stein M. K., Schmidt G. D., Angel J. R. P.* Angular diameter of Vesta from speckle-interferometry // *Icarus*.—1977.—**32**.—P. 450—457.

Статья поступила в редакцию 07.08.12