

УДК 523.47-87:520.85

ПОЛЯРИМЕТРИЯ ГЛАВНЫХ СПУТНИКОВ УРАНА НА 6-М ТЕЛЕСКОПЕ

© 2014 В. Л. Афанасьев^{1*}, В. К. Розенбуш², Н. Н. Киселёв²¹Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия²Главная астрономическая обсерватория НАНУ, Киев, 03680 Украина

Поступила в редакцию 4 марта 2014 года; принята в печать 22 марта 2014 года

Приведены результаты поляриметрических исследований ледяных спутников Урана (Ариэля, Титании, Оберона и Умбриэля) на 6-м телескопе САО РАН с универсальным спектрографом SCORPIO-2 в диапазоне фазовых углов $0^{\circ}06-2^{\circ}37$. Получены параметры ветви отрицательной (отнесенной к плоскости рассеяния) поляризации в фильтре V : для Ариэля максимальная глубина ветви $P_{\min} \approx -1.4\%$ достигается на фазовом угле $\alpha_{\min} \approx 1^{\circ}$; для Титании $P_{\min} \approx -1.2\%$, $\alpha_{\min} \approx 1^{\circ}4$; для Оберона $P_{\min} \approx -1.1\%$, $\alpha_{\min} \approx 1^{\circ}8$. Для Умбриэля минимум поляризации не был достигнут, для последней точки измерений на $\alpha_{\min} = 2^{\circ}4$ значение поляризации составляет -1.7% . Уменьшение P_{\min} и смещение α_{\min} в сторону больших фазовых углов коррелируют с уменьшением альbedo спутников. Долготная зависимость поляризации спутников с точностью до ошибок наблюдений отсутствует, что свидетельствует о сходстве физических свойств их ведущих и ведомых полушарий. Фазовые зависимости поляризации для спутников Урана хорошо согласуются с данными измерений поляризации для группы малых транснептуновых объектов (Ixion, Huua, Varuna, 1999 DE9 и др.), для которых характерен большой градиент отрицательной поляризации, -1% на градус в диапазоне фазовых углов $0^{\circ}1-1^{\circ}$.

Ключевые слова: планеты и спутники: поверхности—планеты и спутники: индивидуальные: Ариэль, Оберон, Титания, Умбриэль

1. ВВЕДЕНИЕ

Интерес к изучению физических свойств спутников внешних планет Солнечной системы за последние десятилетия резко возрос, о чем свидетельствует ряд космических программ, как уже реализованных (Voyager 1 и 2, Galileo, Cassini, HST), так и планирующихся (миссия JUICE для изучения ледяных спутников Юпитера). Космические исследования значительно расширили наши представления о природе спутников планет. Однако это не умаляет значения наземных наблюдений, которые способствуют планированию космических миссий и, как правило, поддерживают их. Кроме того, в некоторых случаях единственными источниками информации о свойствах таких объектов являются интенсивность и поляризация их рассеянного света, измеренные с Земли. Именно эти измерения могут дать первые представления о физических свойствах рассеивателей на поверхностях спутников. Так, из анализа оптических характеристик спутника, таких как геометрическое альbedo и отражательная способность, и их зависимостей

от длины волны могут быть получены сведения о составе и структуре рассеивающего слоя поверхности. Поэтому задача дистанционной диагностики физических свойств спутников остается одной из самых актуальных задач физики малых тел Солнечной системы.

Для безатмосферных тел Солнечной системы в области оппозиции, то есть на фазовых углах меньше 25° , интенсивность рассеянного света с колебаниями электрического вектора в плоскости рассеяния I_{\parallel} больше интенсивности света с колебаниями электрического вектора, перпендикулярными к плоскости рассеяния I_{\perp} . Поэтому формально степень поляризации $P = (I_{\perp} - I_{\parallel}) / (I_{\perp} + I_{\parallel})$ будет отрицательной, и на фазовой зависимости поляризации будет наблюдаться отрицательная ветвь. Здесь $I = I_{\perp} + I_{\parallel}$ — суммарная интенсивность. В этом случае степень поляризации в проекции на плоскость рассеяния (плоскость, проходящая через Солнце, объект и наблюдателя) определяется через параметры Стокса как $P = -Q/I$ и $U = 0$.

Для многих безатмосферных тел Солнечной системы ветвь отрицательной поляризации имеет

*E-mail: vafan@sao.ru

форму широкой, несколько асимметричной параболы. В то же время у высокоальбедных тел, например, спутников Юпитера, Сатурна, астероидов E-типа, на малых фазовых углах $\alpha \leq 2^\circ$ обнаружены особенности в отрицательной ветви поляризации около оппозиции [1–5] в виде резко асимметричного минимума или в виде отдельного вторичного минимума поляризации, который накладывается на регулярную ветвь отрицательной поляризации. Эти особенности в изменении поляризации около оппозиции названы поляризационным оппозиционным эффектом (ПОЭ) [6]. В области оппозиции на фазовых углах $\alpha < 2^\circ - 7^\circ$ для безатмосферных космических тел (БКТ) наблюдается еще одно оптическое явление — нелинейное увеличение блеска с уменьшением фазового угла, так называемый фотометрический оппозиционный эффект (ФОЭ). У высокоальбедных объектов ФОЭ проявляется в виде узкого и резкого пика яркости в направлении, обратном рассеянию света (так называемый спайк-эффект [7]), в то время как для средне- и низкоальбедных тел ФОЭ имеет небольшую амплитуду или даже отсутствует совсем [8, 9]. Параметры отрицательной ветви поляризации (глубина P_{\min} и положение минимума поляризации α_{\min} , фазовый угол точки инверсии α_{inv} , на котором происходит изменение знака степени поляризации), параметры ПОЭ (глубина $P_{\text{РОЭ, min}}$ и положения минимумов степени поляризации $\alpha_{\text{РОЭ, min}}$ и ФОЭ (амплитуда и угловая полуширина на полувысоте оппозиционного пика яркости)) зависят от физических свойств частиц, составляющих реголитовую поверхность. Эти оптические явления — важный тест для проверки теоретических моделей рассеяния света поверхностями безатмосферных тел.

Теоретическое моделирование рассеяния света морфологически сложными объектами, такими как поверхности спутников, еще не достаточно развито, хотя для объяснения оппозиционных эффектов предложен ряд физических механизмов. Среди доминирующих механизмов, определяющих характеристики рассеянного излучения (интенсивность и поляризация) на малых фазовых углах, рассматриваются когерентное усиление обратного рассеяния (или слабая локализация электромагнитных волн), взаимное затенение частиц, эффекты ближнего поля, однократное рассеяние света на отдельных частицах, имеющих сильное обратное рассеяние, и многократное рассеяние между частицами, образующими реголит (диффузное рассеяние) [6, 11–25]. Плотность упаковки среды, эффективный показатель преломления, размер и форма мономеров, составляющих агрегатные частицы, определяют эффективность каждого из механизмов рассеяния и, следовательно, поведение яркости и поляризации вблизи оппозиции.

Интерес к изучению спутников Урана вызван тем, что, несмотря на то, что они относятся к среднеальбедным телам Солнечной системы, на их фазовых кривых яркости наблюдаются чрезвычайно узкие пики на очень малых фазовых углах, т.е. оппозиционный эффект яркости [26, 27]. Оппозиционные пики яркости указывают на то, что поверхности этих спутников являются пористыми и значительная их часть покрыта мелкозернистым материалом, производящим сильное обратное рассеяние. В работе Аврамчука и др. [28] было показано, что параметры ФОЭ и их зависимости от длины волны для главных спутников Урана значительно отличаются от соответствующих параметров ФОЭ для ледяных спутников Юпитера и Сатурна. Как показывают морфологические исследования спутников Урана, на их поверхностях существуют отдельные пятна с разным типом поверхностных слоев: участки с очень светлым материалом (дно кратеров, околократерные выбросы, лучевые структуры, склоны разломов, отдельные площадки) и участки с относительно темным материалом. Возможно, соотношение темных и светлых пятен на поверхности определяет вклад обратного когерентного рассеяния и взаимного затенения частиц в рассеянном свете и, следовательно, в очень сильном оппозиционном эффекте яркости [28]. Главное, чтобы светлые и темные частицы в этих областях не взаимодействовали между собой, как в случае сильно перемешанных смесей разных веществ [29].

Важно дополнить результаты космических и наземных фотометрических и спектральных исследований измерениями поляризации рассеянного света спутников и изучить изменение поляризации около оппозиции. Так как до сих пор поляриметрические наблюдения спутников Урана не проводились, то главной целью данной работы является измерение поляризации рассеянного излучения главных спутников Урана — Миранды (геометрическое альbedo $p_v = 0.27$), Ариэля ($p_v = 0.35$), Умбриэля ($p_v = 0.19$), Титании ($p_v = 0.28$) и Оберона ($p_v = 0.25$) — и ее сравнение с поляризацией галилеевых спутников Юпитера и ледяных спутников Сатурна для выявления сходства и различия в оппозиционных эффектах.

2. НАБЛЮДЕНИЯ

Поляриметрические наблюдения рассеянного излучения спутников Юпитера и Сатурна и астероидов до сих пор проводились на небольших телескопах диаметром 0.7–2.6 м с помощью различных поляриметров с фиксированной апертурой и фотоэлектрической регистрацией [1–5]. Наблюдения спутников более удаленных планет такими методами практически невозможны из-за их слабого блеска и трудностей учета рассеянного

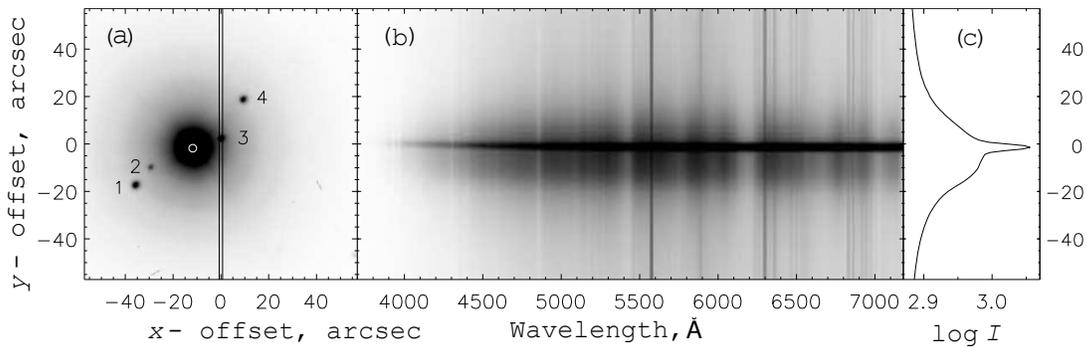


Рис. 1. Спектрополяриметрические наблюдения спутника Урана Ариэль: (а) прямое изображение Урана со спутниками на входе спектрографа SCORPIO-2, цифрами обозначены: 1 — Титания, 2 — Умбриэль, 3 — Ариэль, 4 — Оберон; (б) суммарный спектр в режиме спектрополяриметрии; (с) разрез изображения спектра поперек дисперсии.

света от родительской планеты. В случае Урана яркость планеты составляет около 6^m , а яркость главных спутников лежит в диапазоне от $14^m.4$ до $16^m.5$. В зависимости от условий наблюдений спутники могут находиться на расстояниях $5''$ – $40''$ от планеты, где вклад от рассеянного света сравним с регистрируемым потоком от спутника.

Наблюдения больших спутников Урана (Миранды, Ариэля, Умбриэля, Титании и Оберона) проводились в 2011–2012 гг. с помощью модифицированного универсального редуктора светосилы SCORPIO-2 [30], установленного в прямом фокусе 6-м телескопа Специальной астрофизической обсерватории РАН. Для измерений поляризации рассеянного света спутников использовались спектрополяриметрический режим и режим панорамной поляриметрии. В таблице 1 приведен журнал наблюдений, где указаны дата наблюдения (середина экспозиции), суммарная экспозиция, число циклов измерений, качество изображения, размер щели, режим наблюдений и наблюдаемые спутники. В 2011 г. наблюдения проводились в спектрополяриметрическом режиме, при котором рассеянный свет минимален. В 2012 г. после разработки эффективных алгоритмов выделения изображений спутников на ярком переменном фоне проводились широкополосные поляриметрические наблюдения в фотометрической полосе V . Отметим, что хотя в отдельные ночи наблюдений условия видимости спутника Миранда были удовлетворительными (он находился на максимально возможном расстоянии от Урана, около $10''$), из-за его слабости (примерно $16^m.5$) и яркого переменного фона не удалось получить измерения с приемлемой точностью, поэтому он не упоминается в таблице 1.

В качестве анализатора поляризации нами использовалась призма Волластона, установленная в параллельном пучке редуктора SCORPIO-2. Светоприемником регистрировались одновременно либо два щелевых спектра (высота щели $2'$)

в обыкновенном (о) и необыкновенном (е) лучах, либо два соответствующих изображения в полосе V . В качестве светоприемника мы использовали ПЗС-матрицу EEV 42-90 формата 2048×4630 элементов с размером каждого элемента 13.5×13.5 мкм. Для однозначного определения степени линейной поляризации и позиционного угла плоскости поляризации измерения проводились при различных углах поворота фазовой пластинки $\lambda/2$. Пластинка установлена вблизи фокальной плоскости телескопа (за щелью спектрографа) и поворачивается на фиксированные углы — 0° , 45° , 22.5° и 67.5° . Детально методика наблюдений и редукиции данных со спектрографом SCORPIO-2 в режиме поляриметрии описана в [31]. Особенности методики наблюдений спутников Урана и редукиции в двух режимах приведены далее.

2.1. Наблюдения в режиме спектрополяриметрии

При наблюдениях в режиме спектрополяриметрии мы полагали, что вклад рассеянного света будет минимален. Это оказалось справедливым для случая, когда наблюдаемый спутник находится на расстоянии больше $20''$ от планеты. На меньших расстояниях вклад рассеянного света от Урана становится значительным, что иллюстрирует рис. 1.

Щель спектрографа при наблюдениях каждого спутника ориентировалась таким образом, чтобы вклад рассеянного света от Урана был минимален. В некоторых случаях на щель ставились два спутника, что отражено в последнем столбце таблицы 1. Экспозиция для каждого положения фазовой пластинки составляла 120–180 с, что позволяло получать необходимое отношение сигнал/шум и минимизировать влияние атмосферы Земли (деполяризация), которое учитывалось по методике, описанной в [31]. Для получения интегрального

Таблица 1. Журнал наблюдений. В колонке «Режим наблюдений» цифрами обозначены: 1 — призма Волластона + фазовая пластинка $\lambda/2$ + решетка VPHG 940, спектральный диапазон 3700–8400 Å; 2 — призма Волластона + фазовая пластинка $\lambda/2$ + решетка VPHG 120, спектральный диапазон 3700–7300 Å; 3 — призма Волластона + фазовая пластинка $\lambda/2$ + фильтр V

Дата наблюдений, UT	Экспозиция, с	Число циклов	Изображения, arcsec	Щель, arcsec	Режим наблюдений	Наблюдаемые спутники
Август 27.953, 2011	2880	6	1.3	2	1, 2	Умбриэль, Титания
Август 28.012, 2011	2880	6	1.5	3	1	Ариэль
Август 28.063, 2011	2880	6	1.5	3	1	Оберон
Август 28.990, 2011	2880	6	1.5	3	1	Ариэль
Август 29.065, 2011	1920	4	1.5	4	1	Титания
Сентябрь 27.022, 2011	2880	6	3	3	1	Титания
Сентябрь 27.923, 2011	2400	5	1.2	3	2	Оберон
Сентябрь 27.989, 2011	2400	5	1.2	3	1	Умбриэль
Сентябрь 28.039, 2011	2400	5	1.2	3	2	Ариэль
Ноябрь 17.730, 2011	2880	4	3.5	2	2	Оберон
Ноябрь 18.796, 2011	2400	10	1.5	2	2	Титания, Оберон
Ноябрь 20.755, 2011	2880	6	2.5	1	2	Умбриэль
Август 26.034, 2012	400	10	1.4	—	3	Ариэль, Умбриэль Титания, Оберон,
Сентябрь 11.966, 2012	400	20	1.5	—	3	Ариэль, Умбриэль, Титания, Оберон
Сентябрь 12.915, 2012	800	20	1.4	—	3	Ариэль, Умбриэль, Титания, Оберон
Сентябрь 14.071, 2012	840	7	2	—	3	Умбриэль, Титания, Оберон
Сентябрь 16.094, 2012	1920	16	1.4	—	3	Умбриэль, Титания, Оберон
Октябрь 7.881, 2012	1280	16	2.5	—	3	Титания, Оберон

спектра спутника (см. рис. 1с) требовалась декомпозиция профилей спутника и рассеянного света от Урана поперек дисперсии в каждом спектральном канале. Следует отметить, что обычно применяемые методы многокомпонентного гаусс-анализа для этого непригодны. Мы использовали итерационный алгоритм, суть которого заключается в следующем:

(1) вначале из профиля рассеянного света в локальной области $\pm 10''$ от положения спутника на щели вычитался профиль изображения спутника, аппроксимируемый гауссианой, фон при этом представлялся квадратичным профилем;

(2) затем оставшийся профиль рассеянного света сглаживался алгоритмом LOWESS (LOcally WEighted Scatterplot Smooth), в котором используется непараметрическая регрессия с переменным окном, не искажающая профиль и не смещающая статистические оценки [32];

(3) полученный таким образом профиль рассеянного света вычитался из исходного профиля, оставшийся профиль спутника аппроксимировался профилем Моффата [33].

Результат декомпозиции интегрального спектра Ариэля и фона неба, изображенных на рис. 1б, по-

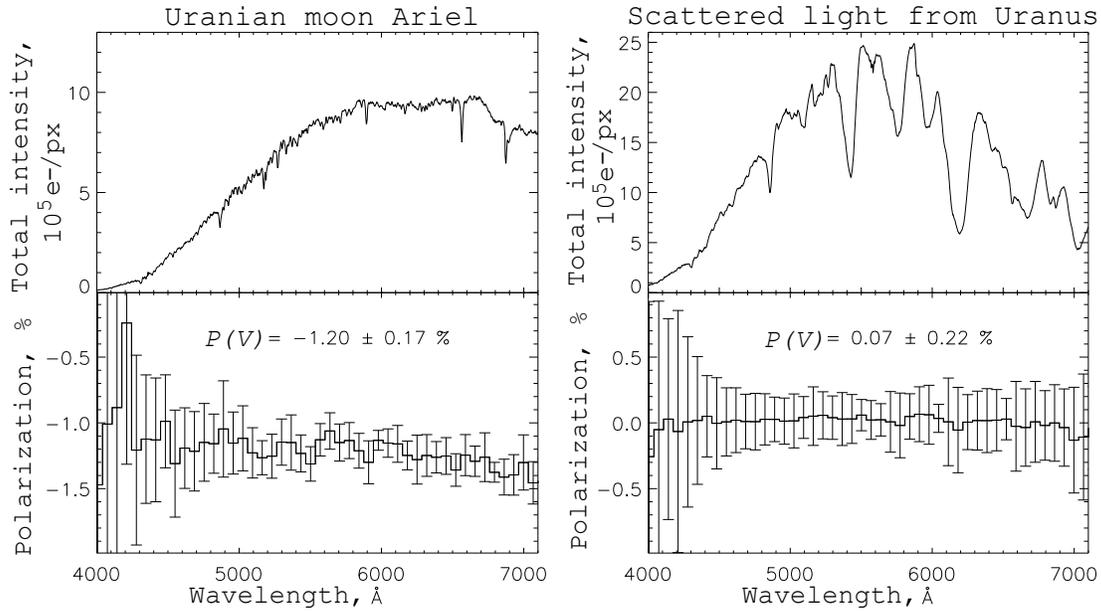


Рис. 2. Результат декомпозиции спектра спутника Ариэль и спектра рассеянного света от Урана вдоль щели. На верхних рисунках показаны не исправленные за спектральную чувствительность интегральные спектры, а на нижних — величина поляризации в проекции на плоскость рассеяния. Приведены робастные оценки поляризации в спектральных интервалах, равных 70 Å (20 пикселей).

казан на рис. 2 (верхние панели) в виде отдельного спектра спутника Ариэль и спектра рассеянного света от Урана.

Таким же способом для каждой пары спектров определялось распределение интенсивности обыкновенного $I_o(\lambda, \varphi)$ и необыкновенного $I_e(\lambda, \varphi)$ лучей с длиной волны λ и для каждого угла поворота фазовой пластины φ . С использованием этих значений вычислялись величины нормированных параметров Стокса $Q'(\lambda)$ и $U'(\lambda)$ в инструментальной системе согласно [31]:

$$U'(\lambda) = 0.5 \left(\frac{I_o(\lambda) - I_e(\lambda)}{I_o(\lambda) + I_e(\lambda)} \right)_{\varphi=45^\circ} - 0.5 \left(\frac{I_o(\lambda) - I_e(\lambda)}{I_o(\lambda) + I_e(\lambda)} \right)_{\varphi=45^\circ}, \quad (1)$$

$$Q'(\lambda) = 0.5 \left(\frac{I_o(\lambda) - I_e(\lambda)}{I_o(\lambda) + I_e(\lambda)} \right)_{\varphi=22.5^\circ} - 0.5 \left(\frac{I_o(\lambda) - I_e(\lambda)}{I_o(\lambda) + I_e(\lambda)} \right)_{\varphi=67.5^\circ}. \quad (2)$$

В случае планетной астрофизики представляют интерес проекции нормированного вектора поляризации на плоскость рассеяния с углом θ , значения которых легко вычисляются из $Q'(\lambda)$ и $U'(\lambda)$ простым

преобразованием поворота:

$$\begin{aligned} U(\lambda) &= U'(\lambda) \cos(2\theta) - Q'(\lambda) \sin(2\theta), \\ Q(\lambda) &= U'(\lambda) \sin(2\theta) + Q'(\lambda) \cos(2\theta). \end{aligned} \quad (3)$$

Для калибровки поляризационного тракта спектрографа каждую ночь снимались поляриметрические стандарты из списков [34, 35]. Для корректного определения ошибок вычислялись робастные оценки среднего значения поляризации и среднеквадратичные отклонения на уровне 2σ в спектральных интервалах 70 Å для всего цикла наблюдений. Пример результатов вычислений величины поляризации $P(\lambda)$ для спутника Ариэль и фона неба показан на рис. 2 (нижние панели). Окончательное значение поляризации в широкополосном фильтре V вычислялось путем интегрирования величины $P(\lambda)$, умноженной на стандартную кривую полосы пропускания фильтра.

2.2. Наблюдения в режиме панорамной поляриметрии

Основная трудность проведения панорамной поляриметрии спутников Урана — сильная засветка от Урана, которая дает переменный фон неба вокруг измеряемого спутника. Преимуществом является более эффективное использование телескопного времени, поскольку при этом все спутники попадают в поле зрения прибора и могут

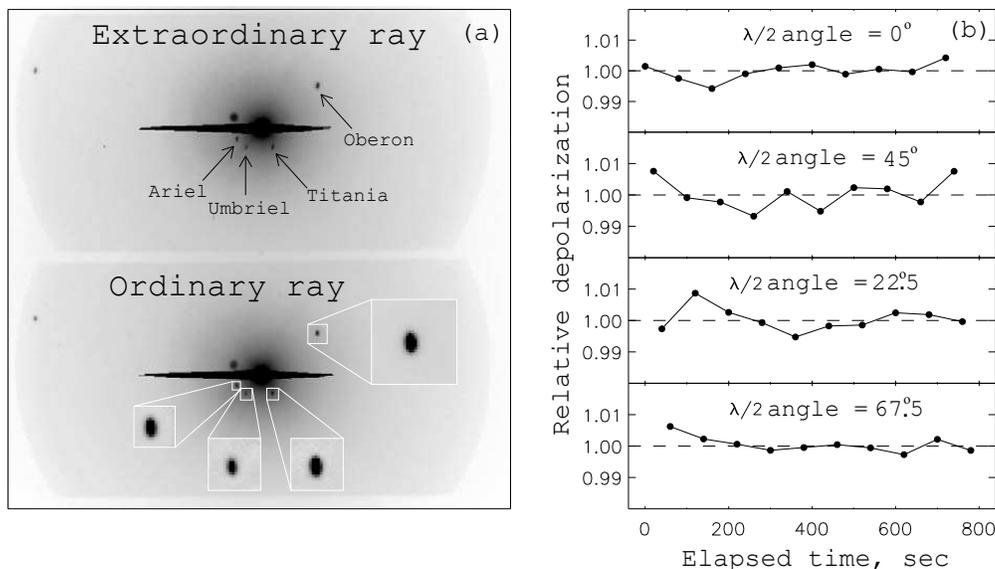


Рис. 3. (а) Отдельный кадр цикла (экспозиция 10 с) с обыкновенным (внизу) и необыкновенным (вверху) изображениями Урана со спутниками. В изображениях спутников в субапертурах фон вычтен. (б) Относительная деполяризация при различных углах поворота фазовой пластинки в цикле наблюдений, определенная по всем измеренным спутникам.

быть измерены одновременно. На рис. 3 показан одиночный кадр, который получался в серии измерений поляризации в режиме широкополосной фотометрии. В этом режиме, как и в режиме спектрополяриметрии, в качестве анализатора поляризации использовалась призма Волластона, которая формировала два изображения с взаимно перпендикулярными направлениями поляризации. Изображение по высоте было ограничено диафрагмой размером $2'$, установленной между фокальной плоскостью телескопа и фазовой пластиной. Ширина изображения ограничивалась апертурой фазовой пластины, установленной вблизи фокальной плоскости, и составляла $4'5$. Как видно из рис. 3, даже при коротких экспозициях (порядка 10 с) изображение Урана сильно передержано, и в центре оно испорчено переполнением потенциальной ямы ПЗС. Каждая серия экспозиций состояла из N циклов по четыре экспозиции для четырех углов поворота фазовой пластины: 0° , 45° , 22.5° и 67.5° . Для каждого угла поворота фазовой пластины снималась равномерная засветка (flat-field), которая после вычитания bias и нормировки на центральную интенсивность (отдельно для обыкновенного и необыкновенного лучей) использовалась для калибровки неоднородности чувствительности по полю. Координатные искажения кадра изображения в необыкновенном свете относительно обыкновенного исправлялись по алгоритму, приведенному в [31]. При этом в качестве реперных точек использовались звезды поля. После исправления координатных искажений и учета смещения изображений движущихся

спутников формировался 5-мерный куб исходных данных $CUBE(x, y, ray, \varphi, N)$, который давал интенсивность изображения в точке с координатами x и y для луча ray , угла поворота пластины φ и номера цикла N . Также для видимых спутников определялись координаты центроидов изображений $[x_i, y_i]$.

Как видно из рис. 3а, изображения спутников вытянуты по вертикали и различаются в разных направлениях поляризации. Это связано с хроматизмом, вносимым анализатором Волластона в достаточно широкой (более 600 \AA) полосе пропускания фильтра V . По этой причине и из-за сильного переменного фона вокруг спутников обычные методы апертурной фотометрии практически неприменимы. Более того, в случае переменного профиля изображения методы апертурной фотометрии дают модельно зависимые оценки потоков от звездобразных изображений. Кроме того, эти методы смещают статистические оценки поляризации, что приводит к появлению в измерениях паразитной инструментальной поляризации.

Корректное вычитание фона делалось в следующей последовательности. Вначале в изображении в исходном кубе данных для каждого i -го спутника выделялись изображения в субапертурах $MAP_i(x, y, ray, \varphi, N)$, как показано на рис. 3а. Размер субапертуры определялся угловым расстоянием спутника до Урана и составлял $7\text{--}11''$. В каждой отдельной субапертуре цикла изображение аппроксимировалось двумерной гауссианой, по внешним контурам которой (на уровне более

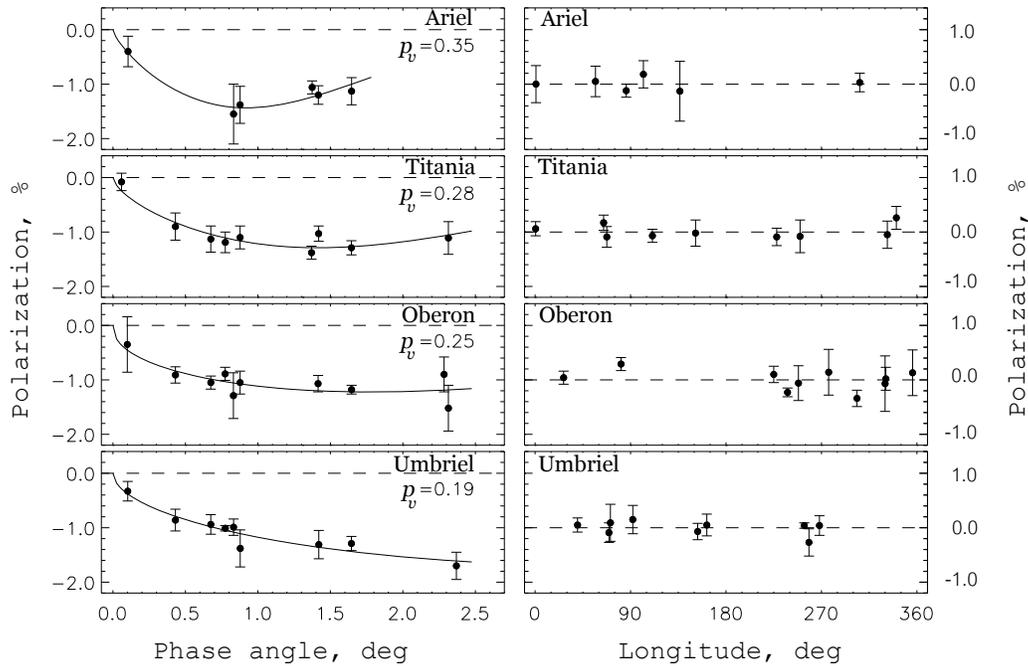


Рис. 4. Фазовые (слева) и долготные (справа) зависимости поляризации рассеянного излучения главных спутников Урана. Кривые представляют аппроксимацию данных тригонометрическим выражением (3) согласно [36]. Долготная зависимость поляризации получена после учета фазовой зависимости.

0.2 от максимального значения) определялась область маскирования изображения спутника. Далее, после маскирования изображения в субапертуре, интенсивность оставшихся точек изображения аппроксимировалась поверхностью второго порядка с использованием алгоритма LOWESS. Полученное таким образом изображение фона вычиталось из исходной субапертуры, после чего простым суммированием определялся поток от спутника $I_i(\text{гау}, \varphi, N)$. Далее по формулам (1) и (2) вычислялись параметры Стокса рассеянного излучения спутника. Стабильность атмосферы оценивалась по изменению средней нормированной деполаризации $D = (I_e/I_o)/\langle I_e/I_o \rangle$ в цикле по всем измеренным спутникам. Характер изменения деполаризации в течение цикла измерений для различных углов фазовой пластины показан на рис. 3б. Как видно из рисунка, статистические вариации деполаризации для этой записи достаточно малы (менее 0.5%). Систематические изменения D , превышающие статистические вариации, интерпретировались как изменение чувствительности поляризационных каналов и учитывались в вычислении поляризации согласно [31].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты измерений поляризации в полосе V в проекции на плоскость рассеяния для четырех главных спутников Урана приведены в таблице 2,

в которой указаны момент середины цикла, робастная оценка величины поляризации и ошибки на уровне 2σ , фазовый угол, долгота центрального меридиана спутника и позиционный угол плоскости рассеяния. В последней колонке таблицы дано формальное значение отношения сигнал/шум для отдельной экспозиции в цикле, вычисленное для пуассоновской статистики и показывающее уровень накопленного сигнала. Необходимо отметить, что случайные ошибки наших робастных оценок в 2–3 раза превышают ошибки, ожидаемые для пуассоновской статистики, что, в первую очередь, обусловлено случайными вариациями величины деполаризации атмосферы Земли.

На рис. 4 показаны зависимости степени поляризации от фазового угла (слева) для четырех спутников Урана: Ариэля, Титании, Оберона, Умбриэля. Так как нет больших различий в поляризации для ведущего и ведомого полушарий спутников, то данные наблюдений были аппроксимированы единой фазовой зависимостью поляризации для двух полушарий. Для этого использовалось тригонометрическое выражение [36]:

$$P(\alpha) = b \sin^{c_1}(\alpha) \cos^{c_2}(\alpha/2) \sin(\alpha - \alpha_{\text{inv}}), \quad (4)$$

где b , c_1 , c_2 и α_{inv} — свободные параметры; член $\sin^{c_1}(\alpha)$ введен для того, чтобы поляризация на $\alpha = 0^\circ$ и $\alpha = 180^\circ$ равнялась 0. Параметр c_2

Таблица 2. Результаты поляриметрии спутников Урана

Момент (середины наблюдений, UT)	Величина поляризации, %	Фазовый угол, град.	Долгота, град.	Позиционный угол плоскости рассеяния, град.	S/N
Ариэль					
Август 28.012, 2011	-1.20 ± 0.17	1.417	306.1	68.0	950
Август 28.990, 2011	-1.06 ± 0.12	1.374	85.9	68.0	851
Август 28.032, 2011	-0.40 ± 0.28	0.104	56.9	224.5	602
Сентябрь 26.034, 2012	-1.13 ± 0.25	1.646	102.1	67.8	620
Сентябрь 11.967, 2012	-1.38 ± 0.34	0.877	0.8	69.2	585
Сентябрь 12.917, 2012	-1.55 ± 0.55	0.832	136.5	69.2	723
Оберон					
Август 28.063, 2011	-1.07 ± 0.15	1.415	225.0	68.0	920
Сентябрь 27.923, 2011	-0.35 ± 0.51	0.099	330.0	223.6	871
Ноябрь 17.730, 2011	-0.90 ± 0.32	2.284	248.3	246.0	622
Ноябрь 18.796, 2011	-1.52 ± 0.42	2.314	276.8	246.1	402
Август 26.034, 2012	-1.18 ± 0.08	1.646	238.0	67.8	705
Сентябрь 11.967, 2012	-1.05 ± 0.21	0.877	330.7	69.1	576
Сентябрь 12.915, 2012	-1.29 ± 0.42	0.831	355.9	69.3	817
Сентябрь 14.071, 2012	-0.89 ± 0.12	0.774	26.9	69.5	1127
Сентябрь 16.094, 2012	-1.05 ± 0.12	0.675	81.0	69.9	1201
Октябрь 7.881, 2012	-0.91 ± 0.15	0.431	303.5	241.8	853
Титания					
Август 27.953, 2011	-1.03 ± 0.14	1.419	64.6	68.0	1020
Август 28.065, 2011	-1.38 ± 0.12	1.370	110.6	68.0	935
Сентябрь 27.022, 2011	-0.08 ± 0.16	0.059	227.8	206.7	880
Ноябрь 18.796, 2011	-1.11 ± 0.30	2.314	249.8	246.1	605
Август 26.034, 2012	-1.29 ± 0.13	1.645	0.5	67.8	735
Сентябрь 11.967, 2012	-1.10 ± 0.21	0.877	340.6	69.1	616
Сентябрь 14.071, 2012	-1.19 ± 0.19	0.775	67.6	69.5	935
Сентябрь 16.094, 2012	-1.13 ± 0.24	0.675	151.3	69.8	1163
Октябрь 7.881, 2012	-0.90 ± 0.25	0.431	332.1	241.7	797
Умбриэль					
Август 27.953, 2011	-1.31 ± 0.26	1.420	92.1	68.0	635
Сентябрь 27.989, 2011	-0.33 ± 0.18	0.102	268.1	224.6	620
Ноябрь 20.755, 2011	-1.70 ± 0.25	2.369	258.2	246.1	538
Август 26.034, 2012	-1.29 ± 0.13	1.645	40.0	67.9	452
Сентябрь 11.967, 2012	-1.38 ± 0.34	0.878	71.0	69.1	412
Сентябрь 12.915, 2012	-0.99 ± 0.15	0.832	153.3	69.2	732
Сентябрь 14.071, 2012	-1.01 ± 0.05	0.775	253.8	69.4	716
Сентябрь 16.094, 2012	-0.94 ± 0.18	0.675	69.6	69.9	418
Октябрь 7.881, 2012	-0.86 ± 0.20	0.431	161.9	241.9	350

характеризует асимметрию фазовой кривой поляризации на больших фазовых углах. По найденным параметрам была определена фазовая зависимость поляризации каждого спутника в первом приближении $P_{\text{fit}}(\alpha)$. Отклонения наблюдаемой поляризации от аппроксимационной кривой дают представление о долготной зависимости поляризации $\Delta P(L) = P_{\text{obs}}(\alpha, L) - P_{\text{fit}}(\alpha)$ для каждого из спутников, представленных на рис. 4. Из рисунка видно, что разброс точек незначительный, т.е. в пределах точности измерений спутники Урана не показывают значительных изменений степени поляризации по поверхности. Это означает, что их поверхности достаточно однородны по своим физическим характеристикам.

Несмотря на узкий диапазон фазовых углов (наблюдения системы Урана с Земли возможны только до $\alpha \approx 3^\circ$), наблюдается значительное изменение поляризации рассеянного излучения спутников с фазовым углом. Получены параметры ветви отрицательной поляризации для спутников: для Ариэля $P_{\text{min}} \approx -1.4\%$ на фазовом угле $\alpha_{\text{min}} \approx 1^\circ$; для Титании $P_{\text{min}} \approx -1.2\%$, $\alpha_{\text{min}} \approx 1^\circ 4'$; для Оберона $P_{\text{min}} \approx -1.1\%$, $\alpha_{\text{min}} \approx 1^\circ 8'$. Для Умбриэля аппроксимация данных измерений сильно зависит от последней точки: $P \approx -1.7\%$ на фазовом угле $\alpha = 2^\circ 4'$. Тем не менее видно, что минимум поляризации не достигнут, и нужны дополнительные наблюдения для уточнения фазовой кривой.

Как видно на рис. 4 (слева), с уменьшением альбедо спутников глубина фазовых кривых увеличивается, хотя сами кривые становятся более пологими, поскольку минимум поляризации сдвигается в сторону больших фазовых углов. Ариэль показывает явно иную форму фазовой кривой поляризации по сравнению с другими спутниками. Его поляризация меняется очень резко: примерно от -0.4% до -1.4% в диапазоне фазовых углов $0^\circ 1' - 1^\circ$.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В настоящее время интерпретация поляриметрических данных, особенно для поверхностей со сложной морфологией и составом, является неоднозначной, поскольку обратная задача — рассеяние света произвольными частицами — еще не решена. Современное теоретическое моделирование только указывает на тенденции, связывающие наблюдаемые параметры ветви отрицательной поляризации и фотометрического оппозитного эффекта со свойствами реголитовых поверхностей спутников планет, такими как размеры кластеров и составляющих их мономеров, плотность упаковки, форма, ориентация, комплексный показатель преломления, альбедо однократного рассеяния и др. Поэтому в большинстве случаев возможна

только качественная интерпретация наблюдаемых явлений с привлечением всех известных данных о поверхностях БКТ. Физические свойства поверхностей спутников обусловлены первичным химическим составом (местом происхождения) и эволюцией, включая взаимодействие с околопланетной средой. Большинство спутников находится в быстро вращающихся магнитосферах внешних планет. Так как спутники не имеют существенных магнитосфер или атмосфер, то их поверхности будут бомбардироваться потоком энергичных заряженных частиц из магнитосферы планеты и микрометеоритами. В результате может происходить эрозия поверхностного льда, а также изменение химического состава поверхности [37]. Эрозия является очень эффективным средством изменения микроструктуры поверхности. Обмен вещества между спутниками и взаимодействие спутников с кольцами планеты может также привести к неоднородностям в реголите. Из-за этих процессов ведущие и ведомые полушария спутников могут иметь разные микроструктуру и химический состав реголита и, в конечном счете, разные поляриметрические и фотометрические характеристики.

В спектрах спутников Урана обнаружены полосы поглощения водяного льда, причем разной интенсивности [26, 27, 38, 39]. Причиной этого может быть загрязнение льда каким-то темным, предположительно углеродистым, материалом. Все большие спутники Урана в основном состоят из примерно равных количеств водяного льда и скальных пород. Судя по разным величинам альбедо, поверхности спутников различаются по концентрации и составу примесей в водяном льду. Так, например, для самого темного спутника, Умбриэля, характерны самые слабые полосы поглощения H_2O . Согласно лабораторным исследованиям Clark и Lucey [40], полосы поглощения водяного льда ослабевают и могут даже полностью исчезнуть в случае большого содержания темных пород в смеси с водяным льдом. Наиболее существенными примесями водяного льда на поверхностях спутников могут быть карбонаты или силикаты [39]. Полосы поглощения водяного льда больших спутников Урана значительно слабее, чем соответствующие полосы ледяных спутников Юпитера и Сатурна. Спутники Урана также отличаются от ледяных спутников Юпитера и Сатурна спектральными зависимостями геометрического альбедо и отражательными способностями [28, 41]. Эти результаты указывают на то, что альбедо, обусловленное примесями на поверхностях спутников Урана, не зависит от длины волны, тогда как ледяные спутники Юпитера и Сатурна имеют резкое уменьшение («завал») альбедо в УФ области. Резкий всплеск яркости около оппозиции указывает на то, что поверхность главных спутников Урана является

пористой, что может быть результатом микроремонтной бомбардировки.

Доминирующими механизмами рассеяния света, от которых зависят такие характеристики излучения, как интенсивность и поляризация на малых фазовых углах, являются теневой механизм (проявляется только в интенсивности), когерентное усиление обратного рассеяния и эффекты ближнего поля. Когерентное обратное рассеяние и эффекты ближнего поля, а также многократное рассеяние между частицами реголита (диффузное рассеяние) и рассеяние света отдельными частицами вносят вклад в формирование наблюдаемой ветви отрицательной поляризации. Ее форма (бимодальная или сильно асимметричная кривая поляризации) будет зависеть от относительного вклада указанных механизмов, которые, в свою очередь, зависят от физических характеристик реголита и геометрии рассеяния.

В теневом механизме [42] рассматривается рассеяние света на масштабах много больших, чем длина волны падающего света, т. е. в рамках геометрической оптики. Вклад механизма взаимозатенения в формирование оппозиционного эффекта яркости максимален при рассеянии первого порядка и уменьшается с увеличением альбедо поверхности. Модели, основанные на геометрической оптике, не дают отрицательную поляризацию [13]. Когерентное усиление обратного рассеяния обусловлено конструктивной интерференцией электромагнитных волн, которые взаимодействовали с одной и той же группой частиц при прохождении прямого и сопряженного путей рассеяния. Так как когерентный механизм является следствием многократного рассеяния, то можно ожидать, что он в основном формирует оппозиционный эффект (ОЭ) яркости на светлых поверхностях с рыхлой структурой. Конструктивная интерференция света приводит к появлению пика отрицательной поляризации в направлении обратного рассеяния [6, 13, 14, 15, 19]. Поскольку когерентный механизм зависит от эффективности многократного рассеяния, то он зависит от размера, состава и плотности упаковки рассеивающих частиц [22, 43, 44]. Эффекты ближнего поля тоже возникают от порядков рассеяния больше первого, но для них важно искривление волновых фронтов, которое становится более сильным при высоких показателях преломления, не очень мелких слагающих кластер частицах (размером порядка 1–2 мкм) и достаточно плотной упаковке рассеивателей. Они расширяют и подавляют ОЭ яркости и увеличивают (по абсолютной величине) отрицательную поляризацию, но в широком диапазоне фазовых углов. Относительный вклад обратного когерентного рассеяния и эффектов ближнего

поля зависит от физических характеристик реголита. В частности, с уменьшением альбедо и увеличением плотности упаковки реголита эффективность обратного когерентного рассеяния уменьшается. В то же время роль эффектов ближнего поля усиливается. Это приводит к некоторому уменьшению амплитуды поляризационного ОЭ, в то время как минимум отрицательной поляризации смещается в сторону больших фазовых углов [25].

Геометрическое альбедо является одной из основных характеристик поверхности, определяющей поляризационные свойства как спутников, так и других БКТ. Согласно [45], глубину ветви отрицательной поляризации P_{\min} можно использовать в качестве индикатора альбедо, хотя такое использование является опасным ввиду его чувствительности к текстуре поверхности. Возможно, именно поэтому соотношение между P_{\min} и альбедо является неоднозначным. Кроме того, добавка даже небольшого количества темного материала на светлую поверхность приводит к непропорционально низкому альбедо поверхности [46]. С учетом вышесказанного можно провести только качественную интерпретацию фазовых зависимостей поляризации и яркости спутников Урана и обсудить их различие с аналогичными свойствами спутников Юпитера, Сатурна и некоторых БКТ.

Несмотря на невысокие величины геометрического альбедо ($p_v = 0.35–0.19$), вклад когерентного обратного рассеяния для спутников Урана оказался значительным, о чем свидетельствуют наблюдаемые очень узкие пики яркости на малых фазовых углах [28] и полученные нами очень асимметричные кривые поляризации. В таком случае можно предполагать, что часть поверхности спутников покрыта микронными или субмикронными частицами, формирующими довольно рыхлую структуру реголита [47]. Поляриметрические данные, полученные для Ариэля, Титании и Оберона, показывают, что с уменьшением альбедо спутников (соответственно 0.35, 0.28 и 0.25) отрицательные ветви поляризации становятся менее глубокими, а угол α_{\min} смещается в сторону больших фазовых углов (см. рис. 5). Качественно это согласуется с постепенным увеличением влияния эффектов ближнего поля [25]. Таким образом, ветви отрицательной поляризации, которые получены нами для спутников Урана, могут быть результатом наложения двух механизмов рассеяния света (когерентного и эффектов ближнего поля), которые возникают внутри каждого кластера частиц и между кластерами (Петрова, частное сообщение).

На рис. 5 приведено сравнение фазовых зависимостей поляризации рассеянного излучения спутников Урана с соответствующими кривыми для спутников Юпитера (Европа, Каллисто — ведущее (L) и ведомое (T) полушария) и Сатурна

(Энцелад, Рея, а также и ведущее (L) и ведомое (T) полушария Япета). Они представлены в виде кривых поляризации, которые наилучшим образом аппроксимируют имеющиеся наблюдательные данные. Как следует из этого рисунка, высокоальбедные спутники Сатурна Энцелад, Рея и ведомое (светлое) полушарие Япета показывают довольно глубокие и асимметричные фазовые кривые поляризации. Для этих спутников не наблюдается вторичный минимум поляризации около оппозиции. В то же время для светлых спутников Юпитера (Ио, Европы и Ганимеда) найден вторичный минимум поляризации около оппозиции (см. также [4]). Фазовые кривые поляризации для Энцелада ($p_v = 1.05$) и Реи ($p_v = 0.7$) имеют почти одинаковую величину $P_{\min} = -0.7\%$, в то время как P_{\min} для Европы ($p_v = 0.68$) составляет только -0.2% . В то же время среднеальбедные спутники Урана ($p_v = 0.19-0.35$) демонстрируют очень узкие и глубокие кривые поляризации с минимумами, достигающими от -1.2% до -1.4% в диапазоне фазовых углов $\alpha_{\min} \approx 1^\circ-1.4^\circ$. Как мы уже указывали, несмотря на довольно низкое альbedo спутников Урана, у всех спутников наблюдаются сильные и чрезвычайно узкие оппозиционные пики яркости. Конкретные причины обнаруженных различий в поляризации спутников Юпитера, Сатурна и Урана остаются неясными.

Интересно, что поляризация рассеянного излучения наблюдаемых спутников Урана довольно близка к результатам измерений поляризации для группы малых (с диаметром менее 750 км) транснептуновых объектов (Ixion, Nuua, Varuna, 1999 DE9 и др.) на соответствующих фазовых углах (рис. 6). В диапазоне фазовых углов $0^\circ:1-1^\circ$ градиент поляризации для них составляет порядка 1% на градус [48–50]. Эти транснептуновые объекты, как предполагается, уже потеряли летучие вещества. Несмотря на то что они имеют разные альbedo и принадлежат к разным динамическим группам, они обладают сходными поляризационными свойствами.

Таким образом, несмотря на то что наблюдаемый диапазон фазовых углов не позволяет однозначно определить кривые поляризации в широком диапазоне фазовых углов для спутников Урана, Юпитера и Сатурна, можно сделать вывод, что поляризация рассеянного излучения этих объектов значительно различается, и ее величина не определяется только альbedo поверхности. Механизм когерентного усиления обратного рассеяния является доминирующим при формировании бимодальной фазовой зависимости поляризации для светлых спутников Ио, Европы и Ганимеда. С другой стороны, резкий всплеск яркости и необычно высокая поляризация на малых фазовых углах для далеких

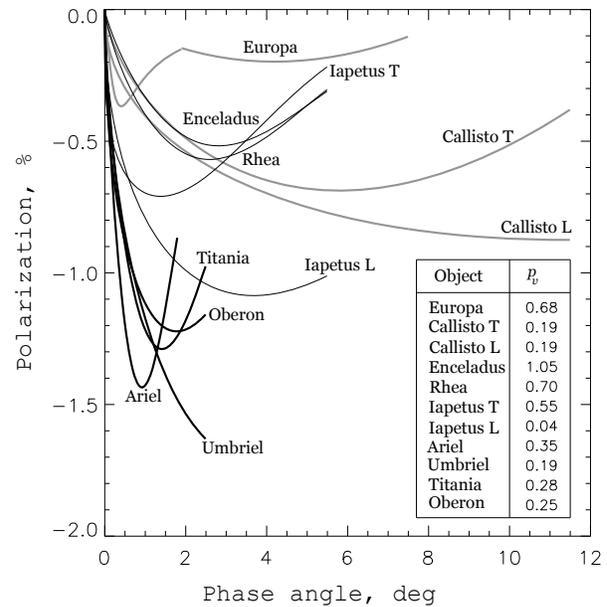


Рис. 5. Сравнение фазовых зависимостей поляризации рассеянного излучения спутников Юпитера, Сатурна и Урана. Геометрическое альbedo представленных спутников дается в списке справа. Для иллюстрации локальный минимум поляризации вблизи оппозиции показан для спутника Юпитера Европы [9].

объектов (спутники Сатурна, Урана и транснептуновые объекты), ее постепенное увеличение (по абсолютной величине) и смещение минимума в сторону меньших фазовых углов с расстоянием от Солнца могут свидетельствовать о специфическом составе и/или микроструктуре их поверхностей. В частности, можно ожидать более выраженную эволюцию поверхности благодаря большей инсоляции для объектов, находящихся ближе к Солнцу, и относительно слабой инсоляции примитивных материалов, характерных для внешних областей Солнечной системы. Естественно предположить, что более примитивные и непереработанные материалы будут наблюдаться на поверхностях далеких объектов. Другими словами, состав и структура поверхностей БКТ, скорее всего, должны меняться с расстоянием от Солнца, а не определяться исключительно эволюционной историей этих объектов.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В 2011–2012 гг. с универсальным спектрографом SCORPIO-2, установленном на 6-м телескопе БТА САО РАН, проведены первые спектрополяризметрические и панорамные поляризационные наблюдения ледяных спутников Урана в диапазоне фазовых углов $0^\circ:06-2^\circ:37$. Основным результатом данной работы являются впервые полученные фазовые и долготные зависимости по-

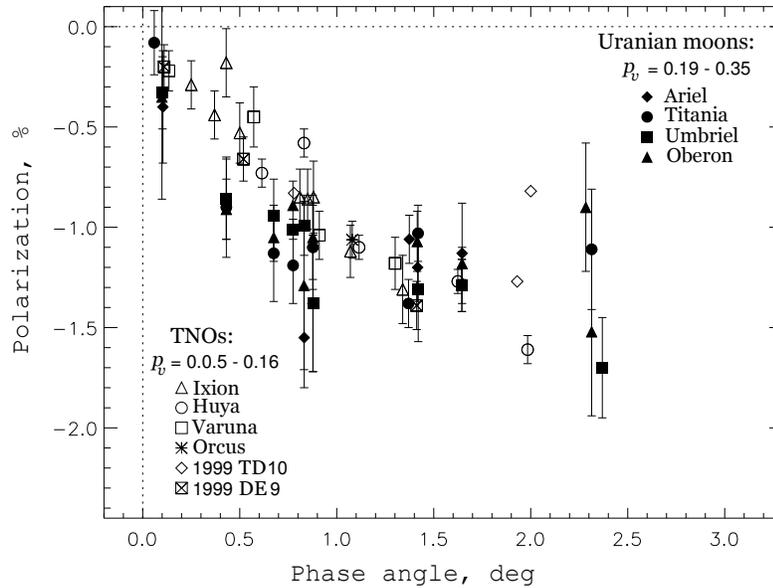


Рис. 6. Сравнение поляризации рассеянного излучения спутников Урана (темные символы) и транснептуновых объектов (открытые символы). Данные для ТНО взяты из [49, 50].

ляризации рассеянного излучения главных спутников Урана. Получены параметры ветви отрицательной поляризации в фильтре V : для Ариэля $P_{\min} \approx -1.4\%$ на фазовом угле $\alpha_{\min} \approx 1^\circ$; для Титании $P_{\min} \approx -1.2\%$, $\alpha_{\min} \approx 1^\circ 4'$; для Оберона $P_{\min} \approx -1.1\%$, $\alpha_{\min} \approx 1^\circ 8'$. Для Умбриэля аппроксимация данных измерений сильно зависит от последних измерений поляризации на фазовом угле $\alpha = 2^\circ 4'$, на котором $P \approx -1.7\%$. Поляриметрические данные, полученные для Ариэля, Титании и Оберона, показывают, что с уменьшением альбедо спутников (соответственно 0.35, 0.28 и 0.25) отрицательные ветви поляризации становятся менее глубокими, а угол α_{\min} смещается в сторону больших фазовых углов, т.е. наблюдается антикорреляция с альбедо. Отметим, что, например, для астероидов наблюдается противоположная зависимость: с уменьшением альбедо P_{\min} увеличивается. Долготная зависимость поляризации спутников с точностью до ошибок наблюдений отсутствует, что свидетельствует об однородности свойств их ведущих и ведомых полушарий. Показано, что поляризация рассеянного излучения спутников Урана гораздо выше (по абсолютной величине) поляризации высокоальбедных спутников Юпитера и Сатурна. Фазовые зависимости поляризации спутников Урана хорошо согласуются с измеренной поляризацией группы малых транснептуновых объектов (Ixion, Huya, Varuna, 1999 DE9 и др.), для которых характерен большой градиент отрицательной поляризации, примерно -1% на градус в диапазоне фазовых углов $0^\circ 1' - 1^\circ$.

БЛАГОДАРНОСТИ

Результаты получены на 6-м телескопе Специальной астрофизической обсерватории РАН при поддержке Министерства науки и образования РФ (госконтракты № 16.552.11.7028, 14.518.11.7070 и 16.518.11.7073). В. К. Розенбуш и Н. Н. Киселев выполняли работу в рамках целевой темы ГАО НАН Украины № 299Т и European COST Action. Авторы благодарны Комитету по тематике больших телескопов (КТБТ) за поддержку программы поляриметрических наблюдений на БТА.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. V. K. Rosenbush, V. V. Avramchuk, A. E. Rosenbush, and M. I. Mishchenko, *Astrophys. J.* **487**, 402 (1997).
2. V. Rosenbush, N. Kiselev, V. Avramchuk, and M. Mishchenko, in *Proc. NATO Advanced Research Workshop on Optics of Cosmic Dust*, Ed. by G. Videen and M. Kocifaj (Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2002), p. 191.
3. V. K. Rosenbush, N. N. Kiselev, V. G. Shevchenko, et al., *Icarus* **178**, 222 (2005).
4. V. K. Rosenbush and N. N. Kiselev, *Icarus* **179**, 490 (2005).
5. V. K. Rosenbush, V. G. Shevchenko, N. N. Kiselev, et al., *Icarus* **201**, 655 (2009).
6. M. I. Mishchenko, *Astrophys. J.* **411**, 351 (1993).
7. A. W. Harris, J. W. Young, L. Contreiras, et al., *Icarus* **81**, 365.
8. V. G. Shevchenko, I. N. Belskaya, and I. A. Tereschenko, *LPI Contribution*, No. 1405, 8105 (2008).

9. M. I. Mishchenko, Y. S. Yatskiv, V. K. Rosenbush, and G. Videen, *Polarimetric Detection, Characterization, and Remote Sensing* (Springer, Berlin, 2011), p. 409.
10. Ю. Г. Шкуратов, Астрон. циркуляр, No. 1400, 3 (1985).
11. B. Hapke, *Theory of Reflectance and Emittance Spectroscopy* (Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1993).
12. B. W. Hapke, *Icarus* **157**, 523 (2002).
13. Yu. G. Shkuratov, K. Muinonen, E. Bowell, et al., *Earth, Moon, Planets* **65**, 201 (1994).
14. M. I. Mishchenko, J.-M. Luck, and Th. M. Nieuwenhuizen, *J. Opt. Soc. America A* **17**, 888 (2000).
15. M. Mishchenko, V. Tishkovets, and P. Litvinov, in *Proc. NATO Advanced Research Workshop on Optics of Cosmic Dust*, Ed. by G. Videen and M. Kocifaj (Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2002), p. 239.
16. M. I. Mishchenko, V. K. Rosenbush, and N. N. Kiselev, *Appl. Opt.* **45**, 4459 (2006).
17. M. I. Mishchenko, V. K. Rosenbush, N. N. Kiselev, et al., *Polarimetric Remote Sensing of Solar System Objects*, (Akadempriodika, Kyiv, 2010).
18. K. Muinonen, *Waves Random Media* **14**, 365 (2004).
19. K. Muinonen, G. Videen, E. Zubko, and Yu. Shkuratov, in *Proc. NATO Advanced Research Workshop on Optics of Cosmic Dust*, Ed. by G. Videen and M. Kocifaj (Kluwer Acad. Publ., Dordrecht, 2002), p. 261.
20. K. Muinonen, J. Tyynela, E. Zubko, and G. Videen, *Earth, Planets, Space* **62**, 47 (2010).
21. K. Muinonen, M. I. Mishchenko, J. M. Dlugach, et al., *Astrophys. J.* **760**, 118 (2012).
22. D. W. Mackowski and M. I. Mishchenko, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* **112**, 2182 (2011).
23. V. Tishkovets, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* **108**, 454 (2007).
24. V. P. Tishkovets, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* **109**, 2665 (2008).
25. V. P. Tishkovets and E. V. Petrova, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* **127**, 192 (2013).
26. R. H. Brown and D. P. Cruikshank, *Icarus* **55**, 83 (1983).
27. E. Karkoschka, *Icarus* **151**, 51 (2001).
28. V. V. Avramchuk, V. K. Rosenbush, and T. P. Bul'ba, *Solar System Research* **41**, 186 (2007).
29. H. Boehnhardt, S. Bagnulo, K. Muinonen, et al., *Astronom. and Astrophys.* **415**, L21, (2004).
30. V. L. Afanasiev and A. V. Moiseev, *Baltic Astron.* **20**, 363 (2011).
31. V. L. Afanasiev and V. R. Amirkhanyan, *Astrophysical Bulletin* **67**, 438 (2012).
32. W. S. Cleveland, *J. Amer. Statist. Assoc.* **74**, 829 (1979).
33. A. F. J. Moffat, *Astronom. and Astrophys.* **3**, 455, (1969).
34. J.-C. Hsu and M. Breger, *Astrophys. J.* **262**, 732 (1982).
35. G. D. Schmidt, R. Elston, and O. L. Lupie, *Astronom. J.* **104**, 1563 (1992).
36. K. Lumme and K. O. Muinonen, *LPI Contribution, No. 810*, 194 (1993).
37. F. Bagenal, T. E. Dowling, and W. B. McKinnon, *Jupiter. The Planet, Satellites and Magnetosphere* (Cambridge University Press, Cambridge, 2004).
38. B. T. Soifer, G. Neugebauer, and K. Matthews, *Icarus* **45**, 612 (1981).
39. J. M. Bauer, T. L. Roush, T. R. Geballe, et al., *Icarus*, **158**, 178 (2002).
40. R. N. Clark and P. G. Lucey, *J. Geophys. Res.* **89**, 6341 (1984).
41. D. P. Cruikshank, R. H. Brown, W. Calvin, et al., *Astrophys. Space Science Library, No. 227*, 579 (1998).
42. B. Hapke, *Icarus* **67**, 264 (1986).
43. M. I. Mishchenko, J. M. Dlugach, Liu Li, et al., *Astrophys. J.* **705**, L118 (2009).
44. M. I. Mishchenko, V. P. Tishkovets, L. D. Travis, et al., *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* **112**, 671 (2011).
45. A. Dollfus and B. Zellner, in *Asteroids*, Ed. by T. Gehrels (University of Arizona Press, Tucson, 1979), p. 170.
46. J. M. Moore, C. R. Chapman, E. B. Bierhaus, et al., in *Jupiter: The Planet, Satellites and Magnetosphere*, Ed. by F. Bagenal, T. E. Dowling and W. B. McKinnon (Cambridge University Press, Cambridge, 2004), p. 397.
47. B. W. Hapke, R. M. Nelson, W. Smythe, and K. Mannatt, *LPI Contribution, No. 1391*, 1328 (2008).
48. S. Bagnulo, I. Belskaya, K. Muinonen, et al., *Astronom. and Astrophys.* **491**, L33 (2008).
49. S. Bagnulo, I. Belskaya, H. Boehnhardt, et al., *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* **112**, 2059 (2011).
50. I. N. Belskaya, S. Bagnulo, A. Stinson, et al., *Astronom. and Astrophys.* **547**, A101 (2012).

Polarimetry of Major Uranian Moons at the 6-m Telescope

V. L. Afanasiev, V. K. Rosenbush, and N. N. Kiselev

We present the results of polarimetric observations of the icy moons of Uranus (Ariel, Titania, Oberon, and Umbriel) performed at the 6-m BTA telescope of the SAO RAS with the SCORPIO-2 focal reducer within the phase angle range of $0^{\circ}06' - 2^{\circ}37'$. The parameters of the negative polarization branch (referred to the scattering plane) are obtained in the V filter: for Ariel the maximum branch depth of $P_{\min} \approx -1.4\%$ is reached at the phase angle of $\alpha_{\min} \approx 1^{\circ}$; for Titania $P_{\min} \approx -1.2\%$, $\alpha_{\min} \approx 1^{\circ}4'$; for Oberon $P_{\min} \approx -1.1\%$, $\alpha_{\min} \approx 1^{\circ}8'$. For Umbriel the polarization minimum was not reached: for the last measurement point at $\alpha_{\min} = 2^{\circ}4'$, polarization amounts to -1.7% . The declining P_{\min} and shifting α_{\min} towards larger phase angles correlate with a decrease of the geometric albedo of the Uranian moons. There is no longitudinal dependence of polarization for the moons within the observational errors which indicates a similarity in the physical properties of the leading and trailing hemispheres. The phase-angle dependences of polarization for the major moons of Uranus are quite close to those observed in the group of small trans-Neptunian objects (Ixion, Huya, Varuna, 1999 DE9, etc.), which are characterized by a large gradient of negative polarization, about -1% per degree in the phase-angle range of $0^{\circ}1' - 1^{\circ}$.

Keywords: *planets and satellites: surfaces—planets and satellites: individual: Ariel, Oberon, Titania, Umbriel*