

УДК 523.4

Лабораторные исследования отрицательной поляризации света, рассеянного поверхностями со сложной структурой.

Некоторые следствия для безатмосферных космических тел. II

Ю. Г. Шкуратов, Л. А. Акимов, Н. П. Станкевич, Л. Я. Мелкумова,
И. И. Латынина, Т. Б. Богданова

Представлены результаты поляриметрии при малых углах фазы для различных образцов техногенного происхождения. Обнаружено увеличение отрицательной поляризации и опозиционного эффекта яркости стеклянных порошков при уменьшении размеров частиц вплоть до порядка длины световой волны. Исследовано влияние пористости образцов и коэффициентов преломления вещества на параметры отрицательной поляризации. Найдено существенное усиление отрицательной поляризации при смешивании мелкодисперсных порошков с сильно отличающимися альбедо частиц.

LABORATORY STUDIES OF NEGATIVE POLARIZATION OF LIGHT SCATTERED BY COMPLEX STRUCTURE SURFACES. SOME SEQUENCES FOR ATMOSPHERE-LESS COSMIC BODIES. II, by Shkurov Yu. G., Akimov L. A., Stankevich N. P., Melkumova L. Ya., Latynina I. I., Bogdanova T. B.— The results of small angle polarimetry for different powdered optic glasses as well as for some metal powder samples are presented. An increase of both negative polarization and brightness opposition effect for glass powders with the decrease of particle size up to light wavelength is revealed. The negative polarization parameters are studied for the samples with different surface porosity and particles index of refraction. The negative polarization is found to be increased by mixing fine powders with contrast albedo.

Цель данной части работы — исследование влияния на параметры отрицательной поляризации: 1) размеров частиц образца; 2) пористости поверхности; 3) ориентации образца относительно направления на приемник излучения; 4) выбора спектрального диапазона измерения; 5) величины коэффициента преломления частиц; 6) однородности образца по составу частиц.

Для измерений использовались образцы техногенного происхождения — раздробленные оптические стекла (КС-17, ЗС-3, БС-7, НС-12, ТС-3), порошки некоторых металлов и сажа. Образцы оптических стекол подвергались отмучиванию в дистиллированной воде для разделения на фракции по размерам частиц. Порошки металлов для этой же цели просеивались на ситах. Размеры частиц определялись с помощью микроскопа. Все оптические измерения проводились на фотометре-поляриметре АО ХГУ [8]. Полученные данные — результат усреднения нескольких серий измерений, причем каждый раз наладка прибора и приготовление образцов проводились заново. Кроме специально отмеченных случаев, измерения велись в красной части спектра, а образцы устанавливались так, чтобы их нормали ориентировались в направлении на приемник излучения.

Результаты измерений. Перейдем к описанию экспериментальных данных, позволяющих судить о количественном влиянии различных факторов на параметры отрицательной поляризации.

Прежде всего нас интересовало влияние размеров частиц образца. Из работ [4, 10] известно, что применительно к металлическим порошкам уменьшение размеров частиц приводит к заметному увеличению таких параметров отрицательной поляризации, как P_{\min} и α_{inv} . Для диэлектриков этот вопрос детально не исследовался. Мы провели измерения образцов оптических стекол ЗС-3, БС-7, НС-12, каждый из которых был представлен 14 градациями размеров частиц от $r \leq 0.5$ мкм до $r = 250$ мкм. Эти стекла обладают совершенно различными поглощающими свойствами. Стекло БС-7 прозрачно в видимом диапазоне длин волн даже при толщине 5 мм. Стекло НС-12 при толщине около 3 мм ослабляет световой поток (примерно одинаково в пределах видимого диапазона) почти на три порядка. Как следствие отмеченных особенностей,

все фракции стекла БС-7 имели приблизительно одинаковые альбедо, а стекло НС-12 характеризуется резким уменьшением альбедо примерно от 70 до 5 % по мере увеличения размеров частиц. Стекло ЗС-3 представляет собой сильно окрашенный образец (доминирует зеленый цвет).

Несмотря на описанные различия, все измеренные типы стекол обнаружили сходные эффекты. В пределах размеров частиц от 250 до 10 мкм ветвь отрицательной поляризации выражена очень слабо. Ее реакция на изменение размеров также слабая. Начиная с фракции 10 мкм, отрицательная ветвь заметно развивается при уменьшении

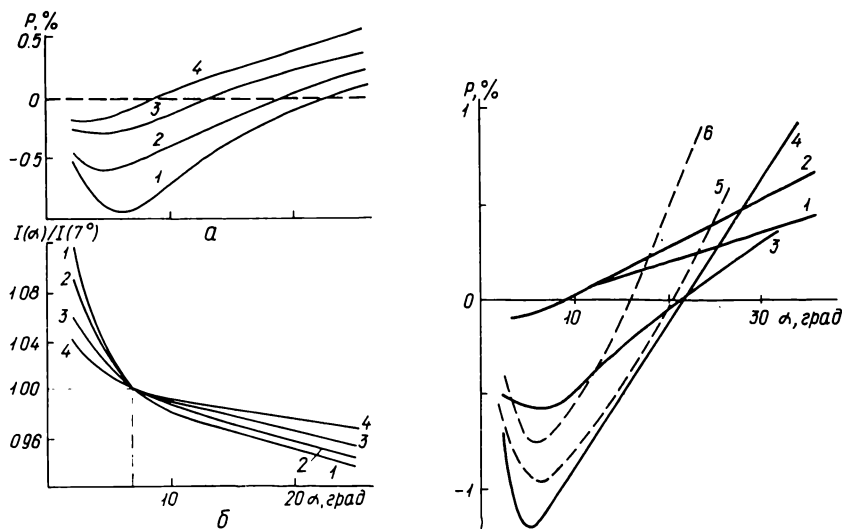


Рис. 1. Фазовая зависимость поляризации (а) и яркости (б) для образцов порошкообразного стекла ЗС-3. Кривые 1—4 соответствуют образцам с размером частиц $r \leq 0.5; 1.5; 5$ и 10 мкм

Рис. 2. Фазовая зависимость поляризации для образцов стекла БС-7 (сплошные линии) и висмута (штриховые). Кривые 1, 2 — размер частиц 250 мкм (здесь и далее до и после прессования соответственно); 3, 4 — $r \leq 0.5$ мкм; 5, 6 — $r \leq 40$ мкм

размеров частиц, и максимальные значения $|P_{\min}|$ и α_{inv} достигаются для образцов с самыми мелкими частицами ($r \leq 0.5$ мкм). На рис. 1, а приведены зависимости $P(\alpha)$ для четырех фракций стекла ЗС-3. Влияние размеров частиц на параметры отрицательной поляризации прослеживается совершенно отчетливо. Интересно отметить, что при уменьшении размеров частиц возрастает также и оппозитный эффект яркости (рис. 1, б). Более подробные данные о взаимосвязи этого эффекта и отрицательной поляризации приведены в работе [7].

О влиянии пористости (рыхлости, степени уплотнения) поверхности на параметры отрицательной поляризации существуют противоречивые сведения. С одной стороны, давно считается неоспоримым то, что при спрессовывании порошкообразной поверхности отрицательная ветвь поляризации становится более мелкой [3], с другой — по данным наших исследований [1], некоторые образцы, наоборот, при уплотнении обнаруживали увеличение параметров $|P_{\min}|$ и α_{inv} . Как же разрешить создавшееся противоречие? По-видимому, здесь все зависит от природы образца. Так, на рис. 2 показана зависимость $P(\alpha)$ для порошка висмута ($r \leq 40$ мкм) при различном уплотнении. Этот образец обнаруживает уменьшение отрицательной поляризации при прессовке. Однако мелкозернистый образец стекла БС-7, как видно из рис. 2, обнаруживает усиление отрицательной поляризации при спрессовывании. Мы установили также, что влияние уплотнения на вид $P(\alpha)$ образцов зависит от размеров частиц порошков. На рис. 2 представлена фазовая зависимость поляризации для образцов стекла БС-7 с размерами частиц около 1 и 250 мкм. Эти образцы подверглись прессовке при одинаковой нагрузке около 20 кг/см², однако заметное усиление отрицательной поляризации наблюдается только у мелкозернистого образца. Сходный эффект обнаружен у порошков других исследованных оптических стекол.

Представляет интерес влияние геометрии рассеяния на параметры отрицательной поляризации. Мы исследовали это влияние на образцах, отличающихся размерами частиц, их прозрачностью, а также рельефом поверхности. Наблюдались закономерности, которые, применительно к образцам стекла БС-7, иллюстрируются рис. 3. При наклонении нормали образца в направлении, перпендикулярном плоскости рассеяния (по «широте»), отрицательная поляризация заметно уменьшается, при сильном наклоне

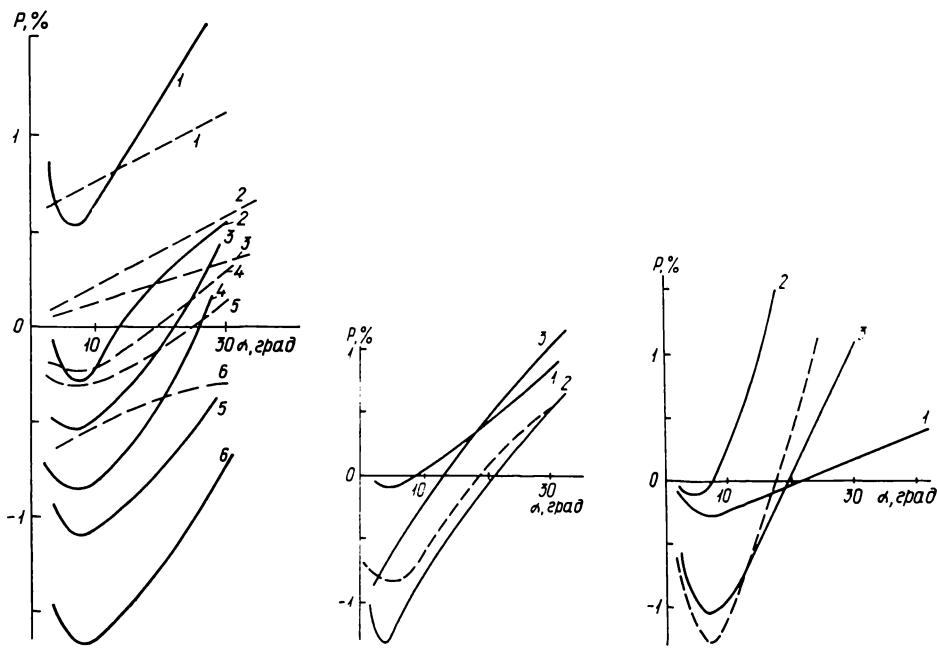


Рис. 3. Фазовая зависимость поляризации для образцов стекла БС-7 с размером частиц $r \leq 0.5$ мкм (сплошные линии) и $r = 140$ мкм (штриховые) при различных ориентациях нормали относительно направления на приемник света. Кривым соответствуют следующие пары значений «фотометрической широты» и «фотометрической долготы» (в град): 1—45, 0; 2—25, 0; 3—0, 0; 4—0, +25; 5—0, —25; 6—0, +45 (пара 0, —45 измерена неубверенно, поэтому данные здесь не приводятся)

Рис. 4. Фазовая зависимость поляризации для образцов стекла ТС-3 (размер частиц $r \leq 0.5$ мкм): 1 — порошок, погруженный в этанол; 2 — просушенный образец; 3 — тот же образец, но в увлажненном виде. Штриховая линия — кривая для исходного образца

Рис. 5. Фазовая зависимость поляризации для образцов стекла БС-7 с размером частиц около 1 мкм (кривая 1), сажи после промывки в спирте (2), смесь тех же образцов (3). Штриховая линия — зависимость $P(\alpha)$ для остатков порошка БС-7 (размер частиц около 1 мкм) на черной матовой подложке

она исчезает вообще, а на ее месте даже может появиться положительная поляризация. При наклонении нормали образца в плоскости рассеяния в одну и в другую стороны от направления на приемник излучения (по «долготе») отрицательная поляризация усиливается. Качественно сходные эффекты описаны в работе [4]. Мы нашли также, что зависимость от геометрии рассеяния света более выражена у образцов с выровненной поверхностью. Усложнение рельефа, наличие у него микроструктуры заметно демпфируют эту зависимость. У некоторых металлических образцов (порошки карбонильного железа, никеля) при выраженной отрицательной поляризации даже у крупных фракций зависимость от геометрических факторов практически не выражена. Отметим еще одно немаловажное обстоятельство, связанное с исследуемым эффектом. По характеру зависимости $P(\alpha)$ (рис. 3) можно предполагать, что образцы из полупрозрачных частиц при отклонении нормали от направления на наблюдателя обнаруживают ненулевую поляризацию даже при нулевых значениях угла фазы.

Исследования спектральной зависимости отрицательной поляризации с методической точки зрения представляют собой трудную задачу. Переход в другую спектральную область сопряжен со сменой светофильтров, что приводит, наряду с другими

обстоятельствами, к изменениям инструментальной поляризации, при учете или компенсации которых могут появиться дополнительные погрешности.

В исследованиях спектральной зависимости отрицательной поляризации нас интересовал вопрос о поведении $\alpha_{inv}(\lambda)$ применительно к диэлектрикам. Мы имели возможность определять значения α_{inv} при различных длинах световых волн с точностью не лучше 1°. Зависимость $\alpha_{inv}(\lambda)$ удалось обнаружить только для сильно окрашенных образцов. Во всех других случаях измерения однородных порошков оптических стекол эта зависимость надежно не установлена. Для иллюстрации приведем следующие данные. Образец стекла КС-17, имеющий в красной части спектра альbedo в 1.5 раза более высокое, чем в синей, обнаружил смещение α_{inv} всего на 3°. Зависимость $P_{min}(\lambda)$ для цветных стекол (включая КС-17) надежно не выявилась. Материалы по исследованию спектральной зависимости параметров отрицательной поляризации для металлов будут представлены в специальной работе.

Влияние относительного коэффициента преломления частиц на параметры отрицательной поляризации мы исследовали с помощью иммерсионных жидкостей. Порошки полностью погружались в жидкость. В комбинации со стеклянными порошками использовались две жидкости: этанол и глицерин, имеющие различные коэффициенты преломления — соответственно 1.36 и 1.48. Во всех случаях результаты оказались сходными: отрицательная поляризация резко ослаблялась.

Данные, касающиеся этого эффекта применительно к стеклу ТС-3 (размер частиц порошка 0.5 мкм) и этанолу, представлены на рис. 4. Недостаток данного эксперимента — возникновение паразитной поляризации при преломлении света на плоской поверхности жидкости. Однако, воспользовавшись формулами Френеля, нетрудно показать, что в этом случае может возникнуть только отрицательная поляризация. Таким образом, вывод об ослаблении отрицательной поляризации при наличии иммерсионной жидкости, т. е. при уменьшении относительного коэффициента преломления частиц среды, может быть только усилен учетом паразитной поляризации.

Интересный эффект для мелких стеклянных порошков наблюдался при высыхании жидкости. Вероятно, за счет высокой подвижности мелких частиц в жидкости при высыхании образуются плотные конгломераты (корочки), которые в некоторых случаях разрушаются с трудом даже при значительных усилиях. Эти образования имеют заметно большую отрицательную поляризацию, чем исходные порошки (рис. 4). Описываемый эффект полностью согласуется с тем, что отмечалось выше о влиянии уплотнения мелкозернистых порошков стекла БС-7 на параметры отрицательной поляризации. При повторной заливке просушенных корочек в такой степени, чтобы не происходило ожигание массы (при этом корочка темнеет, но ее поверхность не блестит из-за недостатка жидкости), отрицательная поляризация уменьшалась, но не так сильно, как в случае полного погружения порошка в жидкость (рис. 4).

Изучение поляриметрических характеристик различных смесей техногенных образцов представляет интерес в связи с тем, что, как правило, природные образования (поверхность планеты или лабораторный образец породы земного происхождения) имеют гетерогенную микроструктуру. Для исследования была приготовлена смесь порошков стекла БС-7 (размер частиц около 1 мкм) и саж, взятых примерно в равных по объему количествах. Размер частиц саж — менее 1 мкм. Таким образом, мы смешивали очень светлые и очень темные частицы, но близкие по размерам. Альbedo стекла БС-7 составляло около 87 %, саж — около 2 %, а смеси — около 20 %. На рис. 5 показана зависимость $P(\alpha)$ для смеси и отдельных компонентов. Как видно из рисунка, смесь обнаруживает резкое усиление отрицательной поляризации.

Существенное влияние микроструктуры образца на параметры отрицательной поляризации отчетливо проявляется еще на одном примере. Порошок стекла БС-7 с размером частиц около 1 мкм был сжат на черной матовой подложке, которая имела альbedo около 5 % и не обнаруживала отрицательной поляризации. Затем порошок стряхнули, но в подложке застряли его остатки. Исследования под микроскопом показали, что эти остатки представляют собой отдельные плотные агрегаты (от нескольких частиц до нескольких сотен), расположенные на значительном расстоянии друг от друга. По грубым оценкам площадь, занятая такими агрегатами-островками, составляла около 20 % всей поверхности образца, однако их вклад в отраженный световой поток доминировал вследствие значительно более высокого альbedo. Ввиду малой поверхностной концентрации агрегатов их можно считать изолированными рассеивателями. Зави-

симность $P(\alpha)$ для такого образца показана на рис. 5 штриховой линией. Как следует из рисунка, отрицательная поляризация, порождаемая изолированными агрегатами мелких частиц, весьма заметно превышает то, что обнаруживает толстый слой частиц того же порошка.

Обсуждение результатов. Этот цикл поляриметрических исследований мы намеренно начали с измерений образцов техногенного происхождения. Природные образцы являются, на наш взгляд, слишком сложными объектами для выяснения основных закономерностей в поведении параметров отрицательной поляризации при изменении тех или иных факторов. Переход к изучению природных образцов целесообразен на следующем этапе исследований. Эту же мысль можно проследить и в работе [11], в которой приведены результаты измерений поляриметрических характеристик искусственных образцов (поверхность пластилина, покрытая лунками определенного размера, и т. д.). С другой стороны, обобщение закономерностей, выявленных для простых техногенных образцов, на сложные природные полиминеральные объекты (поверхности безатмосферных космических тел) требует осторожности. Поэтому выводы и предположения, приведенные ниже, следует рассматривать как предварительные.

Напомним некоторые важные экспериментальные факты. Из наших измерений следует, что порошки диэлектрических материалов, состоящие из крупных частиц, лишённых микроструктуры, при ориентации нормали образца на приемник света практически не обнаруживают отрицательной поляризации. На первый взгляд, этот результат входит в противоречие с данными работы [11], в которой изучалась заметная отрицательная поляризация, обнаруженная у техногенных порошков с размерами частиц в несколько десятков и сотен микрометров. Однако в работе [11] нет указаний на то, как были ориентированы нормали исследуемых образцов относительно приемника света. Для достижения 0,5 % отрицательной поляризации у крупнозернистых стеклянных порошков достаточно отклонить нормаль образца от направления на наблюдателя всего на 20—30° (рис. 3). Возникшее противоречие легко объясняется этим обстоятельством.

Другой экспериментальный факт относится к металлам. У металлических крупнозернистых порошков значительная отрицательная поляризация наблюдается даже при ориентации нормали образца на приемник света. Это позволяет предположить, что у диэлектриков и металлов отрицательная поляризация порождается различными механизмами. О природе этих механизмов можно высказать пока лишь предварительные соображения. Применительно к крупнозернистым металлическим порошкам механизмом отрицательной поляризации, вероятно, является двукратное рассеяние, действующее в сочетании с теневым эффектом [6, 14]. С диэлектриками дело обстоит сложнее. Здесь логично предполагать наличие двух механизмов. Первый из них — дифракционной (интерференционной) природы (см., например, [7, 12]), должен объяснять отрицательную поляризацию при наличии микроструктуры порядка длины световой волны для случая, когда нормаль образца ориентирована на наблюдателя. Вероятно, этот же механизм действует применительно к образцам, содержащим и очень мелкие металлические частицы. Второй механизм должен объяснять эффекты усиления отрицательной поляризации или ее возникновения (в случае крупных частиц) при наклоне нормали образца по «долготе», а также ослабление отрицательной поляризации (появление положительной поляризации) при наклонах по «широте».

Из изложенного понятно, что в настоящее время мы скептически относимся к применимости моделей [6, 14] к диэлектрическим поверхностям. Это мнение не противоречит очевидной разумности этих моделей. Все они убедительно объясняют возникновение отрицательной поляризации как следствие двукратного френселевского отражения лучей поверхностями частиц, однако они не дают представления об энергетическом вкладе этого отражения в рассеянный световой поток. Соответствующие коэффициенты, описывающие этот вклад, входят в модели как свободные параметры и определяются путем подгонки под экспериментальные данные. Можно утверждать, что модели [6, 14] более применимы к металлическим порошкам, чем к диэлектрикам, так как вследствие высокого коэффициента отражения металлических поверхностей вклад двукратного рассеяния в этом случае всегда выше, чем в случае диэлектриков.

Принимая во внимание эти рассуждения и приведенные экспериментальные результаты, приходим к следующим выводам, представляющим интерес для изучения безатмосферных космических тел.

1. Отрицательная поляризация света, присущая практически всем твердым поверхностям космических тел, по-видимому, всегда свидетельствует о наличии мелкозернистой структуры этих поверхностей с характерным масштабом порядка 1 мкм независимо от того, создана ли эта структура гомогенным пылевым слоем или плотно упакованными микрочастицами, образующими твердые крупные фрагменты пород. В этом плане утверждение о том, что отрицательная поляризация является индикатором реголита на поверхностях безатмосферных космических тел (см., например, [5]), совершенно не обоснованно. Отрицательная поляризация лишь не противоречит наличию реголита [9].

2. При исследовании безатмосферных космических тел может иметь значение эффект зависимости величины отрицательной поляризации от геометрии рассеяния света. Так, несимметричные тела или тела, имеющие анизотропное строение рельефа (типа борозд на Фобосе), благодаря этому эффекту могут обнаружить слабую поляризацию даже при нулевом угле фазы. Здесь уместно еще раз отметить необходимость при описании лабораторных поляриметрических измерений указывать ориентацию образца относительно приемника излучения, так как в противном случае результаты измерений различными авторами даже одних и тех же образцов (метеориты, лунный грунт) окажутся несопоставимыми.

3. Обнаружение значительной отрицательной поляризации у изолированных агрегатов мелких частиц (рис. 5) может представлять интерес при поляриметрических исследованиях комет. У кометной пыли обнаружена отрицательная поляризация, достигающая нескольких процентов [13]. Агрегаты исследованных нами мелких частиц — хорошие структурные модели частиц Браунли [2], которые, в свою очередь, являются вероятными представителями частиц кометной пыли.

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. Браунли Д. Е. Межпланетная пыль: возможная связь с кометами и досолнечными межзвездными частицами // Протозвезды и планеты. Т. 1 / Под ред. Т. Герелса.— М. : Мир, 1982.— С. 152—170.
3. Веверка Дж. Поляриметрия поверхности спутников // Спутники планет / Под ред. Дж. Бернса.— М. : Мир, 1980.— С. 244—266.
4. Дольфюс А. Исследования поляризации планет // Планеты и спутники / Под ред. Г. Койпера, Б. Миддлхерст.— М. : Изд-во иностр. лит., 1963.— С. 306—352.
5. Жарков В. П., Козенко А. В. Фобос и Деймос — спутники Марса.— М. : Знание, 1985.—64 с.
6. Шкуратов Ю. Г. Модель отрицательной поляризации света безатмосферных космических тел // Астрон. журн.— 1982.—59, вып. 4.— С. 817—822.
7. Шкуратов Ю. Г. О природе оппозиционного эффекта яркости и отрицательной поляризации света твердых космических поверхностей // Астрон. циркуляр.— 1985.— № 1400.— С. 3—6.
8. Шкуратов Ю. Г., Акимов Л. А. Лабораторные исследования отрицательной поляризации света, рассеянного поверхностями со сложной структурой. Некоторые следствия для безатмосферных космических тел. I // Кинематика и физика небес. тел.— 1987.—3, № 2.— С. 22—27.
9. Шкуратов Ю. Г., Акимов Л. А., Тишковец В. П. Отрицательная поляризация не доказывает существование пыли на поверхностях безатмосферных космических тел // Письма в Астрон. журн.— 1984.—10, № 10.— С. 797—799.
10. Dollfus A., Mandeville J., Duseux M. The nature of the M-type asteroids from optical polarimetry // Icarus.— 1979.—37, N 1.— P. 124—132.
11. Geake J. E., 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.
12. Hopfield J. J. Mechanism of lunar polarization // Science.— 1966.—151, N 3716.— P. 1380—1381.
13. Kiselev N. N., Chernova G. P. Phase functions of polarization and brightness and the nature of cometary atmosphere particles // Icarus.— 1981.—48, N 3.— P. 473—481.
14. Wolff M. Polarization of light reflected from rough planetary surface // Appl. Opt.— 1975.—24, N 6.— P. 1395—1405.