

УДК 523.532

РЕЗУЛЬТАТЫ ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ АСЗ (2100) RA-SHALOM В СБЛИЖЕНИЕ 2019 г.

© 2021 г. С. Х. Абдуллоев^а, Н. Н. Киселев^{б, *}, Ш. Ш. Шамсиддинов^а

^аИнститут астрофизики, Национальная академия наук Таджикистана,
Душанбе, Республика Таджикистан

^бКрымская астрофизическая обсерватория Российской академии наук (КРАО РАН),
Научный, Крым, Россия

*e-mail: kiselevnn42@gmail.com

Поступила в редакцию 20.01.2021 г.

После доработки 20.04.2021 г.

Принята к публикации 16.06.2021 г.

Приведены результаты фотометрических ПЗС-наблюдений АСЗ (2100) Ra-Shalom, выполненные в период 24–29 августа 2019 г. на 1-м телескопе обсерватории Санглох Института астрофизики Национальной академии наук Республики Таджикистан. Определен период вращения $P = 19.8 \pm 0.1$ ч. Построены составные кривые блеска в фотометрических полосах BVR , определены амплитуда изменения блеска $\Delta V = 0.61^m \pm 0.05^m$ и средние величины показателей цвета $B-V = 0.75^m \pm 0.05^m$, $V-R = 0.40^m \pm 0.02^m$. Изменения показателей цвета с периодом вращения находятся в пределах ошибок измерений, что указывает на однородность отражательной способности поверхности Ра-Шалом. Абсолютная звездная величина астероида равна $15.91^m \pm 0.10^m$. Оценено соотношение осей астероида $a/b = 1.75$.

Ключевые слова: астероиды, сближающиеся с Землей, АСЗ (2100) Ра-Шалом, фотометрия, абсолютный блеск, показатели цвета, период вращения

DOI: 10.31857/S0320930X21050017

ВВЕДЕНИЕ

Астероид (2100) Ra-Shalom (в дальнейшем Ра-Шалом) был открыт 10 сентября 1978 г. американским астрономом Eleanor Helin в Паломарской обсерватории. Он принадлежит к астероидам группы Атона, большая часть орбит которых, находятся внутри земной орбиты. В афелии расстояния атонцев от Солнца больше перигелийного расстояния Земли, поэтому они пересекают земную орбиту. Орбиты атонцев быстро эволюционируют, вследствие чего, некоторые из них могут быть потенциально опасными объектами. Наклонение орбиты Ра-Шалом составляет около 15.8° , поэтому он не считается потенциально опасным астероидом. Тем не менее изучение физических характеристик каждого члена этого семейства является актуальной задачей.

По данным (Shepard и др., 2008; JPL Small-Body Database) геометрическое альbedo Ра-Шалом $p_v = 0.13 \pm 0.03$, абсолютный блеск $H = 16.3^m$, показатели цвета $U-B = 0.310^m \pm 0.053^m$, $B-V = 0.712^m \pm 0.011^m$. Диаметр астероида $D = 2.3 \pm 0.2$ км, период вращения составляет 19.797 ч (0.824875 сут). Согласно таксономической классификации (ASTEROID-TAXONOMY-V4) Ра-Шалом отно-

сится к астероидам типа С, т.е. это темный объект, материал которого соответствует углистым хондритам. В тоже время по спектральной классификации (Binzel и др., 2004) астероид отнесен к классу В. Это подтип С-астероидов, в спектрах которых отсутствуют или наблюдаются очень слабые линии поглощения для длин волн менее 0.5 мкм. Однако альbedo атонцев чуть выше альbedo других астероидов С-типа ($p_v = 0.06 \pm 0.02$).

Целью настоящей работы было построение составных кривых блеска, определение абсолютной величины, амплитуды изменения блеска, показателей цвета и периода вращения Ра-Шалом.

НАБЛЮДЕНИЯ

Фотометрические наблюдения АСЗ Ра-Шалом проведены с 24 по 29 августа 2019 г. на 1-м телескопе RCC (Цейсс-1000) международной астрономической обсерватории Санглох (МАОС), Республика Таджикистан. Использовалась ПЗС-камера FLI PL-16803, количество пикселей составляет 4096×4096 , а размер пикселя равен 9×9 мкм (масштаб изображения равен 0.14 угл. с/пиксел). Фокусное расстояние телескопа Цейсс-1000, имею-

шего систему Ричи—Кретьена, равно 13.3 м, что при использовании данной камеры обеспечивается поле зрения 10×10 угл. мин. Наблюдения проведены в фотометрических полосах *BVRI*. Фотометрическая система близка к стандартной системе Джонсона—Кузинса. Более подробная информация об используемой аппаратуре приведена в работах (Кохирова и др., 2016; Kokhirova и др., 2018).

В период наблюдений Ра-Шалом находился на минимальном расстоянии от Земли ($\Delta \approx 0.26$ а. е.) и на больших угловых расстояниях от Солнца (элонгация $\approx 125^\circ$), что создало благоприятные условия для его наблюдений. Максимальные экспозиции в каждом фильтре выбирались из условия, чтобы угловое смещение астероида на снимке не превосходило величину атмосферного кружка рассеяния ≈ 2 угл. с. В течение шести ночей в хороших погодных условиях было получено 2693 снимков астероида.

ОБРАБОТКА И АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Во время экспозиций использовалось суммирование пикселей (биннинг) 4×4 пиксела, что уменьшило эквивалентное число пикселей до 1024×1024 . В итоге на каждый пиксел приходилось 0.56 угл. с. Это было сделано для того, чтобы повысить отношение сигнала к шуму, сохранив в то же время достаточное угловое разрешение по отношению к атмосферному кружку рассеяния, которое для обсерватории Санглож (высота 2300 м) обычно составляет ~ 2 угл. с.

Фотометрическая обработка полученных кадров выполнена с использованием программ MaxImDL5 и Astrometrica. Блеск астероида в инструментальной системе конвертировался в звездные величины на основе каталога UCAC4 (Zacharias и др., 2013) для *BVRI*-полос и каталога USNOB1 (Roeser и др., 2010) для *I*-полосы. В результате был определен блеск астероида $m(r, \Delta, \alpha)$ в фильтрах *BVRI* в течение шести ночей наблюдений на наблюдаемых гелиоцентрических (r) и геоцентрических (Δ) расстояниях и фазовых (солнечных) углах (α). Индивидуальные ошибки измерения блеска, зависящие от времени экспозиции в каждом фильтре, составили около 0.05^m , 0.04^m , 0.03^m , 0.03^m в фильтрах *BVRI*, соответственно.

Наблюдаемый блеск астероида обычно редуцируется к единичным гелиоцентрическим и геоцентрическим расстояниям и нулевому фазовому углу, согласно выражению $m(1,1,0) = m(r, \Delta, \alpha) - 5 \lg(r\Delta) - F(\alpha)$. Фазовая функция берется в виде $F(\alpha) = \beta_\lambda \alpha$, где β_λ — фазовый коэффициент на линейном участке фазовой зависимости блеска для каждой фотометрической полосы. В работе Shevchenko и Lupishko (1998) для низкоальбедных астероидов

приведены величины $\beta_B = 0.044 \pm 0.001$ зв. вел./град и $\beta_V = 0.043 \pm 0.001$ зв. вел./град. Фазы вращения астероида Ра-Шалом 24 и 29 августа совпали. Это позволило нам оценить величины $\beta_B = 0.040 \pm 0.003$ зв. вел./град, $\beta_V = 0.039 \pm 0.002$ зв. вел./град и $\beta_R = 0.039 \pm 0.002$ зв. вел./град в диапазоне фазовых углов 44.31° — 38.49° нашего периода наблюдений. Разница в фазовых коэффициентах β_B и β_V , определенных нами, и в работе Shevchenko и Lupishko (1998), находится в пределах точности измерений. С одной стороны, нельзя исключить возможность индивидуальных величин β_λ , свойственных астероиду Ра-Шалом. С другой стороны, величины β_λ найдены нами в небольшом диапазоне изменений фазовых углов 5.82° . На их значения могут влиять также различия блеска звезд сравнения в разных площадках измерения астероида, который быстро перемещался во время наблюдений. Видимо, последнее обстоятельство стало причиной отрицательного значения фазового коэффициента β_I , несмотря на тщательную проверку измерений астероида в фильтре *I*. В связи с этим измерения астероида в данном фильтре в дальнейшем не рассматривались. Очевидно, для обработки этих данных необходимо в дальнейшем осуществить привязку величин *I* звезд сравнения во всех площадках, где наблюдался астероид.

Из-за неопределенностей ≈ 0.002 зв. вел./град величин β_λ и больших солнечных фазовых углов $\alpha \approx 40^\circ$, на которых наблюдался Ра-Шалом, мы использовали выражение $m(1,1,44.31) = m(r, \Delta, \alpha) + \beta_\lambda(44.31 - \alpha_i)$ для нахождения составных величин, приведенных к единичным гелио- и геоцентрическому расстояниям и к фазовому углу $\alpha = 44.31^\circ$ для момента наблюдений UT 24.385 августа 2019 г. В этом выражении α_i — фазовые углы для каждой ночи наблюдений. Мы использовали фазовые коэффициенты блеска $\beta_B = 0.040$ зв. вел./град, $\beta_V = 0.039$ зв. вел./град и $\beta_R = 0.039$ зв. вел./град, найденные для периода наших наблюдений. Составные кривые блеска астероида Ра-Шалом в фильтрах *BVR* приведены на рис. 1а, б, в. Величины для каждой ночи, обозначенные на рисунках разными символами, были смещены по оси ординат, чтобы получить наилучшее совпадение с данными, полученными на момент времени UT 24.385 августа 2019 г. Значения этих сдвигов показаны на рисунках. Показатели цветов *B—V* и *V—R* были определены по разности средних наблюдаемых величин в каждом фильтре на одних и тех же фазах периода вращения в каждую ночь наблюдений. Показатели цвета слабо зависят от солнечного фазового угла α (Shevchenko, Lupishko, 1998). Ввиду небольшого диапазона изменения фазовых углов α в период наших наблюдений, можно считать, что полученные показатели цвета *B—V* и *V—R* должны зависеть только от фазы периода вра-

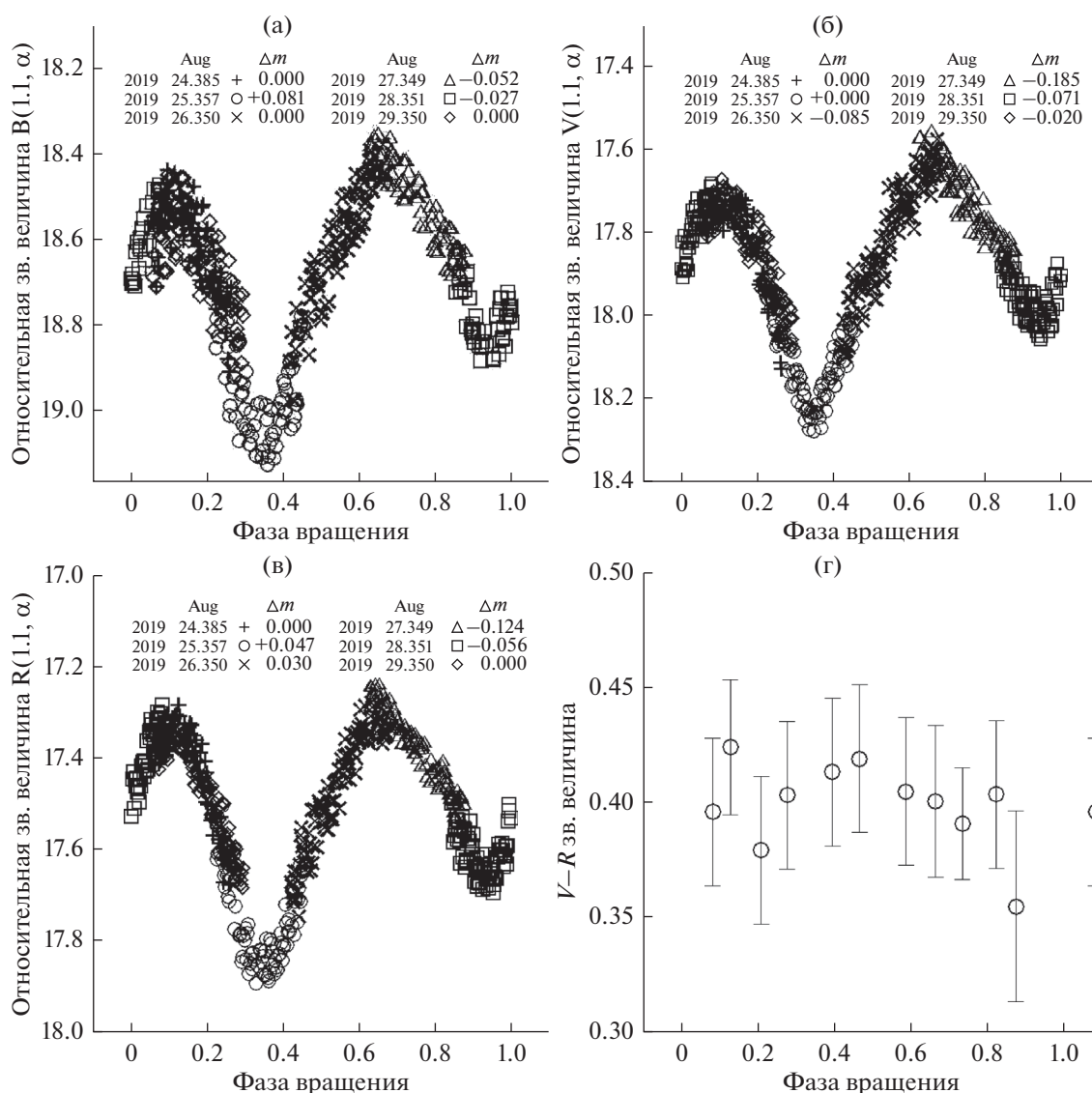


Рис. 1. (а), (б), (в) — составные кривые блеска $m(1,1,\alpha)$ АСЗ (2100) Ра-Шалом в фильтрах BVR , соответственно, полученные 24–29 августа 2019 г. и приведенные к солнечному фазовому углу $\alpha = 44.31^\circ$. (г) — зависимость показателя цвета $V-R$ от фазы вращения. Нулевая фаза периода вращения соответствует $JD_0 = 2458720.25$, период $P = 19.828$ ч.

нения. На рис. 1г показано, что зависимость показателя цвета $V-R$ от фазы вращения отсутствует.

Для поиска периода вращения астероида был использован метод периодограммного анализа (Stellingwerf, 1978), реализованный в пакете программ ISDA (Pelt, 1992). Мы нашли, что для нашего интервала наблюдений период вращения составляет $P = 19.8 \pm 0.1$ ч. В пределах полученной неопределенности это значение близко к ранее опубликованному значению периода $P = 19.797$ ч. В дальнейшем для построения составных фотометрических кривых мы использовали период вращения $P = 19.828$ ч (0.826166 сут), полученный нами. Фазы периода вращения рассчитывались по формуле $E = (JD_{i, \text{hel}} - JD_0)/P$, где $JD_{i, \text{hel}}$ — мо-

мент наблюдения с учетом светового уравнения, $JD_0 = 2458720.25$ — первоначальный момент, а $P = 19.828$ ч.

Кривые блеска на рис. 1а, б, в, представляют собой классические вариации блеска астероидов с двумя максимумами и минимумами, что в целом соответствует форме астероида, близкой к трехосному эллипсоиду. Рассеяние точек на составных кривых блеска, за небольшими исключениями, соответствуют индивидуальным ошибкам измерений блеска, отмеченным выше. Изменения показателей цветов с периодом вращения не превосходят ошибок измерений, что указывает на однородность отражательной способности поверхности Ра-Шалом.

Таблица 1. Результаты фотометрических наблюдений АСЗ (2100) Ра-Шалом

Период наблюдений, 2019 г.	Δ , а. е.	r , а. е.	α , град	$V(1,1,0)$ зв. вел	ΔV зв. вел	$B-V$ зв. вел	$V-R$ зв. вел
Август, 24–29	0.278–0.251	1.191–1.194	44.31–38.49	15.91 ± 0.10	0.61 ± 0.05	0.75 ± 0.05	0.40 ± 0.02

В таблице приведены абсолютная звездная величина астероида $V(1,1,0)$, амплитуда изменения кривой блеска в полосе V и средние величины показателей цвета $B-V$ и $V-R$.

Абсолютный блеск Ра-Шалом $V = 15.9^m$ в пределах трех сигма близок к величине $H = 16.3^m$, приводимой в (JPL Small-Body Database). Отметим, что величина $V(1,1,0)$ соответствует линейной экстраполяции к нулевому фазовому углу наблюдаемого максимального блеска астероида $V(1,1,44.31)$, в то время как при вычислении абсолютного блеска H учитывается нелинейность фазовой зависимости блеска на углах $\alpha \leq 2^\circ - 7^\circ$ – фотометрический оппозиционный эффект (ФОЭ). Величина ФОЭ зависит от альбедо астероидов. Для низкоальбедных астероидов (типов С, D, F, G, P и В) амплитуда ФОЭ наименьшая. Вместе с тем, у некоторых низкоальбедных астероидов амплитуды ФОЭ оказываются $\leq 0.06^m$ или практически отсутствует (Shevchenko, Belskaya, 2010). В нашем случае, величина $V(1,1,0)$ зависит от принятого значения коэффициента β_V и от диапазона фазовых углов, на которых проводились измерения. При неопределенности величины β_V , равной 0.002^m , неопределенность величины $V(1,1,0)$ составляет 0.08^m . В свою очередь, абсолютный блеск H вычисляется согласно эмпирической HG-функции (Bowell и др., 1989), т.е. является модельно зависимой величиной.

Амплитуда блеска $\Delta V = 0.61^m$ зависит от соотношения осей астероида, угла аспекта ψ (Binzel и др., 1989) и от распределения альбедо по поверхности. Вариации показателей цвета в пределах ошибок измерений с фазой периода вращения косвенно указывают на однородность отражательных свойств реголитовой поверхности Ра-Шалом. Поэтому можно предположить отсутствие значительных изменений альбедо по поверхности Ра-Шалом. Если допустить, что астероид наблюдается под углом $\psi = 90^\circ$ к оси вращения (экваториальный аспект), тогда из соотношения $\Delta V = 0.61 = 2.5 \lg(a/b)$, получаем минимальную оценку отношения осей Ра-Шалом $a/b = 1.75$.

Средний показатель цвета астероида $B-V = 0.75^m$ близок к значению $B-V = 0.712^m$, приведенному в JPL Small-Body Database. Показатель цвета $V-R = 0.40^m$ определен для Ра-Шалом впервые. В пределах ошибок наблюдений он совпал со средней величиной $V-R = 0.38^m$, приведенной для

низкоальбедных астероидов таксономического класса С в работе (Shevchenko, Lupishko, 1998).

ВЫВОДЫ

В результате фотометрического мониторинга астероида (2100) Ра-Шалом построены составные кривые блеска в фотометрических полосах BVR , определены амплитуда изменения блеска $\Delta V = 0.61^m \pm 0.05^m$ и средние величины показателей цвета $B-V = 0.75^m \pm 0.05^m$, $V-R = 0.40^m \pm 0.02^m$. Абсолютная звездная величина без учета амплитуды фотометрического оппозиционного эффекта составила $15.91^m \pm 0.10^m$. Определен период вращения $P = 19.8 \pm 0.1$ ч. Корреляция между вращением астероида и показателями цвета не обнаружена, что указывает на однородность отражательной способности поверхности Ра-Шалом. Оценено соотношение осей астероида $a/b = 1.75$.

Мы благодарим рецензентов Д.Ф. Лупишко и С.И. Барабанова за конструктивные замечания к рукописи. Авторы выражают признательность Е.П. Павленко (КрАО) за помощь в использовании периодограммного пакета и М. Nusarik (Астрономический институт Академии наук Словакии) за советы по редукции наблюдений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Кохирова Г.И., Фарход Р., Крючков С.В., Николаенко И.В., Мулло-Абдолов А.Ш., Хамроев У.Х., Абдуллоев С.Х. Новый “первый свет” телескопа Цейсс-1000 международной астрономической Обсерватории Санглов. Изв. АН Республики Таджикистан. 2016. № 1(162). С. 59–69.
- ASTEROID-TAXONOMY, электронный ресурс <https://data.nasa.gov/Earth-Science/ASTEROID-TAXONOMY-V4-0>
- Binzel R.P., Farinella P., Zappala V., Cellino A. Asteroid rotation rates: distributions and statistics // Asteroids II / Eds: Binzel R., Gehrels T., Matthews M. Tucson: Univ. Arizona Press, 1989. P. 416–441.
- Binzel R.P., Rivkin A.S., Stuart J.S., Harris A.W., Bus S.J., Burbine T.H. Observed spectral properties of near-Earth objects: Results for population distribution, source regions, and space weathering processes // Icarus. 2004. V. 170. P. 259–294.
- Bowell E., Hapke B., Domingue D. Application of photometric models to asteroids // Asteroids II / Eds: Binzel R.P. Tucson: Univ. Arizona Press, 1989. P. 524–556.
- JPL Small-Body Database электронный ресурс <https://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb.cgi> Kokhirova G.I., Ivanova O.V., Rakhmatullaeva F.Dzh., Khamroev U.Kh.,

- Buriev M., Abdulloev S.Kh. Results of complex observations of asteroid (596) Scheila at the Sanglokh International Astronomical Observatory // *Sol. Syst. Res.* 2018. V. 52. Iss. 6. P. 495–504.
- Pelt J. Irregularity Spaced Data Analysis, User Manual. Helsinki, 1992. 267 p.
- Roeser S., Demleitner M., Schilbach E. The PPMXL catalog of positions and proper motions on the ICRS. Combining USNO-B1. 0 and the Two Micron All Sky Survey (2MASS) // *Astron. J.* 2010. V. 139. P. 2440.
- Shepard M.K., Clark B.E., Nolan M.C., Benner L.A.M., Ostro S.J., Giorgini J.D., Vilas F., Jarvis K., Lederer S., Lim L.F., McConnochie T., Bell J., Margot J.-L., Rivkin A., Magri Ch., Scheeres D., Pravec P. Multi-wavelength observations of asteroid 2100 Ra-Shalom // *Icarus*. 2008. V. 193. P. 20–38.
- Shevchenko V.G., Belskaya I.N. Opposition effect of dark asteroids: diversity and albedo dependence // *EPSC*. 2010. V. 5. EPSC2010-738.
- Shevchenko V.G., Lupishko D.F. Optical properties of asteroids from photometric data // *Sol. Syst. Res.* 1998. № 3. P. 220–232.
- Stellingwerf R.F. Period determination using phase dispersion minimization // *Astrophys. J.* 1978. V. 224. P. 953.
- Zacharias N., Finch C.T., Girard T.M., Henden A., Bartlett J.L., Monet D.G., Zacharias M.I. The fourth US Naval Observatory CCD astrograph catalog (UCAC4) // *Astron. J.* 2013. V. 145(2). 44 p.