

УДК 523.4

ХАРАКТЕРИСТИКИ СВЕТОРАССЕЯНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ, СОСТОЯЩИХ ИЗ СФЕРИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ, ПРИ МАЛЫХ УГЛАХ ФАЗЫ

© 2001 г. А. А. Овчаренко*, Ю. Г. Шкуратов*, Р. М. Нельсон**

**Астрономическая обсерватория харьковского государственного университета, Украина*

***Лаборатория реактивного движения НАСА, США*

Поступила в редакцию 28.06.2000. После исправления 17.11.2000 г.

Представлены результаты измерений фазовых зависимостей яркости, поляризационных и деполяризационных характеристик поверхностей, состоящих из сферических частиц стекла, в диапазоне углов фазы $0.1\text{--}5.0^\circ$. Измерения проведены с помощью лабораторного фотометра-поляриметра Харьковской астрономической обсерватории и фотометра Лаборатории реактивного движения НАСА США. Оптически толстый слой шариков прозрачного стекла со средним размером около 57 мкм с показателем преломления 1.44 обнаруживает сильный оппозитивный эффект, связанный с одночастичным рассеянием. Вклад межчастичного рассеяния практически не зависит от фазового угла. При угле 0.4° шарики обнаруживают кольцо глории, которое проявляет себя в фазовом ходе всех исследованных характеристик. В измерениях с монохроматическим источником излучения на зависимостях видны слабые детали, наличие которых подтверждается расчетами по формулам теории Ми. Необычность поведения фазовых зависимостей отражательной способности, степени поляризации и показателя цвета для слоев сферических частиц можно использовать при поиске мест возможных отложений стеклянных (или ледяных) шариков в реголитах безатмосферных небесных тел.

ВВЕДЕНИЕ

Экспериментальные и теоретические исследования рассеяния света поверхностями, сложенными сферическими частицами, важно для многих целей, в том числе для интерпретации оптических характеристик планетных тел. В частности, экспериментальные данные такого рода необходимы для проверки теоретических моделей рассеяния, которые учитывают взаимодействие частиц среды – именно для систем частиц сферической формы удается наиболее далеко продвинуться в решении задачи дифракции для коллектива электромагнитно связанных частиц (см., например, Брунинг, Ло, 1971; Макковски, 1991).

Особенно интересен случай рассеяния при малых фазовых углах. Он мало исследован, хотя потенциально, с точки зрения оптики планетных реголитов, может иметь важные применения, поскольку многие безатмосферные небесные тела – астероиды, спутники планет – наблюдаются с Земли при малых углах фазы. Как будет показано ниже, некоторые особенности поведения фазовых зависимостей отражательной способности шариков диаметром около 60 мкм при малых фазовых углах могут быть, в принципе, использованы для поиска отложений сферических частиц в реголитах безатмосферных небесных тел. Такие частицы могут об-

разовываться при ударных или вулканических процессах на поверхностях этих тел.

Иллюстрацией того, что реголиты некоторых безатмосферных небесных тел, вероятно, содержат небольшое количество частиц сферической формы, является лунный грунт. В некоторых его пробах найдены шарики оранжевого и зеленого цвета, предположительно вулканического происхождения. Их размер составляет около 40–50 мкм (см., например, Макки и др., 1991). Даже сравнительно небольшое количество полупрозрачных сферических частиц (несколько процентов от общей массы) может вносить обнаружимый вклад в формирование фазового хода яркости, степени поляризации и показателя цвета лунной поверхности при малых углах фазы (Акимов и др.; 1980, Шкуратов и др., 1996).

В настоящей работе мы представляем результаты лабораторных измерений фазовых зависимостей яркости и поляризационных характеристик поверхности, составленной стеклянными частицами сферической формы, в диапазоне углов фазы $0.1\text{--}5.0^\circ$. Измерения проводились на двух приборах: лабораторном фотометре-поляриметре малых фазовых углов Астрономической обсерватории Харьковского университета и фотометре Лаборатории реактивного движения (JPL) НАСА США. В нескольких случаях с помощью

этих двух разных инструментов удалось измерить одни и те же образцы. Такое дублирование повышает надежность результатов.

ПРИБОРЫ И ОБРАЗЦЫ

Фотометр-поляриметр Астрономической обсерватории Харьковского университета позволяет проводить измерения горизонтально расположенных образцов размером 6 см в диапазоне фазовых углов $0.1\text{--}3.5^\circ$. Все результаты, приведенные ниже, получены с помощью этого прибора при эффективной длине волны $\lambda = 0.63$ мкм для стандартной геометрии светорассеяния, когда ось приемника излучения перпендикулярна поверхности образца. В некоторых случаях измерения проводились также при $\lambda = 0.5$ мкм. В качестве источника света использовалась галогенная лампа (некогерентный источник). Более детальное описание прибора, его наладки и исследования точности измерений приведено в работах (Овчаренко, Шкуратов, 2000, Шкуратов, Овчаренко, 1998).

С помощью фотометра Каборатории реактивного движения НАСА США удается проводить фотометрические и поляриметрические измерения образцов в диапазоне углов фаз $0.05\text{--}5.0^\circ$. В качестве источника света здесь используется HeNe лазер, $\lambda = 0.633$ мкм. В оптической системе источника предусмотрена возможность получения как линейно, так и циркулярно поляризованного света. Отметим, что в этом приборе исследуемый образец может вращаться для подавления спекловых флуктуаций. Измерения в неполяризованном свете здесь моделируются двумя сериями измерений, которые проводятся при двух взаимно перпендикулярных положениях плоскости поляризации света, освещающего образец. Детальное описание этого инструмента дано Нельсоном и др. (1998).

Ранее мы уже проводили измерения одних и тех же образцов на обоих приборах. Использовались порошки Al_2O_3 с различными размерами частиц. Измерения показали неплохое согласие данных (Нельсон и др., 1999); это говорит об удовлетворительной работе обоих инструментов.

Для целей данной работы мы использовали образцы, состоящие из шариков прозрачного боросиликатного стекла с показателем преломления 1.44 и средним размером частиц около 57 мкм, а также образец из почти непрозрачных стеклянных шариков размером около 1 мм. С помощью микроскопа для образца из шариков прозрачного боросиликатного стекла было проведено исследование функции распределения части по размерам. Это распределение оказалось довольно узким. Оно близко к нормальному со среднеквадратичным отклонением около 5 мкм. Отметим

также, что частицы этого образца довольно совершенны по форме.

Мы исследовали рассеяние света оптически толстыми слоями порошка изсферических частиц (толщиной 3–4 мм), а также поверхностями, которые мы условно называем монослоями. В последнем случае образец представлял собой темную подложку, покрытую случайно набросанными прозрачными сферическими частицами.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

В этом разделе мы описываем результаты определения фазовых зависимостей оптических характеристик, измеренных либо с помощью двух приборов, либо одним из них. Измерялись следующие параметры: I – отражательная способность, нормированная обычно при 2° , $P = (I_\perp - I_\parallel)/(I_\perp + I_\parallel)$ – степень линейной поляризации, $C(0.63/0.50 \text{ мкм}) = I(0.63 \text{ мкм})/I(0.50 \text{ мкм})$ – показатель цвета, I_\perp/I_\parallel – отношение кросс- и ко-поляризованных компонент рассеянного излучения и I_π/I_π – отношение лево- и право-поляризованных компонент рассеянного света.

На рис. 1 приведены фотометрические данные для одного и того же образца из оптически толстого слоя шариков боросиликатного стекла, измеренного с помощью двух приборов (кривая 1 – харьковские измерения, кривая 2 – измерения Лаборатории реактивного движения). Обе фазовые зависимости отражательной способности неплохо совпадают друг с другом. Они показывают наличие у исследуемого образца весьма выраженного оппозиционного эффекта. Амплитуда эффекта в диапазоне фазовых углов $0\text{--}5^\circ$ достигает почти 2. Альбеда образца при угле фазы 2° относительно фотометрического стандарта Halon (Вейднер, Хсиа, 1981) составляет примерно 110%. Это означает, что оппозиционный эффект образца сферических частиц заметно превышает эффект обратного рассеяния, которым обладает фотометрический стандарт Halon.

Как видно на рис. 1, некоторые детали хорошо повторяются на обеих фазовых зависимостях. Так, хорошо заметна деталь вблизи 0.4° , относящаяся к кольцу глории (показана стрелкой). Ее положение очень чувствительно к длине волны падающего излучения. Это иллюстрирует рис. 2, на котором представлена фазовая зависимость отношения величин отражательной способности образца, измеренных в красных и зеленых лучах, т.е. показателя цвета $C(0.63/0.50 \text{ мкм})$. При углах менее 0.7° наблюдаются сильные осцилляции, обусловленные различием положения и амплитуды кольца глории в разных длинах волн, их величина достигает 10%. Наличие такого эффекта можно использовать для поиска прозрачных сферических частиц в грунте безатмосферных небес-

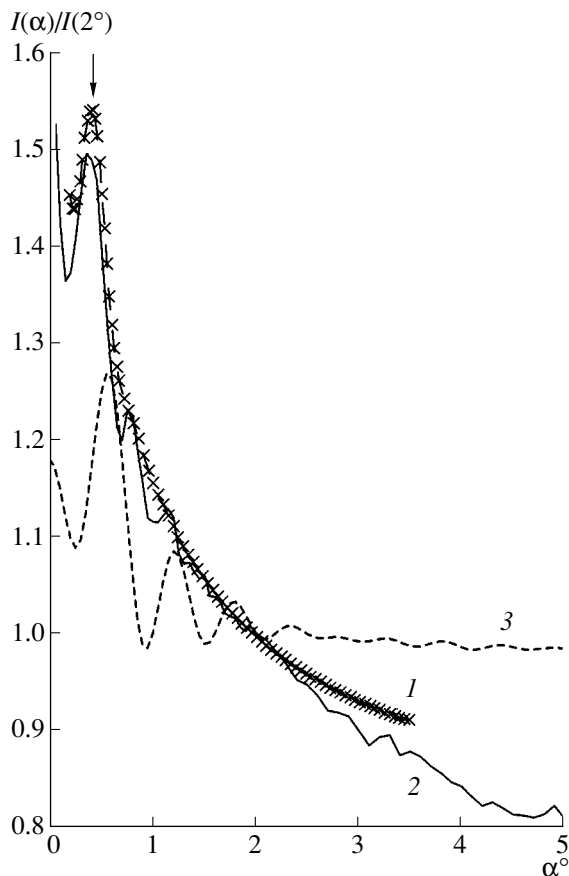


Рис. 1. Нормированные фазовые зависимости отражательной способности оптически толстого слоя шариков боросиликатного стекла, измеренные с помощью фотометра-поляриметра Харьковской обсерватории (1) и фотометра Лаборатории реактивного движения НАСА США (2). Стрелкой показано кольцо глории. Зависимость (3) представляет данные расчетов по формулам теории Ми для шаров с показателем преломления 1.44, с нормальным распределением размеров (среднее 57 мкм, среднеквадратичный разброс около 5 мкм). Для согласования расчетных и экспериментальных результатов, учитывалась деполаризованная составляющая, связанная с межчастичным рассеянием света в оптически толстом слое образца (см. текст).

ных тел с помощью колориметрических измерений. При углах фазы более 0.7° фазовая зависимость показателя цвета почти нейтральна; при этом наблюдаются слабые осцилляции, сглаженные из-за использования некогерентного источника света.

Обращает на себя внимание наличие тонких деталей на фазовой зависимости отражательной способности, полученной с помощью фотометра лаборатории реактивного движения (кривую 2 на рис. 1). Эта тонкая структура хорошо воспроизводится при повторных измерениях. Качественно она подтверждается расчетами, которые были выполнены с помощью формул теории Ми (Бо-

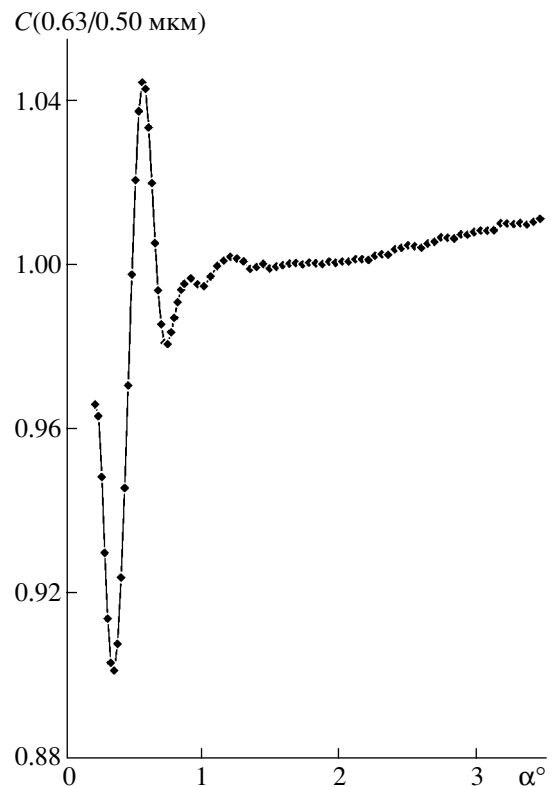


Рис. 2. Фазовая зависимость показателя цвета $C(0.63/0.50 \text{ мкм})$ оптически толстого слоя шариков боросиликатного стекла, измеренная с помощью фотометра-поляриметра Харьковской обсерватории.

рен, Хафмен; 1986) – кривая 3 на рис. 1 (выбор параметров расчетной зависимости описан ниже). Слабые нерегулярности фазовой зависимости яркости сглаживаются в случае измерений с помощью фотометра с ламповым (некогерентным) источником света. Это связано с тем, что тонкая дифракционная структура очень чувствительна к длине волны падающего излучения; при освещении светом в достаточно широком диапазоне спектра происходит усреднение и сглаживание тонких деталей.

Рис. 3 представляет измерения степени линейной поляризации для толстого слоя шариков из боросиликатного стекла. Как и в случае фотометрических исследований, данные, полученные с помощью двух инструментов, неплохо совпадают. При фазовых углах менее 1° наблюдаются сильные колебания степени линейной поляризации, что характерно для колец глории. В частности, при очень малых фазовых углах эта поляризация может быть положительной (до 6%). В то же время, для поверхностей, сложенных частицами произвольной формы и разных размеров, в исследуемом диапазоне фазовых углов наблюдается либо отрицательная поляризация (обычно не более 1%), если образец тонкодисперсный, либо

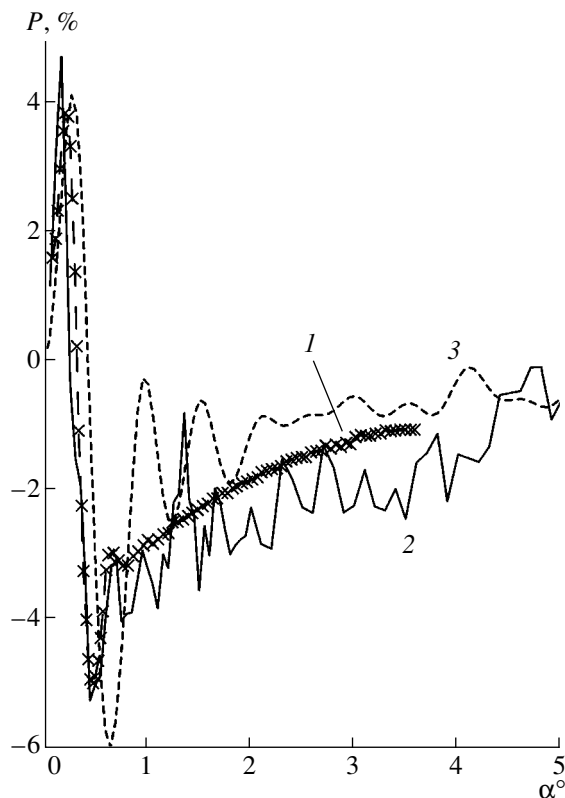


Рис. 3. Сравнение фазовых зависимостей степени линейной поляризации оптически толстого слоя шариков боросиликатного стекла, измеренных с помощью фотометра-поляриметра Харьковской обсерватории (1) и фотометра Лаборатории реактивного движения НАСА США (2). Зависимость, рассчитанная по формулам теории Ми, представлена кривой (3).

нулевой поляриметрический эффект, если образец грубозернистый. Наличие положительного всплеска степени поляризации при очень малых фазовых углах можно использовать для поиска отложений достаточно крупных полупрозрачных сферических частиц на поверхностях безатмосферных небесных тел. Простые оценки, сделанные с использованием приведенных экспериментальных данных, показывают, что при значениях поверхностной концентрации шариков всего в несколько процентов описанная деталь кривой поляризации может быть обнаружена.

При монохроматическом освещении на экспериментальных фазовых зависимостях поляризации при углах больше 1° хорошо заметна тонкая дифракционная структура. В поляризации она проявляется более явно, чем в фазовом ходе интенсивности. Эта структура сглаживается при использовании прибора с некогерентным освещением. То, что такая структура существует, также следует из наших расчетов с помощью формул теории Ми (Борен, Хафмен, 1986) – см. кривую 3 на рис. 3. Эти расчеты аналогичны тем, что были проведе-

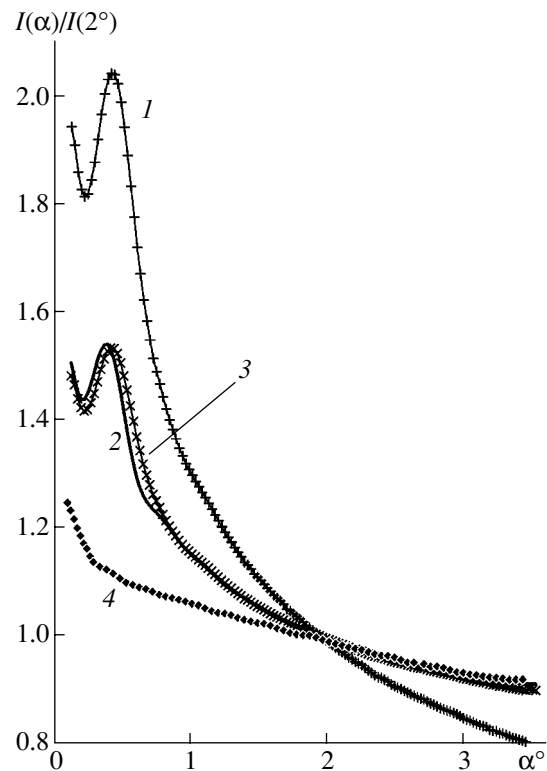


Рис. 4. Нормированные фазовые зависимости отражательной способности образца из шариков боросиликатного стекла: монослой на сажевой подложке (кривая 1), толстый слой шариков (кривая 2). Зависимость 3 представляет учет вклада межчастичного рассеяния (см. текст). Нормированная фазовая зависимость яркости образца из шариков непрозрачного стекла (кривая 4). Измерения выполнены с помощью фотометра-поляриметра Харьковской обсерватории.

ны для построения зависимости 3 на рис. 1. Мы делали расчеты для ансамбля независимых сферических частиц с показателем преломления боросиликатного стекла 1.44 (мнимая часть показателя преломления принималась равной нулю), средним размером частиц 57 мкм и среднеквадратичным разбросом размеров около 5 мкм (эти значения были определены экспериментально, см. выше). Для согласования расчетных и экспериментальных результатов, приближенно учитывалась деполаризованная составляющая, связанная с межчастичным рассеянием света в оптически толстом слое образца. Практически это осуществлялось добавлением подгоночной константы к интенсивности при вычислении степени поляризации. То же самое значение константы использовалось и при построении зависимости 3 на рис. 1. Значение константы было таким, что отношение вкладов межчастичного и одночастичного рассеяния оказалось равным примерно 7.

Измерения, результаты которых представлены на рис. 4 и 5, выполнены с помощью фотометра-поляриметра Харьковской обсерватории. Они также

позволяют сделать оценку вклада межчастичного рассеяния. Здесь приведены, соответственно, нормированные фазовые зависимости отражательной способности и степени линейной поляризации образцов из шариков боросиликатного стекла (толстого слоя и монослоя). Монослой частиц, набросанных на темную подложку имеет более выраженный оппозиционный пик и больший размах колебаний степени поляризации при углах фазы менее 1° (кривые с номером 1) по сравнению с толстым слоем шариков (кривые с номером 2). Монослой частиц покрывает примерно 20–30% площади образца (оценки сделаны с помощью микроскопа). Подложка выбрана темной (сажа) для того, чтобы минимизировать ее вклад в суммарный рассеянный поток.

Подобно тому, как это было сделано применительно к данным на рис. 1 и 3, различия кривых 1 и 2 на рис. 4 и 5 могут быть сведены к минимуму добавлением к интенсивности постоянной величины (одной и той же для фотометрических и поляриметрических графиков), которая в первом приближении описывает межчастичное многократное рассеяние. При этом отношение вкладов межчастичного и одночастичного рассеяния оказалось равным примерно 2, что существенно меньше, чем при аналогичном сравнении расчетных и экспериментальных данных. Это различие, вероятно, связано с тем, что для монослоя частиц, расположенных на сажевой подложке, вклад многократного межчастичного рассеяния не был исключен полностью.

Таким образом, при углах фазы $0\text{--}5^\circ$ для толстого слоя из сферических частиц вклад одночастичного рассеяния довольно заметен – фактически он и формирует наблюдаемый оппозиционный эффект исследуемого образца. Несколько неожиданным оказалось то, что удовлетворительное совмещение графиков, относящихся к монослою и толстому слою частиц, удалось провести только добавлением константы, а не более сложной зависимости от фазового угла (например, имеющей оппозиционный пик). Это говорит о том, что в исследуемом диапазоне фазовых углов многократное межчастичное рассеяние, по-видимому, не дает заметного вклада в когерентное усиление обратного рассеяния. Возможно, что пик, создаваемый межчастичным рассеянием, оказывается слишком узким по сравнению с используемыми апертурами инструментов.

На рис. 4 приведена также фазовая зависимость нормированной отражательной способности образца из шариков диаметром около 1 мм почти непрозрачного стекла (измерения выполнены с помощью фотометра-поляриметра Харьковской обсерватории). Эта зависимость почти линейна при фазовых углах более 0.5° , что согласуется стеновым механизмом формирования фазовых

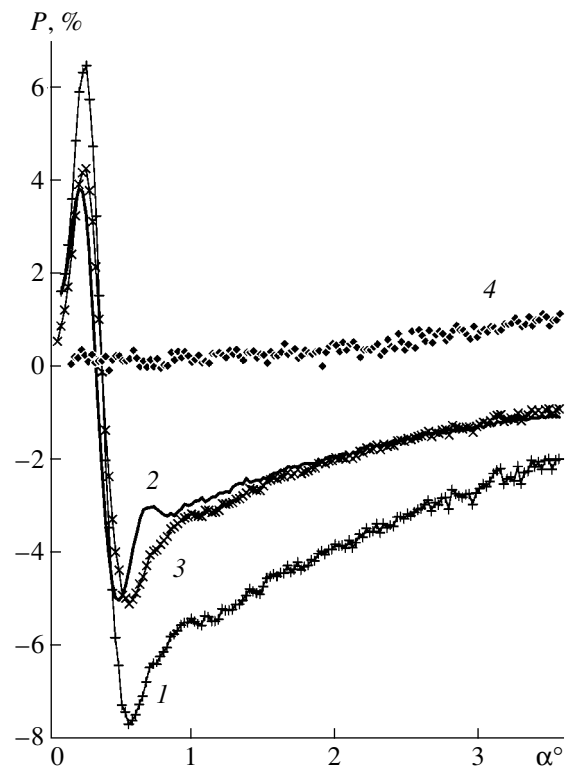


Рис. 5. Фазовые зависимости степени линейной поляризации монослоя на сажевой подложке (кривая 1) и толстого слоя (кривая 2) шариков боросиликатного стекла. Зависимость 3 представляет учет вклада межчастичного рассеяния (см. текст). Степень линейной поляризации для образца из шариков непрозрачного стекла (кривая 4). Измерения выполнены с помощью фотометра-поляриметра Харьковской обсерватории.

зависимостей отражательной способности сред, составленных из непрозрачных частиц (Станкевич и др., 1999). При меньших углах наблюдается резкий рост яркости. Можно было бы предположить, что этот пик сформирован многократным рассеянием между шариками (т.е. обусловлен когерентным усилением обратного рассеяния), однако этому противоречат некоторые обстоятельства. Во-первых, шарики почти непрозрачны (их альбедо около 5%), следовательно вклад многократного рассеяния даже внутри частиц не может быть значительным. Во-вторых, шарики слишком велики, чтобы дать интерференционный пик шириной, заметной в наших экспериментах. Кроме того, на фазовой кривой поляризации (рис. 5, кривая 4) не наблюдается никаких особенностей, которые свидетельствовали бы о наличии рассеяния внутри частиц – в первом приближении зависимость следует формулам Френеля для однократного отражения гладкой поверхностью. Возможно, оппозиционный пик этого образца формируется двукратным френелевским отражением между частицами, которое при столь малых углах фазы

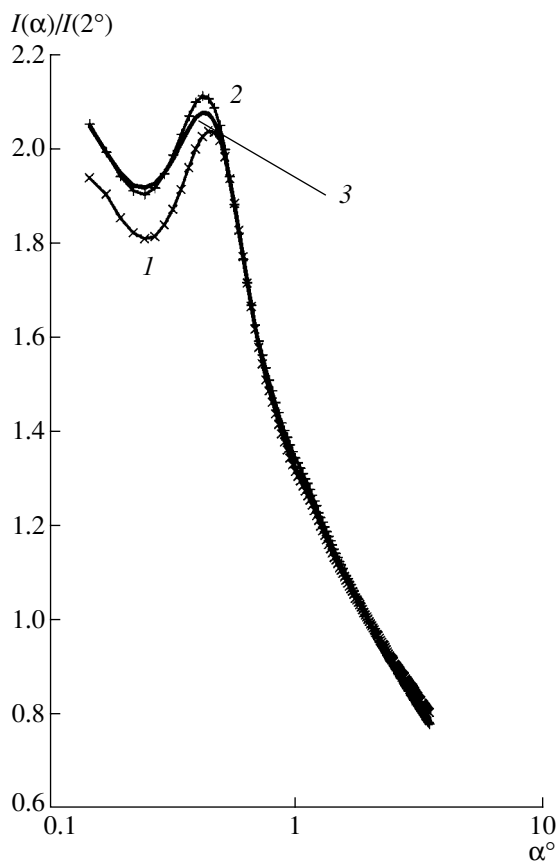


Рис. 6. Нормированные фазовые зависимости отражательной способности образца из шариков боросиликатного стекла, измеренные с помощью фотометра-поляриметра Харьковской обсерватории для разной геометрии светорассеяния. (1) – стандартная геометрия, ось приемника перпендикулярна поверхности образца, (2) – наклон нормали образца в плоскости рассеяния на 30° в направлении, перпендикулярном плоскости рассеяния, (3) – наклон нормали образца в плоскости рассеяния на 30° в сторону от источника света.

может давать усиление обратного рассеяния по принципу углового отражения.

Представляет интерес изучение влияния геометрии светорассеяния на исследуемые характеристики. На рис. 6 приведены нормированные фазовые зависимости отражательной способности образца, состоящего из шариков боросиликатного стекла, которые хаотично расположены монослоем на подложке сажи (этот образец уже описывался выше). Измерения для разной геометрии светорассеяния проведены с помощью фотометра-поляриметра Харьковской астрономической обсерватории. Для наглядного представления данных (чтобы выделить деталь, относящуюся к кольцу глории), ось фазовых углов дана в логарифмическом виде. Кривая 1 на рис. 6 соответствует измерениям при стандартной геометрии светорассеяния, когда нормаль образца направлена вдоль оси приемника света. Кривые 2 и 3 на том же рисунке

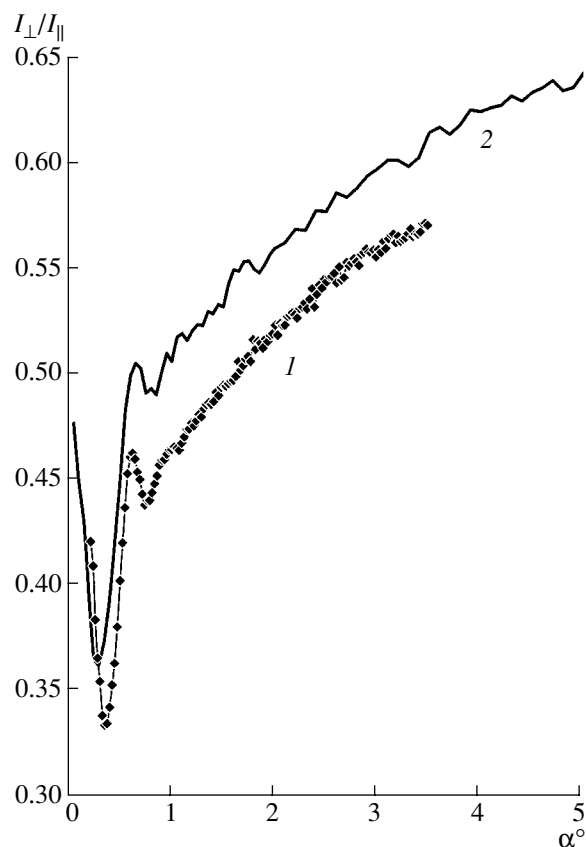


Рис. 7. Фазовые зависимости отношения кросс- и кополяризованных составляющих светового потока, рассеянного образцом из шариков боросиликатного стекла. (1) – измерения с помощью фотометра-поляриметра Харьковской обсерватории; (2) – фотометра Лаборатории реактивного движения НАСА США.

соответствуют случаям, когда нормаль исследуемого образца наклонена, соответственно, на 30° в направлении перпендикулярном плоскости рассеяния и на 30° в плоскости рассеяния в сторону от источника света. Как видно влияние геометрии светорассеяния мало. Оно проявляется в основном в области кольца глории. Хорошо заметно, что при наклонах поверхности образца фазовая зависимость отражательной способности становится чуть более крутой. Аналогичные измерения степени линейной поляризации показали, что зависимость от геометрии светорассеяния в этом случае мала. Это, скорее всего, означает, что в описываемых экспериментах мы фактически наблюдаем особенности фазовой функции одной частицы.

Для многих приложений, например для разделения вкладов различных механизмов формирования фазовых кривых отражательной способности лунного грунта (Хапке и др., 1993), представляет интерес изучение фазовых зависимостей отношений компонент светового потока с проти-

воположными поляризациями при освещении поверхности линейно и циркулярно поляризованным светом. На рис. 7 приведены фазовые зависимости отношения кросс- и ко-поляризованной составляющих светового потока, рассеянного образцом из шариков боросиликатного стекла. Кривые 1 и 2 относятся к измерениям, выполненным соответственно с помощью лабораторного фотометра-поляриметра Харьковской астрономической обсерватории и фотометра Лаборатории реактивного движения. Полученные зависимости очень похожи по форме, хотя смещены друг относительно друга по оси ординат. В измерениях, выполненных с помощью харьковского прибора, относительный вклад кросс-поляризованной (обусловленной многократным рассеянием между частицами) составляющей оказался примерно на 10% ниже, чем в случае измерений другим инструментом. Возможно, это связано с тем, что толщина образца, который использовался в харьковских измерениях, была меньше (около 3–4 мм), чем в случае измерений в Лаборатории реактивного движения (около 1 см). Т.е. мы предполагаем, что в первом случае вклад темной подложки мог несколько гасить многократное рассеяние.

По данным, приведенным на рис. 7, можно приблизительно оценить вклад межчастичной компоненты рассеянного потока относительно одночастичной. В исследуемом диапазоне фазовых углов он оказывается равным примерно 0.5. Этот вклад несколько увеличивается при росте фазового угла. На зависимостях, показанных на рис. 7, хорошо заметна деталь, ассоциирующаяся с кольцом глории вблизи 0.4° . Здесь относительный вклад межчастичного рассеяния резко уменьшается, что вполне понятно, поскольку кольцо глории образуется при одночастичном рассеянии.

На рис. 8 дана фазовая зависимость отношения циркулярно поляризованных составляющих светового потока, рассеянного образцом шариков боросиликатного стекла. Измерения выполнены с помощью фотометра Лаборатории реактивного движения НАСА США. Образец освещался правополяризованным светом. Регистрировались две составляющих интенсивности рассеянного излучения, I_{π} и I_{π} . Первая из них отвечает регистрации правополяризованного света, а вторая – левополяризованного. Так же, как и в случае линейно поляризованного света, на зависимости, показанной на рис. 8, хорошо виден всплеск около 0.4° , относящийся к кольцу глории, здесь относительный вклад одночастичного рассеяния резко возрастает. Отметим, что зависимость отношения циркулярно поляризованных составляющих качественно напоминает фазовый ход показателя цвета, см. рис. 2.

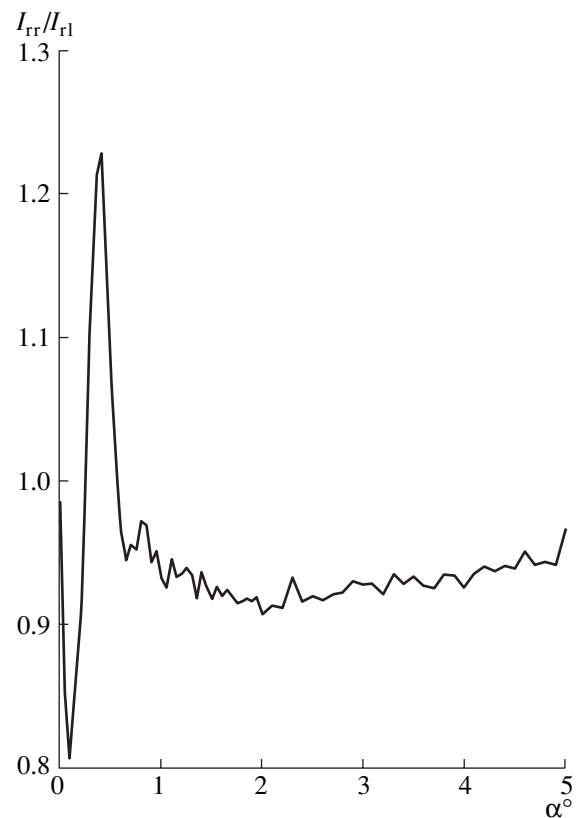


Рис. 8. Фазовая зависимость отношения циркулярно поляризованных составляющих светового потока, рассеянного образцом из шариков боросиликатного стекла. Измерения выполнены с помощью фотометра Лаборатории реактивного движения НАСА США.

Данные измерений деполяризации линейно и циркулярно поляризованного света, приведенные на рис. 7 и 8, свидетельствуют о существенном вкладе одночастичного рассеяния в формирование оптических свойств светлой поверхности, состоящей из сферических частиц.

В конце этого раздела рассмотрим подробнее результаты исследований фазовых зависимостей кросс-поляризованной (измерения линейной поляризации) компоненты для образца из шариков боросиликатного стекла. Как видно из рис. 9, фазовые зависимости этой компоненты показывают деталь, относящуюся к кольцу глории. Хотя эта деталь заметно менее выражена, чем на аналогичных графиках для ко-поляризованной компоненты, она обнаруживается вполне надежно, причем с помощью двух приборов. Странность этого результата заключается в том, что теоретически эта деталь вообще не должна наблюдаться в кросс-поляризованной компоненте. Действительно, при рассеянии поляризованного света на совершенной сфере кросс-поляризованная компонента строго равна нулю; она может возникнуть только при межчастичном рассеянии. С дру-

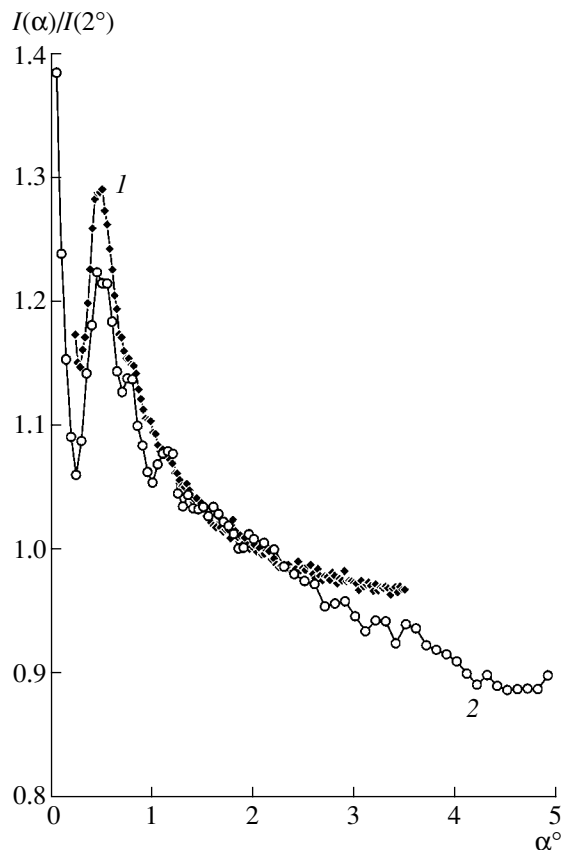


Рис. 9. Фазовые зависимости кросс-поляризованных составляющих светового потока, рассеянного образцом из шариков боросиликатного стекла. (1) – измерения с помощью фотометра-поляриметра Харьковской обсерватории; (2) – фотометра Лаборатории реактивного движения НАСА США.

гой стороны, кольцо глории – деталь, присущая только одночастичному рассеянию; при межчастичном рассеянии эта деталь возникнуть не может. Откуда же в межчастичном рассеянии берется компонента, присущая одночастичному рассеянию? На ошибки измерений это не похоже, поскольку два разных прибора дают близкие результаты. Физическое объяснение этому противоречию можно дать, допустив, что частицы образца имеют не вполне совершенную сферическую поверхность и покрыты некоторым количеством мелких анизотрических рассеивателей (частицами пыли). В этом случае кольцо глории может в принципе быть заметно и в измерениях кросс-поляризованной составляющей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Лабораторные фотометрические и поляризметрические измерения образцов, состоящих из шариков стекла, в диапазоне фазовых углов $0.1\text{--}5.0^\circ$, вы-

полненные с помощью двух различных инструментов показали следующее.

1. Оптически толстый слой из шариков прозрачного стекла обнаруживает сильный оппозитивный эффект и другую структуру фазовых зависимостей, связанную с одночастичным рассеянием. Вклад межчастичного рассеяния в этом случае практически не зависит от фазового угла.

2. Вблизи фазового угла 0.4° шарики прозрачного стекла диаметром около 60 мкм с показателем преломления 1.44 обнаруживают кольцо глории, которое проявляет себя в фазовом ходе всех исследованных характеристик. При измерениях с использованием лазерного источника излучения на зависимостях видна слабая дифракционная структура, наличие которой подтверждается расчетами с использованием формул теории Ми.

3. В области углов $0.1\text{--}5.0^\circ$ геометрия светорассеяния оказывает малое влияние на фазовый ход отражательной способности и степени линейной поляризации для поверхностей, составленных сферическими частицами.

4. Исследования деполаризации линейно и циркулярно поляризованного излучения показало, что, несмотря на высокую отражательную способность исследуемых образцов, вклад одночастичного рассеяния в их фазовую зависимость отражательной способности при малых фазовых углах вполне сопоставим с вкладом некогерентного межчастичного рассеяния.

5. Необычность поведения фазовых зависимостей отражательной способности, степени поляризации и показателя цвета для слоев сферических частиц можно использовать при поиске мест возможных отложений стеклянных (или ледяных) шариков в реголитах безатмосферных небесных тел.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Акимов Л.А., Антипова-Каратаева И.И., Езерский В.И., Шкуратов Ю.Г. Некоторые результаты изучения оптических свойств проб реголита “Луны-24” // Лунный грунт из Моря Кризисов / Под ред. Барсукова В.Л., М.: Наука, 1980. С. 333–341.
- Борен К., Хафмен Д. Поглощение и рассеяние света малыми частицами. М.: Мир, 1986. 660 с.
- Брунинг, Ло (Bruning J.H., Lo Y.T.). Multiple scattering of EM waves by spheres. Part I – Multiple expansion and ray-optical solutions // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1971. V. AP-19. № 3. P. 378–390.
- Вейднер, Хсия (Weidner V., Hsia J.). Reflection properties of pressed polytetrafluoroethylene powder // J. Opt. Soc. Amer. 1981. V. 71. № 7. P. 856–861.
- Макковски (Mackowski D.W.). Analysis of radiative scattering for multiple sphere configurations // Proc. Roy. Soc. Lond. A. 1991 V. 433. P. 599–614.

- Макки и др. (McKay D., Heiken G., Basu A. et al.). The lunar regolith // Lunar source-book. NY: Cambridge Univ. Press, 1991. P. 285–356.
- Нельсон и др. (Nelson R., Hapke B., Smythe W., Horn L.). Phase curves of selected particulate materials: The contribution of coherent backscattering to the opposition surge // Icarus 1998. V. 131. P. 223–230.
- Нельсон и др. (Nelson R., Hapke B., Smyth W. et al.). The reflectance phase curves at very small phase angle: A comparative study of two goniometers // Lunar and Planet. Sci. Conf. 30-th. 1999. Abstract № 2068.
- Овчаренко А.А., Шкуратов Ю.Г. Эффект слабой локализации света при обратном рассеянии поверхностями сложной структуры // Оптика и спектроскопия. 2000. Т. 88. № 2. С. 291–297.
- Станкевич и др. (Stankevich D., Shkuratov Yu., Muinonen K.). Shadow-hiding effect in inhomogeneous and layered particulate media // J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer. 1999. V. 63. № 2–6. P. 445–458.
- Хапке и др. (Hapke B., Nelson R., Smith W.). The opposition effect of the Moon: the contribution of coherent backscatter // Science. 1993. V. 260. P. 509–511.
- Шкуратов Ю.Г., Мелкумова Л.Я., Опанасенко Н.В., Станкевич Д.Г. О фазовой зависимости показателя цвета твердых поверхностей небесных тел // Астрон. вестн. 1996. Т. 30. № 1. С. 82–91.
- Шкуратов Ю.Г., Овчаренко А.А. Оппозиционный эффект: теоретическая модель и лабораторные измерения // Астрон. вестн. 1998. Т. 32. № 4. С. 315–326.