

# Поляриметрический мониторинг астероидов примитивных типов вблизи перигелия с целью обнаружения их сублимационно-пылевой активности

В. В. Бусарев,<sup>1,2,\*</sup> Н. Н. Киселёв,<sup>2</sup> М. П. Щербина,<sup>2</sup> Н. В. Карпов,<sup>2</sup> А. П. Горшков<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*МГУ им. М. В. Ломоносова, Астрономический ин-т им. П. К. Штернберга (ГАИШ МГУ),*

*Университетский проспект 13, 119234 Москва*

<sup>2</sup>*Институт астрономии РАН, Пятницкая 48, 119017 Москва*

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 возможной 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) Интеграмния, (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) Интеграмния 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  $\sim (0.02 \div 0.1) \%$  у астероидов разного блеска. Таким образом, в период наблюдений не было обнаружено сколько-нибудь заметных поляризационных признаков временной сублимационно-пылевой активности наблюдавшихся астероидов. Дополнительно показано, что существующие в настоящее время варианты спектральной таксономии астероидов, основанные на спектрофотометрических данных и альбедо, демонстрируют значительное рас-

сеяние 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 волны.

Ключевые слова: астероиды, UBVR $\text{I}$ -поляриметрия, сублимационно-пылевая активность

## 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) [1–3]. 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 UBVR $\text{I}$ - фотометрия являются эффективными методами обнаружения феномена СПА у астероидов примитивных типов. В то же время для обнаружения и изучения данного феномена 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 (напр., [6, 7] и ссылки там же).

В нашей статье обсуждаются результаты UBVR-поляриметрических 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 поляриметрических характери-

---

\* Electronic address: busarev@sai.msu.ru

стик и параметров невелики [7, 8], что затрудняет их использование для обнаружения изменений, вызванных появлением СПА и связанной с ней ПЭ. Для изучения возможностей использования поляриметрических 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  $30^\circ$  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 поляриметрических 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

Поляриметрические 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-Кретъена-Куде обсерватории Пик Терскол (Северный Кавказ, Россия), оснащенного двухканальным апертурным поляриметром имени Н. М. Шаховского «POLSHAKH». Оптический тракт поляриметра включает модулятор, представляющий собой быстро вращающуюся ахроматическую волновую пластину ( $\sim 30$  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: UVV в синем канале и UVRI 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 В ( $\lambda 434/117$  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  $0^\circ - 22.5^\circ, 22.5^\circ - 45^\circ, \dots, 337.5^\circ - 360^\circ$  одновременно для двух ортогонально поляризованных лучей. Интенсивность света, прошедшего через идеальную полуволновую фазовую пластинку с оптической осью под углом  $\varphi$ , 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  $\sigma_{q_{obs}}$  и  $\sigma_{u_{obs}}$ .

Для определения инструментальной 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  $\sigma_{q_{ins}}$  и  $\sigma_{u_{ins}}$  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  $P = \sqrt{q^2 + u^2}$  и позиционный угол плоскости поляризации  $\theta = \frac{1}{2} \text{atan}(\frac{u}{q}) + \Delta PA$  в экваториальной системе координат, где  $\Delta PA$  - поправки к нуль-пунктам инструментальных позиционных углов. Для определения поправок  $\Delta PA$  проведены наблюдения звезд - стандартов с известной большой 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  $\pm 3$  градусов. 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  $\varphi$ , проходящей через Солнце, наблюдателя и объект изучения. Они связаны с величинами  $P$  и  $\theta$  посредством выражений  $\theta_r = \theta - (\varphi \pm 90^\circ)$ ,  $P_r \equiv q_r = P \cos(2\theta_r)$  и  $u_r = P \sin(2\theta_r)$ . Знак в скобках выбирается «+», если  $(\varphi \pm 90^\circ) \leq 180^\circ$ , и «-», если  $(\varphi \pm 90^\circ) \geq 180^\circ$  [14]. Обычно, если нет физических причин, то с точностью до ошибок измерений, положительная ветвь фазовой зависимости поляризации на фазовых углах  $\alpha \geq \alpha_{inv}$  характеризуется ортогональностью плоскости поляризации  $\theta$  по отношению к плоскости рассеяния  $\varphi$ , то есть  $\theta_r = 0^\circ$ ,  $q_r = P$  и  $u_r = 0$ . Угол  $\alpha_{inv}$  - является углом инверсии, то есть фазовым углом, на котором меняется знак степени поляризации. На фазовых углах  $0 \leq \alpha \leq \alpha_{inv}$ , наблюдается так называемая отрицательная ветвь фазовой кривой поляризации с параметрами: плоскость поляризации  $\theta$  параллельна плоскости рассеяния  $\varphi$ , 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  $b$ ,  $c1$ ,  $c2$ ,  $\alpha_{inv}$  - свободные параметры:

$$P(\alpha) = b \times \sin^{c1} \alpha \times \cos^{c2}(\alpha/2) \times (\alpha - \alpha_{inv}), \quad (2)$$

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ И ДИСКУССИЯ

В Таблице 1 представлены данные о наблюдаемых астероидах.

**Таблица 1.** Обстоятельства наблюдений избранных астероидов

Имя	Полосы	Пол. данные	Фазовые углы $\alpha$ , град	$m_v$ , зв.вел.	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) Фламарио	BVR	APDB	4.9-14.5	11.5-12.3	F	B	C

Она содержит: имя астероида, фотометрические полосы наших наблюдений, наличие/отсутствие данных в Астероидной Поляриметрической Базе Данных (APDB) [16], диапазон наблюдавшихся фазовых углов, эфемеридную звездную величину на момент наблюдений, спектральную классификацию согласно [17, 18] (колонка 1), [19] (колонка 2) и [20] (колонка 3).

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  $\text{H}_2\text{O}$  (возможно, в виде инея), которая в течение зимы аккумулируется, а летом сублимирует. Мож-

но предположить, что в результате возможно изменение поляриметрических свойств излучения астероида, особенно если временное образование несимметричной газовой оболочки сопровождается выносом пыли. Кроме того, у (1) Цереры заподозрено 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 градусов. Зельнер и Градье 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  $\alpha_{inv} < 8^\circ$ . Как отмечалось выше, обычно в диапазоне фазовых углов  $0 - \alpha_{inv}$  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 градусов для F- типа астероидов, а максимальный угол инверсии равен около 28 градусов для «Varbaga-like» астероидов S-типа [26]. Отметим, что пока абсолютный минимум угла инверсии безатмосферных тел Солнечной системы принадлежит спутнику Юпитера Европа ( $\alpha_{inv} \approx 6.1$  градуса, 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 градусов, в том числе и на близком фазовом угле 10.7 градуса, на котором проведены наблюдения Зельнера и Градье. Вопреки данным Зельнера и Градье, была установлена отрицательная степень поляризации  $P_r = -2.10 \pm 0.17\%$  астероида. 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  $160^\circ$  дает возможность наблюдать две разные поверхности астероида (северную и южную приполярные области) в эти два периода наблюдений. Позже [28, 29] измерили поляризацию (554) Пераги в полосе V на фазовых углах 9.2 и 10.3 градусов. 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 Таблице 2.

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

Г-М-Д	Полоса	$\alpha$ , град	$\varphi$ , град	$P \pm \sigma$ , %	$\theta \pm \sigma$ , град	$\theta_r$ , град	$P_r = q_r$ , %	$u_r$ , %
(1) Церера								
2023-01-20.060	B	20.82	287.91	$0.718 \pm 0.009$	$18.26 \pm 0.36$	0.36	0.718	0.009
2023-01-20.061	R	20.82	287.91	$0.725 \pm 0.031$	$18.45 \pm 1.23$	0.55	0.725	0.014
2023-01-22.010	B	20.54	287.33	$0.625 \pm 0.010$	$14.77 \pm 0.46$	177.44	0.623	-0.056
2023-01-22.010	R	20.54	287.33	$0.697 \pm 0.032$	$16.78 \pm 1.30$	179.45	0.696	-0.013



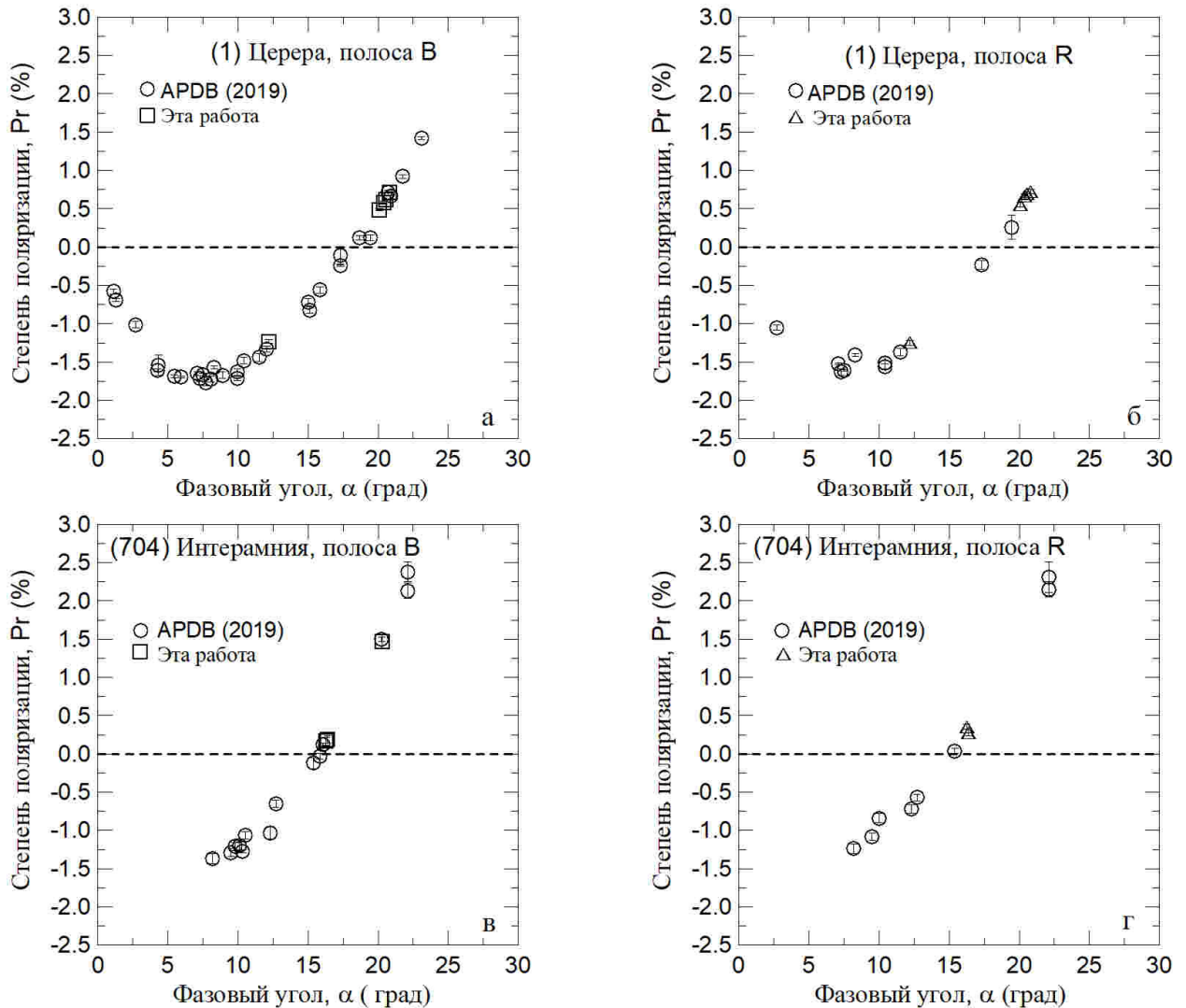
2023-01-23.012	B	20.38	287.02	$0.580 \pm 0.018$	$15.57 \pm 0.91$	178.55	0.579	-0.029
2023-01-23.004	R	20.38	287.02	$0.666 \pm 0.033$	$14.32 \pm 1.42$	177.30	0.663	-0.063
2023-01-24.995	B	20.06	286.38	$0.492 \pm 0.014$	$12.06 \pm 0.81$	175.68	0.486	-0.074
2023-01-25.005	R	20.06	286.38	$0.556 \pm 0.031$	$12.92 \pm 1.58$	176.55	0.552	-0.067
2023-02-25.003	U	12.20	267.37	$1.018 \pm 0.040$	$85.40 \pm 1.12$	88.03	-1.016	0.070
2023-02-24.985	B	12.20	267.38	$1.232 \pm 0.023$	$87.28 \pm 0.54$	89.90	-1.232	0.005
2023-02-24.985	V	12.20	267.39	$1.226 \pm 0.022$	$87.12 \pm 0.51$	89.73	-1.226	0.012
2023-02-24.985	R	12.20	267.39	$1.250 \pm 0.030$	$85.86 \pm 0.68$	88.47	-1.249	0.067
2023-02-24.999	I	12.20	267.37	$1.241 \pm 0.037$	$86.77 \pm 0.85$	89.39	-1.240	0.026
(53) Калипсо								
2022-12-24.076	B	20.14	291.08	$0.261 \pm 0.047$	$120.89 \pm 5.19$	99.81	-0.246	-0.088
2022-12-31.056	B	17.50	291.71	$0.794 \pm 0.059$	$108.54 \pm 2.14$	86.83	-0.789	0.088
2022-12-31.056	R	17.50	291.71	$0.820 \pm 0.059$	$106.01 \pm 2.05$	84.30	-0.804	0.162
2023-01-24.012	B	5.65	297.15	$1.159 \pm 0.043$	$115.67 \pm 1.07$	88.52	-1.157	0.060
2023-01-24.011	R	5.65	297.15	$1.194 \pm 0.041$	$116.09 \pm 0.99$	88.94	-1.194	0.044
(117) Ломия								
2022-12-23.772	B	7.69	153.35	$0.955 \pm 0.061$	$153.31 \pm 1.84$	89.96	-0.955	0.001
2023-01-24.790	B	14.70	101.18	$0.712 \pm 0.089$	$96.85 \pm 3.59$	85.67	-0.703	0.107
2023-01-24.790	R	14.70	101.18	$0.751 \pm 0.086$	$97.46 \pm 3.26$	86.29	-0.744	0.097
(164) Ева								
2022-12-23.662	B	13.49	75.84	$1.186 \pm 0.037$	$74.73 \pm 0.89$	88.89	-1.185	0.046
2022-12-24.691	B	13.95	76.31	$1.137 \pm 0.039$	$75.02 \pm 0.99$	88.71	-1.136	0.051
2022-12-25.740	V	14.42	76.74	$1.077 \pm 0.043$	$73.59 \pm 1.14$	86.85	-1.070	0.118
2022-12-29.781	B	16.10	78.01	$0.708 \pm 0.045$	$75.96 \pm 1.81$	87.95	-0.707	0.051
2023-01-22.785	B	22.83	80.09	$0.788 \pm 0.065$	$168.35 \pm 2.35$	178.26	0.786	-0.048
2023-01-22.786	R	22.83	80.09	$0.805 \pm 0.055$	$163.34 \pm 1.97$	173.25	0.783	-0.188
(214) Ашера								
2022-12-23.816	B	8.74	269.66	$0.260 \pm 0.079$	$70.74 \pm 8.69$	71.09	-0.205	0.160
2023-01-21.015	V	5.11	116.03	$0.272 \pm 0.153$	$172.62 \pm 16.16$	146.59	0.107	-0.250
2023-01-21.013	R	5.11	116.03	$0.478 \pm 0.138$	$83.22 \pm 8.30$	57.19	-0.197	0.435

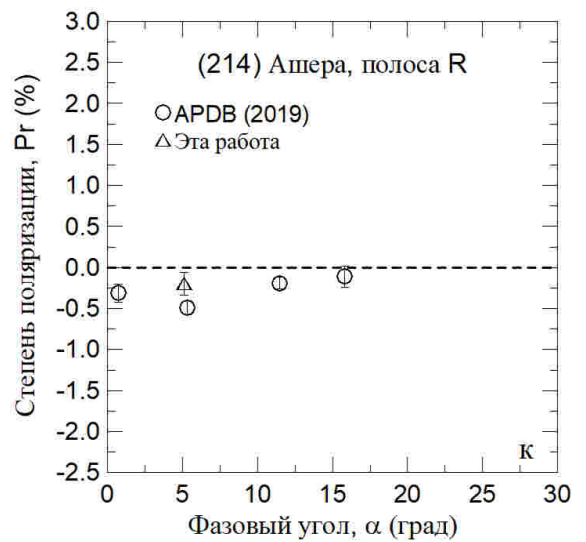
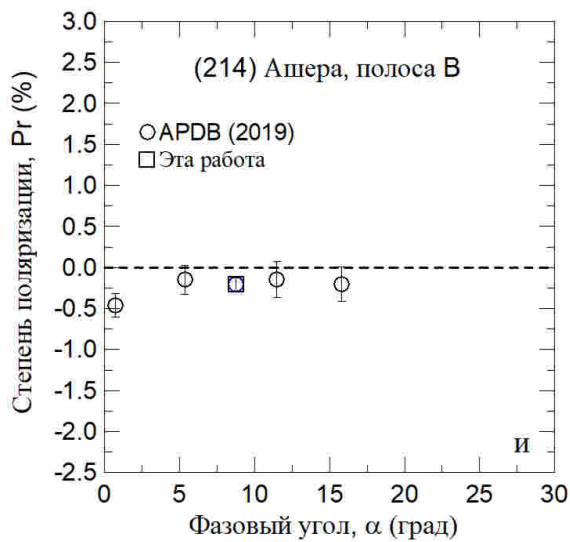
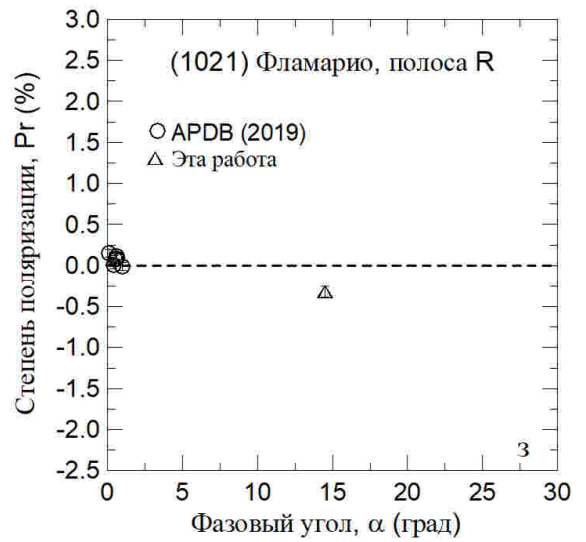
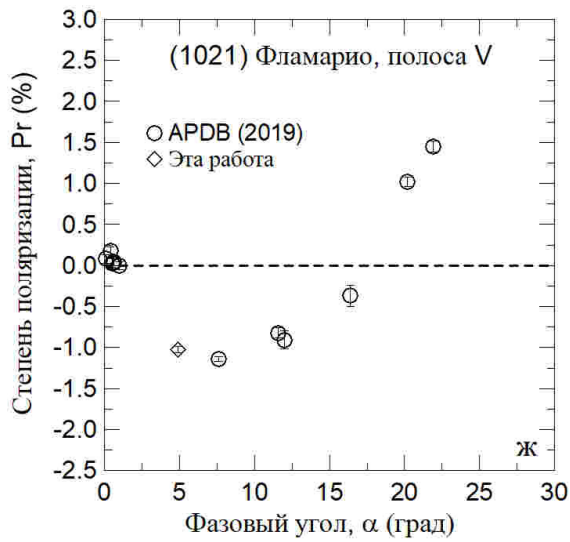
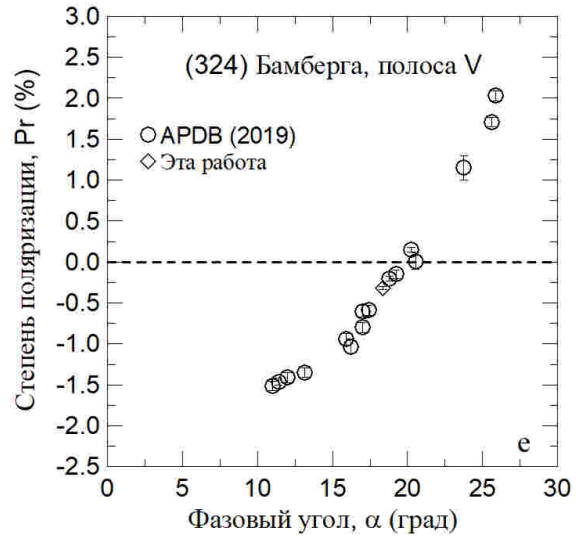
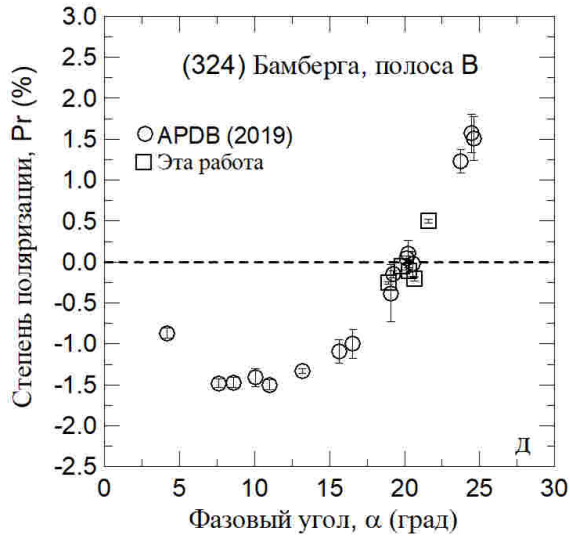
(324) Бамберга								
2022-12-22.792	V	18.36	97.09	$0.318 \pm 0.023$	$96.55 \pm 2.07$	89.46	-0.318	0.006
2022-12-24.743	B	18.93	95.30	$0.256 \pm 0.018$	$98.39 \pm 2.06$	93.08	-0.255	-0.028
2022-12-27.884	B	19.83	92.76	$0.068 \pm 0.040$	$73.53 \pm 17.00$	70.77	-0.053	0.042
2022-12-29.664	B	20.31	91.49	$0.104 \pm 0.019$	$92.46 \pm 5.28$	90.98	-0.104	-0.004
2022-12-30.973	B	20.65	90.61	$0.225 \pm 0.023$	$79.31 \pm 2.98$	78.69	-0.207	0.086
2022-12-30.814	R	20.61	90.72	$0.207 \pm 0.033$	$1.56 \pm 4.63$	0.84	0.207	0.006
2023-01-03.723	B	21.58	88.40	$0.501 \pm 0.023$	$179.39 \pm 1.29$	0.99	0.501	0.017
2023-01-03.765	R	21.58	88.40	$0.490 \pm 0.037$	$175.03 \pm 2.19$	176.63	0.487	-0.058
(419) Аврелия								
2022-12-23.719	B	12.88	72.65	$0.886 \pm 0.099$	$77.08 \pm 3.20$	94.43	-0.876	-0.136
2022-12-25.690	V	13.37	72.66	$0.763 \pm 0.110$	$77.46 \pm 4.12$	94.80	-0.753	-0.127
(505) Кава								
2022-12-29.821	B	8.79	266.07	$1.262 \pm 0.059$	$83.09 \pm 1.35$	87.02	-1.255	0.131
2023-01-22.945	B	6.20	132.10	$1.182 \pm 0.028$	$132.59 \pm 0.68$	90.50	-1.181	-0.020
2023-01-22.945	R	6.20	132.10	$1.088 \pm 0.031$	$129.92 \pm 0.81$	87.82	-1.085	0.083
(654) Зелинда								
2022-12-24.120	B	27.59	297.70	$2.187 \pm 0.041$	$26.77 \pm 0.53$	179.07	2.186	-0.071
2023-01-21.929	B	18.20	326.75	$0.575 \pm 0.027$	$146.15 \pm 1.33$	89.40	-0.575	0.012
2023-01-21.928	R	18.20	326.75	$0.530 \pm 0.035$	$147.07 \pm 1.91$	90.32	-0.530	-0.006
(704) Интерамния								
2022-12-22.724	B	20.27	61.66	$1.474 \pm 0.084$	$153.74 \pm 1.64$	2.08	1.470	0.107
2023-01-22.683	B	16.40	53.67	$0.194 \pm 0.050$	$150.98 \pm 7.46$	7.30	0.187	0.049
2023-01-22.682	R	16.40	53.67	$0.303 \pm 0.042$	$155.25 \pm 3.98$	11.58	0.278	0.119
2023-01-23.674	B	16.25	53.40	$0.173 \pm 0.049$	$151.69 \pm 8.17$	8.29	0.166	0.049
2023-01-23.671	R	16.25	53.40	$0.355 \pm 0.036$	$142.26 \pm 2.88$	178.86	0.355	-0.014
(1021) Фламарио								
2022-12-25.791	V	4.89	348.72	$1.022 \pm 0.037$	$168.26 \pm 1.04$	89.53	-1.022	0.017
2023-01-24.817	B	14.49	82.60	$0.441 \pm 0.088$	$76.02 \pm 5.73$	83.42	-0.430	0.101
2023-01-24.817	R	14.49	82.60	$0.329 \pm 0.070$	$89.60 \pm 6.11$	97.00	-0.319	-0.080

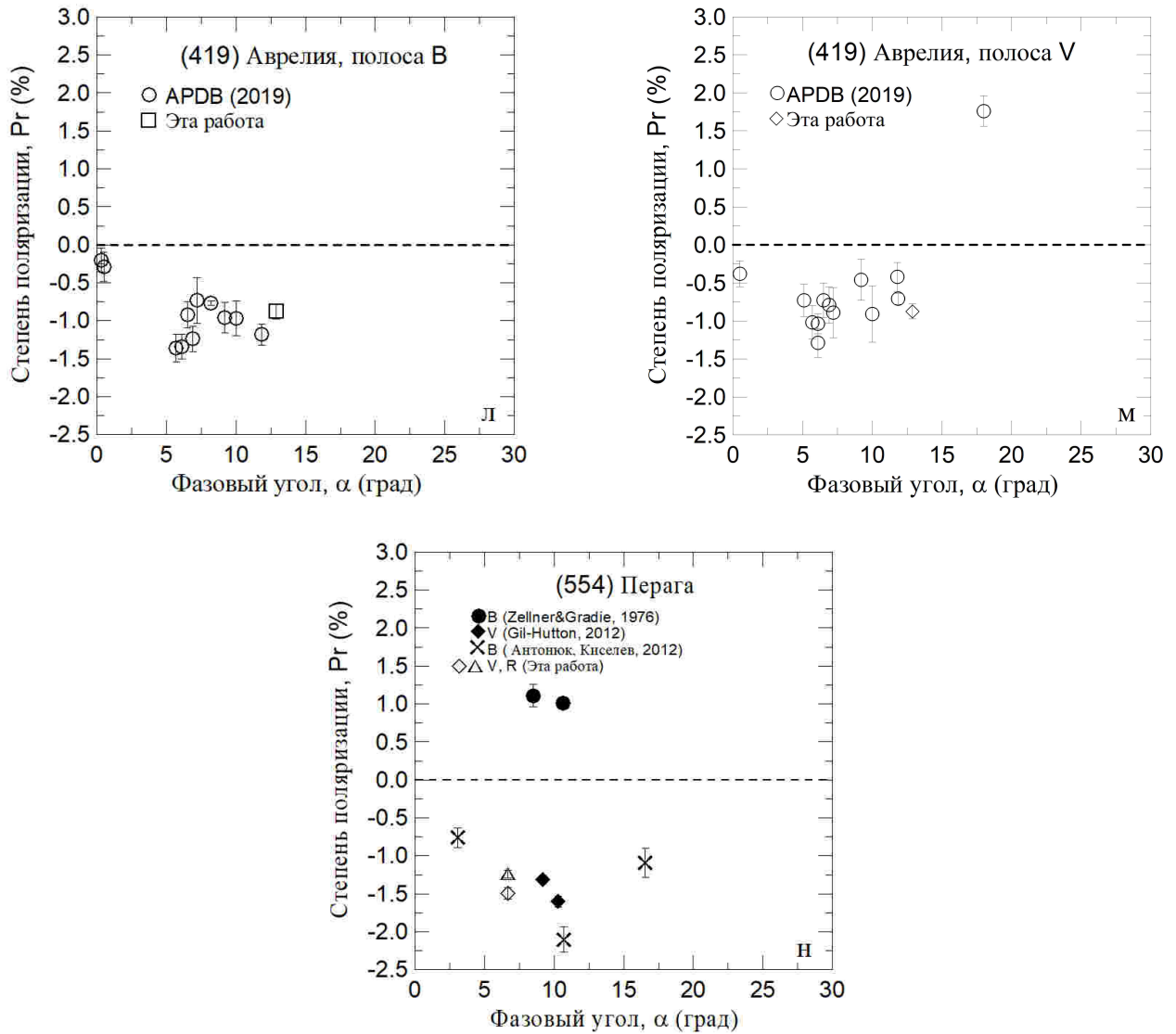
(554) Церера								
2023-04-25.996	V	6.66	298.18	$1.493 \pm 0.081$	$117.79 \pm 1.55$	89.61	-1.493	0.021
2023-04-25.996	R	6.66	298.18	$1.244 \pm 0.055$	$115.70 \pm 1.27$	87.52	-1.239	0.108

В ней представлены: среднее время наблюдений (Г-М-Д (UT)), фотометрическая полоса, фазовый угол ( $\alpha$ ), позиционный угол плоскости рассеяния ( $\varphi$ ), измеренные степень поляризации (P) и позиционный угол плоскости поляризации ( $\theta$ ) вместе с их среднеквадратическими ошибками ( $\sigma$ ), позиционный угол плоскости поляризации ( $\theta_r$ ) и параметры Стокса  $q_r$  и  $u_r$  по отношению к перпендикуляру к плоскости рассеяния.

На Рисунках 1 (а — г) показаны результаты наших измерений степени поляризации астероидов в полосах В, V и R вместе с данными разных авторов, взятых из каталога APDB [16].





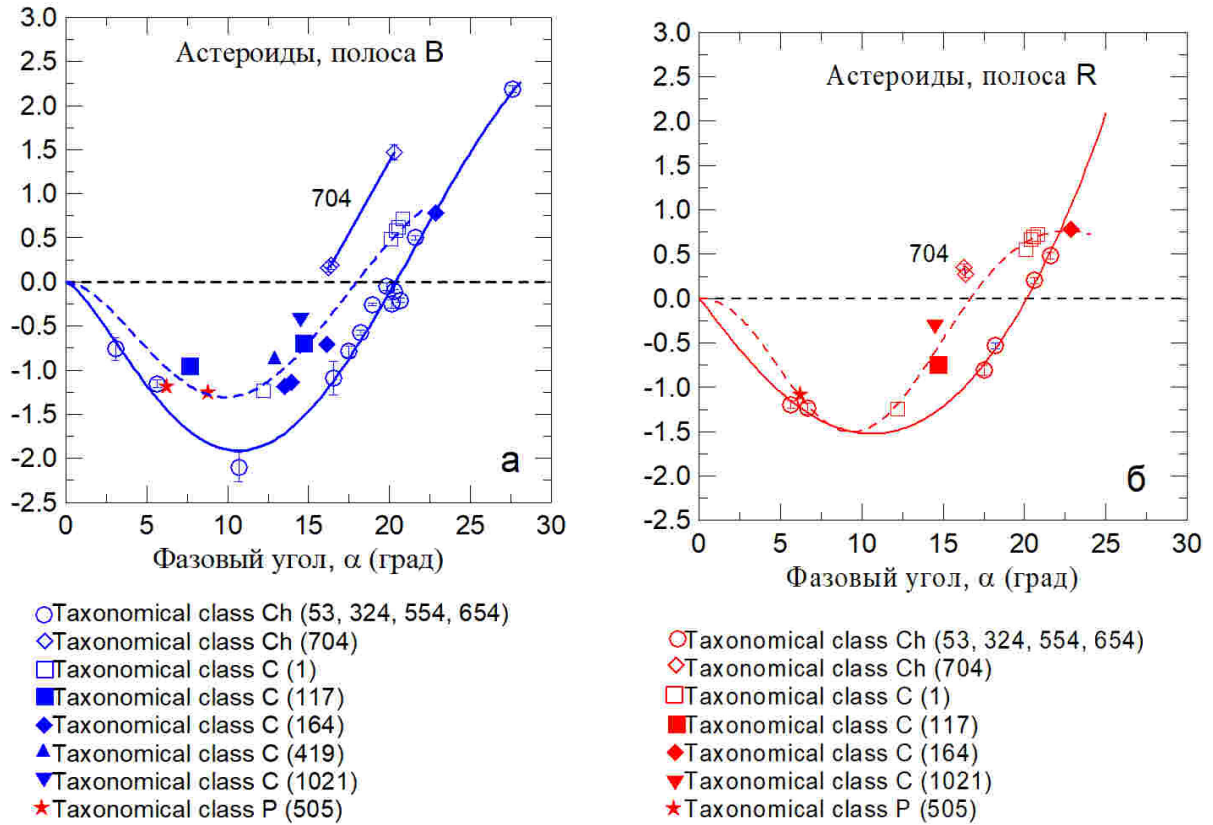


**Рис. 1(а-н).** Фазовые зависимости степени поляризации астероидов (1) Церера, (704) Интерамния, (324) Бамберга, (1021) Фламарио, (214) Ашера, (419), Аврелия, (554) Перага в полосах В (открытые квадраты), V (открытые ромбы) и R (открытые треугольники) вместе с данными разных авторов (открытые кружочки,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

Из Таблицы 2 и Рисунка 1 видно, что с точностью до ошибок измерений  $\sim (0.01 \div 0.1)\%$ , 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 спектрофо-

тометрическим наблюдениям. Во-первых, как уже отмечалось выше, поляриметрическое проявление СПА может быть слабее по сравнению с эффектами, выявленными по спектрофотометрии. 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  $H_2O$ .

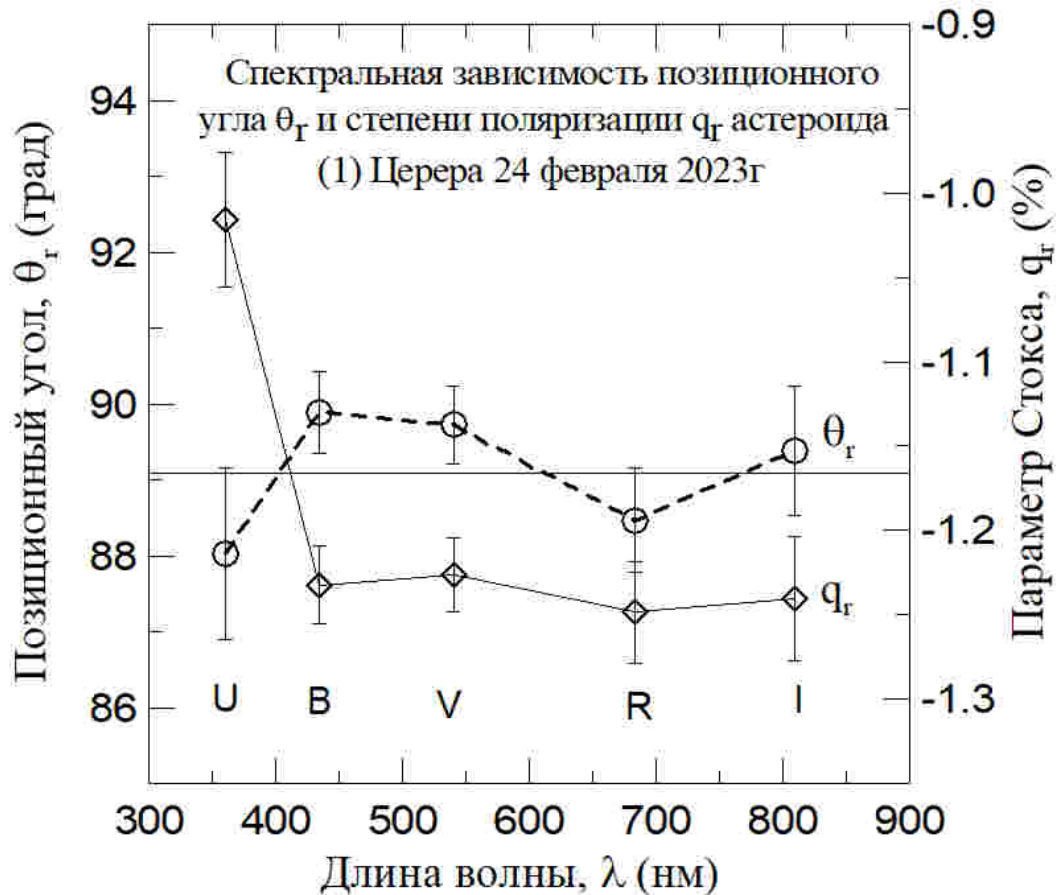
Так как в программу наблюдений были включены примитивные астероиды разных спектральных классов (см. Таблицу 1), то представляет интерес рассмотреть, как измеренная степень поляризации соответствует их спектральной классификации. В настоящее время существуют несколько вариантов спектральной классификации астероидов. Чаще всего используют классификацию Tholen [17, 18] и Bus & Binzel [19]. Классификация Tholen основана на широкополосных измерениях спектра в диапазоне от 0.31 мкм до 1.06 мкм, полученных в ходе восьмицветной фотометрии астероидов в 1980-х гг., и данных альбеда. В классификации Bus & Binzel используются спектральные ПЗС-данные более высокого разрешения, полученные по программе SMASSII, но не учитывается альbedo астероидов. Недавняя таксономия [20] основана на спектрофотометрии в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах, а также альбеда астероидов. Принадлежность наблюдавшихся нами астероидов к классам трех спектральных классификации приведена в Таблице 1. Как видно, один и тот же астероид может относиться к разным спектральным классам, поскольку использованы различные критерии для установления разных вариантов таксономии. В связи с этим интересно проанализировать, имеется ли связь между спектральными классами и параметрами поляризации. На Рисунках 2 (а, б) показаны значения степени поляризации  $P_r$  в полосах В и R астероидов таксономических классов С и Ch, по классификации [20].



**Рис. 2(а, б).** 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.

Из Рисунков 2 видно, что степень поляризации астероидов (53) Калипсо, (324) Бамберга, (554) Перага и (654) Зелинда, относящихся к таксономическому классу Ch (согласно [20], см. также Таблицу 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) Еввы, (419) Аврелии и (1021) Фламарио, относящиеся 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 Рисунке 3 представлена спектральная зависимость позиционного угла  $\theta_r$  и степени поляризации  $q_r$  астероида (1) Церера, измеренные 24 февраля 2023 г.



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

Очевидно, что с точностью до  $1\sigma$  случайных ошибок наблюдений спектральная зависимость позиционного угла плоскости поляризации  $\theta_r$  плоская. Среднее значение угла  $\theta_r = 89.1^\circ \pm 0.81^\circ$  также в пределах  $1\sigma$  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 враще-



ния (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  $4^\circ$  [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.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

---

1. \refitem{*article*}  
V. V. Busarev, S. I. Barabanov, V. S. Rusakov, V. B. Puzin, and V. V. Kravtsov, *Icarus* **262**, 44 (2015).
2. \refitem{*article*}  
V. V. Busarev, A. B. Makalkin, F. Vilas, S. I. Barabanov, and M. P. Scherbina, *Icarus* **304**, 83 (2018).
3. \refitem{*article*}  
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 Research* **57**, 439 (2023).
4. \refitem{*article*}  
V. V. Busarev, E. V. Petrova, T. R. Irmambetova, M. P. Shcherbina, and S. I. Barabanov, *Icarus* **369**, 114634 (2021).
5. \refitem{*article*}  
E. Petrova and V. Busarev, *Solar System Research* **57**, 161 (2023).
6. \refitem{*article*}  
C. R. Chapman, D. Morrison, and B. Zellner, *Icarus* **25**, 104 (1975).
7. \refitem{*incollection*}  
A. Dollfus, M. Wolff, J. Geake, D. Lupishko, and L. Dougherty, in *Asteroids II* (1989), pp. 594–616.
8. \refitem{*article*}  
I. Belskaya, A. Cellino, R. Gil-Hutton, K. Muinonen, Y. Shkuratov, *et al.*, *Asteroids IV* **151** (2015).
9. \refitem{*article*}  
Е. Петрова, *Астрономический вестник* **58** (2023), в печати.
10. \refitem{*inproceedings*}  
K. Serkowski and T. Gehrels, in *Proc. Of IAU Colloq* (1974), vol. 23, p. 135.
11. \refitem{*article*}

- J.-C. Hsu and M. Breger, *Astrophysical Journal*, Part 1, vol. 262, Nov. 15, 1982, p. 732-738. **262**, 732 (1982).
12. \refitem{*article*}
- G. D. Schmidt, R. Elston, and O. L. Lupie, *Astronomical Journal* (ISSN 0004-6256), vol. 104, no. 4, p. 1563-1567. **104**, 1563 (1992).
13. \refitem{*article*}
- N. Kiselev, V. Rosenbush, K. Muinonen, L. Kolokolova, A. Savushkin, and N. Karpov, *The Planetary Science Journal* **3**, 134 (2022).
14. \refitem{*article*}
- G. Chernova, D. Lupishko, and V. Shevchenko, *Kinematika i Fizika Nebesnykh Tel* **10**, 45 (1994).
15. \refitem{*article*}
- K. Lumme and K. Muinonen, p. 194 (1993).
16. \refitem{*article*}
- D. Lupishko, *NASA Planetary Data System* p. 1 (2019).
17. \refitem{*misc*}
- D. Tholen, *In asteroids ii, ed. rp binzel, t. gehrels, & ms matthews* (1989), p. 1139–1150.
18. \refitem{*misc*}
- D. J. Tholen, *Asteroid taxonomy from cluster analysis of photometry*, PhD thesis, University of Arizona (1984), 150 p.
19. \refitem{*article*}
- S. J. Bus and R. P. Binzel, *Icarus* **158**, 146 (2002).
20. \refitem{*article*}
- M. Mahlke, B. Carry, and P.-A. Mattei, *Astronomy & Astrophysics* **665**, A26 (2022).
21. \refitem{*article*}
- M. F. A'Hearn and P. D. Feldman, *Icarus* **98**, 54 (1992).
22. \refitem{*misc*}
- Д. Лупишко, *Фотометрия и поляриметрия астероидов: результаты наблюдений и анализ данных*, Дисс. докт. физ.-мат. наук (1998), 259 с.
23. \refitem{*article*}
- B. Zellner and J. Gradie, *The Astronomical Journal* **81**, 262 (1976).

24. \refitem{*article*}  
 A. Cellino, S. Bagnulo, R. Gil-Hutton, P. Tanga, M. Cañada-Assandri, and E. Tedesco, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **451**, 3473 (2015).
25. \refitem{*article*}  
 A. Penttilä, K. Lumme, E. Hadamcik, and A.-C. Levasseur-Regourd, *Astronomy & Astrophysics* **432**, 1081 (2005).
26. \refitem{*article*}  
 R. Gil-Hutton, V. Mesa, A. Cellino, P. Bendjoya, L. Penalzoza, and F. Lovos, *Astronomy & Astrophysics* **482**, 309 (2008).
27. \refitem{*article*}  
 K. Antonyuk and N. Kiselev, *Solar System Research* **46**, 54 (2012).
28. \refitem{*article*}  
 R. Gil-Hutton *et al.*, *Astronomy & Astrophysics* **539**, A115 (2012).
29. \refitem{*article*}  
 R. Gil-Hutton and E. García-Migani, *Astronomy & Astrophysics* **607**, A103 (2017).
30. \refitem{*article*}  
 V. Busarev, S. Barabanov, and V. Puzin, *Solar System Research* **50**, 281 (2016).
31. \refitem{*inproceedings*}  
 V. Busarev, L. Golubeva, E. Petrova, and D. Shestopalov, in *The Eleventh Moscow Solar System Symposium 11M-S3* (2020), pp. 275–278.
32. \refitem{*misc*}  
 J. P. Laboratory, *Small-Body Database Lookup Tool*, uRL: [https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb\\_lookup.html#/?sstr=1](https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb_lookup.html#/?sstr=1) [Дата обращения: 4 октября 2023 г.], URL [https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb\\_lookup.html#/?sstr=1](https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb_lookup.html#/?sstr=1).
33. \refitem{*article*}  
 N. Schorghofer, E. Mazarico, T. Platz, F. Preusker, S. E. Schröder, C. A. Raymond, and C. T. Russell, *Geophysical Research Letters* **43**, 6783 (2016).