

УДК 523.4—357

## Лабораторные исследования отрицательной поляризации света, рассеянного поверхностями со сложной структурой. Некоторые следствия для безатмосферных космических тел. I

Ю. Г. Шкуратов, Л. А. Акимов

Приводится описание лабораторного фотометра-поляриметра Астрономической обсерватории ХГУ и методики измерений. Представлены данные по фазовой зависимости поляризации и деполяризации образцов, которые могут быть использованы в практике лабораторной поляриметрии как эталоны для определения инструментальной поляризации. Представлены результаты измерений природных и техногенных образцов, обнаруживающих необычную, с точки зрения планетологических данных, отрицательную поляризацию.

*LABORATORY STUDIES OF NEGATIVE POLARIZATION OF LIGHT SCATTERED BY COMPLEX STRUCTURE SURFACES. SOME SEQUENCES FOR ATMOSPHERELESS COSMIC BODIES. I., by Shkuratov Yu. G., Akimov L. A. — The laboratory photopolarimeter and measurement procedure are described. Phase dependence of polarization and depolarization degree for some natural and artificial samples is presented.*

При работе над обзором современных проблем поляриметрии безатмосферных космических тел [5] мы столкнулись с трудностями в подборе материалов, касающихся исследований отрицательной поляризации. По многим интересным вопросам, таким как зависимость параметров отрицательной поляризации от размеров частиц, условий освещения и наблюдения, способа приготовления образца, выбора спектрального диапазона измерений и т. д., данные практически отсутствовали или были противоречивы. С целью более детального изучения отрицательной поляризации нами начаты лабораторные эксперименты, первые результаты которых уже частично опубликованы [1, 5]. Данная работа является продолжением этих исследований. Ее результаты основаны на использовании фотометра-поляриметра АО ХГУ, который претерпел в последнее время ряд изменений. В работе приведено описание этого прибора, методики измерений и контроля возможных ошибок, (ч. I), а также описание и интерпретация результатов поляриметрии техногенных (ч. II) и природных (ч. III) образцов.

**Описание поляриметра.** Лабораторный фотометр-поляриметр разработан и создан в АО ХГУ Л. А. Акимовым. Методика измерений, вопросы контроля и учета инструментальной поляризации разрабатывались авторами данной статьи совместно. На протяжении ряда лет прибор и методика измерений совершенствовались, повышалась надежность измерений. Ниже мы представим описание последнего варианта фотометра-поляриметра.

Прибор ориентирован на имитацию условий освещения и наблюдения участков лунной поверхности: угол визирования фиксирован, а изменение угла фазы происходит за счет изменения угла падения. Конструктивно прибор выполнен в виде двух штанг (штанги приемника и осветителя), способных вращаться в одной плоскости вокруг одной оси, проходящей по поверхности исследуемого образца. Перейдем к описанию оптической схемы прибора (рис. 1). Источник света (1) — лампа накаливания, питаемая стабилизированным напряжением. Оптическая система (2) формирует пучок с расходимостью  $30'$ , который имитирует солнечное освещение. Имеется призма полного внутреннего отражения (3) и компенсатор паразитной поляризации (4) источника света (две плоскопараллельные пластины, наклон нормалей которых к лучам можно плавно изменять в широких пределах). Шкалы (5) и (6) позволяют производить отсчеты углов падения или угла фазы с ошибкой фиксации не более  $0.2^\circ$ . Углы фиксируются вручную. Шаг отсчетов произвольный. В наших измерениях мы чаще всего использовали шаг 2, 3 и  $5^\circ$ , в зависимости от необходимости детализировать ту или иную особен-

ность поведения измеряемых оптических параметров. Минимальный угол фазы, достижимый в этом варианте поляриметра, составляет  $2^\circ$ . В держателе образцов (7), который может вращаться вокруг оси, перпендикулярной плоскости рассеяния, предусмотрено отверстие для пропускания лучей при угле фазы  $180^\circ$ . Обойма для смешанных светофильтров (8) установлена перед объективом (9). Он формирует изображение освещенной части образца (размер которой может изменяться от 3 до 15 мм), и прилегающей неосвещенной окрестности (размером 20 мм), задаваемой диафрагмой (11).

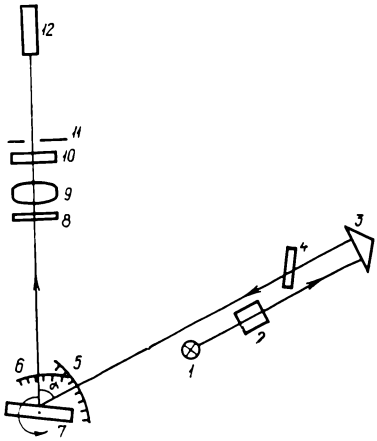


Рис. 1. Оптическая схема фото-поляриметра

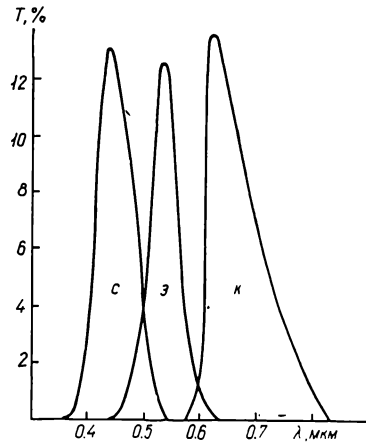


Рис. 2. Спектральные кривые реакции поляриметра

Измерения проводятся в затемненном помещении. В качестве анализатора мы используем стандартный пленочный поляроид ПФ-42 (10), положение оси которого изменяется с помощью электродвигателя. Светоприемником служит ФЭУ-69 (12). Линза Фабри в оптической схеме отсутствует, так как фотометр-поляриметр предназначен для измерений образцов с однородной по альбедо поверхностью.

Поляриметр измеряет световой поток при четырех положениях оси анализатора: в плоскости рассеяния, в перпендикулярной плоскости и двух плоскостях, ориентированных под углом  $45^\circ$  к плоскости рассеяния. Таким образом, мы можем определять три параметра Стокса (интенсивность, степень и положение плоскости поляризации). Полный цикл измерений (4 отсчета) выполняется за 4 с. Длительность одного отсчета 0.1 с. Сигнал (величина светового потока в относительных единицах) измеряется цифровым вольтметром и выводится на цифрочитающее устройство. Затем данные обрабатываются. На этом этапе выполняется учет инструментальной поляризации. При каждом фиксированном значении фазового угла проводится несколько циклов измерений, результаты которых усредняются.

Поляриметрия образцов выполняется в трех участках спектра (красный, зеленый, синий). Кривые реакции (учтены пропускание светофильтров, включая поляроид, и спектральная чувствительность ФЭУ) приведены на рис. 2. Исследована также реакция используемого поляроида на полностью (100 %) поляризованный свет. В синей и зеленой частях спектра степень поляризации оказалась равной 97.2 и 98 % соответственно, а в красной — 79.9 %. На основании этих исследований вносились поправки в измерения.

Изучение точностных характеристик прибора показало следующее. Погрешности, вызванные шумом светоприемника и электронной аппаратуры, оказались не более 0.05 %. Погрешности, вызванные влиянием отдельных зерен образца при изменении условий освещения и наблюдения, как правило, меньше 0.1 %, если отношение размера освещенной части образца к максимальному размеру зерен (частиц) не менее 100. Основным источником погрешностей является инструментальная поляризация, куда мы включаем и паразитную поляризацию осветителя.

**Учет инструментальной поляризации.** Из практики лабораторной поляриметрии известно, что осветительные устройства в зависимости от используемых оптических элементов и типа лампы могут иметь собственную поляризацию. Даже в случае отсутствия

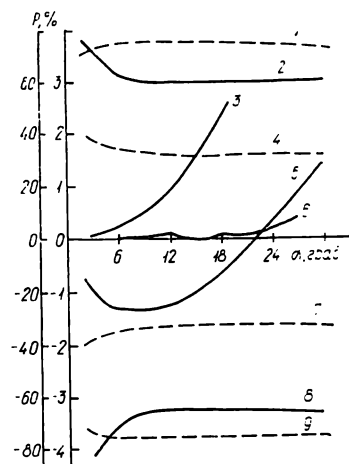
элементов, расположенных под углом к световым лучам, эта поляризация может достигать нескольких процентов. Наиболее вероятными причинами поляризации света лампы являются: изогнутость поверхности ее баллона; напряжения, возникающие в баллоне при нагреве, неравномерность оседания копоти с внутренней стороны баллона при выгорании нити (последнее относится к некоторым типам ламп накаливания) и т. д. Известно также, что ФЭУ (в особенности ФЭУ со слюдяными окнами) обладают слабым поляризующим действием: эффект может достигать нескольких десятых долей процента. Для измерения и последующего учета паразитной поляризации, связанной с ФЭУ, необходимо осветить приемное устройство неполяризованным (естественным) светом. Это может быть прямой солнечный свет, пропущенный через неполяризующие ослабители, свет свечи или свет звезд с нулевой поляризацией [6]. Когда инструментальная поляризация приемного устройства определена, можно определить и компенсировать поляризацию лабораторного источника света.

Мы решали задачу учета инструментальной поляризации несколько иначе. Вначале путем вращения ФЭУ (12) (рис. 1) грубо оценивалась поляризация, вносимая его окном. При этом поляриметр работал в режиме «на просвет», т. е. угол фазы равнялся  $180^\circ$ . Свет от источника через ослабитель (светофильтр НС-11, установленный с точностью  $0.5^\circ$  перпендикулярно оптической оси) направлялся прямо в приемное устройство. Инструментальная поляризация, связанная с ФЭУ, оказалась менее  $0.5\%$ . Затем включался двигатель вращения анализатора и измерялась поляризация, вносимая осветительным устройством. Она составляла примерно  $3\%$ . После этого в оптическую систему вводились компенсаторы (4) (рис. 1) и поляризация источника минимизировалась (она не превышала  $0.5\%$ ). Затем наступала стадия тонкой наладки: более точно определялась поляризация, связанная с приемным устройством и более тщательно компенсировалась поляризация источника света. На практике это проводилось так. Устанавливался угол фазы  $2^\circ$ . В качестве образца, сильно деполаризующего свет, использовалась вата. Коэффициент деполаризации  $R$  ваты предварительно измерялся, он оказался равным  $3\%$  (согласно [4],  $R = P_{\text{рас}}/P_{\text{пад}}$ , где  $P_{\text{рас}}$  и  $P_{\text{пад}}$  — степень поляризации соответственно рассеянного и падающего излучения). Свет от источника после деполаризации имел остаточную поляризацию всего несколько сотых долей процента. Это позволило примерно с такой же погрешностью определить поляризацию, вносимую приемным устройством. Затем вновь устанавливался угол фазы  $180^\circ$  и выполнялась более тонкая компенсация паразитной поляризации источника света. Остаточная поляризация источника света, составляющая  $0.1$ — $0.2\%$ , учитывалась при обработке данных. При этом принималось во внимание деполаризующее действие измеряемых образцов, которое определялось либо путем непосредственных измерений (на осветительном устройстве устанавливался поляризатор), либо путем вычислений по формуле  $R = 0.05/A$ , которая, как показал анализ наших данных и данных измерений [4], применительно к диэлектрическим образцам, неплохо описывает корреляционную зависимость между альбедо ( $A$ ) и коэффициентом деполаризации ( $R$ ). Важно отметить, что все описанные действия при определении погрешностей выполнялись заново при изменении спектрального диапазона измерений, так как инструментальная поляризация заметно зависит от длины световой волны. Достигнутая точность поляриметрии образцов на нашем поляриметре была не ниже  $0.1\%$ . Подтверждением этому является сходимость (с погрешностью не более  $0.1\%$ ) различных серий измерений одних и тех же образцов. При выполнении измерений разных серий поляриметр юстировался и настраивался заново.

**Проблема стандартов в лабораторной поляриметрии.** Эта проблема имеет два важных аспекта. Первый из них связан с давно назревшей необходимостью приведения в единую систему данных измерений различных авторов. Второй — с дополнительным контролем точностных характеристик одного и того же поляриметра при сопоставлении различных серий измерений. Основные требования к стандартным образцам следующие. Необходимо, чтобы образцы были легко доступны, причем их характеристики должны быть по возможности идентичны. В наборе стандартных образцов необходимо иметь материалы, деполаризующие свет в минимальной и максимальной степенях. Существенно также, чтобы эти образцы не давали отрицательной поляризации. Мы предлагаем использовать для целей стандартизации два образца. Первый отличный деполаризатор — обычная вата. Для нее фазовая зависимость степени поляризации и деполаризации приведена на рис. 3; как видно из него, вата не обнаруживает никаких признаков отрицательной поляризации. Ее деполаризация в интервале фаз  $0$ — $30^\circ$  практически по-

стоянна и составляет 3%. С помощью этого образца можно эффективно контролировать паразитную поляризацию приемника излучения. Вторым образцом — черное матовое стекло. Матовые стекла отличаются хорошей воспроизводимостью характеристик поверхности. Согласно [2], при шлифовке стекла угол при вершине выступов и впадин практически не зависит от зернистости абразива и составляет около  $120^\circ$ . С повышением прочности стекла этот угол несколько увеличивается. Отношение глубины нарушенного слоя (глубина микротрещин) к высоте рельефа при шлифовке абразивом ( $\sim 4$ ) не зависит от марки стекла и зернистости абразива. Фазовые кривые поляризации и деполяризации черного матового стекла приведены на рис. 3. Поверхность этого образца обрабатывалась абразивом с размером зерен около 30 мкм. Как видно из рис. 3, черное матовое стекло не имеет отрицательной поляризации. Поверхность такого

Рис. 3. Фазовые кривые поляризации и деполяризации возможных эталонных поляриметрических образцов и кусочка метеорита Каинсаз. Пунктир — кривые, которым соответствует внешняя шкала по оси  $P$ ; сплошная линия — внутренняя шкала. Кривые 1, 9 — степень деполяризации для черного матового стекла; 4, 7 — для кусочка метеорита Каинсаз; 2, 8 — для ваты. Кривые 3, 5 и 6 — степень поляризации соответственно для черного матового стекла, метеорита Каинсаз и ваты. Зависимости получены в красных лучах. Размер освещенной части образца — около 5 мм



стекла можно использовать для определения паразитной поляризации источника света (естественно, с поправкой за деполяризацию). Для сравнения на рис. 3 приведены фазовые зависимости поляризации и деполяризации природного образца — кусочка метеорита Каинсаз, который имеет выраженную ветвь отрицательной поляризации. С точки зрения стандартизации измерений очень важным обстоятельством является то, что условия освещения и наблюдения образцов должны быть одинаковы. Вопрос о влиянии этих условий мы рассмотрим во второй части работы. В дальнейшем, кроме специально оговоренных случаев, все приводимые результаты соответствуют ориентации нормали образца по линии визирования (угол визирования равен нулю, а изменение угла падения лучей задает изменение фазового угла).

**Представление поляриметрических данных.** В планетных исследованиях определение степени поляризации  $P$  несколько отличается от общепринятого [4]. В рамках общепринятого определения величина  $P$  всегда положительна, а ситуация типа инверсии соответствует скачку угла ориентации плоскости поляризации на  $90^\circ$ . Для примера на рис. 4 приведена фазовая зависимость положения плоскости и степени поляризации для двух порошкообразных образцов оптического стекла ЗС-3, размеры частиц которых составляют 250 и 1.5 мкм. Крупнозернистый образец, в отличие от мелкозернистого, не имеет отрицательной поляризации. Это видно из рис. 4, а. Степень поляризации для мелкозернистого образца имеет минимум ( $P \approx 0$ ) при угле инверсии  $\alpha_0 \approx 19^\circ$  (рис. 4, б). Результаты измерений упомянутых образцов в традиционном для планетологии представлении приведены на рис. 4, в. Точки, соответствующие мелкозернистому образцу (лежащие левее угла инверсии на рис. 4, б), зеркально отобразились относительно оси  $\alpha$  и образовали отрицательную ветвь на рис. 4, в. Точки, соответствующие крупнозернистому образцу при малых  $\alpha$ , располагаются на рис. 4, в ближе к оси  $\alpha$ , чем на рис. 4, б вследствие разброса значений угла ориентации плоскости поляризации (рис. 4, а). Этот разброс вызван погрешностями, связанными с большим размером частиц образца. Представление данных в виде, аналогичном рис. 4, в, экономичнее (один график вместо двух), поэтому в дальнейшем мы будем использовать в основном это представление.

**Необычные фазовые кривые отрицательной поляризации света.** При исследовании отрицательной поляризации нескольких сотен образцов различного происхождения (природных и техногенных) мы задались целью отыскать материалы, имеющие экстремаль-

ные значения параметров отрицательной поляризации  $P_{\min}$  и  $\alpha_{\text{inv}}$ . В настоящий момент с этой точки зрения нам представляются интересными следующие образцы: 1) толстый слой копоти MgO, образованный при сжигании опилок Mg; 2) копоть, образующаяся при сжигании резины; 3) порошок  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (крокус) и 4) природный PbS (галенит). Соответствующие кривые  $P(\alpha)$  для этих материалов приведены на рис. 5. Копоть Mg обнаруживает резко несимметричную фазовую кривую. Ее невозможно аппроксимировать параболой. Отношение  $\alpha_{\text{inv}}/\alpha_{\text{min}}$  составляет около 15. Копоть резины характеризуется малым  $\alpha_{\text{inv}}$  (около  $11^\circ$ ) при значительной (до 1.1%) величине  $P_{\min}$ . Порошок

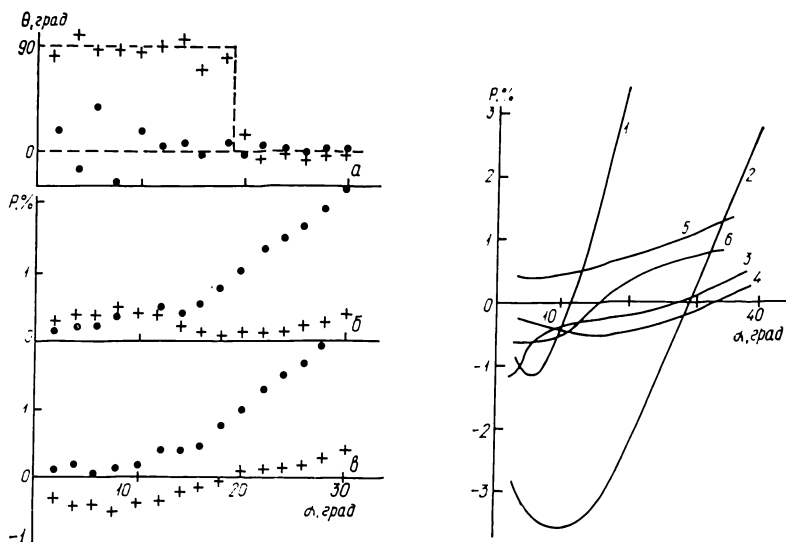


Рис. 4. Фазовые зависимости положения плоскости поляризации (а) и степени поляризации в общепринятом определении (б) и в определении, используемом в планетологии (в) для порошкообразных образцов стекла ЗС-3 с размером частиц 1.5 мкм (крестики) и 250 мкм (точки). Зависимости получены в красных лучах. Размер освещенной части образца около 7 мм

Рис. 5. Фазовые зависимости степени поляризации некоторых образцов: 1 — копоть резины, 2 — галенит, 3 — копоть магния, 4 — крокус, 5 — гипс-селенит, при ориентации волокон перпендикулярно плоскости рассеяния, 6 — гипс-селенит, при ориентации волокон параллельно плоскости рассеяния. Измерения выполнены в красных лучах. Размер освещенной части образца — около 7 мм

$\text{Fe}_2\text{O}_3$  среди диэлектрических материалов обнаруживает необычно большое значение  $\alpha_{\text{inv}}$  (причем только в красных лучах), свойственное порошкам металлов. При этом величина  $|P_{\min}|$  — всего около 0.5%. Пока нам удалось найти лишь одно вещество, обладающее  $|P_{\min}| \approx 4\%$ , — сернистый свинец (в природе галенит).

Представляет интерес сравнительное описание указанных «экстремальных» образцов. Копоть MgO ( $n=1.7$ , согласно [3]) представляет собой нагромождение слоев прозрачных частиц MgO примерно кубической формы, размером несколько десятых долей микрометра. Исследования резиновой копоти (в основном аморфный углерод) под оптическим микроскопом показали, что размер частиц этого образца по крайней мере не больше 1 мкм. Описываемые образцы имеют не только экстремальные поляриметрические свойства, они также экстремальны по альбедо. Толстый слой MgO используется, как известно, в качестве спектрофотометрического стандарта. Он обладает очень высоким альбедо (до 96%). Альбедо резиновой копоти оказалось примерно 2%. Оба образца почти нейтральны по спектру. Крокус применяется для полировки оптических изделий и в качестве красителя. Размер его частиц не бывает больше нескольких микрометров. Крокус имеет в красной части спектра довольно высокое альбедо (примерно 25%), при этом в синей части его альбедо всего около 4%. Особенностью кристаллов галенита является их весьма большая действительная часть коэффициента преломления. Согласно [3],  $n \approx 3.5$ . Материалы с таким  $n$  даже при очень небольшой мнимой части имеют высокое альбедо и металлический блеск (галенит еще называют свинцовым блеском). Можно предположить, что и другие соединения свинца, например PbTe (в приро-

де алтант), обладающие высоким  $n$ , в видимой части спектра также имеют большие значения  $P_{\text{min}}$ . Исследование галенита (скола куска породы) под оптическим микроскопом показало сложную зернистую поверхность со множеством блестящих микрограней, часть из которых имели размеры порядка длины световой волны, что было видно по дифракционным ореолам вокруг блестящих центров. Интересна фазовая кривая поляризации еще одного природного образца — кусочка гипса-селенита, имеющего ярко выраженную волокнистую структуру. На вид это непрозрачный светлый образец с желтоватым оттенком. Поляризация его заметно зависит от ориентации волокон относительно плоскости рассеяния (рис. 5, кривые 5 и 6). Когда волокна перпендикулярны плоскости рассеяния, даже при малых фазовых углах (возможно, и при  $\alpha=0$ ) наблюдается положительная поляризация. И наоборот — при параллельной ориентации наблюдается отрицательная поляризация. Аналогичное влияние анизотропии образца на параметры поляризации обнаружено для техногенных образцов [6].

**Заключение.** Результаты измерений, приведенные в этой части, носят лишь иллюстративный характер. Для того чтобы сделать уверенные заключения о природе отрицательной поляризации, необходимо анализировать данные значительно более обширных измерений, выполняемых по целевым программам. Решению этой задачи посвящены следующие части этой работы. Однако уже сейчас мы приходим к выводу, что в возникновении отрицательной поляризации существенную роль играют частицы (неоднородности) порядка длины световой волны. Подтверждением этого являются данные, представленные на рис. 4 для двух фракций (1.5 и 250 мкм) стекла 3С-3. Таким образом, отрицательная поляризация, по крайней мере частично, обусловлена дифракционными явлениями и не может быть полностью объяснена в рамках геометрической оптики. Такой же вывод сделан в [6].

Авторы благодарят Н. П. Станкевич, Л. Я. Мелкумову и Т. Б. Богданову за большую помощь, оказанную при выполнении этой части работы.

1. *Акимов Л. А., Тишковец В. П., Шкуратов Ю. Г.* Экспериментальное моделирование поляризующих свойств поверхности безатмосферных космических тел при малых углах фазы // Фотометрические и поляриметрические исследования небесных тел / Под ред. А. В. Мороженко. — Киев : Наук. думка, 1985. — С. 42—47.
2. *Бубис И. Я., Вейденбах В. А., Духопел И. Н. и др.* Справочник технолога-оптика. — Л. : Машиностроение, 1983. — 414 с.
3. *Воронкова Е. М., Гречушников Б. Н., Дистлер Г. И., Петров И. П.* Оптические материалы для инфракрасной техники. — М. : Наука, 1965. — 335 с.
4. *Дольфус А.* Исследования поляризации планет // Планеты и спутники / Под ред. Г. Койпера, Б. Миддлхерст. — М. : Изд-во иностр. лит., 1963. — С. 306—352.
5. *Шкуратов Ю. Г., Акимов Л. А., Тишковец В. П.* Современные проблемы поляриметрии твердых поверхностей космических тел // Астрон. вестн. — 1984. — № 3. — С. 163—178.
6. *Geake J., Geake M., Zellner B.* Experiments to test theoretical models of the polarization of light by rough surface // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. — 1984. — 210, N 1. — P. 89—112.

Астрон. обсерватория Харьков. ун-та  
им. А. М. Горького

Поступила в редакцию  
12.06.86