

ПОЛЯРИМЕТРИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ АСТЕРОИДОВ ПРИМИТИВНЫХ ТИПОВ ВБЛИЗИ ПЕРИГЕЛИЯ С ЦЕЛЬЮ ОБНАРУЖЕНИЯ ИХ СУБЛИМАЦИОННО-ПЫЛЕВОЙ АКТИВНОСТИ

© 2024 г. В. В. Бусарев^{1,2,*}, Н. Н. Киселёв², М. П. Щербина^{2,1},
Н. В. Карпов², А. П. Горшков²

¹Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Государственный
астрономический институт им. П. К. Штернберга, Москва, Россия

²Учреждение Российской академии наук Институт астрономии
Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: busarev@sai.msu.ru

Поступила в редакцию 10.10.2023 г.

После доработки 21.11.2023 г.

Принята в печать 21.11.2023 г.

С декабря 2022 г. по апрель 2023 г. на телескопе “Цейсс–2000” обсерватории Пик Терскол проведены *UBVR*-поляриметрические наблюдения 12 астероидов, в основном примитивных типов Главного пояса, находившихся на гелиоцентрических расстояниях вблизи перигелия. Целью мониторинговой программы был поиск изменений параметров поляризации астероидов, вызванных предполагаемой сублимационно-пылевой активностью, в результате которой возможно формирование разреженных пылевых экзосфер астероидов. Объектами программы были астероиды (1) Церера, (53) Калипсо, (117) Ломия, (164) Ева, (214) Ашера, (324) Бамберга, (419) Аврелия, (505) Кава, (554) Перага, (654) Зелинда, (704) Интерамния, (1021) Фламарио. Поляриметрические наблюдения астероидов (117) Ломия, (164) Ева и (505) Кава выполнены впервые, остальные астероиды наблюдались ранее. Только для двух астероидов, (1) Церера и (704) Интерамния, по спектрофотометрическим наблюдениям ранее была отмечена временная спектрофотометрическая переменность. Анализ временных изменений степени поляризации астероидов и сравнение результатов наблюдений с данными, имеющимися в литературе, показали, что стабильность наблюдаемой степени поляризации сопоставима с ошибками измерений $\sim(0.02\text{--}0.1)\%$ у астероидов разного блеска. Таким образом, в период наблюдений не было обнаружено сколько-нибудь заметных поляризационных признаков сублимационно-пылевой активности наблюдавшихся астероидов. Дополнительно показано, что существующие в настоящее время варианты спектральной таксономии астероидов, основанные на спектрофотометрических данных и альbedo, демонстрируют значительное рассеяние выделенных классов при сопоставлении их с фазовыми зависимостями поляризации астероидов. У астероида (554) Перага подтверждена отрицательная степень поляризации на углах меньше угла инверсии. Измерения поляризации астероида (1) Цереры в широком диапазоне длин волн не подтвердили заподозренное ранее изменение угла плоскости поляризации с длиной волн.

Ключевые слова: астероиды, *UBVRI*-поляриметрия, сублимационно-пылевая активность

DOI: 10.31857/S0004629924020112 **EDN:** KSFCXJ

1. ВВЕДЕНИЕ

Спектральные наблюдения астероидов Главного пояса (АГП) примитивных типов (С, В, F, G, X) с вероятным содержанием в недрах водяного льда показывают, что у этих тел вблизи перигелийных гелиоцентрических расстояний и, соответственно, при максимальных подсолнечных температурах возможна временная сублимационно-пылевая активность (СПА), ведущая к образованию разреженной пылевой экзосферы (ПЭ) [1, 2, 3]. Моделирование спектров отражения таких астероидов, окруженных оптически тонкой ПЭ, состоящей из агрегатных частиц субмикронного размера и разного состава,

это полностью подтверждает [4, 5]. Из перечисленных результатов также следует, что спектрофотометрия и широкополосная *UBVRI*-фотометрия являются эффективными методами обнаружения явления СПА у астероидов примитивных типов. В то же время для обнаружения и изучения данного явления было бы целесообразно также использовать поляриметрический метод, который во многих случаях служит независимым источником информации об оптических, химико-минералогических и структурных особенностях поверхностей безатмосферных небесных тел и пылевых частиц (см., напр., [6, 7] и ссылки там же).

В нашей статье обсуждаются результаты *UBVR*-поляризметрических наблюдений на интервале времени около четырех месяцев двенадцати АГП в основном примитивных типов, находившихся вблизи перигелия орбиты. Как известно, фазовые углы АГП не превышают $\sim 30^\circ$ и поэтому возможные изменения их поляризметрических характеристик и параметров невелики [7, 8], что затрудняет их использование для обнаружения изменений, вызванных появлением СПА и связанной с ней ПЭ. Для изучения возможностей использования поляризметрических параметров астероидов примитивных типов для обнаружения СПА было проведено численное моделирование (с использованием теории радиационного переноса излучения) этих параметров у условного астероида С-типа, окруженного оптически тонкой пылевой экзосферой ($\tau < 0,5$), состоящей из агрегатных частиц субмикронного размера и разного состава (лед H_2O , оливин, астрономические силикаты и органика типа толинов [9]). На основании этого моделирования был сделан вывод, что по данным поляриметрии на фазовых углах менее 30° невозможно утверждать, была ли у астероида какая-то экзосфера или нет во время наблюдений, и тем более оценить ее свойства, так как изменения, вносимые рассеянием света в ПЭ в значения степени поляризации на указанных фазовых углах, малы и слабо отличаются для экзосферных частиц с разными параметрами [9].

Тем не менее в качестве первоначального этапа мы провели поиск признаков СПА у вышеупомянутых астероидов примитивных типов, находившихся при максимальных подсолнечных температурах, с расчетом на то, что имеется вероятность обнаружения кратковременных вариаций поляризметрических параметров, связанная с наличием СПА и локальной неустойчивости ПЭ у некоторых из этих тел. Результаты этого небольшого обзора изложены ниже.

2. АППАРАТУРА, МЕТОДИКИ НАБЛЮДЕНИЙ И ОБРАБОТКИ

Поляризметрические наблюдения по программе поиска признаков сублимационно-пылевой активности астероидов были проведены в период с 22 декабря 2022 г. по 26 апреля 2023 г. на 2-м (F/8) телескопе “Цейсс-2000” системы Ричи-Кретьена-Куде обсерватории Пик Терскол (Северный Кавказ, Россия), оснащенного двухканальным апертурным поляриметром имени Н. М. Шаховского “POL-SHAKH”. Оптический тракт поляриметра включает модулятор, представляющий собой быстро враща-

ющуюся ахроматическую волновую пластину (~ 30 оборотов в секунду). Для работы использовалась полуволновая пластинка ($\lambda/2$), служащая для измерения линейной поляризации. После модулятора установлена призма Волластона, которая разделяет входящий свет на два ортогонально поляризованных луча. Эти лучи направляются зеркалами в два канала — синий и красный. Каждый из каналов имеет свой приемник излучения и набор спектральных фильтров, выделяющих необходимые фотометрические полосы: *UBV* в синем канале и *UBVRI* в красном канале. В качестве приемника излучения в синем канале стоит неохлаждаемый ФЭУ ЕМІ 6556 В. В красном канале используется охлаждаемый приемник Hamamatsu R943-02. Наши наблюдения в основном проводились с центральными длинами волн и ширинами на полувысоте пропускания фильтров (FWHM) в полосах *B* ($\lambda 434/117$ нм) и *R* ($\lambda 683/159$ нм), а для некоторых объектов в *U* ($\lambda 360/74$ нм), *V* ($\lambda 540/80$ нм) и *I* ($\lambda 809/188$ нм). Вращение фазовой пластины синхронизировано со временем накопления импульсов ФЭУ в каждом из 16 секторов положения фазовой пластины 0° – 22.5° , 22.5° – 45° , ..., 337.5° – 360° одновременно для двух ортогонально поляризованных лучей. Интенсивность света, прошедшего через идеальную полуволновую фазовую пластинку с оптической осью под углом φ , за которой следует анализатор (Волластон) с главной плоскостью под углом $\psi = 0^\circ$, можно записать согласно [10]:

$$I(\varphi) = \frac{1}{2}(1 + q \cos 4\varphi + u \sin 4\varphi). \quad (1)$$

Этот метод обеспечивает квазиодновременное измерение параметров Стокса q и u приходящего излучения. Преимуществом этого метода является независимость измеряемых поляризационных параметров от изменений интенсивности, вызванных переменностью объекта и/или атмосферным поглощением. Измерения выполнялись по схеме: фон неба — астероид, астероид —, ..., — фон неба. Длительность мониторинга каждого объекта была около 1 часа. При обработке наблюдений отсчеты от фона неба интерполировались на средние моменты наблюдений программного объекта (астероида) и вычитались. После коррекции фона неба решение системы уравнений (1) для 16 положений полуволновой фазовой пластинки позволяет получать значения параметров Стокса астероида в инструментальной системе q_{obs} и u_{obs} для каждой экспозиции. Используя весь ряд экспозиций, были получены средние значения наблюдаемых параметров Стокса q_{obs} и u_{obs} и их среднеквадратические

ошибки, определяемые как стандартные отклонения $\sigma_{q_{\text{obs}}}$ и $\sigma_{u_{\text{obs}}}$.

Для определения инструментальной линейной поляризации наблюдались неполяризованные звезды с нулевой поляризацией ($P < 0.01\%$) из списка [10]. В результате наблюдений нескольких стандартов были получены средние инструментальные параметры q_{ins} и u_{ins} и их среднеквадратические ошибки $\sigma_{q_{\text{ins}}}$ и $\sigma_{u_{\text{ins}}}$ для каждой полосы и каждого сезона наблюдений. Инструментальная степень поляризации телескопа во всех полосах была менее 0.04% и была исключена из измеренной степени поляризации астероидов согласно выражениям $q = \bar{q}_{\text{obs}} - \bar{q}_{\text{ins}}$ и $u = \bar{u}_{\text{obs}} - \bar{u}_{\text{ins}}$. В результате для каждого астероида и каждой полосы были определены степень $P = (q^2 + u^2)^{1/2}$ и позиционный угол плоскости линейной поляризации

$$\theta = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{u}{q}\right) + \Delta PA$$

в экваториальной системе координат, где ΔPA — поправки к нуль-пунктам инструментальных позиционных углов. Для определения поправок ΔPA проведены наблюдения звезд-стандартов с известной высокой степенью поляризации и известными углами поляризации в экваториальной системе координат, взятые из [11, 12]. Поправки за нуль-пункты инструментальных позиционных углов во всех фильтрах были постоянны в пределах $\pm 3^\circ$. Более подробно поляриметр, методики наблюдений и обработки данных описаны в работе [13].

В дальнейшем, как это принято в планетной астрофизике, мы будем рассматривать параметры Стокса астероидов q_r и u_r по отношению к перпендикуляру к плоскости рассеяния ϕ , проходящей через Солнце, наблюдателя и объект изучения. Они

связаны с величинами P и θ посредством выражений $\theta_r = \theta - (\phi \pm 90^\circ)$, $P_r \equiv q_r = P \cos(2\theta_r)$ и $u_r = P \sin(2\theta_r)$. Знак в скобках выбирается «+», если $(\phi \pm 90^\circ) \leq 180^\circ$, и «-», если $(\phi \pm 90^\circ) \geq 180^\circ$ [14]. Обычно, если нет физических причин, то с точностью до ошибок измерений положительная ветвь фазовой зависимости поляризации на фазовых углах $\alpha \geq \alpha_{\text{inv}}$ характеризуется ортогональностью плоскости поляризации θ по отношению к плоскости рассеяния ϕ , то есть $\theta_r = 0^\circ$, $q_r = P$ и $u_r = 0$. Угол α_{inv} является углом инверсии, то есть фазовым углом, на котором меняется знак степени поляризации. На фазовых углах $0 \leq \alpha \leq \alpha_{\text{inv}}$ наблюдается так называемая отрицательная ветвь фазовой кривой поляризации с параметрами: плоскость поляризации θ параллельна плоскости рассеяния ϕ , то есть $\theta_r = 90^\circ$, $q_r = -P$ и $u_r = 0$.

Фазовые зависимости поляризации (ФЗП) безатмосферных космических тел (БКТ) Солнечной системы (астероиды, спутники планет), а также ансамблей частиц (например, кометы) являются одними из основных характеристик, морфология и параметры которых зависят от свойств частиц реголитовых поверхностей БКТ и частиц атмосфер комет. Для аппроксимации фазовых кривых используются различные выражения, например, тригонометрический полином [15], где b , c_1 , c_2 , α_{inv} — свободные параметры:

$$P(\alpha) = b \times \sin^{c_1} \alpha \times \cos^{c_2}(\alpha/2) \times (\alpha - \alpha_{\text{inv}}). \quad (2)$$

3. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ И ДИСКУССИЯ

В табл. 1 представлены данные о наблюдавшихся астероидах. Она содержит: имя астероида, фотометрические полосы, наличие/отсутствие данных

Таблица 1. Обстоятельства наблюдений избранных астероидов

	Название	Полосы	Поляриз. данные	Фазовые углы α , град	m_v	Спектральный класс		
						1	2	3
1	Церера	UBVR	APDB	12.2–20.8	7.9–7.3	G	C	C
53	Калипсо	BR	APDB	17.5–20.1	12.2–11.4	Xc		Ch
117	Ломия	BR		7.7–14.7	12.6–13.1	Xc	X	C
164	Ева	BVR		13.5–22.8	11.6–12.7	CX	X	C
214	Ашера	BVR	APDB	5.1–8.7	12.8–12.5	Xc	Ek	
324	Бамберга	BVR	APDB	18.9–21.6	10.1–11.1	CP		Ch
419	Аврелия	VB	APDB	12.9–13.7	13.7	F	C	
505	Кава	BR		6.2–8.8	11.7–11.2	FC	P	P
554	Перага	VR	APDB	6.7	13.2	Fc	Ch	Ch
654	Зелинда	BR	APDB	18.2–21.6	11.2–10.5	C	Ch	Ch
704	Интерамния	BR	APDB	16.3–20.3	~12	F	B	Ch
1021	Фламмаро	BVR	APDB	4.9–14.5	11.5–12.3	F	B	C

в Астероидной поляриметрической базе данных (APDB) [16], диапазон наблюдавшихся фазовых углов, эфемеридную звездную величину на момент наблюдений, спектральную классификацию согласно [17, 18] (столбец 1), [19] (столбец 2) и [20] (столбец 3) группы “Спектральный класс”.

Отметим некоторые особенности фотометрического и поляриметрического поведения астероидов, по которым они были включены в нашу программу. Астероид (1) Церера был включен в программу наблюдений как объект, у которого [21] обнаружили эмиссию молекул радикала OH ($\lambda 3080 \text{ \AA}$), образующихся в результате фотодиссоциации молекул воды. Авторы заключили, что OH -атмосфера Цереры не-симметрична. Вероятно, что северная полярная шапка астероида состоит из замерзшей H_2O (возможно, в виде инея), которая в течение зимы аккумулируется, а летом сублимирует. Можно предположить, что в результате возможно изменение поляриметрических свойств отраженного света астероида, особенно если временное образование не-симметричной газовой оболочки сопровождается выносом пыли. Кроме того, у (1) Цереры подозревается монотонное возрастание позиционного угла плоскости отрицательной поляризации с длиной волны [22]. В связи с этим измерения поляризации астероида проведены в широком спектральном диапазоне, включающем фотометрические полосы *UBVR*.

В работе [23] была найдена большая положительная поляризация излучения астероида (554) Перага ($P_r = 1\%$) на фазовых углах $8-10^\circ$. Зельнер и Градье [23] отметили этот уникальный случай среди большого числа объектов, которые они наблюдали. Они исключили ошибку в отождествлении объекта, так как он двигался в поле звезд в обе даты наблюдений в соответствии с эфемеридой. Так как на зависимости $P_r(\alpha)$ было всего две точки, можно было заподозрить, что переход ФЗП астероида от отрицательных значений P_r к положительным происходит на очень небольшом угле инверсии $\alpha_{\text{inv}} < 8^\circ$. Как отмечалось выше, обычно в диапазоне фазовых углов $0 - \alpha_{\text{inv}}$ фазовая зависимость степени поляризации большинства астероидов имеет один минимум [24] и хорошо описывается тригонометрическим полиномом [25] или параболой. В настоящее время установлено, что минимальный угол инверсии составляет около 14° для астероидов F-типа, а максимальный угол инверсии равен около 28° для “Barbaralike” астероидов S-типа [26]. Отметим, что пока абсолютный минимум угла инверсии безатмосфер-

ных тел Солнечной системы принадлежит спутнику Юпитера Европа ($\alpha_{\text{inv}} \approx 6.1^\circ$, полоса *V*) [13].

Для уточнения вида отрицательной ветви ФЗП Антонюк и Киселев [27] провели в 2006 г. измерения поляризации (554) Перага в диапазоне фазовых углов $3-16^\circ$, в том числе и на близком фазовом угле 10.7° , на котором проведены наблюдения Зельнера и Градье. Вопреки данным Зельнера и Градье, была установлена отрицательная степень поляризации астероида, $P_r = -2.10 \pm 0.17\%$. В ошибочность результатов наблюдений Зельнера и Градье трудно поверить, зная огромный опыт этих наблюдателей и то, что они сами обратили внимание на необычные данные для (554) Перага. Поэтому Антонюк и Киселев выдвинули предположение, что различия в поляризации реальны и вызваны различиями в свойствах областей поверхности астероида, которые были доступны для наблюдений Зельнеру и Градье в 1975 г. и Антонюку и Киселеву в 2006 г. Эклиптические координаты астероида в 1975 г. и 2006 г. составили ($\lambda = 181.6^\circ$, $\beta = -2.7^\circ$) и ($\lambda = 21.1^\circ$, $\beta = 2.9^\circ$) соответственно. Если ось вращения астероида близка к плоскости эклиптики, то разница в эклиптических долготах 160° дает возможность наблюдать две разные части поверхности астероида (северную и южную приполярные области) в эти два периода наблюдений. Позже Гил-Хаттон и др. [28, 29] измерили поляризацию (554) Пераги в полосе *V* на фазовых углах 9.2° и 10.3° . Она оказалась отрицательной: $P_r = -1.31\%$ и -1.6% соответственно. Эклиптические координаты астероида составили $\lambda = 286.5^\circ$, $\beta = -0.5^\circ$ и $\lambda = 264.1^\circ$, $\beta = -1.5^\circ$. Нельзя исключить также, что уникальные свойства поляризации (554) Пераги, полученные Зельнером и Градье в 1975 г., были вызваны временной сублимационно-пылевой активностью, обнаруженной для ряда астероидов ([3] и ссылки там). Поэтому наблюдаемые особенности поляризации Пераги стали основанием включения этого астероида в программу поляриметрического мониторинга.

Астероид (704) Интерамния — единственный объект нашей программы, у которого ранее по спектрофотометрическим наблюдениям были обнаружены признаки сублимационно-пылевой активности [1, 30].

Остальные астероиды были включены в программу, как объекты примитивных (низкотемпературных) спектральных классов, находившихся вблизи перигелия, где наиболее вероятно проявление сублимационно-пылевой активности. Результаты поляризационной мониторинговой программы астероидов приведены в табл. 2. В ней представлены:

Таблица 2. Результаты поляриметрического мониторинга астероидов в 2022–2023 гг.

Г–М–Д	Полоса	α , град	φ , град	$P \pm \sigma$, %	$\theta \pm \sigma$, град	θ_r , град	$P_r = q_r$, %	u_r , %
(1)Церера								
-01-20.060	<i>B</i>	20.82	287.91	0.718 ± 0.009	18.26 ± 0.36	0.36	0.718	0.009
2023-01-20.061	<i>R</i>	20.82	287.91	0.725 ± 0.031	18.45 ± 1.23	0.55	0.725	0.014
2023-01-22.010	<i>B</i>	20.54	287.33	0.625 ± 0.010	14.77 ± 0.46	177.44	0.623	–0.056
2023-01-22.010	<i>R</i>	20.54	287.33	0.697 ± 0.032	16.78 ± 1.30	179.45	0.696	–0.013
2023-01-23.012	<i>B</i>	20.38	287.02	0.580 ± 0.018	15.57 ± 0.91	178.55	0.579	–0.029
2023-01-23.004	<i>R</i>	20.38	287.02	0.666 ± 0.033	14.32 ± 1.42	177.30	0.663	–0.063
2023-01-24.995	<i>B</i>	20.06	286.38	0.492 ± 0.014	12.06 ± 0.81	175.68	0.486	–0.074
2023-01-25.005	<i>R</i>	20.06	286.38	0.556 ± 0.031	12.92 ± 1.58	176.55	0.552	–0.067
2023-02-25.003	<i>U</i>	12.20	267.37	1.018 ± 0.040	85.40 ± 1.12	88.03	–1.016	0.070
2023-02-24.985	<i>B</i>	12.20	267.38	1.232 ± 0.023	87.28 ± 0.54	89.90	–1.232	0.005
2023-02-24.985	<i>V</i>	12.20	267.39	1.226 ± 0.022	87.12 ± 0.51	89.73	–1.226	0.012
2023-02-24.985	<i>R</i>	12.20	267.39	1.250 ± 0.030	85.86 ± 0.68	88.47	–1.249	0.067
2023-02-24.999	<i>I</i>	12.20	267.37	1.241 ± 0.037	86.77 ± 0.85	89.39	–1.240	0.026
(53)Калипсо								
-12-24.076	<i>B</i>	20.14	291.08	0.261 ± 0.047	120.89 ± 5.19	99.81	–0.246	–0.088
2022-12-31.056	<i>B</i>	17.50	291.71	0.794 ± 0.059	108.54 ± 2.14	86.83	–0.789	0.088
2022-12-31.056	<i>R</i>	17.50	291.71	0.820 ± 0.059	106.01 ± 2.05	84.30	–0.804	0.162
2023-01-24.012	<i>B</i>	5.65	297.15	1.159 ± 0.043	115.67 ± 1.07	88.52	–1.157	0.060
2023-01-24.011	<i>R</i>	5.65	297.15	1.194 ± 0.041	116.09 ± 0.99	88.94	–1.194	0.044
(117)Ломя								
-12-23.772	<i>B</i>	7.69	153.35	0.955 ± 0.061	153.31 ± 1.84	89.96	–0.955	0.001
2023-01-24.790	<i>B</i>	14.70	101.18	0.712 ± 0.089	96.85 ± 3.59	85.67	–0.703	0.107
2023-01-24.790	<i>R</i>	14.70	101.18	0.751 ± 0.086	97.46 ± 3.26	86.29	–0.744	0.097
(164)Ева								
-12-23.662	<i>B</i>	13.49	75.84	1.186 ± 0.037	74.73 ± 0.89	88.89	–1.185	0.046
2022-12-24.691	<i>B</i>	13.95	76.31	1.137 ± 0.039	75.02 ± 0.99	88.71	–1.136	0.051
2022-12-25.740	<i>V</i>	14.42	76.74	1.077 ± 0.043	73.59 ± 1.14	86.85	–1.070	0.118
2022-12-29.781	<i>B</i>	16.10	78.01	0.708 ± 0.045	75.96 ± 1.81	87.95	–0.707	0.051
2023-01-22.785	<i>B</i>	22.83	80.09	0.788 ± 0.065	168.35 ± 2.35	178.26	0.786	–0.048
2023-01-22.786	<i>R</i>	22.83	80.09	0.805 ± 0.055	163.34 ± 1.97	173.25	0.783	–0.188
(214) Ашера								
-12-23.816	<i>B</i>	8.74	269.66	0.260 ± 0.079	70.74 ± 8.69	71.09	–0.205	0.160
2023-01-21.015	<i>V</i>	5.11	116.03	0.272 ± 0.153	172.62 ± 16.16	146.59	0.107	–0.250
2023-01-21.013	<i>R</i>	5.11	116.03	0.478 ± 0.138	83.22 ± 8.30	57.19	–0.197	0.435
(324) Бамберга								
-12-22.792	<i>V</i>	18.36	97.09	0.318 ± 0.023	96.55 ± 2.07	89.46	–0.318	0.006
2022-12-24.743	<i>B</i>	18.93	95.30	0.256 ± 0.018	98.39 ± 2.06	93.08	–0.255	–0.028
2022-12-27.884	<i>B</i>	19.83	92.76	0.068 ± 0.040	73.53 ± 17.00	70.77	–0.053	0.042
2022-12-29.664	<i>B</i>	20.31	91.49	0.104 ± 0.019	92.46 ± 5.28	90.98	–0.104	–0.004
2022-12-30.973	<i>B</i>	20.65	90.61	0.225 ± 0.023	79.31 ± 2.98	78.69	–0.207	0.086
2022-12-30.814	<i>B</i>	20.61	90.72	0.207 ± 0.033	1.56 ± 4.63	0.84	0.207	0.006
2023-01-03.723	<i>B</i>	21.58	88.40	0.501 ± 0.023	179.39 ± 1.29	0.99	0.501	0.017
2023-01-03.765	<i>R</i>	21.58	88.40	0.490 ± 0.037	175.03 ± 2.19	176.63	0.487	–0.058

Г–М–Д	Полоса	α , град	φ , град	$P \pm \sigma$, %	$\theta \pm \sigma$, град	θ_r , град	$P_r = q_r$, %	u_r , %
(419) Аврелия								
-12-23.719	<i>B</i>	12.88	72.65	0.886 ± 0.099	77.08 ± 3.20	94.43	-0.876	-0.136
2022-12-25.690	<i>V</i>	13.37	72.66	0.763 ± 0.110	77.46 ± 4.12	94.80	-0.753	-0.127
(505) Кава								
-12-29.821	<i>B</i>	8.79	266.07	1.262 ± 0.059	83.09 ± 1.35	87.02	-1.255	0.131
2023-01-22.945	<i>B</i>	6.20	132.10	1.182 ± 0.028	132.59 ± 0.68	90.50	-1.181	-0.020
2023-01-22.945	<i>R</i>	6.20	132.10	1.088 ± 0.031	129.92 ± 0.81	87.82	-1.085	0.083
(654) Зелинда								
-12-24.120	<i>B</i>	27.59	297.70	2.187 ± 0.041	26.77 ± 0.53	179.07	2.186	-0.071
2023-01-21.929	<i>B</i>	18.20	326.75	0.575 ± 0.027	146.15 ± 1.33	89.40	-0.575	0.012
2023-01-21.928	<i>B</i>	18.20	326.75	0.530 ± 0.035	147.07 ± 1.91	90.32	-0.530	-0.006
(704) Интерамния								
-12-22.724	<i>B</i>	20.27	61.66	1.474 ± 0.084	153.74 ± 1.64	2.08	1.470	0.107
2023-01-22.683	<i>B</i>	16.40	53.67	0.194 ± 0.050	150.98 ± 7.46	7.30	0.187	0.049
2023-01-22.682	<i>B</i>	16.40	53.67	0.303 ± 0.042	155.25 ± 3.98	11.58	0.278	0.119
2023-01-23.674	<i>B</i>	16.25	53.40	0.173 ± 0.049	151.69 ± 8.17	8.29	0.166	0.049
2023-01-23.671	<i>R</i>	16.25	53.40	0.355 ± 0.036	142.26 ± 2.88	178.86	0.355	-0.014
(1021) Фламмарио								
-12-25.791	<i>V</i>	4.89	348.72	1.022 ± 0.037	168.26 ± 1.04	89.53	-1.022	0.017
2023-01-24.817	<i>B</i>	14.49	82.60	0.441 ± 0.088	76.02 ± 5.73	83.42	-0.430	0.101
2023-01-24.817	<i>R</i>	14.49	82.60	0.329 ± 0.070	89.60 ± 6.11	97.00	-0.319	-0.080
(554) Перага								
-04-25.996	<i>V</i>	6.66	298.18	1.493 ± 0.081	117.79 ± 1.55	89.61	-1.493	0.021
2023-04-25.996	<i>R</i>	6.66	298.18	1.244 ± 0.055	115.70 ± 1.27	87.52	-1.239	0.108

среднее время наблюдений (Y-M-D (UT)), фотометрическая полоса, фазовый угол (α), позиционный угол плоскости рассеяния (φ), измеренные степень линейной поляризации (P) и позиционный угол плоскости поляризации (θ) вместе с их среднеквадратическими ошибками (σ), позиционный угол плоскости поляризации (θ_r) и параметры Стокса q_r и u_r по отношению к перпендикуляру к плоскости рассеяния.

На рис. 1(а)–(е) показаны результаты наших измерений степени поляризации астероидов в полосах *B*, *V* и *R* вместе с данными разных авторов, взятых из каталога APDB [16].

Из табл. 2 и рис. 1 видно, что с точностью до ошибок измерений $\sim(0.01\text{--}0.1)\%$, в зависимости от блеска астероида, данные новых измерений дополняют прежде полученные фазовые зависимости поляризации. Следовательно, можно заключить, что в период наших наблюдений отсутствовали значимые изменения степени поляризации выбранных астероидов. Отсутствие признаков СПА у Интерамнии по поляриметрическим данным не ставит под сомнение обнаруженные ранее эффекты по спек-

рофотометрическим наблюдениям. Во-первых, как уже отмечалось выше, поляриметрическое проявление СПА может быть слабее по сравнению с эффектами, выявленными по спектрофотометрии при фазовых углах менее 30 градусов. Во-вторых, отсутствие СПА в наш период наблюдений (очень близко до и после перигелийного расстояния) может быть вызвано тем, что проявление сублимационно-пылевой активности Интерамнии обусловлено некоторой тепловой инерцией, зависящей от времени прогревания поверхностного слоя вещества астероида над залежами льда H_2O .

Так как в программу наблюдений были включены примитивные астероиды разных спектральных классов (табл. 1), то представляет интерес рассмотрение того, как измеренная степень поляризации соответствует их спектральной классификации. В настоящее время существуют несколько вариантов спектральной классификации астероидов. Чаще всего используют классификацию Толена [18, 17] и Баса и Бинзела [19]. Классификация Толена основана на узкополосных измерениях спектра в диапазоне

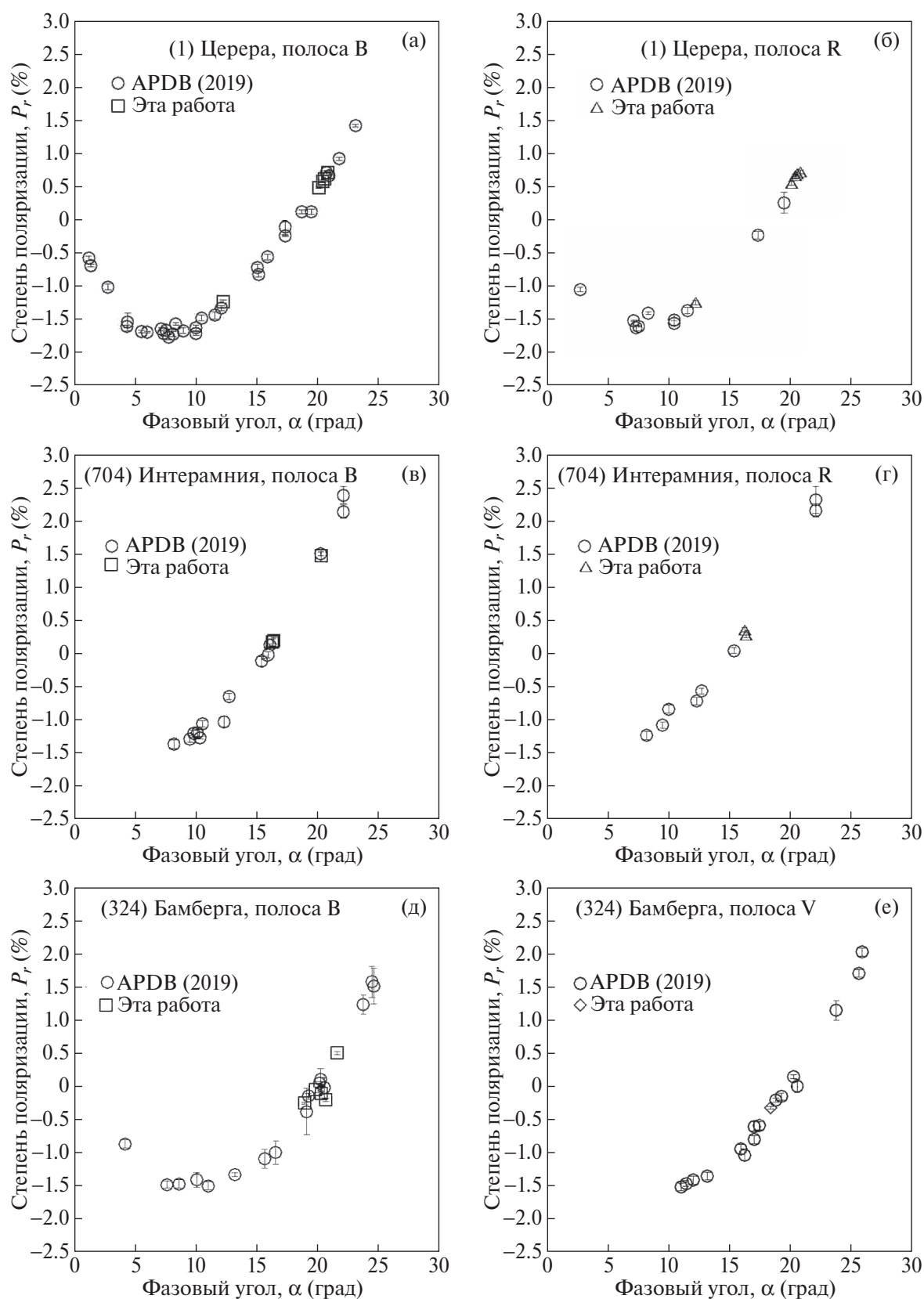


Рис. 1. Фазовые зависимости степени поляризации астероидов (1) Церера, (704) Интерамния, (324) Бамберга, (1021) Фламарио, (214) Ашера, (419) Аврелия, (554) Перага в полосах *B* (открытые квадраты), *V* (открытые ромбы) и *R* (открытые треугольники) вместе с данными разных авторов (открытые кружочки, закрытые кружочки, закрытые ромбы) из каталога APDB [16].

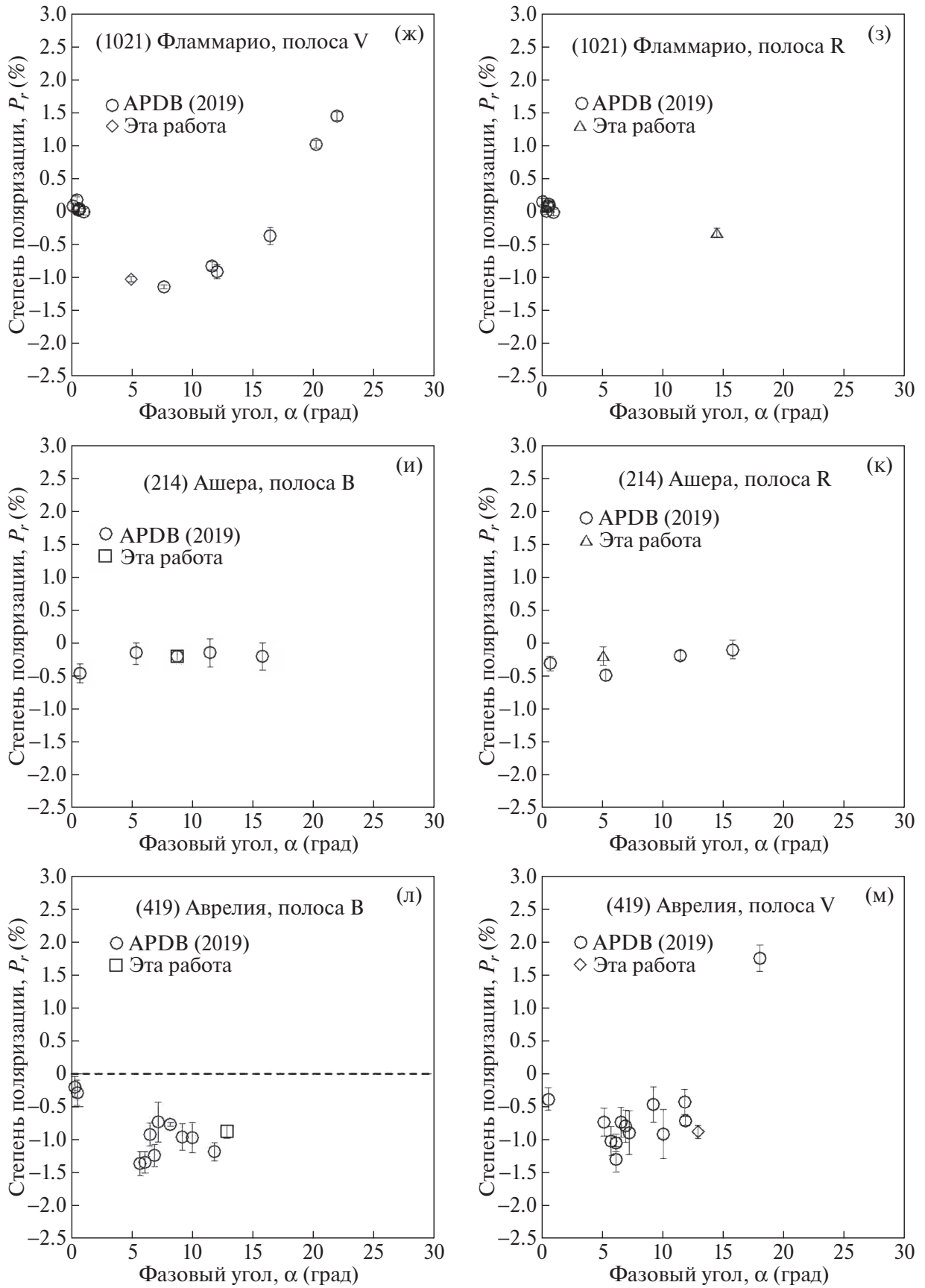


Рис. 1 (продолжение).

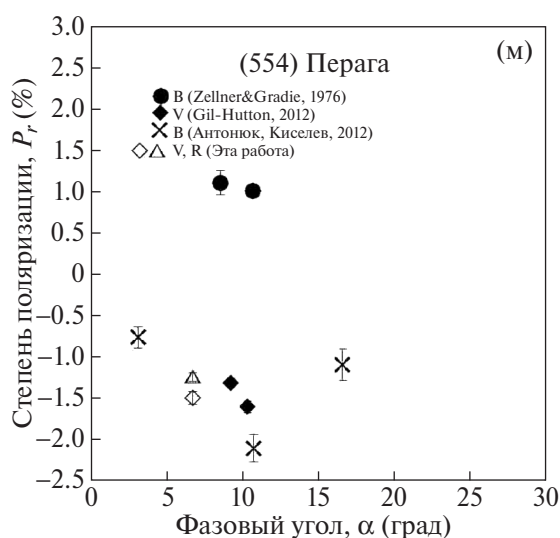


Рис. 1 (окончание).

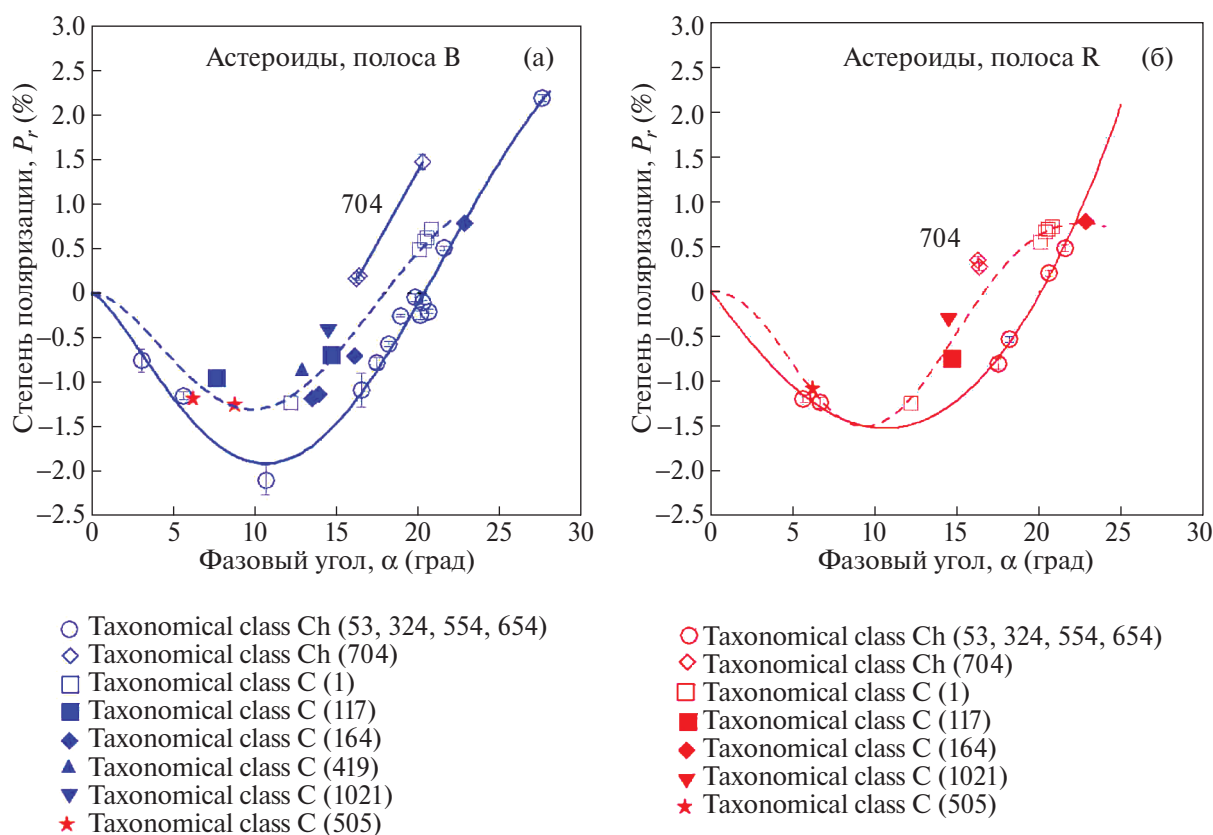


Рис. 2. Фазовые кривые поляризации исследуемых астероидов в полосах В и R для таксономических классов C, Ch и P согласно [20]. Числа на графиках соответствуют номерам астероидов.

от 0.31 мкм до 1.06 мкм, полученных в ходе восьмичетной фотометрии астероидов в 1980-х годах, и данных альбедо. В классификации Баса и Бинзела используются спектральные ПЗС данные более высокого разрешения, полученные по программе SMASSII, но не учитывается альбедо астероидов. Недавняя таксономия [20] основана на спектрофо-

тометрии в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах, а также альбедо астероидов. Принадлежность наблюдавшихся нами астероидов к классам трех спектральных классификаций приведена в табл. 1. Как видно, один и тот же астероид может относиться к разным спектральным классам, поскольку использованы различные критерии для

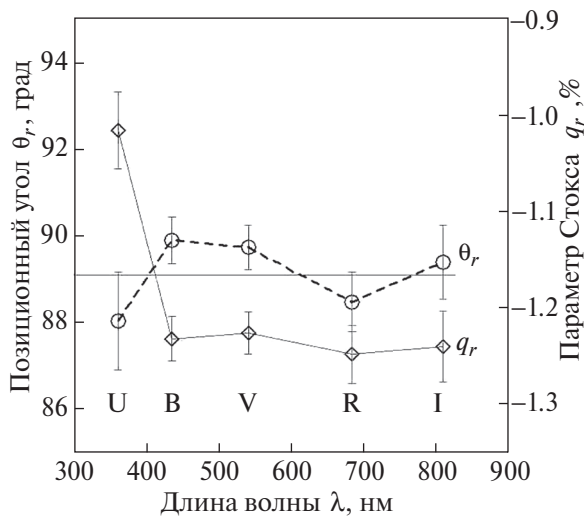


Рис. 3. Спектральная зависимость позиционного угла плоскости поляризации θ_r (кружки) и степени поляризации q_r (ромбы) астероида (1) Церера 24 февраля 2023 г. Прямая линия соответствует среднему значению угла $\theta_r = 89.1^\circ \pm 0.7^\circ$.

установления разных вариантов таксономии. Поэтому интересно проанализировать, имеется ли связь между спектральными классами и параметрами поляризации. На рис. 2а, б показаны значения степени поляризации P_r в полосах B и R астероидов таксономических классов C и Ch по классификации [20].

Из рис. 2 видно, что степень поляризации астероидов (53) Калипсо, (324) Бамберга, (554) Перага и (654) Зелинда, относящихся к таксономическому классу Ch (согласно [20], см. также табл. 1), можно аппроксимировать едиными фазовыми кривыми поляризации в синей и красной полосах. Вместе с тем кривая поляризации астероида (704) Интерамнии того же спектрального класса Ch заметно отличается от этих кривых. Степень поляризации астероидов (1) Цереры, (117) Ломии, (164) Евы, (419) Аврелии и (1021) Фламарио, относящихся к C -типу, систематически выше по сравнению с ФЗП астероидов Ch -типа и имеет большее рассеяние данных. Это, а также пример с астероидом (704) Интерамнией, указывает на необходимость привлекать к таксономии астероидов, кроме данных по спектрофотометрии и альбедо, данные по поляризации.

На рис. 3 представлена спектральная зависимость позиционного угла θ_r и степени поляризации q_r астероида (1) Церера, измеренные 24 февраля 2023 г.

Очевидно, что с точностью до 1σ случайных ошибок наблюдений спектральная зависимость позиционного угла плоскости поляризации θ_r плоская. Среднее значение угла $\theta_r = 89.1^\circ \pm 0.81^\circ$ также в пределах 1σ отличается от ортогонального значения, которое обычно наблюдается для безатмосферных

тел Солнечной системы при стандартных условиях наблюдений, когда падающий луч, нормаль к поверхности объекта и отраженный луч лежат в одной плоскости. Таким образом, наши измерения не подтвердили систематическое увеличение угла плоскости поляризации астероида (1) Цереры, отмеченное в работе [22].

Что касается возможности наличия у Цереры СПА, имеются многолетние наблюдательные данные [31], свидетельствующие о корреляции вариаций спектров отражения Цереры с солнечной активностью. Такой вариант активности может быть преобладающим у астероидов с малым эксцентриситетом орбиты и малым наклоном оси вращения (или спиновой оси) относительно нормали к плоскости орбиты. Как известно по уточненным данным космического аппарата Dawn (НАСА), у Цереры эти параметры составляют соответственно 0.0789125318 [32] и 4° [33].

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. С декабря 2022 г. по апрель 2023 г. на телескопе “Цейсс–2000” обсерватории Пик Терскол проведен $UBVR$ -поляриметрический мониторинг 12 астероидов, в основном примитивных типов Главного пояса, находившихся на расстояниях вблизи перигелия, с целью поиска изменений поляризации, вызванных возможной сублимационно-пылевой активностью.

2. Показано, что в период наблюдений значимые изменения степени поляризации выбранных астероидов отсутствовали.

3. В настоящее время астероид (554) Перага является единственным, у которого наблюдались значимые временные изменения степени поляризации.

4. Показано, что существующие в настоящее время спектральные классификации астероидов, основанные на спектрофотометрических данных и альбедо, демонстрируют значительный разброс при сопоставлении спектральных классов с фазовыми зависимостями поляризации астероидов. Поэтому для надежного выделения таксономических классов надо привлекать данные по поляризации астероидов.

5. Наши измерения не подтвердили систематическое увеличение угла плоскости поляризации астероида (1) Цереры, отмеченное в работе [22].

6. С целью повышения вероятности обнаружения признаков СПА у АГП примитивных типов в форме вариаций поляриметрических данных целесообразно уменьшить интервалы времени между последовательными измерениями и проводить не менее двух

последовательных измерений в используемых фотометрических полосах.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Авторы (В. В. Бусарев и М. П. Щербина) выражают благодарность Российскому научному фонду за финансовую поддержку работы (грант РНФ 22-12-00115).

Результаты получены на Уникальной научной установке “Цейсс-2000” Центра коллективного пользования “Терскольская обсерватория” Института астрономии РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. V.V. Busarev, S.I. Barabanov, V.S. Rusakov, V.B. Puzin, and V.V. Kravtsov, *Icarus* **262**, 44 (2015).
2. V.V. Busarev, A.B. Makalkin, F. Vilas, S.I. Barabanov, and M.P. Scherbina, *Icarus* **304**, 83 (2018).
3. V.V. Busarev, E.V. Petrova, M.P. Shcherbina, S.Y. Kuznetsov, M.A. Burlak, N.P. Ikonnikova, A.A. Savelova, and A.A. Belinskii, *Solar System Res.* **57**, 439 (2023).
4. V.V. Busarev, E.V. Petrova, T.R. Irmambetova, M.P. Shcherbina, and S.I. Barabanov, *Icarus* **369**, id. 114634 (2021).
5. E. Petrova and V. Busarev, *Solar System Res.* **57**(2), 161 (2023).
6. C.R. Chapman, D. Morrison, and B. Zellner, *Icarus* **25**, 104 (1975).
7. A. Dollfus, M. Wolff, J. Geake, D. Lupishko, and L. Dougherty, in *Asteroids II*. Proc. of the Conference, Tucson, AZ, Mar. 8–11, 1988 (A90-27001 10-91) (Tucson, AZ: University of Arizona Press, 1989), p. 594.
8. I. Belskaya, A. Cellino, R. Gil-Hutton, K. Muinonen, Y. Shkuratov, in *Asteroids IV*, edited by P. Michel, F.E. DeMeo, and W. F. Bottke (Tucson: University of Arizona Press, 2015), p.151.
9. E.V. Petrova. *Solar System Research* **58**, 196 (2024).
10. K. Serkowski, in *Planets, Stars, and Nebulae: Studied with Photopolarimetry*, Proc. of IAU Colloq. 23, held in Tucson, AZ, November, 1972; edited by T. Gehrels (Tucson, AZ: University of Arizona Press, 1974), p.135.
11. J.-C. Hsu and M. Breger, **262**, 732 (1982).
12. G. D. Schmidt, R. Elston, and O. L. Lupie, *Astron. J.* **104**(4), 1563 (1992).
13. N. Kiselev, V. Rosenbush, K. Muinonen, L. Kolokolova, A. Savushkin, and N. Karpov, *Planetary Sci. J.* **3**(6), id. 134 (2022).
14. G. Chernova, D. Lupishko, and V. Shevchenko, *Kinematika Fiz. Nebesn. Tel.* **10**(2), 45 (1994).
15. K. Lumme and K. Muinonen, Abstracts for the IAU Symp. 160 *Asteroids, Comets, Meteors 1993*, held June 14–18, 1993, in Belgirate, Italy (Houston: Lunar and Planetary Institute, 1993), p.194.
16. D. Lupishko, *NASA Planetary Data System*, p. 1 (2019), https://sbn.psi.edu/pds/resource/doi/apd_1.0.html.
17. D. Tholen, in *Asteroids II*. Proc. of the Conference, held in Tucson, AZ, Mar. 8–11, 1988 (A90-27001 10-91), edited by R. P. Binzel, T. Gehrels, and M. S. Matthews (Tucson, AZ: University of Arizona Press, 1989), p. 1139.
18. D.J. Tholen, *Asteroid taxonomy from cluster analysis of photometry*, PhD thesis, University of Arizona (1984), 150 p.
19. S.J. Bus and R.P. Binzel, *Icarus* **158**(1), 146 (2002).
20. M. Mahlke, B. Carry, and P.-A. Mattei, *Astron. and Astrophys.* **665**, id. A26 (2022).
21. M.F. A’Hearn and P.D. Feldman, *Icarus* **98**(1), 54 (1992).
22. Д. Лунишко, *Фотометрия и поляриметрия астероидов: результаты наблюдений и анализ данных*, Дисс. докт. физ.-мат. наук, Харьков, гос.университет (1998), 259 с.
23. B. Zellner and J. Gradie, *Astron. J.* **81**, 262 (1976).
24. A. Cellino, S. Bagnulo, R. Gil-Hutton, P. Tanga, M. Cañada-Assandri, and E. Tedesco, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **451**, 3473 (2015).
25. A. Penttilä, K. Lumme, E. Hadamcik, and A.-C. Levasseur-Regourd, *Astron. and Astrophys.* **432**, 1081 (2005).
26. R. Gil-Hutton, V. Mesa, A. Cellino, P. Bendjoya, L. Penaloza, and F. Lovos, *Astron. and Astrophys.* **482**, 309 (2008).
27. K. Antonyuk and N. Kiselev, *Solar System Res.* **46**, 54 (2012).
28. R. Gil-Hutton and M. Cañada-Assandri, *Astron. and Astrophys.* **539**, id. A115 (2012).
29. R. Gil-Hutton and E. Garca-Migani, *Astron. and Astrophys.* **607**, id. A103 (2017).
30. V. Busarev, S. Barabanov, and V. Puzin, *Solar System Res.* **50**, 281 (2016).
31. V. Busarev, L. Golubeva, E. Petrova, and D. Shestopalov, in *The Eleventh Moscow Solar System Symposium (11MS3)*, held in Moscow 5–9 October 2020 (Moscow: Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences Press, 2020), Book of Abstracts 11MS3-SB-09, p. 275.
32. J.P. Laboratory, *Small-Body Database Lookup Tool*, https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb_lookup.html#/?sstr=1
33. N. Schorghofer, E. Mazarico, T. Platz, F. Preusker, S.E. Schröder, C.A. Raymond, and C.T. Russell, *Geophys. Res. Letters* **43**, 6783 (2016).

POLARIMETRIC MONITORING OF PRIMITIVE ASTEROIDS NEAR PERIHELION IN ORDER TO DETECT THEIR SUBLIMATION-DUST ACTIVITY

V. V. Busarev^{a,b}, N. N. Kiselev^b, M. P. Shcherbina^{b,a}, N. V. Karpov^b, A. P. Gorshkov^b

^a*Lomonosov Moscow State University, Sternberg Astronomical Institute, Moscow, Russia*

^b*Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

UBVR polarimetric observations of 12 main-belt mostly primitive asteroids located near perihelion heliocentric distances were carried out from December 2022 to April 2023 with Zeiss-2000 telescope at the Terskol Peak observatory. The purpose of the monitoring program was to search for changes in the polarimetric parameters of the asteroids caused by possible sublimation-dust activity, as a result of which the formation of rarefied dust exospheres of asteroids is possible. The objects of the program were asteroids: (1) Ceres, (53) Kalypso, (117) Lomia, (164) Eva, (214) Ashera, (324) Bamberg, (419) Aurelia, (505) Cava, (554) Peraga, (654) Zelinda, (704) Interamnia, (1021) Flammario. Polarimetric observations of asteroids (117) Lomia, (164) Eva and (505) Cava were made for the first time, the remaining asteroids were observed earlier. Only for two asteroids (1) Ceres and (704) Interamnia, according to spectrophotometric observations, temporal spectrophotometric variability was noted earlier. Analysis of temporal changes in the degree of polarization of asteroids and comparison of the results of observations with the data available in the literature showed that the stability of the observed degree of polarization is comparable with measurement errors of $\sim(0.02-0.1)\%$ for asteroids of different brightness. Thus, during the observation period, no noticeable polarization signs of temporary sublimation-dust activity of the observed asteroids were detected. Additionally, it is shown that the currently existing variants of the spectral taxonomy of asteroids, based on spectrophotometric data and albedo, demonstrate a significant scattering of the selected classes when compared with their polarimetric phase dependencies. The asteroid (554) Peraga has been confirmed to have a negative degree of polarization at angles less than the inversion angle. Measurements of the polarization of the asteroid (1) Ceres in a wide range of wavelengths did not confirm the previously suspected change in the angle of the polarization plane with the wavelength.

Keywords: asteroids, UBVR polarimetry, sublimation-dust activity