

УДК 523.44

## Исследование поляризации излучения избранных высокоальбедных объектов вблизи оппозиции

*В.К. Розенбуш<sup>1</sup>, Н.Н. Киселев<sup>1,2</sup>, Н.М. Шаховской<sup>3</sup>, Ю.С. Ефимов<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> Главная астрономическая обсерватория НАН Украины, 03680, ул. Заболотного 27, Киев  
gosevera@mao.kiev.ua

<sup>2</sup> Институт астрономии Харьковского национального университета им. В.Н. Каразина, Харьков

<sup>3</sup> НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория”, 98409, Украина, Крым, Научный

Поступила в редакцию 1 марта 2006 г.

**Аннотация.** Представлены результаты поляриметрических наблюдений высокоальбедных астероидов E-типа 64 Ангелина и 44 Низа, среднеальбедного астероида S-типа 20 Массалия и спутника Сатурна Япета, проведенных в Крымской астрофизической обсерватории в 1994–2001 гг. Установлено, что фазовые зависимости поляризации высокоальбедных объектов (и, возможно, среднеальбедных) в области оппозиции имеют бимодальную форму и являются суперпозицией широкой регулярной отрицательной ветви поляризации и поляризационного оппозиционного эффекта (ПОЭ) в виде узкого локального минимума на очень малых фазовых углах, около 1°. Так как наблюдаемые объекты показывают сильно выраженные оппозиционные эффекты яркости, то регистрация ПОЭ дает доказательства того, что причиной оппозиционных эффектов у высокоальбедных объектов является когерентное усиление обратного рассеяния. Исследована спектральная зависимость параметров ПОЭ и регулярной фазовой зависимости поляризации для астероида 64 Ангелина. Обнаружена корреляция между спектральными зависимостями отражательной способности астероида и глубиной ПОЭ.

INVESTIGATION OF POLARIZATION OF SELECTED HIGH-ALBEDO OBJECTS NEAR OPPOSITION, *by V.K. Rosenbush, N.N. Kiselev, N.M. Shakhovskoy, Yu.S. Efimov.* Polarimetric observations of the E-type asteroids 64 Angelina and 44 Nysa, the S-type asteroid 20 Massalia, and Saturn's satellite Iapetus, which were carried out at the Crimean Astrophysical Observatory during 1994–2001, are presented. The double-minimum phase-angle dependence of polarization is observed for high-albedo asteroids, and possible for middle-albedo asteroid, and for the trailing hemisphere of Iapetus. There is a superposition of wide regular negative polarization branch and a narrow local minimum centered at a phase angle about 1°, namely the polarization opposition effect. Since the observed objects show strongly pronounced photometric opposition effects we conclude that a reliable detection of the polarization opposition effect provide an almost uncontroversial evidence that they are caused by the renowned effect of coherent backscattering. Therefore the theoretical prediction that the brightness opposition effect must be accompanied by the polarization opposition effect is completely confirmed, thus providing the evidences that the regolith grains have sizes comparable to or smaller than the wavelength. A correlation between a spectral trend of reflectance and minimum polarization of the polarization opposition effect is found.

**Ключевые слова:** линейная поляризация, астероиды, 64 Ангелина, 44 Низа, 20 Массалия, Япет

---

## 1 Введение

Различные по своей природе объекты Солнечной системы, такие как планеты, спутники планет, астероиды, транс-нептуновские объекты, планетные кольца, кометы, межпланетная пыль, показывают общие свойства вблизи оппозиции – нелинейное увеличение яркости (фотометрический оппозиционный эффект) и отрицательную поляризацию (Розенбуш и др., 2002). Сходство этих феноменологических явлений для тел различной природы свидетельствует о том, что механизмы возникновения фотометрического оппозиционного эффекта (ФОЭ) и отрицательной поляризации света имеют фундаментальную физическую основу. Как следует из существующих моделей, несколько основных физических механизмов ответственны за возникновение оппозиционных эффектов (Вайдин, Косифай, 2002; Вайдин и др., 2004). Среди них взаимное затенение частиц, когерентное усиление обратного рассеяния света, эффекты ближнего поля и однократное рассеяние света на отдельных частицах, имеющих сильное обратное рассеяние, а также их сочетание. Относительный вклад этих механизмов зависит как от физических свойств поверхностных слоев, в частности размера, состава, и структуры составляющих частиц, так и от геометрии рассеяния.

Теоретические исследования показали, что основной причиной очень сильного и узкого оппозиционного пика яркости (спайк-эффекта) высокоальбедных объектов является когерентное усиление обратного рассеяния на порошкообразных средах (Мищенко, 1993). Фундаментальным выводом этой теории было предсказание, что оппозиционный эффект яркости должен сопровождаться поляризационным оппозиционным эффектом (ПОЭ) в форме очень узкого асимметричного минимума отрицательной поляризации вблизи оппозиции. На то время (до середины 90-х годов) ПОЭ в виде сильно асимметричной ветви отрицательной поляризации был известен только для лабораторного образца MgO (Лио, 1929) и колец Сатурна (Дольфус, 1996). Розенбуш и др. (1997) обнаружили ПОЭ для трех галилеевых спутников Юпитера (Ио, Европы и Ганимеда). Однако детальное (форма и параметры ПОЭ) поведение поляризации этих объектов, равно как и других безатмосферных тел Солнечной системы, на предельно малых фазовых углах  $\alpha \lesssim 2^\circ$ , не было изучено, хотя для многих из этих объектов фотометрические оппозиционные эффекты уже были обнаружены.

В связи с этим, начиная с 1994 г. в КрАО проводится программа поляриметрических наблюдений избранных объектов, в первую очередь высокоальбедных, на малых фазовых углах. Поскольку имеются разные теоретические предсказания формы фазовой зависимости поляризации на предельно малых фазовых углах – от резко асимметричной ветви отрицательной поляризации до отдельного вторичного минимума поляризации (Мищенко, 1993; Розенбуш и др., 1997; Мищенко и др., 2000; Муйнонен и др., 2002), то основная цель наших исследований заключается как в поиске ПОЭ, так и в исследовании его точной формы и положения. Обнаружение ПОЭ в объектах, для которых наблюдается фотометрический оппозиционный эффект, явилось бы убедительным и практически окончательным аргументом, подтверждающим механизм когерентного усиления обратного рассеяния, как главную причину возникновения оппозиционных эффектов, по крайней мере для высокоальбедных тел.

## 2 Наблюдения и результаты

Среди выбранных для наблюдений высокоальбедных объектов были астероиды E-типа 64 Ангелина и 44 Низа и спутник Сатурна Япет. Поляриметрические наблюдения Ангелины и Япета проведены с UBVR-I-поляриметром, установленным на 1.25-м телескопе АЗТ-11. Астероид Низа наблюдался с помощью одноканального фотоэлектрического фотометра-поляриметра на 2.6-м телескопе им. ак. Г.А. Шайна (ЗТШ). Детальное описание приборов, методики наблюдений и их обработки даны в работах (Пиирола, 1988; Шаховской, Ефимов, 1972; Шаховской и др., 2001; Розенбуш и др., 2005). Для сравнения с высокоальбедными объектами, мы проводим детальный анализ данных для среднеальбедного астероида S-типа 20 Массалия, наблюдения которого также проведены авторами настоящей работы на телескопе АЗТ-11. Краткая информация о наблюдениях приведена в табл. 1. В ней последовательно указаны объект, период наблюдений, диапазон фазовых углов  $\Delta\alpha$ , на которых

проведены наблюдения, минимальный достижимый фазовый угол в данный период наблюдений  $\alpha_{opp}$ , звездная величина объекта и число ночей наблюдений  $n$ .

Таблица 1. Обстоятельства поляриметрических наблюдений

Объект	Период наблюдений	$\Delta\alpha$ , град	$\alpha_{opp}$ , град	зв. вел.	$n$
64 Ангелина	17.10–23.10.1995	0.7–2.6	0.75	11.1	5
64 Ангелина	03.09–16.10.1999	0.4–13.0	0.43	11.8	18
64 Ангелина	22.12.2000–01.04.2001	0.6–3.8	0.60	10.5	8
44 Низа	10–14.08.2005	1.7–0.4	0.40	10.6	4
20 Массалия	19–25.10.1998	3.3–0.1	0.10	9.0	5
Япет	11–29.10.1998	0.3–1.4	0.30	11.1	14
Япет	24–26.11.1998	3.5–3.7	3.48	11.1	2
Япет	13–23.12.1998	4.9–5.5	4.97	11.1	2
Япет	11–20.01.1999	6.1	6.06	11.1	2

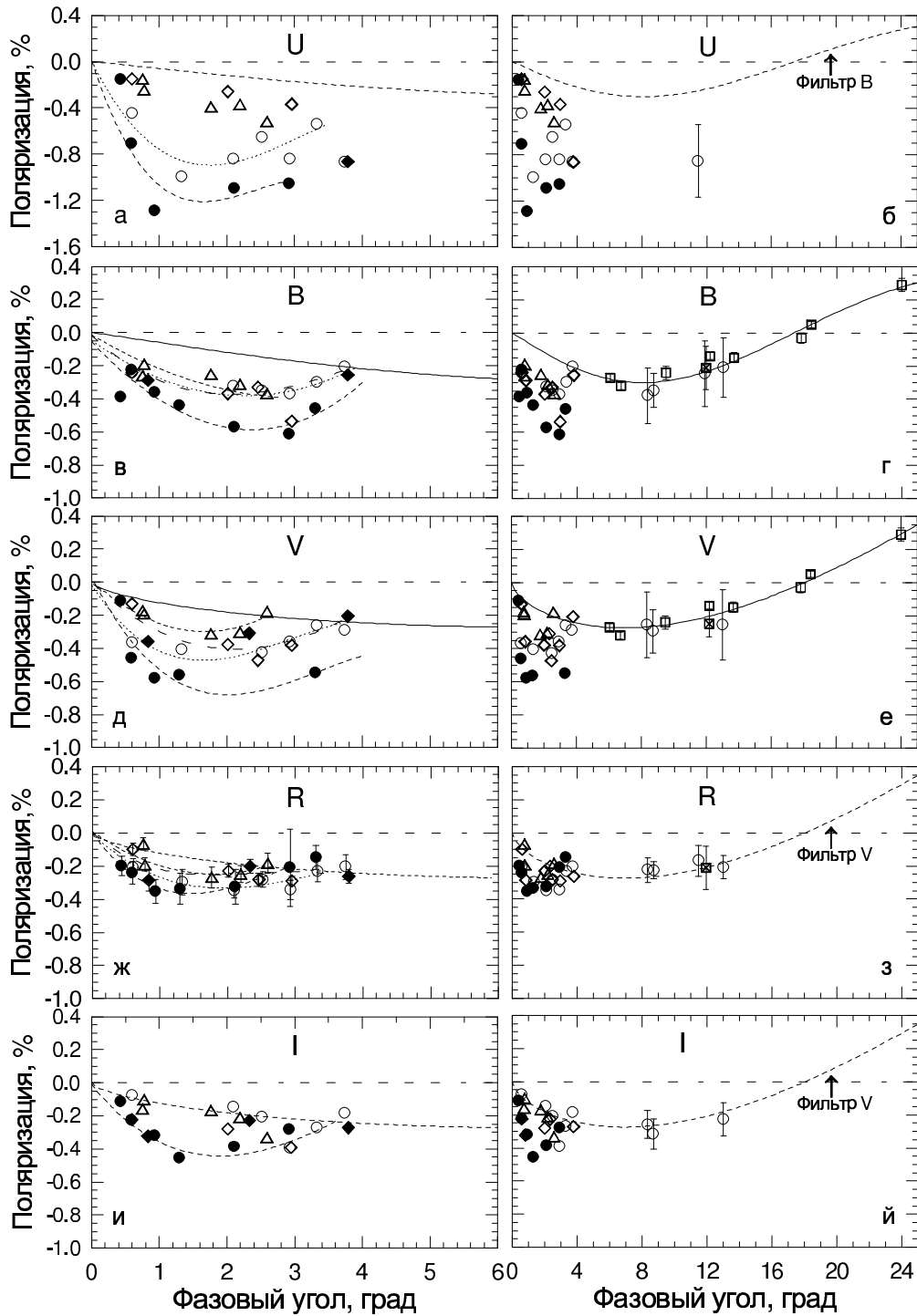
## 2.1 Астероид 64 Ангелина

Астероид 64 Ангелина относится к классу высокоальбедных астероидов (Толен, 1989). Геометрическое альbedo и эффективный размер составляют 0.48 и 60 км (Тедеско и др., 1989; Лушишко, Мохамед, 1996). Период осевого вращения астероида составляет  $8.751^h$ , показатель цвета  $B - V = 0.74^m$  (Поутанен, 1983). Харрис и др. (1989) обнаружили, что Ангелина и другой высокоальбедный астероид 44 Низа показывают сильное (с амплитудой около  $0.25^m$ ) и необычно узкое (полуширина на полумаксимуме пика яркости  $HWHM \approx 0.8^\circ$ ) увеличение блеска на малых фазовых углах, так называемый оппозиционный эффект яркости.

Поляриметрические наблюдения астероида 64 Ангелина проведены во время оппозиций 1994, 1995, 1999 и 2000/2001 гг. (Розенбуш и др., 2005). Наблюдения 1994 г. (Киселев и др., 1996) проведены на небольшом угловом расстоянии астероида от Луны. Несмотря на то, что принцип измерения, используемый в пятиканальном поляриметре, позволяет учитывать поляризацию фона, часть результатов этих наблюдений, вероятно, ошибочна из-за быстрого изменения фона неба. Поэтому наблюдения Ангелины в 1994 г. в настоящей работе не рассматриваются. Данные о последующих наблюдениях приведены в табл. 1.

Рисунок 1 представляет фазовые зависимости поляризации астероида в фильтрах UBVRi: справа – для всего диапазона фазовых углов, слева – более детально на малых фазовых углах. Типичные ошибки в определении степени поляризации в фильтре R лежат в пределах 0.03–0.07%. Данные измерений в фильтрах B и V аппроксимированы тригонометрическим выражением (Люмме, Муйнонен, 1993). Из-за отсутствия данных на фазовых углах  $8\text{--}14^\circ$  результаты измерений в остальных фильтрах сравнивались с модельными кривыми, полученными для ближайших фотометрических полос (пунктирные линии на рис. 1 справа). Данные на  $\alpha < 4^\circ$  были аппроксимированы полиномами второй и третьей степени (левая панель). Очевидно, что во всех полосах имеется вторичный узкий минимум поляризации (ПОЭ), центрированный на фазовый угол  $\alpha \approx 1.8^\circ$ , который накладывается на обычную ветвь отрицательной поляризации. Амплитуда ПОЭ, т. е. глубина узкого вторичного минимума отрицательной поляризации около оппозиции, слегка меняется от оппозиции к оппозиции и с длиной волны рассеянного света.

На рис. 2 (а,б) показаны зависимости параметров  $P_{min}$  (б) и  $\alpha_{min}$  (с) ПОЭ от длины волны. Очевидно, что изменения поляризации с длиной волны во всех трех появлениях показывают практически одинаковый тренд, а абсолютное значение амплитуды ПОЭ в целом уменьшается с увеличением длины волны. В то же время положение минимума ПОЭ  $\alpha_{min}$  имеет слабую



**Рис. 1.** Фазовые зависимости поляризации рассеянного излучения астероида 64 Ангелина в фильтрах UBVR (правая панель). Вариации поляризации на малых фазовых углах показаны детально на левой панели. Открытыми квадратами обозначены данные Зельнера и Градие (1976) в полосах В и V; открытыми треугольниками – данные, полученные в оппозицию 1995 г.; открытыми и заполненными кружками – данные, полученные до и после оппозиции 1999 г. соответственно; ромбами – данные для оппозиции 2000/2001 гг.

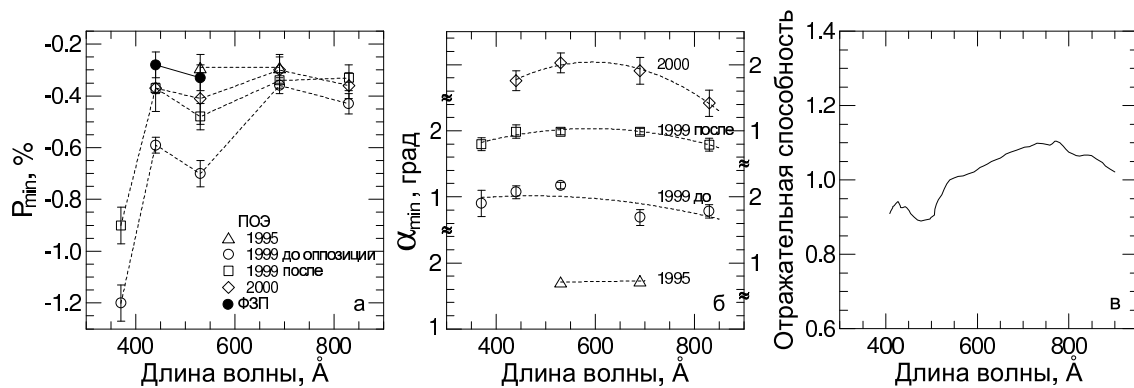


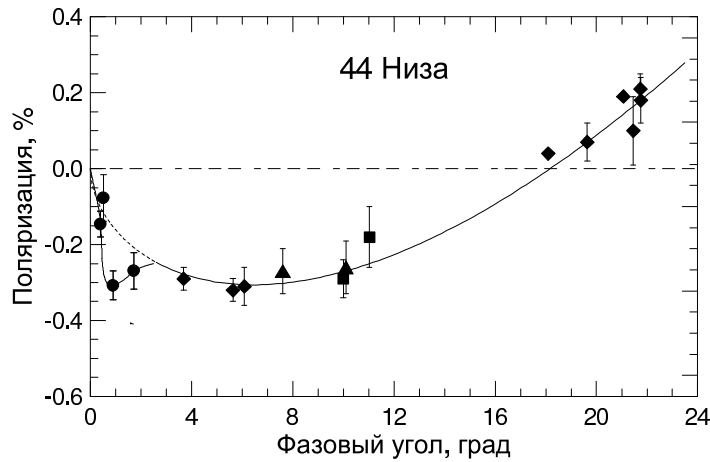
Рис. 2. Спектральные зависимости амплитуды поляризационного оппозиционного эффекта (а), его положения (б) и отражательной способности (в) астероида 64 Ангелина

немонотонную зависимость от длины волны. Рис. 2а показывает увеличение глубины ПОЭ в области около 500 нм, которое характерно для всех оппозиций. На рис. 2в представлена спектральная зависимость отражательной способности астероида 64 Ангелина по данным Форнасье и Лазарина (2001), которая показывает, что в видимой области спектра имеется сильная полоса поглощения. Очевидно, что имеется корреляция не только между полосой поглощения и увеличением поляризации  $|P_{min}|$  около 500 нм, но также и между спектральными зависимостями отражательной способности астероида и глубиной ПОЭ. Имеющиеся аналогичные зависимости  $P_{min}(\lambda)$  для регулярной ветви поляризации для разных типов астероидов не показывают такой однозначной и сильной корреляции. Такое впечатление, что спектральный ход альбеда астероидов других типов не оказывает заметного влияния на зависимость  $P_{min}(\lambda)$  для регулярной ветви поляризации. Обнаруженное различие глубины когерентного минимума в полосе поглощения и в непрерывном спектре может говорить о том, что механизм когерентного рассеяния более чувствительный к веществу рассеивающего слоя, чем механизм, который продуцирует обычную ветвь. В рамках волнового механизма, т. е. когерентного рассеяния света, положение ПОЭ должно зависеть от длины волны, однако, линейным образом (Мищенко, 1993). Рис. 2б показывает, что зависимость  $\alpha_{min}(\lambda)$  является нелинейной функцией.

## 2.2 Астероид 44 Низа

Астероид 44 Низа является вторым доступным по яркости высокоальбедным астероидом, для которого Харрис и др. (1989) обнаружили фотометрический оппозиционный эффект в виде резкого всплеска яркости около оппозиции, так называемый спайк-эффект. Диаметр астероида 70.6 км, а альбеда составляет 0.55 (Тедеско и др., 2002). Поляриметрические наблюдения этого астероида на фазовых углах меньше  $3.6^\circ$  не проводились.

Измерения поляризации излучения астероида 44 Низа проведены 10–14 августа 2005 г. на 2.6-м телескопе ЗТШ. Геометрические условия наблюдений даны в табл. 1. Минимальный достижимый угол около оппозиции был  $0.4^\circ$ . Наблюдения проведены с фильтром V. На рис. 3 показана фазовая зависимость поляризации для астероида 44 Низа. Чтобы построить эту зависимость мы привлекли результаты наблюдений Зельнера и Градье (1976) и Киселева (Лушишко, Васильев, 1997) в фильтре V. Рисунок показывает, что для астероида 44 Низа также наблюдается поляризационный оппозиционный эффект, наложенный на регулярную фазовую зависимость поляризации. Вторичный минимум поляризации имеет следующие параметры:  $\alpha_{min} < 0.85^\circ$ ,  $P_{min} = -0.31 \pm 0.04\%$ .



**Рис. 3.** Фазовая зависимость поляризации рассеянного излучения астероида 44 Ниса, состоящая из регулярной ветви поляризации и поляризационного оппозиционного эффекта на малых фазовых углах. Данные Зельнера и Градие (1976) обозначены ромбами, Киселева (Лушишко, Васильев, 1997) – квадратами и треугольниками. Данные, полученные в настоящей работе – кружками

### 2.3 Астероид 20 Массалия

Основные характеристики астероида 20 Массалия следующие: диаметр равен 145 км, альбедо 0.21, а период вращения  $8.099^h$  (Тедеско и др., 1992). Массалия была первым астероидом, для которого Герельс обнаружил значительное (до  $0.4^m$ ) оппозиционное увеличение яркости. Фазовая зависимость поляризации излучения астероида была получена Зельнером и Градие (1976), однако минимальный фазовый угол составлял  $6.2^\circ$ .

Поляриметрические наблюдения астероида 20 Массалия проводились на телескопе АЗТ-11 в пяти спектральных полосах UBVR с 19 по 25 октября 1998 г. в рамках программы, инициированной Бельской И.Н. Минимальный фазовый угол, на котором была измерена поляризация, составлял  $\sim 0.1^\circ$ . Характеристики наблюдений приведены в табл. 1. Основные результаты поляриметрии астероида Массалия опубликованы в статье (Бельская и др., 2003). Авторы пришли к выводу, что резкий пик отрицательной поляризации на малых фазовых углах отсутствует у этого астероида, а фазовая зависимость поляризации имеет асимметричную форму.

Учитывая то, что астероид Массалия имеет значительный оппозиционный эффект яркости, обусловленный, по-видимому, когерентным усилением обратного рассеяния, мы детально проанализировали поведение поляризации астероида на малых фазовых углах в разных спектральных полосах с целью поиска ПОЭ. На рис. 4 показана фазовая зависимость поляризации астероида Массалия. Сплошной и штрих-пунктирной линией показаны аппроксимационные кривые данных, полученных в V и B полосах соответственно. Как показывает рис. 4, на фазовом угле  $\alpha_{opp} \approx 0.6^\circ$  в фильтрах V, R и I имеются значительные отклонения степени поляризации от регулярной ветви отрицательной поляризации, на величины  $\sim 0.17\%$ ,  $\sim 0.14\%$  и  $\sim 0.3\%$  соответственно. В то же время в фильтре B практически нет отклонения от регулярной ветви поляризации. Для иллюстрации обнаруженных отклонений на рис. 4 данные на малых фазовых углах формально аппроксимированы квадратичным полиномом. Ошибки измерений степени поляризации в полосах B, V, R и I находятся в пределах 0.03–0.04%. Поэтому отклонения, превышающие  $3\sigma$  в трех полосах одновременно, могут свидетельствовать о реальности существования ПОЭ для Массалии. Так как нам неизвестна спектральная зависимость поляризации излучения этого астероида на очень малых фазовых углах, то мы можем только предполагать, хотя и с достаточно большой вероятностью, что ПОЭ действительно существует и для среднеальбедного астероида 20 Массалия.

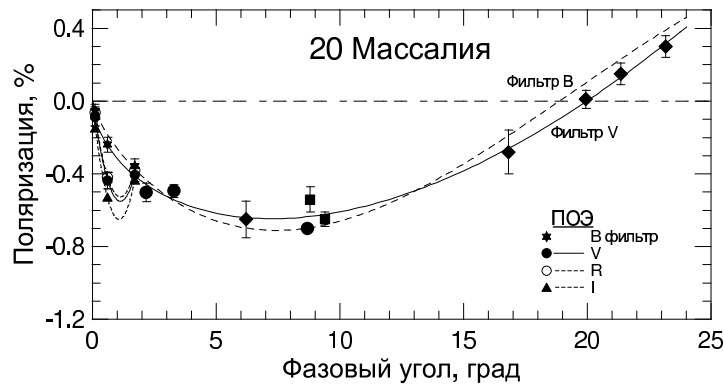


Рис. 4. Фазовая зависимость поляризации рассеянного излучения астероида S-типа 20 Массалия в фильтре V. Аппроксимации данных в фильтрах В и V обозначены штрих-пунктирной и сплошной линиями. Обозначения данных те же, что и на рис. 3

#### 2.4 Спутник Сатурна Япет

В 1998–1999 гг. по программе поиска ПОЭ проведены наблюдения спутника Сатурна Япета. Интерес к этому уникальному спутнику вызван тем, что его ведущее полушарие имеет геометрическое альbedo  $p_v = 0.02–0.05$ , в то время как альbedo ведомого полушария на порядок выше,  $p_v = 0.5–0.6$ , что свойственно для ледяных спутников. Япет имеет самую большую амплитуду кривой блеска  $\sim 2^m$ . КА “Вояджер” обнаружил, что светлая поверхность Япета сильно кратерирована, по плотности кратеров сравнима с Меркурием, Каллисто, Реей и лунными материками. Ведущее полушарие настолько темное, что Вояджер не смог зарегистрировать какие-либо топографические детали. КА Cassini, находящийся в настоящее время в системе Сатурна, 1 января 2005 г. прошел мимо Япета на расстоянии 123 400 км и сфотографировал темное полушарие спутника, которое также испещрено кратерами. Анализ снимков Япета привел к выводу, что поверхностный материал очень мелкозернистый и рыхлый. Наземная фотометрия показывает, что темный материал очень красный. Однако до сих пор природа и относительный возраст вещества на Япете остаются неизвестными.

Как нам представляется, именно такой спутник как Япет является наиболее подходящим объектом для изучения поведения поляризации около оппозиции, так как можно сравнить фазовые зависимости поляризации излучения темного и светлого материала, покрывающего два полушария одного и того же спутника. UVRI-поляриметрические наблюдения Япета проводились нами в КраО на 1.25-м телескопе с октября 1998 г. по январь 1999 г. и Клаусом Йокерсом на 2-м телескопе в В и R фильтрах на пику Терскол в ноябре 1998 г. (Розенбуш и др., 2000). Диапазон фазовых углов был  $0.3–6.1^\circ$ . Условия наблюдений спутника представлены в табл. 1.

Фазовая зависимость поляризации ведущего темного и ведомого светлого полушарий Япета показаны на рис. 5. Несмотря на ограниченное количество данных и их разброс, обусловленный долготными вариациями поляризации, обращает на себя внимание значительное различие фазовых кривых для двух полушарий. Оказалось, что фазовая зависимость поляризации для темной стороны сильно асимметрична с  $P_{min} = -1.1\%$  на  $\alpha_{min} \approx 3.5^\circ$ , а ПОЭ в форме вторичного минимума поляризации отсутствует. Светлая сторона Япета показывает высокую степень поляризации, до  $-0.8\%$  на фазовом угле  $\alpha = 1^\circ$ . На  $\alpha \approx 5^\circ$  величины поляризации для двух полушарий значительно различаются, составляя в среднем  $-0.9\%$  для ведомой и  $-0.25\%$  для ведущей стороны. Если предположить, что для ведомого полушария имеет место сильно асимметричная фазовая зависимость поляризации, то она должна иметь угол инверсии около  $7^\circ$ . Это необычно малая величина, не наблюдаемая ранее ни для одного известного безатмосферного космического тела. На наш взгляд более вероятно, что поляризация  $P \approx -0.25\%$  на  $\alpha \approx 5^\circ$  соответствует регулярной ветви

отрицательной поляризации, что характерно и для других высокоальбедных тел, например для спутников Европа или Ганимед. Поэтому для ведомой стороны Япета с большой долей вероятности имеет место поляризационный оппозиционный эффект на фазовом угле  $\sim 1^\circ$ .

### 3 Заключение

UBVRI-поляриметрические наблюдения астероидов E-типа 44 Низа и 64 Ангелина, и ведомого полушария спутника Япет показывают общее свойство для этих объектов: отрицательная ветвь поляризации имеет два минимума. По-видимому, такое же свойство присуще и для среднеальбедного астероида 20 Массалия. Широкий минимум поляризации относится к регулярной (обычной) фазовой кривой поляризации и по наблюдениям в фильтре V находится на фазовых углах  $5.8^\circ$  для Низы,  $6.9^\circ$  для Ангелины и  $7.3^\circ$  для Массалии. Регулярная отрицательная ветвь поляризации является характерной особенностью безатмосферных космических тел. Однако ее происхождение до сих пор остается неясным.

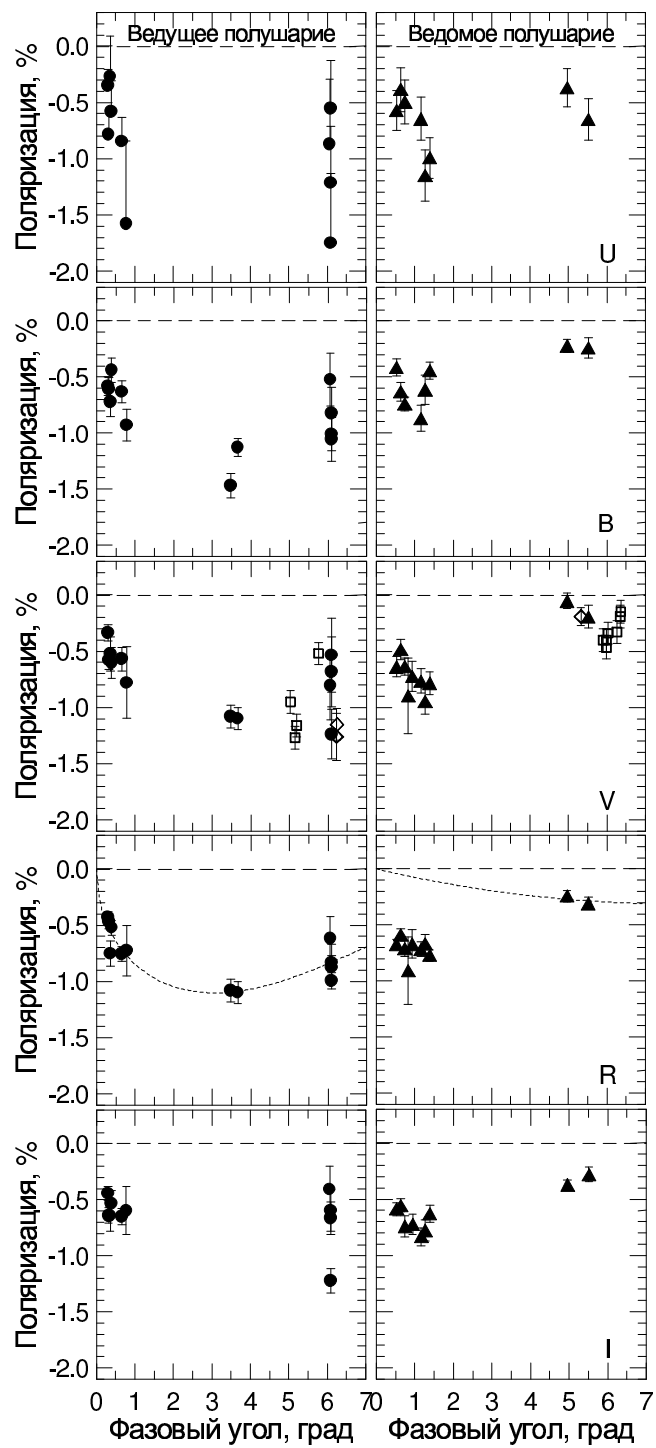
Второй очень узкий локальный минимум поляризации (поляризационный оппозиционный эффект) находится непосредственно около оппозиции. Отметим, что ПОЭ не является частью асимметричной ветви отрицательной поляризации, это отдельный пик, обусловленный когерентным усилением обратного рассеяния света, который накладывается на регулярную ветвь. Положение вторичных минимумов поляризации для Низы, Массалии и светлой стороны Япета характеризуется очень малыми фазовыми углами, меньшими  $1^\circ$ . В то же время для Ангелины он значительно выше,  $\alpha_{opp} \approx 1.8^\circ$ . Амплитуда вторичного минимума поляризации излучения астероидов составляет  $\sim 0.3\%$ , тогда как для Япета – около  $0.8\%$  (в фильтре V). Глубина и положение ПОЭ для Ангелины слегка различаются как до и после оппозиции, так и в разных появлениях. Обнаруженные различия поляризации именно на малых фазовых углах, скорее всего, говорят в пользу различия физических свойств поверхностных слоев, а именно шероховатости и пористости поверхности и геометрических и оптических свойств отдельных частиц.

Параметры поляризационного оппозиционного эффекта  $P_{min}$  и  $\alpha_{min}$  зависят от длины волны. Глубина оппозиционного минимума для Ангелины и Япета увеличивается в диапазоне длин волн от 360 до 700 нм, а затем постепенно уменьшается. В случае Ангелины это соответствует спектральной зависимости отражательной способности астероида. Наблюдается сильная корреляция между  $P_{min}$  ПОЭ и полосой поглощения около 500 нм в спектре Ангелины.

Для всех трех исследуемых астероидов имеются отклонения плоскости поляризации от нормали к плоскости рассеяния от  $90^\circ$ . Для Ангелины это отклонение в среднем составляет  $\theta_r = 85.1 \pm 1.9^\circ$  в фильтре R, а для Низы  $\theta_r = 85.9 \pm 0.6^\circ$  (V-фильтр). Такие же отклонения плоскости поляризации обнаружены и для Массалии. Это говорит о том, что имеется некоторая компонента поляризации, не связанная с плоскостью рассеяния.

Одновременное присутствие оппозиционного всплеска яркости (ФОЭ), который обнаружен для всех исследуемых объектов, и поляризационного оппозиционного эффекта находится в согласии с теоретическим предсказанием, согласно которому оба оппозиционных эффекта порождаются одним и тем же механизмом – когерентным усилением обратного рассеяния (Мищенко и др., 2006). Форма и положение наблюдаемых минимумов поляризации обратного рассеяния похожа на форму ПОЭ, обусловленного когерентным обратным рассеянием от полубесконечной среды непоглощающих релеевских рассеивателей (Мищенко и др., 2000). Однако существуют различия между наблюдаемыми и теоретическими характеристиками ФОЭ и ПОЭ. Это не удивительно, так как реальные частицы реголита не являются релеевскими рассеивателями, и их размеры и показатели преломления, как ожидается, не могут быть одинаковыми для всех БКТ. Кроме того, доля видимой поверхности, обуславливающей когерентное усиление обратного рассеяния, может также варьировать для данного объекта, изменяя результирующую поляризацию. Таким образом можно заключить, что непоглощающие (или слабопоглощающие) субмикронные частички, ответственные за обратное когерентное рассеяние, частично покрывают поверхности исследуемых объектов. Так как поляриметрические наблюдения покрывали разные части поверхностей, то, по-видимому, ПОЭ





**Рис. 5.** Фазовые зависимости поляризации излучения ведущего (слева) и ведомого (справа) полушарий Япета в фильтрах UVRI. В фильтре R штрих-пунктирной линией показана регулярная ветвь поляризации. Открытыми квадратами и ромбами обозначены данные Зельнера и Градие (1974) в полосе V

является глобальным свойством, характерным для всей поверхности. Форма и положение ПОЭ несколько различаются от объекта к объекту, и даже для одного объекта в разных появлениях. Так как поверхности высокоальбедных астероидов, также как и спутников, могут быть покрыты частицами с разными характеристиками и иметь разные размеры поверхностных неровностей и/или пятен светлых и темных частиц, то не исключено действие и других механизмов рассеяния света, играющих важную роль в возникновении отрицательной поляризации излучения безатмосферных космических тел.

**Благодарности.** Авторы благодарны руководству Крымской астрофизической обсерватории за поддержку наблюдательной программы исследования оппозиционных эффектов.

## Литература

- Бельская и др. (Belskaya I.N., Shevchenko V.G., Kiselev N.N., Krugly Yu.N., Shakhovskoy N.M., Efimov Yu.S., Gaftonyuk N.M., Cellino A., Gil-Hutton R.) // *Icarus*. 2003. V. 166. P. 276.
- Вайдин, Косифай (Videen G., Kocifaj M. (Eds.)) // *Optics of Cosmic Dust*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. 2002.
- Вайдин и др. (Videen G., Yatskiv Y., Mishchenko M. (Eds.)) // *Photopolarimetry in Remote Sensing*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. 2004.
- Дольфус (Dollfus A.) // *Icarus*. 1996. V. 124. P. 237.
- Зельнер, Градье (Zellner B., Gradie J.) // *Astron. J.* 1976. V. 81. P. 262.
- Киселев и др. (Kiselev N.N., Shakhovskoy N.M., Efimov Yu.S.) // *Icarus*. 1996. V. 120. P. 408.
- Лю (Lyot B.) // *Ann. Obs. Meudon VIII*. 1929. V. 8. P. 1.
- Люмме, Муйнонен (Lumme K., Muinonen K.) // *Asteroids, Comets, Meteors.* / Eds. Harris A.W., Bowell E. Houston: LPI 810. 1993. P. 194.
- Лушишко Д.Ф., Васильев С.В. // *Кинемат. и физ. неб. тел.* 1997. Т. 13. С. 17.  
(<http://PDS.jpl.nasa.gov/>)
- Лушишко, Мохамед (Lupishko D.F., Mohamed R.A.) // *Icarus*. 1996. V. 119. P. 209.
- Мищенко (Mishchenko M.I.) // *Astrophys. J.* 1993. V. 411. P. 351.
- Мищенко и др. (Mishchenko M.I., Luck J.-M., Nieuwenhuizen Th.M.) // *J. Opt. Soc. Am.* 2000. V. A 17. P. 888.
- Мищенко и др. (Mishchenko M.I., Rosenbush V.K., Kiselev N.N.) // *Applied Optics*. 2006. (in press).
- Муйнонен (Muinonen K., Piironen J., Shkuratov Yu.G., Ovcharenko A., Clark B.E.) // *Asteroids III* / Eds. Bottke W.F., Cellino A., Paolicchi P., Binzel R.P. Tucson: Univ. Arizona Press. 2002. P. 123.
- Пиирола (Piirola V.) // *Polarized radiation of circumstellar origin*/Eds. Coyne, G.V., Magalhaes, A.M., Moffat, A. F. J., Schulte-Ladbeck, R.E., Tapia, S., Wickramasinghe D.T. et al. Vatican City State / Tucson: Univ. Arizona Press. 1988. P. 735.
- Поутанен (Poutanen M.) // *Asteroids, Comets, Meteors* / Eds. Lagerkvist C.-I., Rickman H. Uppsala: Uppsala Universitet Reprocentralen. 1983. P. 45.
- Розенбуш и др. (Rosenbush V.K., Avramchuk V.V., Rosenbush A.E., Mishchenko M.I.) // *Astrophys. J.* 1997. V. 487. P. 402.
- Розенбуш и др. (Rosenbush V.K., Kiselev N.N., Jockers K., Korokhin V.V., Shakhovskoy N.M., Efimov Yu.S.) // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies. Supplement Series*. 2000. V. 3. P. 227.
- Розенбуш и др. (Rosenbush V., Kiselev N., Avramchuk V., Mishchenko M.) // *Optics of Cosmic Dust* / Eds. Videen G., Kocifaj M. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. 2002. P. 191.
- Розенбуш и др. (Rosenbush V.K., Kiselev N.N., Shevchenko V.G., Jockers K., Shakhovskoy N.M., Efimov Yu.S.) // *Icarus*. 2005. V. 178. P. 222.
- Тедеско и др. (Tedesco E.F., Williams J.G., Matson D.L., Gradie J.C., Lebofsky L.A.) // *Asteroids II* / Eds. Binzel R., Gehrels T., Matthews M.S. Tucson: Univ. Arizona Press. 1989. P. 1151.
- Тедеско, Видер (Tedesco E.F., Veeder G.J.) // *IRAS Minor Planet Survey* / Eds. Tedesco E.F., Veeder G.J., Flower J.W., Chillemi J.R. MA (USA): Hanscom Air Force Base. 1992. P. 243.
- Тедеско и др. (Tedesco E.F., Noah P.V., Noah M., Price S.D.) // *Astron. J.* 2002. V.123. P. 1056.

Толен (Tholen D.J.) // Asteroids II / Eds. Binzel R., Gehrels T., Matthews M.S. Tucson: Univ. Arizona Press. 1989. P. 1139.

Форнасье, Лазарин (Fornasier S., Lazzarin M.) // Icarus. 2001. V. 152. P. 127.

Харрис и др. (Harris A.W., Young J.W., Contreiras L., Dockweiler T., Belkora L., Salo H., Harris W.D., Bowell E., Routanen M., Binzel R.P., Tholen D.J., Wang S.) // Icarus. 1989. V. 81. P. 365.

Шаховской, Ефимов (Шаховской Н.М., Ефимов Ю.С.) // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1972. Т. 45. С. 90.

Шаховской и др. (Шаховской Н.М., Андронов И.Л., Колесников С.В., Халевин А.В.) // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2001. Т. 97. С. 91.