

## ОЦЕНКА ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ АСТЕРОИДА 2017 VR12 ПО РАДИОЛОКАЦИОННЫМ И ФОТОМЕТРИЧЕСКИМ НАБЛЮДЕНИЯМ

© 2019 г. Ю. С. Бондаренко<sup>1\*</sup>, Д. А. Маршалов<sup>1</sup>, Ю. Д. Медведев<sup>1</sup>,  
Г. И. Корниенко<sup>2</sup>, А. В. Кочергин<sup>2,3</sup>, М. С. Желтобрюхов<sup>2</sup>, Л. А. Беннер<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Институт прикладной астрономии РАН, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Уссурийская астрофизическая обсерватория ДВО РАН, Приморский край, Россия

<sup>3</sup>Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия

<sup>4</sup>Лаборатория реактивного движения Калифорнийского технологического института, США

Поступила в редакцию 26.09.2018 г.; после доработки 26.09.2018 г.; принята к публикации 30.10.2018 г.

Представлены результаты радиолокационных и фотометрических наблюдений астероида 2017 VR12. Наблюдения проводились в период тесного сближения астероида с Землей в 2018 г. 5 марта на 32-м радиотелескопах обсерваторий “Зеленчукская” и “Бадары” и 6 марта на 0.65-м оптическом телескопе Уссурийской астрофизической обсерватории. Радиолокационные наблюдения астероида были выполнены в бистатическом режиме на частоте 8.56 ГГц совместно с 70-м антенной обсерватории “Голдстоун”. В результате наблюдений были получены спектры мощности отраженного от астероида сигнала. Размер проекции этого астероида на картинную плоскость составил  $138 \pm 14$  м. Были оценены значения радиолокационного альbedo  $0.32 \pm 0.04$  и  $0.31 \pm 0.04$ , и коэффициента круговой поляризации  $0.36 \pm 0.02$  и  $0.34 \pm 0.01$  для обсерваторий “Зеленчукская” и “Бадары” соответственно. По фотометрическим наблюдениям была получена кривая блеска астероида, определен период вращения, равный  $1.378 \pm 0.03$  ч, и построен двумерный контур поверхности.

*Ключевые слова:* АСЗ, астероиды, радиолокационные наблюдения, фотометрия.

**DOI:** 10.1134/S0320010819020037

### ВВЕДЕНИЕ

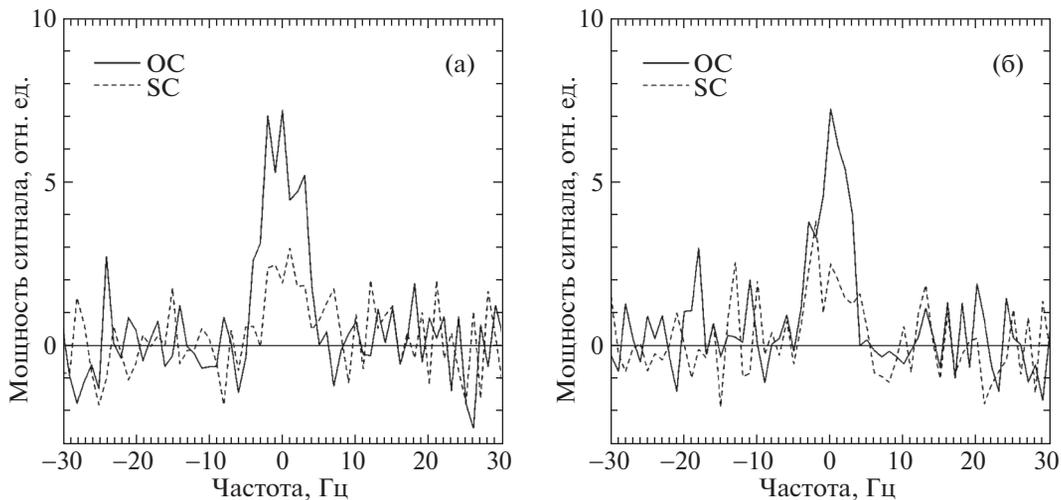
Астероид 2017 VR12 был обнаружен 10 ноября 2017 г. на 1.5-м оптическом телескопе Pan-STARRS 1 обсерватории Халеакала (США). 2017 VR12 относится к астероидам, сближающимся с Землей, класса Амур с большой полуосью, равной 1.3696 а.е., и расстоянием в перигелии 1.0004 а.е. 7 марта 2018 г. этот астероид приблизился к Земле на расстояние 0.0097 а.е., что стало самым тесным сближением с момента его открытия. Период вращения астероида, определенный по световой кривой, составил  $1.37752 \pm 0.00007$  ч (Правек и др., 2018), а абсолютная величина — 20.6, что для среднего оптического альbedo от 0.05 до 0.5 соответствует диаметру от 450 до 140 м. Другие физические параметры этого астероида были неизвестны.

В марте 2018 г. одновременно были проведены радиолокационные и фотометрические наблюдения астероида 2017 VR12. Это позволило нам оценить размеры, форму и физические свойства поверхности астероида.

### РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ

В радиодиапазоне 2017 VR12 наблюдался 5 марта 2018 г. с 4:16 по 4:25 UTC. 70-м радар обсерватории “Голдстоун” облучал астероид 150 кВт сигналом с постоянной частотой 8560 МГц (3.5 см) в правой круговой поляризации. Отраженный от 2017 VR12 сигнал регистрировался одновременно в правой и левой круговых поляризациях на 32-м радиотелескопах в обсерваториях “Зеленчукская” и “Бадары”. Принятый сигнал был квантован и записан в цифровом формате данных. В результате обработки эхо-сигналов были получены спектры мощности на девятиминутном интервале интегрирования с частотным

\*Электронный адрес: [bondarenko@iaaras.ru](mailto:bondarenko@iaaras.ru)



**Рис. 1.** Спектры мощности зеркальной ОС и диффузной SC компонент эхо-сигнала астероида 2017 VR12, полученные в обсерваториях Зеленчукская (А) и Бадары (В) 5 марта 2018 г. на интервале наблюдений с 4 : 16 по 4 : 25 UT с частотным разрешением 1 Гц.

разрешением 1 Гц для обеих поляризаций. Для этого к данным было применено преобразование Фурье, с учетом изменения доплеровской частоты со временем. Полученные спектры мощности эхо-сигнала астероида 2017 VR12 в обсерваториях “Зеленчукская” (А) и “Бадары” (В) представлены на рис. 1. По оси ординат отложена мощность эхо-сигнала, выраженная в единицах стандартного отклонения шума. Нулевое значение соответствует величине математического ожидания шума. По оси абсцисс отложена частота в герцах. Нулевое значение частоты на рисунке соответствует частоте, вычисленной для центра масс астероида. Назовем зеркальной компонентой (ОС) — эхо-сигнал, имеющий поляризацию, ортогональную излученному сигналу, а диффузной компонентой (SC) — эхо-сигнал с совпадающей поляризацией. Как правило, основную часть эхо-сигнала составляет зеркальная компонента ОС. Диффузная компонента SC возникает вследствие многократных отражений сигнала от поверхности. Чем больше неровность поверхности на масштабах длины волны излучаемого сигнала, тем больше величина диффузной компоненты. Сплошными и штриховыми линиями изображены спектры зеркальной и диффузной компонент эхо-сигнала соответственно.

По спектрам мощности зеркальной компоненты эхо-сигналов, полученных в обеих обсерваториях, была оценена ширина спектров по пересечению с осью абсцисс (Марги и др., 2007)  $B_A = 11.0$  Гц и  $B_B = 10.3$ . Для частотного разрешения в 1 Гц точность определения ширины спектра по границам составляет  $\pm 0.7$  Гц. Далее, используя полученные значения  $B_A$  и  $B_B$ , были вычислены интегральные

суммы диффузной и зеркальной компонент спектра и их ошибки. Полагая, что энергия отраженного сигнала содержится в обеих компонентах, отношения сигнал/шум (ОСШ) на интервале наблюдений определялись как суммы этих величин и составили  $ОСШ_A = 55.5 \pm 0.5$  и  $ОСШ_B = 51.7 \pm 0.5$ .

## ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ

Фотометрические наблюдения астероида 2017 VR12 были выполнены в Уссурийской астрофизической обсерватории 6 марта 2018 г. на 0.65-м оптическом телескопе САНТЕЛ-650 с фокусным расстоянием 1300 мм, оснащенным ПЗС-матрицей КАФ-4301Е. Наблюдения проводились в интегральном свете с 11 : 51 до 14 : 26 UTC. Всего было получено 500 изображений астероида с временем экспонирования 10 с и интервалом между кадрами по 10 с. Для определения блеска астероида использовались 16 звезд из каталога UCAC4. Полученные значения блеска представлены на рис. 2. По оси абсцисс отложено время в сутках от 6 марта 2018 г. 00:00 UTC, а по оси ординат — блеск в звездных величинах. Средний блеск астероида составляет 11.77 и изменяется в пределах 0.6 звездной величины.

По значениям блеска астероида был получен спектр мощности, используя дискретное преобразование Фурье. Анализ спектра показал наличие двух спектральных компонент разной амплитуды  $0.194 \pm 0.003$  и  $0.070 \pm 0.003$ . Мы определили основной период вращения по гармонике с наибольшей амплитудой, который составил  $1.378 \pm 0.03$  часа. По полученному периоду была постро-

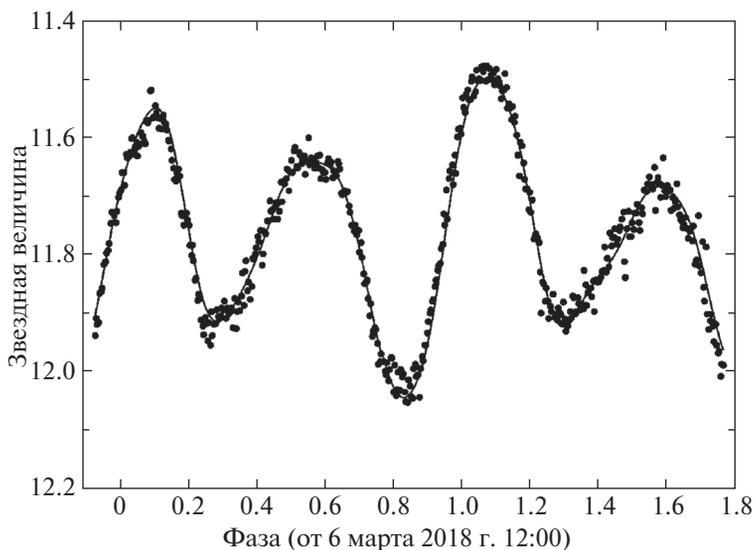


Рис. 2. Кривая блеска астероида 2017 VR12, полученная по фотометрическим наблюдениям 6 марта 2018 г.

ена кривая блеска 2017 VR12, изображенная на рис. 2 сплошной линией.

### СОВМЕСТНЫЙ АНАЛИЗ НАБЛЮДАТЕЛЬНЫХ ДАННЫХ

Ширина  $B$  спектра мощности эхо-сигнала связана с периодом вращения  $P$  астероида следующим выражением  $B = 4\pi D \cos \delta / (\lambda P)$ , где  $\delta$  — угол между осью вращения исследуемого объекта и картинной плоскостью, а  $D$  — диаметр проекции астероида на картинную плоскость. Таким образом, полагая  $\delta = 0^\circ$  и используя полученные значения периода вращения и ширину спектра  $B_A$ , имеющую наименьшую ошибку, мы оцениваем максимальный диаметр проекции астероида на картинную плоскость  $D_{\max} = 138 \pm 14$  м на средний момент  $T_{\text{рад}}$  радиолокационного наблюдения 5 марта 2018 г. 4 : 20 UTC.

Зная период вращения астероида и изменение ширины спектра со временем, можно построить двумерную выпуклую фигуру, представляющую собой проекцию астероида на его экваториальную плоскость (Ипатов и др., 2016). Однако для этого необходимо проводить радиолокационные измерения на интервале времени не менее одного периода вращения астероида. В нашем случае длительность радиолокационных наблюдений составила всего 0.1 периода, поэтому двумерный контур поверхности астероида был построен по кривой блеска, используя методику, описанную в работе (Остро и др., 1988) в предположении, что фигура астероида выпуклая, а альbedo одинаково для всей поверхности. Полученный контур на момент  $T_{\text{фот}}$

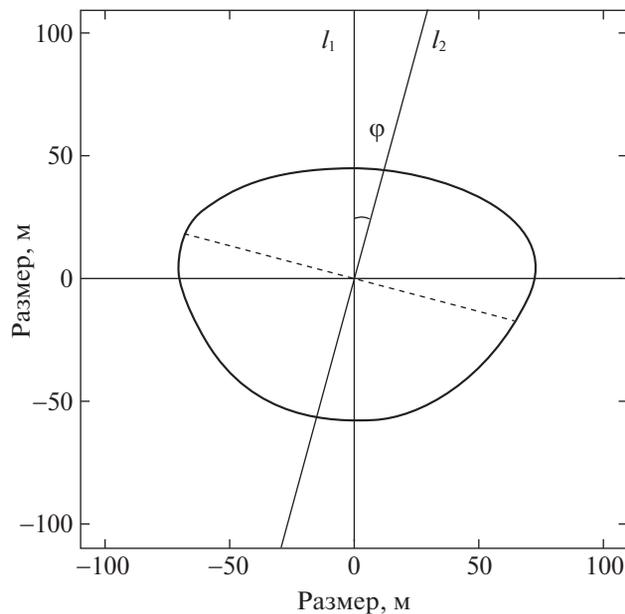
максимума блеска 6 марта 2018 г. 13 : 28 UTC представлен на рис. 3. Предполагается, что наблюдатель находится в верхней части рисунка, т.е. луч зрения  $l_1$  на момент  $T_{\text{фот}}$  направлен параллельно оси ординат. Для масштабирования контура мы использовали значение  $D_{\max}$  и угол  $\phi \approx 15^\circ$  между направлением  $l_1$  и лучом зрения  $l_2$  на момент  $T_{\text{рад}}$ . Пунктирной линией отмечена проекция астероида  $D_{\max}$  на средний момент радарных наблюдений. Максимальные наибольший и наименьший размеры контура фигуры составили 144 и 102 м.

Оценка свойств поверхности астероида была выполнена на основе анализа поляризационных зеркальной и диффузной компонент эхо-сигнала. Для характеристики неровности поверхности используется коэффициент круговой поляризации  $\mu = SC/OC$ , который вычисляется как отношение интегральных сумм диффузной и зеркальной компонент спектра. Мы оцениваем коэффициенты круговой поляризации астероида 2017 VR12  $\mu = 0.36 \pm 0.02$  и  $0.34 \pm 0.01$  по наблюдениям, полученным в обсерваториях “Зеленчукская” и “Бада-ры” соответственно.

ОСШ для эхо-сигнала определяется как отношение мощности принятого эхо-сигнала  $P_{\Pi}$  к дисперсии шумов приемника  $\Delta P_{\text{ш}}$  следующим образом (Маршалов и др., 2018):

$$\text{ОСШ} = \frac{P_{\Pi}}{\Delta P_{\text{ш}}} = \frac{P_{\text{И}} G_{\text{И}} A_{\Pi} \eta \delta D^{3/2} \sqrt{\lambda \Delta \tau P}}{128 \pi^{3/2} k T_{\Pi} R^4},$$

где  $P_{\text{И}}$  и  $G_{\text{И}}$  — мощность сигнала передатчика и коэффициент усиления передающей антенны,  $\lambda$  — длина волны излучения,  $k$  — постоянная Больцмана,  $T_{\Pi}$ ,  $A_{\Pi}$  и  $\eta$  — шумовая температура приемника,



**Рис. 3.** Двумерный контур поверхности астероида, построенный по результатам фотометрических наблюдений. Пунктирной линией отмечена проекция астероида на 5 марта 2018 г. 4 : 20 UT.

площадь собирающей поверхности и коэффициент использования приемной антенны,  $D$  и  $P$  — диаметр и период вращения объекта,  $R$  — расстояние от приемника до объекта и  $\Delta\tau$  — время накопления эхо-сигнала.

Радиолокационное альbedo  $\hat{\sigma}$  представляет собой отношение эффективной отражающей поверхности к геометрической поверхности астероида и позволяет судить о свойствах вещества и структуре поверхности. Зная параметры передающей и приемной систем, диаметр, период и эфемериду объекта, а также оценки ОСШ, полученные по радарным наблюдениям, и считая время накопления  $\Delta\tau = 9$  мин, радиолокационное альbedo 2017 VR12 по наблюдениям, полученным в обсерваториях “Зеленчукская” и “Бадары”, составило  $\hat{\sigma}_A = 0.32 \pm 0.04$  и  $\hat{\sigma}_B = 0.31 \pm 0.04$  соответственно.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Бистатистические радиолокационные наблюдения астероида 2017 VR12 были проведены 5 марта 2018 г. в обсерваториях “Зеленчукская” и “Бадары” совместно с обсерваторией “Голдстоун”. Были определены коэффициенты круговой поляризации  $0.36 \pm 0.02$  и  $0.34 \pm 0.01$  для обсерваторий “Зеленчукская” и “Бадары” соответственно, что указывает на то, что поверхность 2017 VR12 на дециметровых масштабах морфологически более грубая, чем у большинства обнаруженных радаром

астероидов (Беннер и др., 2008). Получены оценки радиолокационного альbedo астероида  $0.32 \pm 0.04$  и  $0.31 \pm 0.04$ , которые позволяют отнести 2017 VR12 к астероидам с яркой поверхностью S или M-класса (Марги и др., 2007).

6 марта 2018 г. были проведены фотометрические наблюдения астероида 2017 VR12 в Уссурийской астрофизической обсерватории. По фотометрическим наблюдениям получен период вращения  $1.378 \pm 0.03$  ч астероида.

Совместная обработка разных типов наблюдений позволила получить двумерный контур поверхности астероида, оценить его размеры 144 и 102 м. Результаты, полученные в работе, подтверждают эффективность совместного использования радарных и оптических наблюдений, особенно в случае короткой дуги радиолокационных наблюдений.

Работа проведена при поддержке гранта Российского научного фонда (№ 16-12-00071).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беннер и др. (L.A.M. Benner, S.J. Ostro, C. Magri, M.C. Nolan, E.S. Howell, J.D. Giorgini, J.L. Margot, M.W. Busch, M.K. Shepard, P.A. Taylor, and R.F. Jurgens), *Icarus* **198**, 294 (2008).

2. Ипатов А.В., Бондаренко Ю.С., Медведев Ю.Д., Мишина Н.А., Маршалов Д.А., Беннер Л.А., Письма в Астрон. журн. **42**, 935 (2016) [A. Ipatov, Yu.S. Bondarenko, Yu.D. Medvedev, N. Mishina, D. Marshalov, L.A. Benner, *Astron. Lett.* **42**, 850 (2016)].
3. Марги и др. (C. Margi, M.C. Nolan, S.J. Ostro, and J.D. Giorgini), *Icarus* **186**, 126 (2007).
4. Маршалов Д.А., Бондаренко Ю.С., Медведев Ю.Д., Вавилов Д.Е., Зотов М.В., Михайлов А.Г., Приб. и техн. эксп. **4**, 111 (2018) [D.A. Marshalov, Yu.S. Bondarenko, Yu.D. Medvedev, D.E. Vavilov, M.B. Zotov, A.G. Mikhailov, *Instr. and Exp. Tech.* **61**, 577 (2018)].
5. Остро и др. (S.J. Ostro, R. Connelly, and M. Dorogi), *Icarus* **75**, 30 (1988).
6. Правек и др. (Pravec et al.), <http://www.asu.cas.cz/ppravec> (2018).