

УДК 523.44

ПОЛЯРИМЕТРИЯ АСТЕРОИДА (599) LUISA – НОВОГО БАРБАРИАНЦА

© 2020 г. Д. Ф. Лупишко^{a, *}, Н. Н. Киселев^b, Н. В. Карпов^{c, d}

^aНИИ астрономии Харьковского национального университета им. В.Н. Каразина, Харьков, Украина

^bКрымская астрофизическая обсерватория Российской академии наук (КрАО РАН), Крым, Россия

^cТерскольский филиал ИНАСАН Российской академии наук, г. Тырныауз, Россия

^dМеждународный центр астрономических и медико-экологических исследований НАН Украины, г. Харьков, Украина

*e-mail: lupishko@astron.kharkov.ua

Поступила в редакцию 16.05.2019 г.

После доработки 24.06.2019 г.

Принята к публикации 11.07.2019 г.

Приведены результаты поляриметрических наблюдений астероида (599) Luisa, выполненных на однотипных апертурных фотоэлектрических поляриметрах 2.6-м рефлектора Крымской астрофизической обсерватории и телескопа Цейсс-2000 обсерватории Пик Терскол в ноябре 2018 г. и феврале 2019 г. По этим и имеющимся литературным данным получены параметры составной фазовой зависимости степени поляризации $P_{\min} = -1.68\%$, $\alpha_{\min} = 14.7^\circ$, $\alpha_{\text{inv}} = 29.2^\circ$, свидетельствующие о принадлежности астероида к классу “барбарянцев”. Показано возрастание абсолютного значения отрицательной степени поляризации астероида с длиной волны в области фотометрических полос BVRI, которое противоречит данным Wagnulo и др. (2015), но согласуется со спектральным ходом поляризации остальных силикатных астероидов S-, K- и L-типов, включая известных барбарянцев. Обсуждаются возможные причины различий в спектральном ходе степени поляризации этого астероида. Отмечена уникальность свойств астероида (599) Luisa, в котором сочетаются спектральные свойства силикатных астероидов L-типа и поляризационные свойства ($P_{\min}$ и наклон h) низкоальбедных C- и Ch-астероидов.

Ключевые слова: астероиды, астероиды-барбарянцы, (599) Luisa, поляриметрия, фазовая кривая поляризации, спектральная зависимость поляризации, классификация

DOI: 10.31857/S0320930X20010077

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, в работе Cellino и др. (2006) впервые было сообщено, что астероид (234) Barbara показывает аномально широкую отрицательную ветвь фазовой кривой поляризации. При фазовом угле $\alpha \sim 20^\circ$ измеренная поляризация его была отрицательной и составляла около -1% , а предполагаемый угол инверсии в этом случае ожидался в области $\alpha \sim 30^\circ$. По таксономической классификации Tholen (1984) Barbara относится к S-классу, а точнее, к S-комплексу, в котором позже по мере накопления новых данных было выделено ряд подклассов. Так, Bus, Binzel (2002) и DeMeo и др. (2009) по характеру спектрального наклона выделили среди S-астероидов K-, L- и Ld-подклассы и классифицировали астероид Barbara как Ld- и L-объект. Таких астероидов всего оказалось около двух десятков, при этом поляриметрические измерения были сделаны только для (234) Barbara.

В связи с этим Gil-Hutton и др. (2008) выполнили программу поляриметрии L- и K-астероидов с целью поиска объектов с аномальными поляриметрическими свойствами. В результате были

проведены новые более детальные наблюдения астероида Barbara (к сожалению, только в полосе V). Авторы обнаружили четыре новых астероида с параметрами поляризации, подобными (234) Barbara, это астероиды L-класса (172) Baucis, (236) Honoria, (980) Anacostia и астероид K-класса (679) Raх. Все они показали аномально широкую отрицательную ветвь фазовой кривой, которая для всех этих пяти астероидов описывается такими средними параметрами: глубина отрицательной ветви фазовой кривой $P_{\min} = -1.36 \pm 0.13\%$, фазовый угол минимума поляризации $\alpha_{\min} = 13.8^\circ$, наклон фазовой кривой в точке инверсии (поляриметрический наклон) $h = 0.183 \pm 0.007$ и угол инверсии $\alpha_{\text{inv}} = 28.4^\circ$. Таким образом, отрицательная ветвь фазовой кривой этой группы астероидов, названных “барбарянами”, продолжается почти до $\alpha_{\text{inv}} \sim 30^\circ$ вместо обычных $\alpha_{\text{inv}} \sim 20^\circ$.

Как отметили Cellino и др. (2014), некоторые из астероидов-барбарянцев, например, (980) Anacostia, относятся к динамическому семейству Watsonia или же в пространстве собственных элементов находятся в непосредственной близости к

Таблица 1. Степень поляризации (599) Luisa и других астероидов по данным измерений Bagnulo и др. (2015)

Астероид	Тип	α , °	V , %	R , %	I , %
599 Luisa	S/K/L	26.9	-0.39	-0.30	-0.16
7 Iris	S/S/S	26.9	0.58	0.52	0.48
		27.5	0.68	0.62	0.56
		28.2	0.75	0.68	0.64
8 Flora	S/-/S	28.4	0.78	0.68	0.60
208 Lacrimosa	S/Sk/-	13.7	-0.46	-0.47	-0.50
236 Honoria	S/L/L	7.1	-1.00	-1.08	-1.17
24 Themis	C/B/C	14.0	-1.23	-1.18	-1.12
51 Nemausa	CU/Ch/Cgh	15.7	-1.11	-1.10	-1.06

этому семейству, как например, еще один астероид-барбариец (387) Aquitania. Оба они, как и сам астероид (234) Barbara, классифицируются как объекты L-класса (Bus, Binzel, 2002) или S-класса по классификации Tholen (1984) и показывают подобные спектры отражения с признаками минерала шпинель ($[\text{Fe,Mg}]\text{Al}_2\text{O}_4$), что вообще является довольно редким свойством среди остальных силикатных типов астероидов. В то же время из спектральных данных известно, что один из членов семейства Watsonia — астероид (599) Luisa — тоже содержит признаки минерала шпинель (Sunshine и др., 2008) и, следовательно, тоже может быть кандидатом в барбарянцы. Однако из-за отсутствия поляриметрических наблюдений этого астероида, принадлежность Luisa к барбариянцам оставалась не выясненной.

Первые поляриметрические наблюдения (599) Luisa вместе с 11 другими астероидами разных типов были проведены Bagnulo и др. (2015). В табл. 1 приведены результаты измерений степени поля-

ризации (599) Luisa и еще нескольких силикатных и низкоальбедных астероидов, взятые из статьи этих авторов (α — фазовый угол, а тип астероида указан по трем классификациям: (Tholen, 1984), (Bus, Binzel, 2002), (DeMeo и др., 2009)).

Bagnulo и др. (2015) отметили, что астероид (599) Luisa при $\alpha = 26.9^\circ$ показывает не положительную степень поляризации (как это имеет место для большинства астероидов), а отрицательную, причем довольно значительную $P(V) = -0.39\%$. Если это измерение правильное, то оно означает, что астероид имеет аномально широкую отрицательную ветвь фазовой кривой поляризации, простирающуюся вплоть до $\alpha \sim 30^\circ$. На этом основании авторы упомянутой статьи предположили, что Luisa является новым кандидатом в барбарянцы.

Однако вызывает большой вопрос характер изменения степени поляризации (599) Luisa по спектру. Хорошо известно, что абсолютные значения степени отрицательной поляризации астероидов силикатных типов (S, Q, L, K) возрастают с длиной волны, а положительной — наоборот, уменьшаются (Lupishko, Shkuratov, 2016). Это подтверждается также измерениями Bagnulo и др. (2015) для остальных астероидов этих типов (см. астероиды (208) Lacrimosa и (236) Honoria в табл. 1). Однако, ход поляризации (599) Luisa противоречит этим данным. Из рис. 1 статьи Bagnulo и др. (2015) видно, что спектральный наклон отрицательной поляризации (599) Luisa противоположен наклону отрицательной поляризации указанных астероидов (208) Lacrimosa и (236) Honoria (тоже барбарянцы!), что видно также и из табл. 1. В то же время этот наклон оказался одинаковым по знаку с наклонами для низкоальбедных астероидов.

Что же может быть причиной такого спектрального наклона отрицательной поляризации (599) Luisa? В принципе, можно рассматривать следующие возможности:

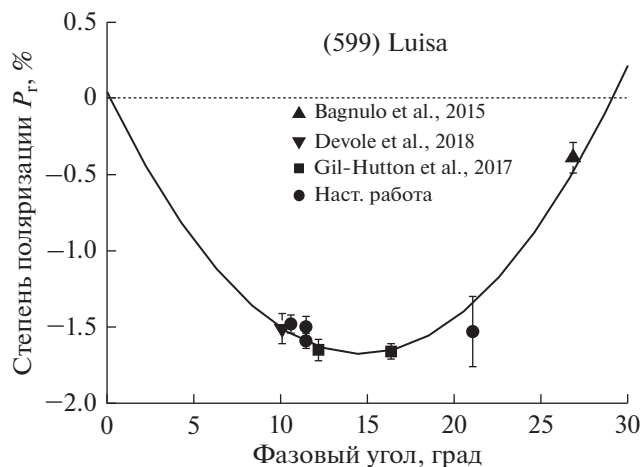


Рис. 1. Составная фазовая зависимость степени поляризации астероида (599) Luisa в фильтре V , полученная по всем имеющимся данным.

а) измеренная Bagnulo и др. (2015) поляризация (599) Luisa при $\alpha = 26.9^\circ$ на самом деле является положительной, а не отрицательной;

б) астероид (599) Luisa является не силикатным S/K/L-классов, а низкоальбедным.

Однако у нас нет оснований не доверять имеющимся поляриметрическим или спектральным наблюдениям, точно так же, как и имеющимся классификациям (599) Luisa по типам. Поэтому можно пока предположить, что астероид (599) Luisa является уникальным по своим свойствам и не вписывается в известные “нормы”. Но поскольку измерения поляризации астероида были проведены только для одного угла фазы $\alpha = 26.9^\circ$ (Bagnulo и др., 2015), то естественно, что нужны более полные и многоцветные поляриметрические наблюдения астероида.

НАБЛЮДЕНИЯ (599) LUISA

Новые поляриметрические наблюдения (599) Luisa были проведены в ноябре 2018 г. и в феврале 2019 г. на телескопах 2.6 м Крымской астрофизической обсерватории и Цейсс 2000 Международной обсерватории Пик Терскол, соответственно. В обоих случаях использовались однотипные двухканальные фотоэлектрические поляриметры (Шаховской и др., 2020). Оптический тракт каждого поляриметра включает в себя вращающуюся ахроматическую четверть-волновую фазовую пластинку и поляризационный анализатор – призму Волластона. Призма разделяет входящий свет на два ортогонально поляризованных пучка, которые затем разделяются с помощью отклоняющих зеркал на два канала. В красном канале используется охлаждаемый ФЭУ Hamamatsu R943-02. Этот канал предназначен для наблюдений в полосах *UBVRI*. В синем канале используется ФЭУ EMI 6556 B, который в сочетании с фильтрами обеспечивает проведение наблюдений в полосах *UBV*. Для регистрации сигнала используется принцип синхронного детектирования, то есть вращение фазовой пластинки синхронизируется со счетом импульсов ФЭУ. Наблюдения стандартных звезд показали низкую инструментальную степень поляризации $P_{\text{instr}} \leq 0.02\%$ и ее высокую стабильность от сезона к сезону наблюдений для обоих поляриметров.

В табл. 2 приведены результаты наших наблюдений вместе с появившимися в последнее время результатами других авторов (Bagnulo и др., 2015; Gil-Hutton и др., 2017; Devogele и др., 2018). Она содержит дату и средний момент наблюдений, обозначение фотометрической полосы, фазовый угол α , позиционный угол плоскости рассеяния ψ , измеренную степень поляризации P и позиционный угол плоскости поляризации θ с их среднеквадратическими ошибками σP и $\sigma \theta$, степень по-

ляризации P_r и позиционный угол плоскости поляризации θ_r в системе координат, связанной с плоскостью рассеяния, и ссылку на наблюдения.

Средние значения степени инструментальной поляризации и их ошибки были учтены в приводимых в табл. 1 наших данных для астероида (599) Luisa. Приведенная ошибка степени поляризации в основном определялась статистикой накопленных импульсов. Большая ошибка измерений степени поляризации $\approx 0.2\%$ 11 февраля 2019 г. вызвана малым накоплением импульсов из-за облачности.

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 представлены все имеющиеся данные наблюдений (599) Luisa в полосе *V* и составная фазовая зависимость поляризации, построенная по этим данным. Аппроксимация наблюдательных данных на этом рисунке (как и на последующих) выполнена полиномом 2-й степени. Параметры кривой степени поляризации Luisa $\alpha_{\text{min}} = 14.7^\circ$, $P_{\text{min}} = -1.68\%$, $\alpha_{\text{inv}} = 29.2^\circ$ указывают на очень широкую и глубокую отрицательную ветвь, что убедительно подтверждает предположение Bagnulo и др. (2015) о том, что этот астероид действительно является барбарянцем. При этом полученное значение угла инверсии, как видно из рис. 2, является одним из наибольших среди всех известных барбарянцев (наибольшим может быть у астероида (402) Chloe, однако пока нет его измерений на $\alpha > 23.2^\circ$).

Отметим, что с одной стороны, спектр астероида Luisa (см., например, Sunshine и др., 2008; Devogele и др., 2018) хорошо измерен в области 0.5–2.5 мкм и полностью соответствует спектрам с полосами поглощения силикатов вблизи 1 и 2 мкм других астероидов-барбарянцев L-класса, таких как (234) Barbara, (387) Aquitania и (980) Apacostia. Спектры этих астероидов с устойчивым возрастанием отражательной способности в красную область кардинально отличаются от почти нейтральных спектров низкоальбедных астероидов. Но, с другой стороны, глубина отрицательной ветви фазовой кривой поляризации (599) Luisa $P_{\text{min}} = -1.68\%$ является очень близкой к среднему значению для низкоальбедных C- и Ch-астероидов $P_{\text{min}} = -1.70 \pm 0.37\%$, а не к среднему значению $P_{\text{min}} = -1.43 \pm 0.20\%$ для L-астероидов и, тем более, к значению $0.75 \pm 0.20\%$ для S-астероидов (Belskaya и др., 2017). Соответствующее значение поляриметрического альбеда (599) Luisa, согласно обобщенной калибровке шкалы поляриметрических альбедо астероидов (Lupishko, 2018), получается равным $p_v = 0.066$ по параметру P_{min} и $p_v = 0.085$ по параметру наклона h . Среднее из этих двух значений $p_v = 0.075$ тоже больше со-

Таблица 2. Результаты поляриметрических наблюдений астероида (599) Luisa

Дата, UT	Полоса	α , °	ψ , °	P , %	σP , %	θ , °	$\sigma\theta$, °	P_r , %	θ_r , °	Ссылка
2018 11 02.980	<i>V</i>	11.5	249	1.47	0.07	69.63	1.41	−1.47	90.62	Наст. работа
2018 11 02.993	<i>R</i>	11.5	249	1.77	0.05	65.69	0.75	−1.76	86.69	Наст. работа
2018 11 02.994	<i>V</i>	11.5	249	1.61	0.05	64.24	0.97	−1.59	85.24	Наст. работа
2018 11 03.010	<i>I</i>	11.5	249	1.77	0.04	66.75	0.72	−1.76	87.75	Наст. работа
2018 11 04.898	<i>B</i>	10.6	247	1.44	0.13	62.76	2.57	−1.42	85.66	Наст. работа
2018 11 04.962	<i>V</i>	10.6	247	1.50	0.06	62.96	1.24	−1.48	85.86	Наст. работа
2018 11 04.935	<i>R</i>	10.6	247	1.62	0.06	64.40	1.10	−1.61	87.30	Наст. работа
2018 11 04.994	<i>I</i>	10.6	247	1.78	0.05	65.76	0.76	−1.78	88.74	Наст. работа
2018 11 05.013	<i>B</i>	10.6	247	1.27	0.12	58.08	2.63	−1.21	81.06	Наст. работа
2019 02 11.886	<i>V</i> ¹	21.1	77.6	1.54	0.23	80.12	4.28	−1.53	92.53	Наст. работа
2019 02 11.879	<i>R</i> ¹	21.1	77.6	1.45	0.16	73.20	3.20	−1.43	85.61	Наст. работа
2019 02 11.892	<i>I</i> ¹	21.1	77.6	1.76	0.20	60.57	3.22	−1.46	72.98	Наст. работа
2013–2014	<i>V</i>	26.9	—	—	0.1	—	—	−0.39	—	Bagnulo и др., 2015
2013–2014	<i>R</i>	26.9	—	—	0.1	—	—	−0.30	—	Bagnulo и др., 2015
2013–2014	<i>I</i>	26.9	—	—	0.1	—	—	−0.16	—	Bagnulo и др., 2015
2013 09 04	<i>V</i>	16.4	110.5	1.66	0.05	109.7	0.8	−1.66	—	Gil-Hutton и др., 2017
2013 10 05	<i>V</i>	12.2	9.6	1.65	0.07	7.0	1.3	−1.65	—	Gil-Hutton и др., 2017
2019 04 10	<i>V</i>	10.9	—	—	0.1	—	—	−1.51	—	Devoege и др., 2018

Примечание. ¹ Малое накопление сигнала из-за облачности.

ответствует среднему альбедо С- и Ch-астероидов 0.068 ± 0.015 , чем среднему альбедо L-астероидов 0.157 ± 0.039 (Belskaya и др., 2017). Таким образом,

астероид (599) Luisa действительно можно рассматривать как уникальный по своим свойствам. Спектрально Luisa соответствует среднеальбед-

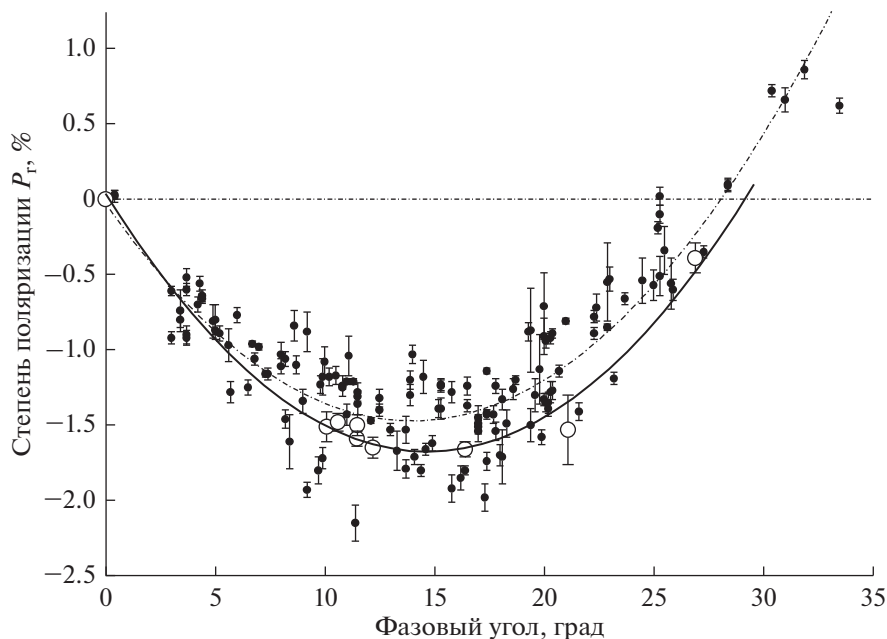


Рис. 2. Фазовая зависимость поляризации в полосе *V* для всей популяции известных барбарянцев (точки) согласно данным Lupishko (2019), пунктирная кривая — ее аппроксимация. Открытые кружки — имеющиеся наблюдения астероида (599) Luisa, а сплошная кривая — их аппроксимация.

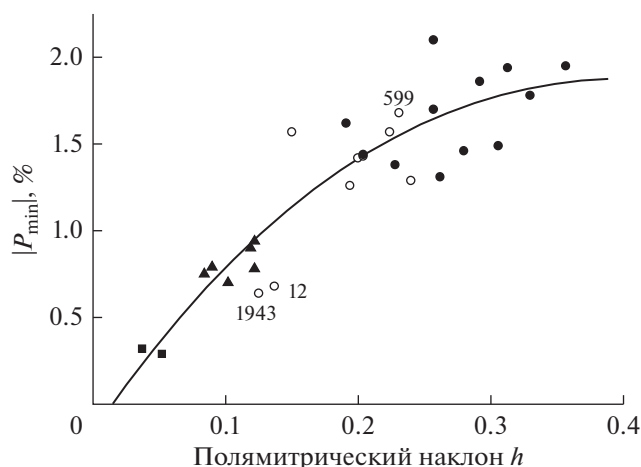


Рис. 3. Положение астероидов разных типов на диаграмме “ $P_{\min}$ –наклон h ”. ● – низкоальбедные C-, G-, B- и P-типы, ○ – L-тип, ▲ – S-тип и ■ – E-тип.

ным силикатным астероидам L-класса, а поляриметрически – низкоальбедным C- и Ch-астероидам и одновременно удовлетворяет основному критерию астероидов-барбарянцев – большое значение угла инверсии.

На диаграмме параметров $P_{\min}$ и поляриметрический наклон h (рис. 3) астероиды L-класса барбарянцы вплотную примыкают к низкоальбедным астероидам C-, B- и G-классов и даже частично перекрываются, при этом барбарянец (599) Luisa наиболее близок к последним. В то же самое время L-астероиды не барбарянцы (12) Victoria и (1943) Anteros (см. Binzel и др., 2004), примыкают вплотную к S-астероидам.

Однако вернемся к спектральному ходу отрицательной поляризации астероида, который по измерениям Bagnulo и др. (2015) противоречит имеющимся данным для других астероидов этого класса. Как видно из табл. 2, наши наблюдения были проведены в полосах *BVRI*, предусматривая тем самым также оценку спектрального хода поляризации. По измерениям 2 и 4 ноября 2018 г. (измерения 11 февраля 2019 г. отягощены существенно большими погрешностями) можно видеть возрастание степени отрицательной поляризации (599) Luisa в красную область спектра, как и должно быть для среднеальбедных силикатных S-, K- и L-астероидов. А почему измерения Bagnulo и др. (2015) дают обратный спектральный ход, в отличие от их же измерений S- и L-астероидов (208) Lacrimosa и (236) Honoria – остается загадкой. Нужны дополнительные измерения поляризации этого астероида в разных участках спектра.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Новые поляриметрические наблюдения астероида (599) Luisa, в спектре которого обнаружено присутствие минерала шпинель, уверенно подтвердили принадлежность его к группе барбарянцев с параметрами поляризационной фазовой кривой $\alpha_{\min} = 14.7^\circ$, $P_{\min} = -1.68\%$, $\alpha_{\text{inv}} = 29.2^\circ$. Эти наблюдения показали возрастание абсолютного значения отрицательной поляризации астероида в красную область спектра в области *BVRI*-длин волн, что противоречит данным Bagnulo и др. (2015), но согласуется со спектральным ходом остальных силикатных астероидов S-, K- и L-типов. Отмечена уникальность свойств астероида Luisa, в котором сочетаются спектральные свойства силикатных астероидов L-типа и поляризационные свойства низкоальбедных C- и Ch-астероидов. В целом, по своим поляризационным свойствам астероиды L-типа барбарянцы близки к низкоальбедным астероидам, а астероиды этого же типа, но не барбарянцы – близки к обычным S-астероидам. Не исключено, что при большем накоплении наблюдательных данных выявится непрерывный переход поляриметрических свойств от астероидов S-типа через L-тип к низкоальбедным C-, Ch-, G-, B- и P-астероидам и (599) Luisa будет одним из таких переходных объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Шаховской Д.Н., Киселев Н.Н., Долгополов А.В., Анто-
нюк К.А., Розенбуш В.К., Иванов Ю.С., Карпов Н.В.,
Тарадий В.К., Колесников С.В. Двухканальные
апертурные поляриметры Крымской астрофизи-
ческой обсерватории и Обсерватории Пик Тер-
скол // Бюллетень CAO. 2020. (В печати).
- Bagnulo S., Cellino A., Sterzik M.F. Linear spectropolarim-
etry: A new diagnostic tool for the classification and
characterisation of asteroids // Mon. Notic. Roy. As-
tron. Soc. 2015. V. 446. № 1. P. L11–L15.
- Belskaya I.N., Fornasier S., Tozzi G.P., Gil-Hutton R., Celli-
no A., Antonyuk K., Krugly Yu.N., Dovgopol A.N., Faggi S.
Refining the asteroid taxonomy by polarimetric obser-
vations // Icarus. 2017. V. 284. № 1. P. 30–42.
- Binzel R.P., Birlan M., Bus S.J., Harris A.W., Rivkin A.S.,
Fornasier S. Spectral observations for near-Earth ob-
jects including potential target 4660 Nereus: Results
from Meudon remote observations at the NASA Infra-
red Telescope Facility (IRTF) // Planet. and Space Sci.
2004. V. 52. P. 291–296.
- Bus S.J., Binzel R.P. Phase II of the small main-belt asteroid
spectroscopic survey: A feature-based taxonomy // Icarus. 2002. V. 158. № 1. P. 146–177.
- Cellino A., Bagnulo S., Tanga P., Novakovic B., Delbo M. A
successful search for hidden Barbarians in the Watsonia
asteroid family // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. Lett.
2014. V. 439. № 1. P. L75–L79.
- Cellino A., Belskaya I.N., Bendjoya Ph., Di Martino M., Gil-
Hutton R., Muinonen K., Tedesco E.F. The strange pola-

- rimetric behavior of asteroid (234) Barbara // *Icarus*. 2006. V. 180. № 2. P. 565–567.
- DeMeo F.E., Binzel R.P., Slivan S.M., Bus S.J.* An extension of the Bus asteroid taxonomy into the near-infrared // *Icarus*. 2009. V. 202. № 1. P. 160–180.
- Devogele M., Tanga P., Cellino A., Bendjoya Ph., Rivet J.-P., Surdej J., Vernet D., Sunshine J.M., Bus S.J., Abe L., Bagnulo S., Borisov G., Campins H., Carry B., Licandro J., McLean W., Pinilla-Alonso N.* New polarimetric and spectroscopic evidence of anomalous enrichment in spinel-bearing Calcium-Aluminium-rich Inclusions among L-type asteroids // *Icarus*. 2018. V. 304. № 1. P. 31–57.
- Gil-Hutton R., Garcia-Migani E.* Polarimetric survey of main-belt asteroids VI. New results from the second epoch of the CASLEO survey // *Astron. and Astrophys.* 2017. V. 607. A103. 6 p.
- Gil-Hutton R., Mesa V., Cellino A., Bendjoya P., Peñaloza L., Lovos F.* New cases of unusual polarimetric behavior in asteroids // *Astron. and Astrophys.* 2008. V. 482. P. 309–314.
- Lupishko D.F.* Generalized calibration of the polarimetric albedo scale of asteroids // *Sol. Syst. Res.* 2018. V. 52. № 2. P. 98–114.
- Lupishko D.* (Ed.) Asteroid Polarimetric Database V9.0. EAR-A-3-RDR-APD-POLARIMETRY-V9.0. NASA Planetary Data System, 2019.
- Lupishko D.F., Shkuratov Yu.G.* On spectral dependence of polarization of asteroids // *Sol. Syst. Res.* 2016. V. 50. № 5. P. 329–336.
- Sunshine J.M., Connolly H.C., McCoy T.J., Bus S.J., La Croix L.M.* Ancient asteroids enriched in refractory inclusions // *Science*. 2008. V. 320. P. 514–520.
- Tholen D.I.* Asteroid taxonomy from cluster analysis of photometry: Doct. Thesis. — Tucson: Univ. Arizona Press, 1984. 150 p.