

УДК 523.4

**А. В. Мороженко**

Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины  
03680, Киев ГСП, ул. Академика Заболотного, 27

### Поляриметрия в изучении тел Солнечной системы

*В обзоре приведены наиболее характерные особенности в зависимостях степени и положения плоскости поляризации света тел Солнечной системы от угла фазы и длины волны, а также показана важность таких исследований при изучении физических свойств этих тел.*

*ПОЛЯРИМЕТРІЯ У ВИВЧЕННІ ТІЛ СОЛЯЧНОЇ СИСТЕМИ, Мороженко О. В. — У огляді приведено найхарактерніші особливості у залежностях ступеня та положення площини поляризації світла тіл Сонячної системи від кута фази та довжини хвилі, а також показана важливість таких досліджень при вивченні фізичних властивостей цих тіл.*

*POLARIMETRY IN THE INVESTIGATIONS OF A SOLAR SYSTEM BODIES, Morozhenko A. V. — The most typical features of the relationships between the degree polarization and position of polarization planes of solar system bodies and the phase angle and wavelength are presented in the survey. The importance of investigations of this kind for the study of physical characteristics of these bodies is demonstrated.*

#### ВВЕДЕНИЕ

Как известно, поле диффузно отраженного телами Солнечной системы излучения описывается спектральными значениями четырех параметров Стокса  $I$ ,  $Q$ ,  $U$ ,  $V$ , значения которых зависят от углов падения и отражения света, а также от фазового угла  $\alpha$ . Параметр  $I$  характеризует интенсивность отраженного излучения (для тел Солнечной системы — отражательную способность), в том числе и в полосах (линиях) поглощения различных газов или минералов, а его величина определяется главным образом значением альbedo однократного рассеяния в атмосфере или в поверхностном слое. Параметры  $Q$  и  $U$  описывают состояние линейной поляризации отраженного излучения, т. е. степень поляризации  $P$  и ориентацию ее плоскости  $\psi$ , а параметр  $V$  — степень круговой поляризации. Их значения определяются главным образом комплексным показателем преломления вещества  $m(\lambda)$ , параметрами функции распределения частиц по размерам  $N(r)$  и формой частиц. В последние годы (после разработки методов

решения задач теории рассеяния света частицами и теории переноса поляризованного излучения) стало очевидным, что метод поляриметрии является единственным дистанционным методом, который позволяет изучать природу облачных частиц планетных атмосфер. В тоже время для безатмосферных небесных тел, для которых пока нет удовлетворительной теории формирования поля диффузно отраженного поверхностным слоем излучения, использование поляриметрических исследований пока не привело к конкретным оценкам физических свойств вещества их поверхностных слоев.

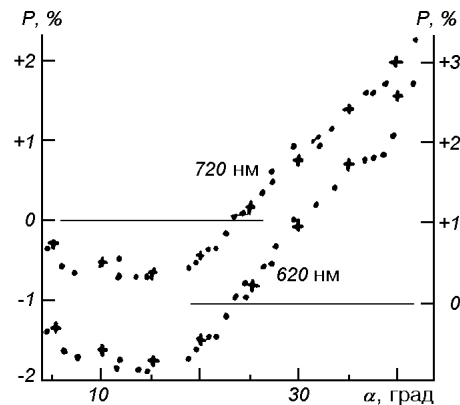
Здесь мы попытаемся коротко подытожить результаты поляризационных исследований тел Солнечной системы, условно разбив их на три класса: безатмосферные тела, включая образцы земных пород; объекты с атмосферами и кометы. Основной упор сделаем на работы, в которых впервые обнаружен какой-либо наблюдательный эффект или предложен метод использования поляризационных наблюдений для изучения физических или иных свойств тел Солнечной системы. Поскольку поляриметрические исследования наиболее успешно используются при изучении облачных слоев планетных атмосфер, то именно этим объектам уделено повышенное внимание.

#### БЕЗАТМОСФЕРНЫЕ ТЕЛА И ЗЕМНЫЕ ОБРАЗЦЫ

Вероятнее всего, начало поляризационным исследованиям поляризующих свойств тел Солнечной системы положил в 1811 г. Араго, который обнаружил, что свет, отраженный темными деталями Луны (морями), поляризован сильнее, чем свет, отраженный светлыми деталями (материками). Этот эффект в 1905—1912 гг. детально исследовался Умовым в лабораторных условиях (эффект Умова) и был приписан деполяризующему влиянию многократно рассеянного излучения на микронеровностях поверхностного слоя. Справедливость этого в середине 1950-х гг. прошлого столетия обосновал Розенберг [39], предложив полуэмпирическое выражение, которое связывает деполяризующий эффект с альбедо однократного рассеяния света отдельными неровностями поверхностного слоя. Следствием эффекта Умова является и наблюдаемое практически для всех безатмосферных небесных тел уменьшение положительного значения степени поляризации с увеличением длины волны в непрерывном спектре.

В 1920-е гг. из наблюдений Луны и множества образцов земных пород Лио [80] установил, что на зависимостях степени поляризации от угла фазы, в отличие от таковых зависимостей для идеально гладких поверхностей, на некотором значении угла фазы имеет место поворот плоскости поляризации на  $90^\circ$ , вследствие чего при углах фазы меньше угла инверсии  $\alpha_i$  наблюдается ветвь отрицательной поляризации. Позже выяснилось, что такие фазовые зависимости характерны для всех безатмосферных тел Солнечной системы и земных образцов в широком интервале длин волн. Для разных небесных тел и образцов различной природы значение угла инверсии различно, но практически всегда находится в пределах  $15\text{--}27^\circ$ . Что касается спектральной зависимости отрицательной поляризации, то с уменьшением отражательной способности иногда (например, для деталей Луны) наблюдается уменьшение степени поляризации, т. е. эффект Умова не всегда проявляется. В середине 1950-х гг. Охман [88] в качестве механизма образования отрицательной ветви поляризации предложил двукратное отражение на расположенных под углом  $90^\circ$  идеально гладких отражающих поверхностях. В последующем этот механизм разрабатывался рядом исследователей, но так и не удалось удовлетворительно согласовать

Рис. 1. Сравнение рассчитанных (крестики) и наблюдаемых (точки) зависимостей степени поляризации Марса на длинах волн  $\lambda = 620$  и  $720$  нм [12]



наблюдаемые и модельно рассчитанные фазовые зависимости степени поляризации. Из этого цикла работ выделим работы Волфа [97] и Колоколовой [17, 18], которые добились наилучшего согласия расчетов и наблюдений. Кроме того, ими наиболее тщательно были изучены взаимосвязи величины наклона зависимости положительной степени поляризации от  $\alpha$  и отражающей способности безатмосферного тела, которая довольно широко используется для оценки альbedo астероидов и их диаметров [96]. Хотя имеются и другие гипотезы о возможном механизме формирования отрицательной ветви поляризации, но они еще меньше разработаны, чем гипотеза Охмана.

На основе результатов экспериментальных исследований предпринимались попытки найти вид эмпирической зависимости между максимальными значениями степени поляризации  $P_{\max}$  и отражательной способностью при нулевом фазовом угле  $\rho(0)$ . Наиболее удачным оказалось соотношение вида

$$\lg \rho(0) + n \lg P_{\max} = \text{const} = C, \quad (1)$$

где  $n$  — параметр [1, 53]. Безусловно, что соотношение типа (1) имеет место для произвольных значений фазовых углов, по крайней мере на ветви положительной поляризации. Именно этим обусловлены известные зависимости степени поляризации Марса [26] и астероида Веста [21] от долготы центрального меридиана. Эффект Умова было предложено [12, 27] использовать для определения фазовой зависимости степени поляризации отраженного подстилающей поверхностью Марса в УФ-области спектра, для чего использовалось выражение

$$P(\alpha, \lambda) = P(\alpha, 504 \text{ нм}) A(\alpha, 504 \text{ нм}) / A(\alpha, \lambda). \quad (2)$$

Здесь  $A(\alpha)$  — видимое альbedo диска. Об удовлетворительности такого соотношения свидетельствуют данные рис. 1, где сравниваются рассчитанные и наблюдаемые фазовые зависимости степени поляризации диска Марса на длинах волн  $\lambda = 620$  и  $720$  нм.

Не исключено, что использование записанного для  $\alpha < 90^\circ$  выражения (1) может быть эффективным при определении приближенных значений видимого альbedo астероидов, а следовательно, и их радиусов:

$$\lg A(\alpha) = C - n \lg P(\alpha), \quad \ln R = 0.5 [n \ln P(\alpha) + m(\alpha) - C], \quad (3)$$

где  $m(\alpha)$  — приведенная на стандартные расстояния от Солнца и Земли звездная величина астероида.

Особое место в поляриметрии безатмосферных небесных тел, а также тел с оптически тонкими атмосферами, занимает проблема положения точки инверсии и его зависимости от длины волны. Сейчас имеется два противоположных мнения: 1) положение точки инверсии не зависит или

очень слабо зависит от длины волны; 2) значение угла инверсии довольно сильно уменьшается с уменьшением длины волны.

Первое мнение принадлежит Аврамчуку [1], который впервые выполнил многофилтровую фотоэлектрическую поляризацию деталей диска Луны в интервале длин волн  $\lambda\lambda = 355...600$  нм и чисто случайно попал на фазовый угол  $\alpha = \alpha_i$ . Во всем этом интервале было получено практически нулевое значение степени поляризации, из чего и сделано заключение о постоянстве значения угла инверсии по спектру. Кроме того, вывод о независимости положения точки инверсии от длины волны был подтвержден результатами лабораторных измерений образцов земных пород, детальный обзор которых можно найти в работе [16], а также наблюдениями Марса в длинноволновой области спектра (рис. 10) и астероидов [79].

Противоположная точка зрения принадлежит Дольфюсу и Бовелу [53]. По результатам измерения степени поляризации 14 деталей диска Луны в спектральном интервале  $\lambda\lambda = 327...1050$  нм они заключили, что угол инверсии уменьшается с уменьшением длины волны от  $26^\circ$  на  $\lambda\lambda = 840...1050$  нм до  $21^\circ$  на  $\lambda\lambda = 327...379$  нм. В то же время Кварцхелия [16] по данным многолетних измерений 190 лунных деталей и доставленного на Землю лунного грунта в спектральном интервале  $\lambda\lambda = 419...783$  нм получил, что для лунных морей, заливов и мореподобных кратеров, а также образцов лунного грунта действительно имеет место эффект уменьшения угла инверсии в коротковолновой области спектра (примерно на  $1.5-2.0^\circ$ ), но отсутствует для светлых деталей. Более достоверными нам кажутся выводы последней работы. Дело в том, что в работе [53] спектральный диапазон перекрывался тремя поляриметрами, каждый из которых мог иметь свою систематическую погрешность. Кроме того, определение  $\alpha_i$  базировалось на графической интерполяции измерений для двух значений фазового угла, в некоторых случаях равных  $10^\circ$  и даже  $45^\circ$ . При этом четко прослеживается тенденция зависимости значения  $\Delta\alpha$  от удаленности по фазовому углу точек, между которыми велась интерполяция фазовой зависимости. Однако для четырех деталей, для которых имелись измерения вблизи точки инверсии, в спектральном интервале  $\lambda\lambda = 350...600$  нм вообще не заметно спектрального изменения точки инверсии. Для независимой перепроверки сделанных выше выводов на рис. 2 приведены измеренные значения степени поляризации для всех деталей при  $\alpha < 25^\circ$  в двух предельных длинах волн. Как видно, если и имеет место спектральная зависимость угла инверсии, то она не может превышать  $2^\circ$  соответственно в спектральных интервалах  $\lambda\lambda = 327...600$  и  $419...704$  нм. Следовательно, сейчас нельзя отрицать измене-

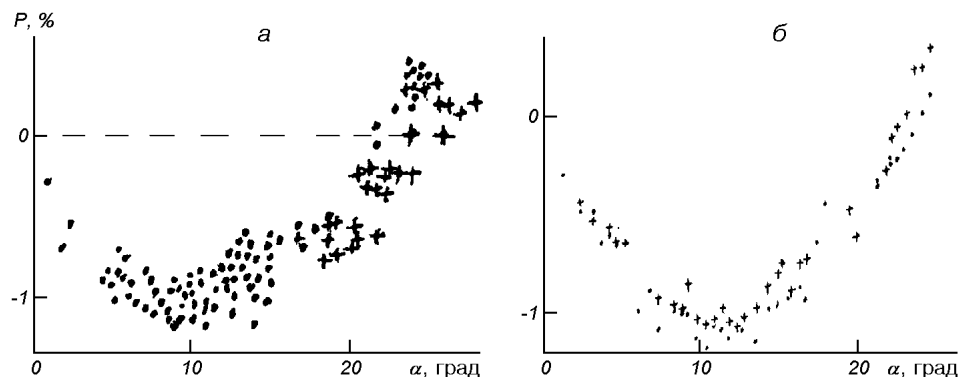


Рис. 2. Усредненные для всех лунных деталей фазовые зависимости степени поляризации: а — по данным [53] (точки —  $\lambda = 327$  нм, крестики —  $600$  нм), б — по данным [16] (точки —  $\lambda = 704$  нм, крестики —  $419$  нм)

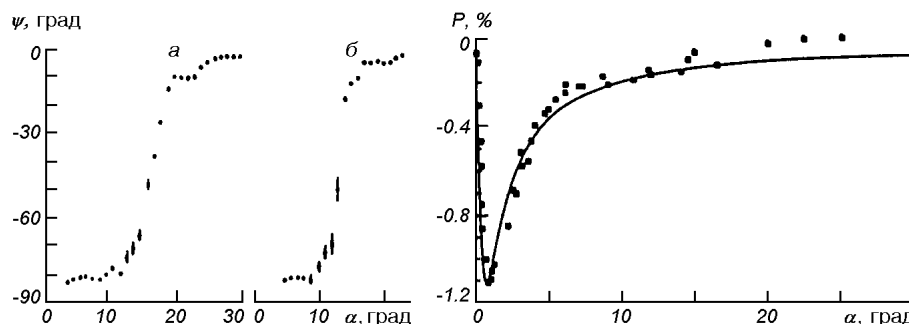


Рис. 3. Поворот положения плоскости поляризации вблизи точки инверсии для земных образцов: *a* — гранит, *б* — базальт [10]

Рис. 4. Сравнение измеренного для магниевого экрана (точки) и рассчитанного в модели когерентного рассеяния (сплошная кривая) оппозиционных эффектов в поляризации [84]

ния положения точки инверсии в поляризации света для безатмосферных небесных тел, но вопрос о его величине остается открытым.

Длительное время априорно предполагалось, что поворот плоскости поляризации на  $90^\circ$  происходит скачкообразно в точке инверсии, что как будто бы действительно имеет место для деталей Луны [16]. Однако в работах [19, 24] было показано, что изменение положения плоскости поляризации отраженного образцами земных пород происходит плавным поворотом на некотором интервале  $\Delta\alpha$  (рис. 3), ширина которого зависит от природы исследуемого образца [10]. Последний эффект может быть использован для изучения природы безатмосферных небесных тел.

Еще в начале двадцатых годов прошлого столетия Лио [80] на фазовой зависимости степени поляризации отраженного магниевым экраном света вблизи нулевого фазового угла обнаружил довольно мощный пик отрицательной поляризации, на который длительное время никто не обращал внимания. Примерно так же поступил и автор, когда в 1986 г. на фазовом угле  $0.4^\circ$  обнаружил довольно большую поляризацию света всех четырех галилеевых спутников Юпитера. Степень поляризации составляла 0.3—0.4 %, а плоскость поляризации была наклонена к плоскости рассеяния под углом  $135^\circ$  [35, 38]. Только после того, как Мищенко [82] математическим моделированием показал, что микронеровности поверхностного слоя на фазовых углах меньше  $1^\circ$  образуют оппозиционный эффект в поляризации (эффект когерентного рассеяния или слабой локализации фотонов, рис. 4), другие наблюдатели также начали уделять повышенное внимание наблюдательным данным при малых значениях фазового угла [90]. Поскольку этот эффект однозначно проявляется на углах фазы меньше  $1^\circ$ , то реально наземными наблюдениями его можно обнаружить только для спутников планет-гигантов и тех астероидов, орбиты которых расположены вне орбиты Юпитера. Считаю целесообразным обратить внимание на то, что в экспериментальных работах традиционно приводятся значения фазовых углов  $\alpha$ , которые рассчитаны без учета угловых размеров Солнца. В действительности результаты измерений относятся к интервалу фазовых углов от  $\alpha - \Delta\alpha$  до  $\alpha + \Delta\alpha$ , где  $\Delta\alpha$  — угловой радиус Солнца на расстоянии планеты или астероида:

Планета	Меркурий	Венера	Земля	Марс	Юпитер	Сатурн	Уран
$2\Delta\alpha$	1.29	0.69	0.50	0.33	0.10	0.05	0.03

Наконец, необходимо обратить внимание на такой важный для изучения природы безатмосферных небесных тел эффект, как появление круговой поляризации на больших фазовых углах (больше  $120^\circ$ ) в диффузно отраженном свете образцов, в поверхностный слой которых вкраплены металлические частицы [11]. Поскольку этот эффект наблюдался даже при освещении неполяризованным светом, то он также может использоваться при изучении природы безатмосферных небесных тел.

Поскольку сейчас нет теории формирования элементов матрицы излучения, диффузно отраженного шероховатыми поверхностями, то их поляризационные измерения используются только для получения качественной информации. Кроме упомянутого выше использования поляризационных измерений для оценки диаметра астероидов, они могут использоваться еще для обнаружения оптической неоднородности дисков и для разделения ее эффекта от эффектов формы астероидов. Кроме того, при минералогическом картировании безатмосферных небесных тел, в частности Луны, наиболее перспективным является построение карт распределения значений второго параметра Стокса, потому что в этом случае до минимума сводятся искажения, обусловленные многократным рассеянием [31].

#### ТЕЛА С АТМОСФЕРАМИ

Начало систематическим поляризационным исследованиям планет положил Лио [80], который в 1922—1925 гг. с помощью визуального поляриметра впервые исследовал фазовые зависимости степени поляризации блеска Венеры, Марса, Юпитера и Сатурна, а также изучал особенности распределения поляризации по диску Юпитера. Поскольку погрешность этих измерений была на уровне 0.1 %, то еще и сейчас они не утратили своей ценности. Хотя в последующем уделялось сравнительно мало внимания поляризационным наблюдениям, но благодаря в основном усилиям сотрудников четырех обсерваторий (Медонская обсерватория во Франции, Лунно-планетная лаборатория Аризонского университета в США, Главная астрономическая обсерватория НАН Украины и Абастуманская астрофизическая обсерватория АН Грузии), а также эпизодическим наблюдениям на других обсерваториях, сейчас накоплен довольно обширный наблюдательный материал. Помимо наблюдений с помощью наземных средств, которые относятся к видимому и ближнему ИК-диапазону, для ряда планет имеются измерения и в далеком ультрафиолете, начало которым положило поднятие в 1969 г. 70-см телескопа на высоту 36 км [50]. Сейчас имеются довольно надежные данные о фазовой зависимости степени поляризации света спутника Сатурна Титана [95], который окружен довольно мощной атмосферой. В отличие от безатмосферных небесных тел, поляризационные исследования планет широко использовались для изучения природы облачных слоев и некоторых других их свойств. Не вдаваясь в детальное рассмотрение результатов всех работ, ниже остановимся только на наиболее важных их результатах.

**ВЕНЕРА.** Благодаря тому, что орбита Венеры находится внутри земной орбиты, даже при наблюдениях с Земли получены данные о фазовой зависимости степени поляризации в широком интервале фазовых углов, а также о поляризующих свойствах отдельных деталей диска [34, 42, 43, 47, 49, 51, 55, 61, 63, 65, 72, 76, 78, 80, 87, 92]. Они охватывают примерный диапазон длин волн  $\lambda\lambda = 320...4500$  нм. Эти данные были дополнены почти двенадцатилетними измерениями с борта КА «Пионер-Венера» (на длинах волн  $\lambda\lambda = 270, 365, 550$  и  $935$  нм) [72, 76]. Данные для всего диска планеты получались интегрированием результатов измерений отдельных точек дис-

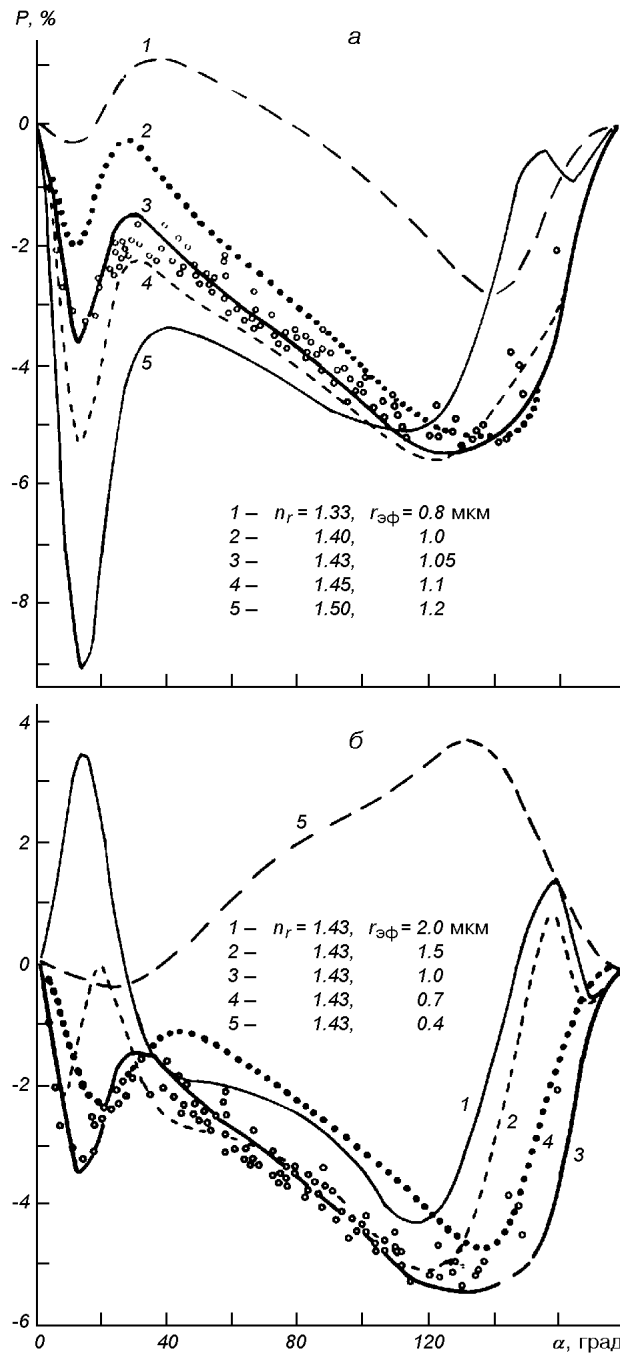


Рис. 5. Сравнение наблюдаемых (кружки) и рассчитанных значений степени поляризации света Венеры [70] при  $\lambda = 900$  нм,  $v_{эф} = 0.07$

ка. В 1969 г. была измерена степень поляризации на длине волны  $\lambda = 225$  нм при фазовом угле  $97.9^\circ$  ( $P \approx +22\%$ ) [50]. В отличие от безатмосферных небесных тел, для Венеры характер зависимости степени поляризации и ее знака от угла фазы очень сильно зависит от длины волны (рис. 5, 6).

Именно на примере Венеры убедительно показаны возможности поляризационных исследований в определении физических параметров облач-

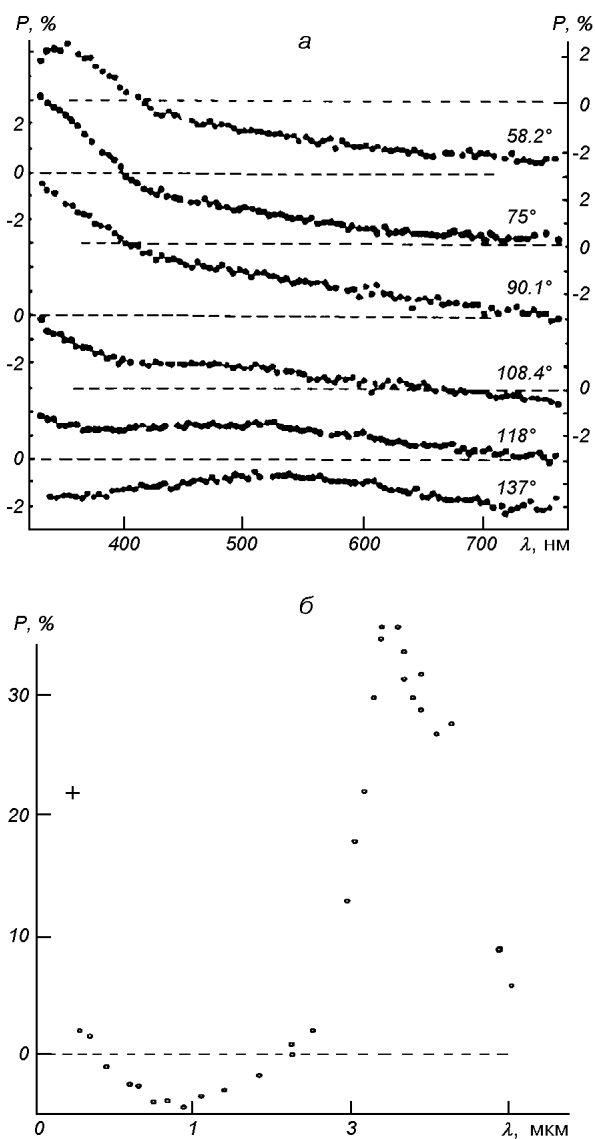


Рис. 6. Изменения степени поляризации с длиной волны: а — при различных значениях фазового угла по спектрополяриметрическим измерениям [34]; б — при фазовых углах  $103^\circ$  (кружки) и  $98^\circ$

ных частиц. Пионером в этом также является Лио, который путем сравнения фазовой зависимости степени поляризации света Венеры с аналогичными зависимостями для света, рассеянного на водяных капельках, получил для среднего радиуса частиц оценку 1.25 мкм [80]. При этом неплохое согласие было получено только для характера фазовых зависимостей, тогда как сами значения степени поляризации существенно (до трех раз) различались. Это различие им было приписано деполяризующему влиянию многократного рассеяния в атмосфере Венеры.

Спустя примерно 40 лет к проблеме аэрозоля в атмосфере Венеры обратился Соболев [41]. Он предположил, что в формировании поляризационных свойств планетных атмосфер принимает участие самый верхний слой атмосферы (с оптической толщиной около 1), а поэтому при их расчетах можно ограничиться учетом только однократного рассеяния. Рас-



сматривались две модели вертикальной структуры атмосферы: 1) однослойная модель (полубесконечный чисто аэрозольный облачный слой); 2) двухслойная модель (над однородным полубесконечным слоем расположен оптически тонкий чисто газовый слой). Для имеющихся на то время расчетных данных о значениях элементов матрицы рассеяния для сферических частиц с действительными величинами показателя преломления 1.33 и 1.50 были рассчитаны фазовые зависимости степени поляризации при различных значениях радиуса частиц. Сравнение последних с упомянутой выше наблюдаемой фазовой зависимостью степени поляризации света Венеры в визуальных лучах показало, что лучшее согласие имеет место при  $n_r = 1.5$  и  $r = 1$  мкм. Примерно в то же время Коффин [47] в аналогичной модели проанализировал свои измерения поляризационных свойств света Венеры. Сравнивая их с расчетами для различных значений действительной части показателя преломления (от 1.335 до 2.5), он получил, что для облачных частиц атмосферы Венеры  $1.43 < n_r < 1.55$ , а  $r = 1.25 \pm 0.25$  мкм. Отметим, что в этих работах приведены монодисперсные значения радиуса частиц.

Однако наиболее корректный анализ (со строгим учетом многократного рассеяния) полученных наземными и космическими средствами наблюдательных данных о фазовых зависимостях степени поляризации в различных длинах волн, сделан в работах [69—72]. Сначала Хансен и Аркинг [69] и Хансен и Ховенир [70], которые вели расчеты методом удвоения слоев в модели однородного газово-аэрозольного слоя, оценили значения действительной части показателя преломления ( $n_r = 1.43 \pm 0.01$  на длине волны  $\lambda = 990$  нм и  $1.46 \pm 0.01$  — на  $\lambda = 365$  нм) и параметры модифицированного гамма-распределения частиц по размерам (эффективного радиуса частиц  $r_{эф} = 1.05 \pm 0.05$  мкм и дисперсии размеров  $v_{эф} = 0.07$ ). Анализ данных КА «Пионер-Венера» [72] также подтвердил реальность приведенных выше оценок. Несомненный интерес представляют работы Катавара и др. [71] и Мороженко с Яновицким [86]. Дело в том, что в первой работе расчеты зависимости степени поляризации от угла фазы велись методом Монте-Карло для нескольких моделей вертикально оптически неоднородной атмосферы, а во второй — анализировались данные о спектральной зависимости степени поляризации с приближенным учетом многократного рассеяния (модель оптически однородной атмосферы). В обеих этих работах получены примерно такие же оценки действительной части показателя преломления и размера частиц. О соответствии расчетов наблюдениям можно судить по данным рис. 5, который к тому же убедительно демонстрирует чувствительность поляризационных измерений к изменению действительной части показателя преломления и размера частиц, что и обеспечивает довольно высокую достоверность получаемых оценок этих параметров.

При зондировании атмосферы Венеры неоднократно проводились нефелометрические эксперименты, а также спектрометрический эксперимент [77], данные которых также использовались для оценок размеров частиц и возможного значения действительной части показателя преломления. Результаты этих экспериментов для верхних слоев атмосферы не показали противоречия с полученными при анализе поляризационных измерений данными, но позволили получить вертикальную структуру концентрации и размера частиц в пределах высот от 66 до 31 км.

Получение практически одинаковых значений параметров облачных частиц из анализа фазовой и спектральной зависимости степени поляризации с одной стороны, и с учетом и без учета многократного рассеяния с другой стороны, качественно подтверждает упомянутый выше вывод Соболева [41] о том, что параметры линейной поляризации формируются

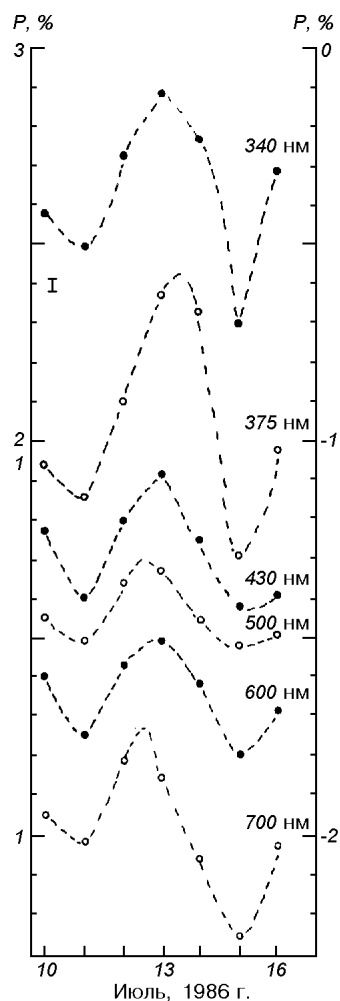


Рис. 7. 4-суточные изменения степени поляризации света Венеры в различных длинах волн [34]

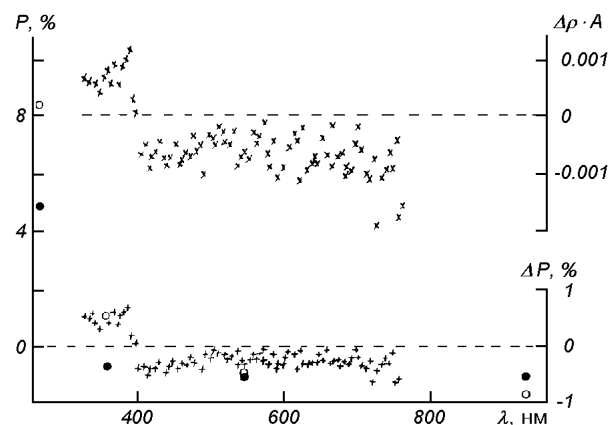


Рис. 8. Спектральные значения степени поляризации темных (светлые кружки) и светлых (темные кружки) деталей диска Венеры [72], а также амплитуды в степени поляризации  $\Delta P$ , % и произведении  $\Delta P A$  ( $A$  — видимое альbedo диска) 4-суточных вариаций [34]

главным образом процессом однократного рассеяния света самыми верхними слоями атмосферы (со значением оптической толщины  $\tau_0 < 1$ ) и показывает возможность для анализа использовать спектральные зависимости степени поляризации. Последнее очень важно применительно к планетам, для которых при наземных наблюдениях весьма ограничен интервал фазовых углов (например, Юпитер и Сатурн).

Данные измерений степени поляризации отдельных деталей диска, которые были получены наземными средствами, указывали на возможность наличия надоблачного тумана, особенно в приполярных районах. Однако окончательно это предположение подтвердили результаты фотополяриметрического эксперимента на КА «Пионер-Венера» [72]. Эффективный радиус его частиц оценен примерно в 0.23 мкм, а действительная часть показателя преломления примерно соответствует оценке этого параметра для основного облачного слоя.

Между полученными в различные годы наблюдательными данными видны заметные различия, что безусловно говорит о долгопериодических вариациях оптических параметров атмосферы, особенно его верхних слоев. Наиболее надежные данные о таких изменениях были получены КА «Пионер—Венера» в период с 1978 по 1990 гг. [76]. Оказалось, что эти изменения могут быть объяснены изменениями оптической толщины тумана на длине волны  $\lambda = 365$  нм от 0.25 в 1978 г. и до 0.10 в 1990 г. Кроме того, не исключено, что в эти годы верхняя граница тумана понижалась от высоты с давлением 0.5 кПа до высоты с давлением 2 кПа. Эффективный радиус частиц здесь также был оценен в 0.25 мкм.

Рядом с долгопериодическими вариациями наблюдаются и короткопериодические (с периодом около 4 сут) [34, 45]. В отличие от видимости так называемых УФ-деталей, изменения степени поляризации проявляются во всем наблюдаемом интервале длин волн (рис. 7). Характерной особенностью этих вариаций является то, что амплитуда  $\Delta P$  изменений степени поляризации и произведения  $\Delta P$  на видимое альbedo диска  $A$  практически не зависит от длины волны, но различается знаками в диапазонах длин волн  $\lambda < 400$  нм и  $\lambda > 400$  нм (рис. 8). Для сравнения на рис. 8 показаны еще значения степени поляризации темных (светлые кружки) и светлых (темные кружки) деталей диска [72]. Рассмотрение различных механизмов возникновения этих 4-суточных вариаций [34] показало, что наиболее вероятным является изменение оптической толщины надоблачного тумана примерно на 0.053 (в длине волны  $\lambda = 330$  нм). Для эффективного радиуса частиц была получена оценка около 0.12 мкм при  $v_{эф} = 0.25$ .

**МАРС.** Уже первые наблюдательные данные о фазовых зависимостях степени поляризации [80] также указали на наличие отрицательной ветви степени поляризации его света, а также на то, что вид фазовых зависимостей в различные противостояния несколько различается. Последующие наблюдения в различные противостояния и в спектральном интервале  $\lambda = 320 \dots 1050$  нм [22] [23, 28, 54, 56, 57] показали сильную спектральную зависимость положительной поляризации (рис. 9) и наличие явления инверсии поляризации во всем видимом диапазоне длин волн. При этом, как уже говорилось, в длинноволновой области спектра ( $\lambda > 550$  нм) положение точки инверсии практически не изменяется с длиной волны, тогда как для  $\lambda < 550$  нм угол инверсии резко уменьшается с уменьшением длины волны (рис. 10). Несомненный интерес представляют результаты поверхностной поляриметрии Дольфюса [57], потому что только они указали на то, что угол инверсии на фазовой кривой поляризации светлых деталей имеет большее значение (примерно на  $5^\circ$ ), чем у темных. Вероятнее всего, именно этим объясняется тот наблюдательный факт, что у

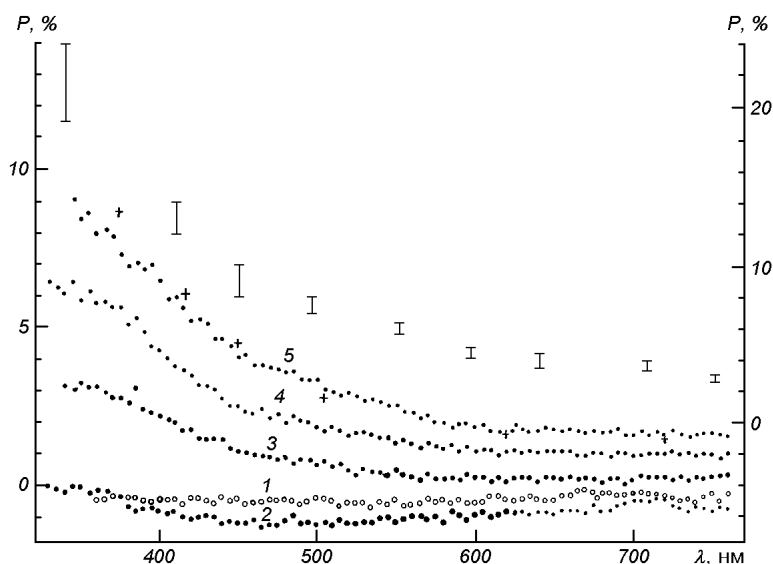


Рис. 9. Спектральные зависимости степени поляризации света Марса в 1986 г. при различных значениях фазового угла  $\alpha$  [37]: 1 —  $4.2^\circ$ , 2 —  $11.8^\circ$ , 3 —  $24.6^\circ$ , 4 —  $37.5\text{--}43.2^\circ$ . Крестики — наблюдения в 1971 г. [28] (шкала ординат слева). Вертикальные линии — измерения АМС «Марс-5» при  $\alpha = 60^\circ$  в 1974 г. [58] (шкала ординат справа)

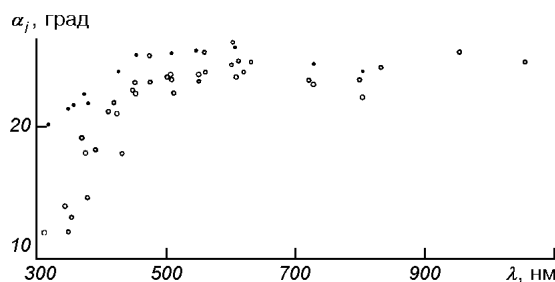


Рис. 10. Изменение положения точки инверсии поляризации света Марса с длиной волны. Светлые кружки — периоды высокой прозрачности атмосферы, точки — глобальные пылевые бури [27]

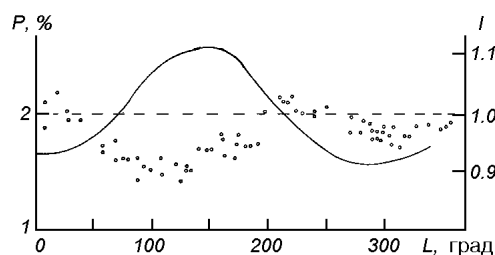


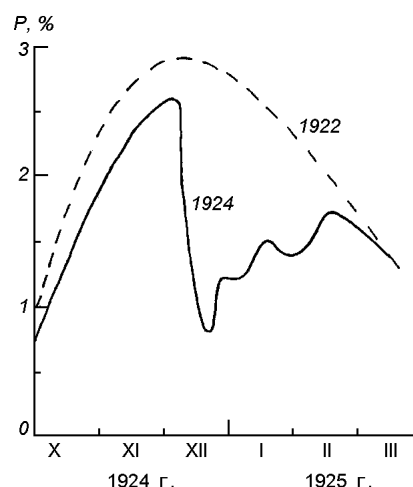
Рис. 11. Долготные зависимости степени поляризации диска Марса на длине волны  $\lambda = 720$  нм в периоды высокой прозрачности атмосферы (кружки — в поляризации, сплошная линия — в отражательной способности) [26]

противостояния с различными значениями аэроцентрического склонения Земли на одной и той же длине волны несколько изменяется значение угла инверсии. Дополнительным следствием различия поляризационных свойств светлых и темных деталей диска является наличие долготного эффекта в поляризующих свойствах света диска Марса (рис. 11). Поляризационные свойства Марса также исследовались КА «Марс-5» в феврале 1975 г. в девяти длинах волн спектрального интервала  $\lambda\lambda = 342...749$  нм [58], но было опубликовано весьма ограниченное количество данных, которые относятся к  $\alpha = 60$  и  $90^\circ$  (рис. 9, вертикальные линии).

В далекой УФ-области спектра, насколько нам известно, пока имеется только два измерения. Первое из них было сделано в 1969 г. с поднятого на высоту 36 км 70-см телескопа при фазовом угле  $25.4^\circ$  на длине волны  $\lambda = 225$  нм [50], а последними были спектрополяриметрические измерения при фазовом угле  $21.5^\circ$  в интервале длин волн от 210 до 1000 нм в 1995 г. [62]. Эти измерения очень важны при определении физических свойств атмосферного аэрозоля, о чем подробнее будет сказано ниже.

Уже первые измерения Лио в период глобальной пылевой бури 1924 г. указали на высокую чувствительность поляризационных измерений к вариациям аэрозольной составляющей атмосферы, что проявилось в резком уменьшении степени положительной поляризации (рис. 12). Наблюдения в периоды последующих пылевых бурь подтвердили этот эффект и для широкого спектрального интервала. Оказалось, что состояние повышенной запыленности атмосферы наиболее долго проявляется именно в поляризационных измерениях и охватывает временной интервал от 2 до 5 месяцев. В периоды глобальных пылевых бурь полностью исчезает долготная зависимость в степени поляризации, а спектральная зависимость угла инверсии становится менее выраженной (см. рис. 10, точки). Кроме того, не исключено, что на фазовом угле около  $5^\circ$  появляется обусловленная аэрозольной составляющей атмосферы вторая точка инверсии, вследствие чего на  $\alpha < 5^\circ$  возможна ветвь положительной поляризации. Анализом полученных главным образом наземными средствами поляризационных измерений оценены значения действительной части показателя преломления аэрозоля

Рис. 12. Сравнение изменения поляризующих свойств света Марса в периоды глобальной пылевой бури 1924 г. и высокой прозрачности атмосферы в 1922 г. [80]



( $1.5 \leq n_r \leq 1.6$  в периоды высокой прозрачности атмосферы и  $1.59 \pm 0.01$  в периоды глобальных пылевых бурь) и среднегеометрического радиуса частиц (нормально-логарифмический закон распределения частиц по размерам) соответственно для этих же состояний атмосферы  $r_0 = 0.05$  мкм и не меньше 8 мкм при дисперсии размеров  $\sigma^2 = 0.10$  [12, 27]. Эти оценки велись с учетом только однократного рассеяния и по спектральной зависимости значений второго параметра Стокса  $Q(\lambda)$  в предположении непоглощающих сферических частиц. Для периодов глобальных пылевых бурь атмосфера принималась полубесконечной чисто аэрозольной. Более сложная ситуация для периодов высокой прозрачности атмосферы, когда практически при всех значениях фазового угла измеренная поляризация формируется подстилающей поверхностью и газовой-аэрозольной оптически тонкой атмосферой. Исключением являются наблюдения на фазовом угле, который равен углу инверсии  $\alpha_i^s$  степени поляризации для отраженного подстилающей поверхностью света. Поскольку в этом случае  $P_n(\alpha_i^s) = 0$ , то измеренная поляризация  $P_0(\alpha_i^s)$  обусловлена только марсианской атмосферой [27]. В предположении однократного рассеяния выражение для наблюдаемого значения параметра  $Q$  принимает вид

$$Q(\alpha_i^s, \lambda) = -2\pi P(\alpha_i^s, \lambda)A(\alpha_i^s, \lambda) = \\ = \{Q(\alpha_i^s, \lambda)[1 - \beta(\lambda)] - 0.75\beta(\lambda)\sin\alpha_i^s\}\omega(\lambda)f(\tau_0, \alpha_i^s), \quad (4)$$

где  $Q_a(\alpha_i^s, \lambda)$  — значение второго параметра Стокса аэрозольных частиц,  $A(\alpha_i^s, \lambda)$  — значение видимого альбедо,  $\tau_0 = \tau_g + \tau_a$  ( $\tau_g, \tau_a$  — газовая и аэрозольная составляющие марсианской атмосферы),  $\beta = \tau_g / (\tau_g + \tau_a)$ , а  $\omega(\lambda)f(\tau_0, \alpha_i^s)$  — отражательная способность атмосферного столба. Если учесть, что вопрос о спектральной зависимости  $\alpha_i^s(\lambda)$  для безатмосферных небесных тел является открытым, то для Марса на длинах волн  $\lambda < 550$  нм невозможно определить точные значения угла инверсии для подстилающей поверхности. Поэтому при анализе наблюдательных данных особое значение имеют наблюдательные данные в далекой УФ-области спектра, потому что с уменьшением длины волны относительный вклад атмосферной составляющей в наблюдательные значения второго параметра Стокса увеличивается, вследствие чего здесь меньшие погрешности будут вносить неточное значение  $\alpha_i^s(\lambda)$ . Из выражения (4) видно, что в предположении чисто рассеивающей ( $\omega(\lambda) = 1$ ) атмосферы и при известном значении атмосферного давления и химического состава атмосферы, т. е. когда можно считать

известными спектральные значения газовой составляющей оптической толщины атмосферы, определению подлежат только действительная часть показателя преломления и параметры функции распределения частиц по размерам, а также аэрозольная составляющая оптической толщины.

Как было сказано, анализ велся в предположении сферических частиц, что имеет место только в исключительных случаях. Чаще всего атмосферный аэрозоль представляет собой ансамбли хаотически ориентированных частиц не одной, а самых разнообразных форм. Поскольку нет практической возможности априорного задания реальной формы частиц, то несомненный интерес представляют работы по оценке влияния неверного задания формы частиц на оцениваемые значения оптических параметров атмосферы. В работе [12] было показано, что использование моделей сферических частиц и довольно сильно вытянутых сфероидов вращения (с отношением осей 1:2) при анализе поляризационных измерений в периоды высокой прозрачности атмосферы Марса дает различие оценок радиуса частиц и оптической толщины аэрозольной составляющей примерно в два раза (для несферических частиц они были большими).

**ЮПИТЕР.** Уже первые проведенные Лио [80] измерения поляризационных свойств планеты показали, что для визуальных лучей во всем доступном для наземного наблюдателя интервале фазовых углов степень поляризации центра диска и его окрестностей отрицательна и меньше 1 %. Она уменьшалась с уменьшением угла фазы, а вид фазовой зависимости, особенно вблизи нулевого фазового угла, несколько изменялся от года к году. Исключение представляли измерения приполярных районов, для которых степень поляризации не изменялась или очень слабо изменялась с углом фазы и достигала 6 %, но различалась величиной для южной и северной полусфер. Измерения лимбовых точек диска показали, что плоскость поляризации совпадала не с плоскостью экватора интенсивности, а с плоскостью нахождения радиуса-вектора диска. Это позволило Лио сделать предположение о том, что эффект обусловлен многократным рассеянием света при формировании линейной поляризации на краю диска планеты. Последующие измерения [3, 9, 20, 25, 29, 32, 33, 37, 44, 48, 64, 67, 93] позволили изучить поведение фазовых зависимостей степени поляризации в широком интервале длин волн (от 316 до 800 нм) для всего диска планеты и его центра, а также подтвердили, что северный и южный полярные районы имеют различные поляризующие свойства, а сами значения степени поляризации этих участков диска довольно сильно изменяются во времени [32]. При наземных наблюдениях погрешность измерений в некоторых работах достигала 0.05 %. В дополнение к этим наземным измерениям при пролетах КА «Пионер-10» и «Пионер-11» мимо Юпитера были проведены еще поляризационные сканирования диска на длинах волн  $\lambda\lambda = 440$  и 670 нм в широком интервале фазовых углов [48, 93]. Было показано, что на больших значениях фазового угла поляризация положительная и имеет большее значение для темных поясов.

Неожиданный результат дали измерения всего диска планеты вблизи нулевого фазового угла. Оказалось, что при  $\alpha < 3^\circ$  знак поляризации изменялся, а степень поляризации начала увеличиваться при приближении к  $\alpha = 0$  [25, 29, 32, 37]. Этот эффект был приписан оптической неоднородности диска и систематически наблюдался во все периоды наблюдений (рис. 13). Очевидно, что его следует использовать для обнаружения оптической неоднородности дисков планет с малыми угловыми размерами (Уран, Нептун, Плутон, а возможно, и высокоальбедных астероидов).

Диффузно отраженный приполярными районами диска Юпитера свет оказался эллиптически поляризованным [74, 81]. Как видно из рис. 14,

Рис. 13. Зависимость степени поляризации всего диска Юпитера от длины волны при  $\alpha < 0.4^\circ$ . Светлые кружки — 1971 г., темные кружки — 1973 г., крестики — 1986 г. [32]

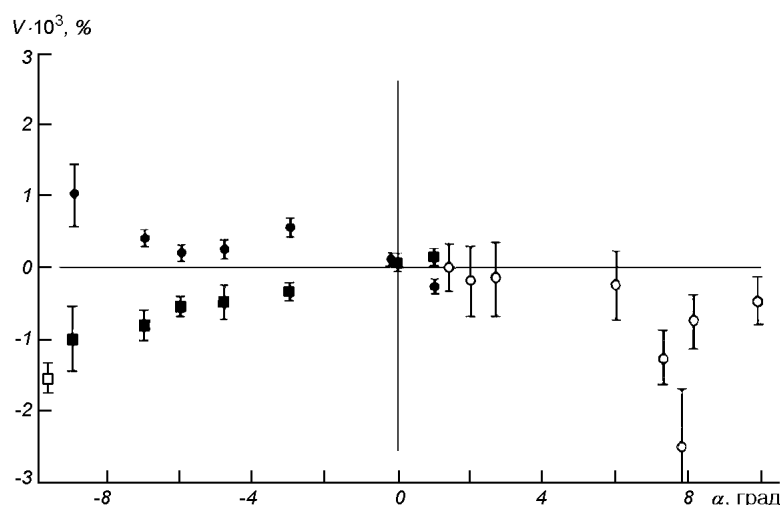
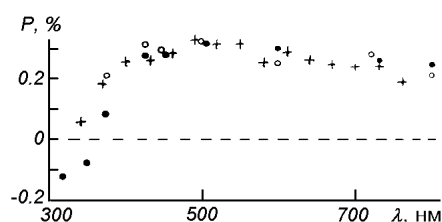


Рис. 14. Степень круговой поляризации приполярных областей Юпитера по данным наблюдений [74, 81]

наибольшее значение степени круговой поляризации находится на уровне  $10^{-5}$  и уменьшается с уменьшением угла фазы. Ее знак различен для северного и южного районов и изменяется на противоположный при изменении знака фазового угла. Механизмом появления этой поляризации может быть многократное рассеяние на крупных сферических диэлектрических частицах [68].

По перечисленным наблюдательным данным были оценены значения параметров облачных частиц. Так, А. В. Мороженко и Э. Г. Яновицкий [86] при анализе с приближенным учетом многократного рассеяния впервые оценили величину действительной части показателя преломления  $n_r = 1.36 \pm 0.01$  и параметров нормально-логарифмического закона распределения частиц по размерам ( $r_0 = (0.19 \pm 0.01)$  мкм,  $\sigma^2 = 0.28 \pm 0.02$ ). Несколько позже Мищенко [83] повторил такой анализ, но уже со строгим учетом многократного рассеяния. В предположении модифицированного гамма-распределения частиц по размерам им было получено  $n_r = 1.39 \pm 0.01$ ,  $r_{\text{эф}} = (0.39 \pm 0.08)$  мкм,  $v_{\text{эф}} = 0.45$  [83]. Перерасчет оценок работы [86] по соотношениям

$$r_{\text{эф}} = r_0 \exp[2.5\sigma^2], \quad v_{\text{эф}} = \exp[\sigma^2/2] - 1 \quad (5)$$

(при переходе от нормально-логарифмического до модифицированного гамма-распределения) и

$$r'_0 \exp[\sigma'/2] = r''_0 \exp[\sigma''^2/2]$$

(при переходе в пределах нормально-логарифмического закона, но с различными значениями параметров дисперсии размеров) привел к значениям  $r_{\text{эф}} = 0.40$  мкм и  $v_{\text{эф}} = 0.35$ .

Несомненный интерес представляет работа Кавата и Хансена [15], в которой из анализа результатов измерений круговой поляризации были получены несколько большие значения размера частиц. Кроме того, в ней было показано, что полученные в работе [86] оценки параметров аэрозоля не согласуются с данными для круговой поляризации, что было приписано ошибочности результатов анализа измерений параметров линейной поляризации. Однако такое заключение является поспешным. Поскольку круговая поляризация в приполярных районах возникает в процессе многократного рассеяния, то полученные при анализе результатов ее измерения оценки параметров аэрозоля относятся к глубоким слоям атмосферы ( $\tau_0 > 1$ ), тогда как данные анализа измерений параметров линейной поляризации, как говорилось выше, характеризуют верхние слои атмосферы ( $\tau_0 \leq 1$ ). Поскольку в турбулентном облачном слое Юпитера имеет место увеличение среднего размера частиц с глубиной [36], то это несовпадение оценок радиусов говорит не об ошибочности одной из них, а отображает реальную вертикальную стратификацию размеров.

Особую важность в изучении Юпитера представляют данные спектрополяриметрии в полосах поглощения метана, которые были начаты Волтенскрофтом и Смитом [98] и продолжены работами автора с коллегами [9, 20, 33, 37] (рис. 15). Оказалось, что такие измерения только в центре диска позволяют чрезвычайно просто и с довольно высокой точностью определять количество метана  $NL$  на луче зрения [20]:

$$NL = -[\mu_0 / (1 + \mu_0) k_v] \ln [P_v(\mu_0) / P_c(\mu_0) R_v(\mu_0)]. \quad (6)$$

Здесь  $P_v(\mu_0)$  и  $P_c(\mu_0)$  — значения степени поляризации в центре полосы поглощения и непрерывном спектре соответственно,  $R_v(\mu_0)$  — остаточная интенсивность в центре полосы поглощения,  $k_v$  — значение монохроматического коэффициента поглощения метана в центре полосы поглощения, а  $\mu_0$  — косинус угла падения света. Несколько позже [37] было показано, что выражение (6) применимо и при наблюдениях с расположенной вдоль экватора интенсивности щелью. Именно благодаря этому методу однозначно было показано, что верхняя граница облачного слоя над Экваториальной Зонай находится примерно на  $0.8H_g$  ( $H_g$  — шкала высот газовой составляющей атмосферы) выше, чем над Северной и Южной Экваториальными Полосами [33]. Отметим, что преимуществом этого метода является то, что он не нуждается в использовании предположения о горизонтальной однород-

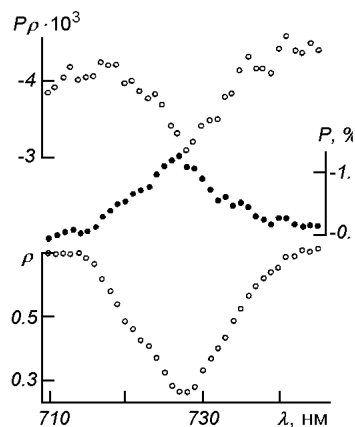


Рис. 15. Контуры полосы поглощения метана в поляризации  $P(\lambda)$ , отражательной способности  $\rho(\lambda)$  и произведения  $P(\lambda)\rho(\lambda)$  при фазовом угле  $10.7^\circ$  [33]



ности оптических свойств диска планеты. Кроме того, поскольку, как уже не раз говорилось, параметры линейной поляризации формируются на небольшой глубине облачного слоя, то здесь до минимума сводятся ошибки некорректно выбранной модели вертикальной структуры последнего.

**САТУРН.** Поляризационные свойства его света исследовались неоднократно [3—5, 30, 40, 67, 80, 91, 94]. Оказалось, что для центра его диска даже при малых значениях угла фазы степень поляризации довольно большая и довольно характерно изменяется с длиной волны (рис. 16). Кроме того, было открыто наличие мелких ориентированных частиц [7] в верхних слоях его атмосферы, что проявилось в следующих наблюдательных эффектах. 1. На восточном и западном лимбах в пределах широт от  $-23$  до  $+23^\circ$  для длин волн  $\lambda < 450$  нм положение плоскости поляризации не соответствовало ни модели однократного рассеяния ( $0$  или  $90^\circ$  с плоскостью рассеяния), ни модели многократного рассеяния ( $0$  или  $90^\circ$  с радиусом-вектором) [4, 67]. 2. На фазовой зависимости степени поляризации центра диска планеты для  $\lambda = 316$  нм наименьшее значение поляризации приходилось на фазовый угол  $2^\circ$ , а положение плоскости поляризации также не совпадало ни с  $0$  ни с  $90^\circ$  [30] (рис. 17). В качестве источника таких частиц был предложен механизм, обусловленный выпадением субмикронных частиц из колец Сатурна, которые являются ядрами кристаллизации аммиака.

Как и для Юпитера, диффузно отраженный приполярными районами свет эллиптически поляризован, но максимальное значение степени круговой поляризации приходится на фазовый угол около  $2^\circ$  [74] (рис. 18).

Из анализа спектральной зависимости линейной поляризации для диапазона  $\lambda > 500$  нм, где нет обусловленных ориентированными частицами эффектов, было получено два решения:  $1.35 < n_r < 1.42$ ,  $r_0 = 1.0 \pm 0.1$  мкм и  $n_r = 1.93$ ,  $r_0 = 0.4$  мкм при  $\sigma^2 = 0.12$  для обоих решений [6, 30]. Однако оказалось, что имевшиеся на то время данные о распределении яркости по диску планеты в непрерывном спектре лучше согласуются с расчетами для индикатрисы рассеяния, которая соответствует параметрам аэрозоля первого решения. Анализ данных о круговой поляризации также дал неоднозначное решение:  $n_r = 1.44$ ,  $r_{\text{эф}} = 1.4$  мкм и  $n_r = 1.60$ ,  $2 \text{ мкм} < r_{\text{эф}} < 5 \text{ мкм}$  при  $v_{\text{эф}} = 0.07$  для обоих решений [73]. Легко убедиться, что пересчет параметров функции распределения частиц по размерам первого из этих решений на закон нормально-логарифмического распределения по выражениям (3) приведет к среднегеометрическому радиусу частиц примерно 1.2 мкм, т. е.

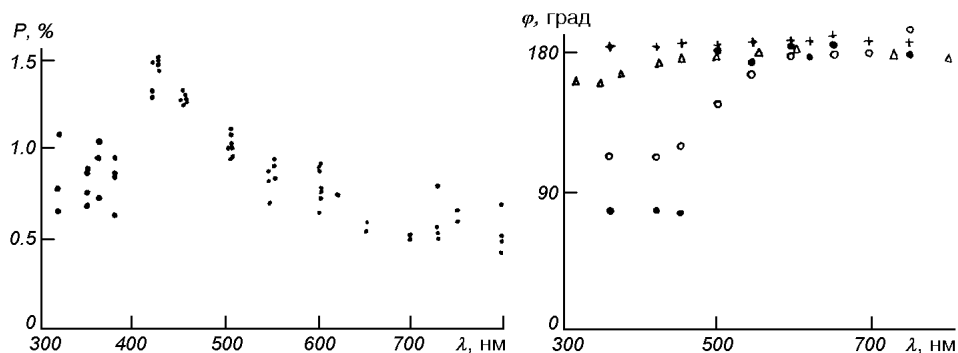


Рис. 16. Зависимость степени поляризации центра диска Сатурна от длины волны при фазовом угле  $6.2^\circ$  [7]

Рис. 17. Изменение положения плоскости поляризации от длины волны для Южного приполярного района (крестики), центра диска (треугольники), западного (темные кружки) и восточного (светлые кружки) приэкваториальных районов [7]

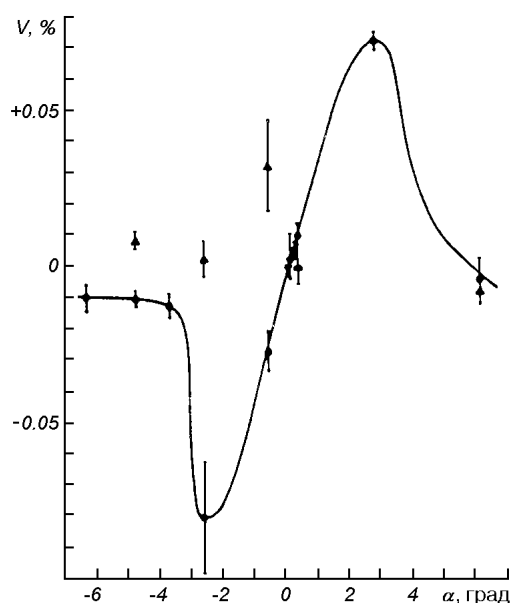


Рис. 18. Фазовая зависимость степени круговой поляризации света приполярных районов Сатурна [74]

практически к тому же значению, которое дает анализ данных о степени линейной поляризации. Это означает, что в атмосфере Сатурна менее выражена стратификация размеров частиц с глубиной.

#### КОМЕТЫ

Особое место среди тел Солнечной системы занимают кометы. Дело в том, что несмотря на малые значения оптической толщины их атмосфер, вклад твердого ядра в интегральные оптические свойства комет пренебрежимо мал. Поэтому измеряемые поляриметрические свойства обусловлены главным образом рассеянием на аэрозоле и эмиссиями газов. Согласно выполненным до 1980 г. данным, результаты которых подытожены в работах [13, 85], для всех комет характер зависимости степени поляризации от угла фазы в визуальных лучах практически одинаков. Во всем исследованном диапазоне длин волн  $\lambda = 360 \dots 1650$  нм максимальное значение степени поляризации наблюдается при близких к  $90^\circ$  значениях фазового угла, а само значение максимальной поляризации в визуальных лучах находится в пределах от 8 до 35 % (рис. 19). Считается, что для комет со значениями  $P_{\max} < 15$  % главным механизмом возникновения поляризации являются эмиссии различных газов, а для комет с большими значениями степени поляризации — рассеяние на аэрозоле. Степень поляризации (во всяком случае при больших значениях фазового угла) в эмиссиях значительно меньше, чем в непрерывном спектре [8]. Как правило, значение степени поляризации увеличивается с увеличением длины волны, одной из причин чего может быть уменьшение вклада интенсивности эмиссии газов с увеличением  $\lambda$ . Как и для безатмосферных небесных тел, при фазовых углах  $\lambda < 25^\circ$  наблюдается ветвь отрицательной поляризации [13]. Немногочисленные работы, где изучались поляризационные свойства отдельных деталей изображения кометы, указали на изменение ориентации плоскости поляризации в отдельных точках изображения и на его краях [13].

В последующем эти результаты не только подтвердились, но и дополнились новыми особенностями. Как и для безатмосферных небесных тел, положение точки инверсии на фазовых зависимостях поляризации света кометы Галлея не зависит или очень слабо зависит от длины волны в

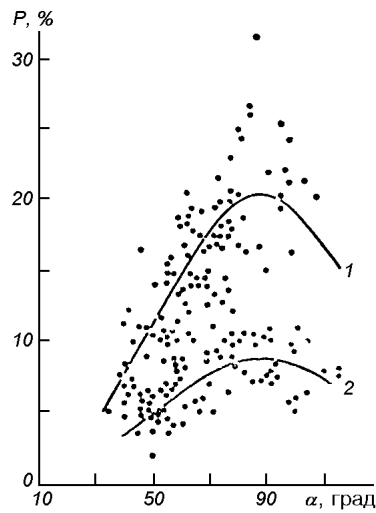


Рис. 19. Зависимости степени поляризации в визуальных лучах для газовых (2) и пылевых (1) комет [13]

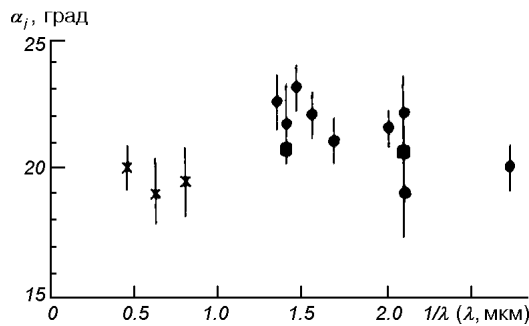


Рис. 20. Изменение с длиной волны точки инверсии поляризации кометы Галлея [52]

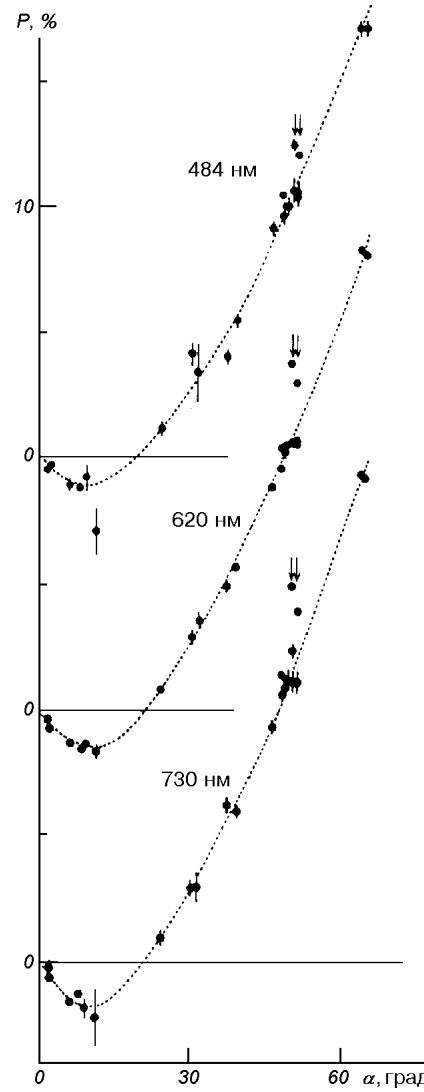


Рис. 21. Фазовые зависимости степени поляризации кометы Галлея в различных длинах волн непрерывного спектра [75]

интервале  $\lambda\lambda = 384...2250$  нм и находится в пределах от  $19$  до  $23^\circ$  [46, 52] (рис. 20, 21).

Тщательные поляризационные измерения кометы Галлея в пределах фазовых углов  $21-23.5^\circ$  на протяжении 5 ночей [8] указали на возможность существования оригинального эффекта, согласно которому в этом интервале фазовых углов степень поляризации была больше погрешности измерения, а плоскость поляризации в непрерывном спектре составляла с плоскостью рассеяния угол около  $40-50^\circ$ , тогда как на длинах волн, которые соответствуют эмиссии молекулы  $C_2$ , практически при таких же значениях степени поляризации этот угол был практически равен  $90^\circ$ . Поэтому не исключено, что для рассеянного кометным аэрозолем света в так называемой точке инверсии изменяется только ориентация плоскости поляризации, а степень поляризации не принимает нулевого значения.

В 1986 г. по крайней мере тремя группами измерялась степень круговой поляризации света кометы Галлея. Так, измерения Хафнера [66] в семи точках головы кометы в период 16—20 марта обнаружили круговую поляризацию в пределах от 0.5 до 0.9 % при погрешности 0.5 %. Дольфус и Суцаил [59] на протяжении 7 ночей с 8 по 15 апреля такие измерения вели практически для всего визуального диапазона длин волн в различных точках диска кометы. Хотя погрешность измерений была очень большой (как правило от 1 до 3 %), но они не исключали наличия круговой поляризации. Наиболее убедительные доказательства наличия последней было получено автором с коллегами [35]. В отличие от предыдущих работ, в которых пространственная селекция осуществлялась круглыми диафрагмами, здесь применялась щель размером  $2.7'' \times 81''$ , которая устанавливалась параллельно радиусу-вектору впереди ядра. Измерения велись на протяжении 10 ночей с 10 по 29 апреля 1986 г., когда фазовый угол изменялся от  $35^\circ$  до  $21^\circ$  и снова до  $28^\circ$ . Значения степени круговой поляризации  $V$  определялись двумя методами: дифференциальным и прямым.

В дифференциальном методе предполагалось, что свет эмиссий только линейно поляризован, поэтому значение степени круговой поляризации рассеянного аэрозолем света находилось как разность параметров  $V$  на длинах волн  $\lambda = 484$  (минимальный вклад эмиссий) и 514 нм (мощная эмиссия  $C_2$ ), которые вырезались интерференционными светофильтрами А'Херна. Статистическая погрешность измерений в каждую ночь находилась, как правило, в пределах 0.1—0.2 %. Для повышения точности было проведено усреднение за весь период наблюдений. Оказалось, что  $V = 0.40 \pm 0.09$  %. Подчеркнем, что здесь измеренное значение параметра  $V$  на длине волны  $\lambda = 514$  нм приписывалось инструментальной поляризации.

В прямом методе инструментальная поляризация исследовалась наблюдениями Юпитера, на котором щель ориентировалась вдоль экватора планеты и центра диска Луны. Оказалось, что  $V_{\text{ин}} = 0.10 \pm 0.01$  %. Для усредненного значения круговой поляризации на длине волны  $\lambda = 484$  нм было получено  $0.26 \pm 0.06$  %.

Наличие круговой поляризации и отмеченные выше изменения ориентации плоскости поляризации непосредственно указывают на то, что кометный аэрозоль действительно является несферическим и ориентированным, поэтому не удивительно, что результаты анализа в модели сферических частиц не увенчались успехом.

Перечисленные выше особенности поляризующих свойств комет, а также некоторых их спектрофотометрических свойств побудило автора еще в 1980 г. [85] высказать предположение о том, что кометный аэрозоль должен являть собой ориентированные шероховатые (агрегатные) частицы довольно больших размеров, для которых спектрополяризационные свойства имеют много общего как с частицами, так и с безатмосферными небесными телами. Петрова и др. [89] провели модельные расчеты для мелких агрегатных частиц и показали, что фазовые зависимости степени поляризации рассеянного ими света напоминают фазовые зависимости для комет. Но, как видно из приведенных в этой работе расчетов, в модели мелких частиц должно наблюдаться значительное увеличение угла инверсии с уменьшением длины волны, что противоречит наблюдениям.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итак, имеющиеся данные исследований поляризационных свойств света тел Солнечной системы и образцов земных пород позволили установить ряд принципиально важных особенностей.

Для безатмосферных небесных тел и земных образцов, кроме таких общеизвестных эффектов как эффект Умова и наличие при фазовых углах меньше  $30^\circ$  отрицательной ветви поляризации, в последние десятилетия были обнаружены следующие малоизученные эффекты. Независимость или слабая зависимость положения точки инверсии от длины волны; плавный поворот плоскости поляризации вблизи точки инверсии в некотором интервале  $\Delta\lambda$ , ширина которого зависит от природы вещества; появление при фазовых углах больше  $90^\circ$  круговой поляризации даже в случае освещения неполяризованным источником; вероятное наличие вблизи нулевого фазового угла обусловленного явлением когерентного рассеяния так называемого оппозиционного эффекта.

Диффузно отраженный планетными атмосферами свет, как правило, является линейно поляризованным, и только в случае Юпитера и Сатурна вблизи полярных районов появляется значимая круговая поляризация. Для планет с мощными атмосферами положение плоскости поляризации лимбовых точек диска привязано не к плоскости рассеяния, а радиусу-вектору точки, что должно наблюдаться при формировании поля диффузно отраженного излучения в процессе многократного рассеяния. В большинстве случаев поляризационные свойства не противоречат предположению о сферической форме частиц или хаотически ориентированном ансамбле частиц несферической формы. Только в случае Сатурна в коротковолновой области спектра ( $\lambda < 500$  нм) имеются убедительные свидетельства о наличии в верхних слоях атмосферы для приэкваториальных районов (в пределах склонений  $\pm 23^\circ$ ) ориентированных частиц. Кроме того, поляризационные исследования всего диска Юпитера показали, что оптическая неоднородность диска приводит к появлению значимой линейной поляризации на близких к нулю значениях фазового угла. Пока только в случае планетных атмосфер поляризационные исследования позволили оценить значения действительной части показателя преломления аэрозольных частиц и параметров функции распределения последних по размерам. При этом анализ данных о линейной поляризации дает информацию о частицах в самых верхних слоях атмосферы (с оптической толщиной около 1), а круговой — глубоких (с  $\tau \gg 1$ ). Кроме того, поляриметрические измерения в контурах полос поглощения метана в спектре Юпитера позволяют очень просто и надежно определить количество метана в надоблачном слое.

Хотя степень поляризации света сильно и слабо запыленных кометных атмосфер при больших фазовых углах различается в несколько раз, но вид фазовых зависимостей поляризации практически одинаков, а максимальное значение степени поляризации приходится на близкое к  $90^\circ$  значение фазового угла. Как и для безатмосферных небесных тел, при малых значениях фазового угла имеет место ветвь отрицательной поляризации, а положение точки инверсии очень слабо зависит или совсем не зависит от длины волны. Поверхностная поляриметрия указала на существование участков комы с аномальными положениями плоскости поляризации и на то, что положение плоскости поляризации света краев комы скорее всего привязано к радиусу-вектору. Вероятнее всего, свет комы эллиптически поляризован. Не исключено, что для комет в точке инверсии степень поляризации не достигает нулевого значения, а изменение положения плоскости поляризации на  $90^\circ$  также происходит плавно. Все это убедительно указывает на то, что поляризационные свойства комет формируются в процессе рассеяния света на ориентированных пористых частицах несферической формы, размеры которых значительно больше длины волны.

При поляризационных исследованиях тел Солнечной системы особое внимание необходимо обращать на измерения степени круговой поляриза-

ции, положение плоскости линейной поляризации (особенно вблизи нулевого фазового угла и точки инверсии), в контурах молекулярных полос поглощения. Для высокоальбедных астероидов существенным может быть роль многократного рассеяния в поверхностном слое. Поэтому оптические неоднородности их дисков (по аналогии с Юпитером) могут привести к ненулевому значению степени поляризации в оппозицию, а также к тому, что положение плоскости поляризации может иметь промежуточное значение между 0 и 90°. Поскольку для большинства тел Солнечной системы вообще нет наблюдательных данных о степени линейной поляризации в далеком УФ-диапазоне, то необходимо более активно использовать внеатмосферные наблюдательные базы.

Благодарю рецензента за внимательное прочтение статьи и сделанные замечания.

1. Аврамчук В. В. Многоцветная поляриметрия некоторых участков Луны // Физика Луны и планет. — Киев: Наук. думка, 1964.—С. 3—15.
2. Болквадзе О. Р. Исследование поляризационных свойств Юпитера // Бюл. Абастум. астрофиз. обсерватории.—1980.—№ 53.—С. 131—163.
3. Болквадзе О. Р., Сигуа Л. А. Поляриметрия Юпитера и Сатурна // Бюл. Абастум. астрофиз. обсерватории.—1986.—№ 61.—С. 125—146.
4. Бугаенко О. И., Галкин Л. С. Поляриметрические исследования планет-гигантов. II. Фазовый ход поляризации избранных областей диска Сатурна // Астрон. журн.—1972.—49, № 4.—С. 837—843.
5. Бугаенко О. И., Галкин Л. С., Мороженко А. В. Поляриметрические исследования планет-гигантов. I. Распределение поляризации по диску Сатурна // Астрон. журн.—1972.—48, № 2.—С. 373—379.
6. Бугаенко О. И., Длугач Ж. М., Мороженко А. В., Яновицкий Э. Г. Об оптических свойствах облачного слоя Сатурна в видимом участке спектра // Астрон. вестник.—1975.—9, № 1.—13—21.
7. Бугаенко О. И., Мороженко А. В. Ориентированные частицы в верхних слоях атмосферы Сатурна // Физика планетных атмосфер / Под ред. А. В. Мороженко. — Киев: Наук. думка, 1981.—С. 108—112.
8. Гурадьчук А. Л., Киселев Н. Н., Мороженко А. В. О поведении вблизи точки инверсии положения плоскости поляризации света, рассеянного атмосферой кометы Галлея // Кинематика и физика небес. тел.—1987.—3, № 1.—С. 93—94.
9. Гурадьчук А. Л., Кучеров В. А., Мороженко А. В. Спектрополяриметрия планет. II. Юпитер // Кинематика и физика небес. тел.—1986.—2, № 4.—С. 57—62.
10. Дегтярев В. С., Колоколова Л. О., Мороженко А. В. Вращение плоскости поляризации света, рассеянного шероховатыми поверхностями, вблизи точки инверсии // Астрон. циркуляр.—1990.—№ 1545.—С. 35—36.
11. Дегтярев В. С., Колоколова Л. О., Мороженко А. В., Цуруль М. Ф. Диагностические возможности круговой поляризации при изучении поверхностей безатмосферных космических тел // Письма в Астрон. журн.—1992.—18, № 3.—С. 279—283.
12. Длугач Ж. М., Мищенко М. И., Мороженко А. В. Влияние формы частиц на оценки оптических параметров пылевой составляющей атмосферы Марса // Кинематика и физика небес. тел.—2002.—18, № 1.— С. 33—42.
13. Добровольский О. В., Киселев Н. Н., Чернова Г. П. Поляриметрия комет // Фотометрические и поляриметрические исследования небесных тел / Под ред. А. В. Мороженко. — Киев: Наук. думка, 1985.—С. 3—8.
14. Дольфнос А., Длугач Ж. М., Мороженко А. В., Яновицкий Э. Г. Оптические параметры атмосферы и поверхности Марса. II. Пылевые бури // Астрон. вестник.—1974.—8, № 4.—С. 211—222.
15. Кавата И., Хансен Дж. Е. Круговая поляризация солнечного света, отраженного от Юпитера // Юпитер. II. Атмосфера, ионосфера / Под ред. Т. Герелса. — М.: Мир, 1979.—С. 378—394.
16. Кварцхелия О. И. Спектрополяриметрия лунной поверхности и образцов лунного грунта // Бюл. Абастум. астрофиз. обсерватории.—1988.—64.—С. 3—311.
17. Колоколова Л. О. Математическое моделирование рассеяния света поверхностями в поляриметрии безатмосферных космических тел. — Киев, 1987.—24 с.—(Препринт / АН УССР, Ин-т теорет. физики; ИТФ-87-70Р).

18. Колоколова Л. О. Исследование некоторых статистических зависимостей между поляриметрическими характеристиками света, рассеянного поверхностями безатмосферных космических тел // Кинематика и физика небес. тел.—1987.—3, № 5.—С. 47—51.
19. Кохан Е. К. Каталог параметров поляризованного света, отраженного земными горными породами // Изв. ГАО АН СССР в Пулковке.—1964.—Вып. 5, № 17.—С. 93—106.
20. Кучеров В. А., Мищенко М. И., Мороженко А. В. Спектрополяриметрия в полосах поглощения метана и вертикальная структура планетных атмосфер // Письма в Астрон. журн.—1990.—14, № 9.—С. 835—839.
21. Лупшико Д. Ф., Бельская Н. Н., Кварцхелия О. И. и др. Поляриметрия Весты в противостояние 1986 г. // Астрон. вестник.—1988.—С. 142—146.
22. Мороженко А. В. Результаты поляриметрических наблюдений Марса в 1962—1963 гг. // Физика Луны и планет. — Киев: Наук. думка, 1964.—С. 58—80.
23. Мороженко А. В. Поляризационные свойства атмосферы и поверхности Марса // Физика Луны и планет. — Киев: Наук. думка, 1966.—С. 49—69.
24. Мороженко А. В. Исследование поляризационных свойств света, отраженного различными образцами земных пород // Физика Луны и планет. — Киев: Наук. думка, 1966.—С. 70—82.
25. Мороженко А. В. Поляриметрические исследования планет-гигантов. III. Юпитер // Астрон. журн.—1973.—50, № 1.—С. 163—166.
26. Мороженко А. В. Долготный эффект в поляризации диска Марса // Астрон. журн.—1973.—50, № 5.—С. 1057—1061.
27. Мороженко А. В. Оптические параметры атмосферы и поверхности Марса. I. Аэрозольная составляющая чистой атмосферы // Астрон. вестник.—1974—8, № 3.—С. 121—127.
28. Мороженко А. В. Результаты поляриметрических наблюдений Марса в 1971 и 1973 гг. // Астрометрия и астрофизика.—1975.—Вып. 26.—С. 97—107.
29. Мороженко А. В. Результаты поляризационных исследований Юпитера // Астрометрия и астрофизика.—1975.—Вып. 30.—С. 47—54.
30. Мороженко А. В. Физические свойства верхних слоев атмосферы Сатурна // Астрометрия и астрофизика.—1977.—Вып. 33.—С. 78—86.
31. Мороженко А. В. О минералогическом картировании лунной поверхности // Изв. высших учебных заведений. Геодезия.—1983.—№ 1.—С. 86—92.
32. Мороженко А. В. Временные изменения поляризационных свойств света Юпитера // Кинематика и физика небес. тел.—1988.—4, № 5.—С. 54—59.
33. Мороженко А. В. Зоны и полосы Юпитера. Надоблачный слой // Астрон. вестник.—1990.—24, № 3.—С. 211—220.
34. Мороженко А. В. Короткопериодические изменения поляризационных свойств излучения Венеры // Кинематика и физика небес. тел.—1992.—8.—№ 4.—С. 22—36.
35. Мороженко А. В., Киселев Н. Н., Гуральчук А. Л. О круговой поляризации света головы кометы Галлея // Кинематика и физика небес. тел.—1987.—3, № 2.—С. 89—90.
36. Мороженко А. В., Овсак А. С., Корсун П. П. Вертикальная структура облачного слоя Юпитера до и после столкновения с кометой Шумейкер—Леви 9 // Кинематика и физика небес. тел.—1995.—11, № 4.—С. 3—20.
37. Мороженко О. В. Результаты спектрополяриметрических спостережень планет та галілеєвих супутників Юпітера в протистояння 1986, 1988 та 1989 рр. // Кинематика и физика небес. тел.—2001.—17, № 1.—С. 45—57.
38. Мороженко О. В., Яновицький Е. Г. Дослідження з фізики планет та малих тіл Сонячної системи // 50 років Головної астрономічної обсерваторії. — Київ, 1994.—С. 135—163.
39. Розенберг Г. В. К вопросу об отражательной способности мутных сред // Сб. памяти П. П. Лазарева. — 1956.—С. 132—143.
40. Сигуа Л. А. Электрополяриметрические исследования Сатурна и его колец // Бюл. Абастум. астрофиз. обсерватории.—1986.—№ 61.—С. 109—124.
41. Соболев В. В. Исследование атмосферы Венеры. II // Астрон. журн.—1968.—45, № 1.—С. 169—176.
42. Стародубцева О. М. Периодичность изменения поляризации экваториальной области Венеры // Письма в Астрон. журн.—1985.—11, № 2.—С. 156—160.
43. Стародубцева О. М. Вариации поляризационных свойств Венеры по наземным наблюдениям // Астрон. вестник.—1989.—23, № 3.—С. 233—242.
44. Стародубцева О. М., Тейфель В. Г. Поляризация света в полярных областях Юпитера // Астрон. вестник.—1984.—18, № 3.—С. 179—190.
45. Bowell E. Short-term periodic variations in the polarizations // The atmosphere of Venus / Ed. by J. E. Hansen. — Washington, 1975.—P. 36—39.
46. Brooke T. Y., Knacke R. F., Jiyce R. R. The near-infrared polarization and color of comet P/Halley // Astron. and Astrophys.—1987.—187, N 1-2.—P. 621—624.
47. Coffeen D. L. A polarimetric Study of the atmosphere of Venus // A dissertation submitted to the faculty of the department of astronomy. — Arizona: University of Arizona, 1968.—117 p.

48. *Coffeen D. L.* Optical polarization measurements of the Jupiter atmosphere at 103 phase angle // *J. Geophys. Res.*—1974.—79, N 25.—P. 3645—3660.
49. *Coffeen D. L., Gehrels T.* Wavelength dependence of polarization. XV. Observations of Venus // *Astron. J.*—1969.—74, N 3.—P. 433—445.
50. *Coffeen D. L., Gehrels T.* Ultraviolet Polarimetry of Planets // *Planetary Space Res.*—1970.—10, N 1.—P. 1—7.
51. *Dollfus A., Auriere M., Santer R.* Wavelength dependence of polarization. XXXVII. Regional observations of Venus // *Astron. J.*—1979.—84, N 9.—P. 1419—1436.
52. *Dollfus A., Bastien P., Borgne Le J.-F., et al.* Optical polarimetry of P/Halley: synthesis of the measurements in the continuum // *Astron. and Astrophys.*—1988.—206, N 2.—P. 348—356.
53. *Dollfus A., Bowell E.* Polarimetric properties of the lunar surface and its interpretation. Part 1—Telescopic observations // *Astron. and Astrophys.*—1971.—10, N 1.—P. 29—53.
54. *Dollfus A., Bowell E., Ebisava S.* The martian dust storm of 1973 // *Astron. and Astrophys.*—1984.—134, N 2.—P. 1419—1436.
55. *Dollfus A., Coffeen D. L.* Polarization of Venus. I. Disk Observations // *Astron. and Astrophys.*—1970.—8, N 2.—P. 251—266.
56. *Dollfus A., Ebisava S., Bowell E.* Polarimetric analysis and Martian dust storm and clouds in 1971 // *Astron. and Astrophys.*—1984.—131, N 1.—P. 123—136.
57. *Dollfus A., Focas J.* La planete Mars: la nature de sa surface et les proprieties de son atmosphere, d'apres la polarization de sa lumiere. I. Observations // *Astron. and Astrophys.*—1969.—2, N 1.—P. 63—74.
58. *Dollfus A., Ksanfomality L. V., Moroz V. I.* Simultaneous polarimetry of Mars from the Mars 5 spacecraft and ground-based telescopes // *COSPAR Space Res.*—1977.—17.—P. 667—671.
59. *Dollfus A., Suchail J.-L.* Polarimetry of grains in the coma of P/Halley // *Astron. and Astrophys.*—1987.—187, N 1/2.—P. 669—688.
60. *Egan W. G.* Polarimetric measurements of simulated lunar surface // *J. Geophys. Res.*—1967.—72, N 12.—P. 3233—3245.
61. *Forbes F. F.* Infrared polarization of Venus // *Astrophys. J.*—1971.—165, N 1.—P. L21—L25.
62. *Fox G. K., Code A. D., Anderson C. M. et al.* Solar system observations by the Wisconsin Ultraviolet Photopolarimeter Experiment. I. The first ultraviolet linear spectropolarimetry of Mars // *Astron. J.*—1997.—113, N 3.—P. 1152—1157.
63. *Gehrels T., Gradie J. C., Howes M. L., Vrba F. J.* Wavelength dependence of polarization. XXXIV. Observations of Venus // *Astron. J.*—1979.—84, N 5.—P. 671—682.
64. *Gehrels T., Herman B. M., Owen T.* Wavelength dependence of polarization. XIV. Atmosphere of Jupiter // *Astron. J.*—1969.—74, N 2.—P. 190—199.
65. *Gehrels T., Samuelson K. E.* Polarization-phase relations for Venus // *Astrophys. J.*—1961.—134, N 3.—P. 1022—1024.
66. *Haefner R., Mitz K.* Halley through the polaroids // *ESO Messenger.*—1986.—N 44.—P. 16—17.
67. *Hall J. S., Riley L. A.* Polarization measures of Jupiter and Saturn // *J. Atmos. Sci.*—1969.—26, N 5.—P. 920—923.
68. *Hansen J. E.* Circular polarization of Sunlight reflected by clouds // *J. Atmos. Sci.*—1971.—28, N 5.—P. 1515—1516.
69. *Hansen J. E., Arking A.* Clouds of Venus: Evidence for their nature // *Science.*—1971.—171, N 3972.—P. 669—672.
70. *Hansen J. E., Hovenier J. W.* Interpretation of the polarization of Venus // *J. Atmos. Sci.*—1974.—31, N 4.—P. 1137—1160.
71. *Kattawar G. M., Plass G. N., Adams Ch. N.* Flux and polarization calculations of the radiation reflected from the clouds of Venus // *Astrophys. J.*—1971.—170, N 2.—P. 371—386.
72. *Kawabata K., Coffeen D. L., Hansen J. E., et al.* Cloud and haze properties from Pioneer Venus polarimetry // *J. Geophys. Res.*—1980.—85, N A13.—P. 8129—8140.
73. *Kawata K.* Circular polarization of Sunlight reflected by planetary atmosphere // *Icarus.*—1978.—33, N 1.—P. 217—233.
74. *Kemp J. S., Wolstencroft R. D., Swedlund J. B.* Circular polarization: Jupiter and other planets // *Nature.*—1971.—232, N 5307.—P. 165—168.
75. *Kikuchi S., Makami Y., Mukai T., et al.* Polarimetry of comet P/Halley // *Astron. and Astrophys.*—1987.—187, N 1/2.—P. 689—692.
76. *Knibble W. J. J., de Haan J. F., Hovenier J. W.* Analysis of temporal variations of the polarization of Venus observed by Pioneer Venus orbiter // *J. Geophys. Res.*—1998.—10, N E4.—P. 8557—8574.
77. *Knollenberg R. G., Hunten D. M.* The microphysics of the clouds of Venus: Results of the Pioneer Venus particle size spectrometer experiment // *J. Geophys. Res.*—1980.—85, N A13.—P. 8039—8058.
78. *Landau R.* The infrared polarization of Venus // *J. Atmos. Sci.*—1975.—32, N 6.—P. 1157—1163.



79. *Lupishko D. F., Vasilyev S. V., Efimov Yu. S., Shahovskoj N. M.* UVRI polarimetry of asteroid 4179 Toutatis // *Icarus*.—1995.—119, N 1.—P. 200—205.
80. *Lyot B.* Recherches sur la polarization de la lumiere des planetes et de quelques substance terrestres // *Ann. Observatoire Meudon*.—1929.—8.—P. 1—161.
81. *Michalsky J. J., Stokes R. A.* A note of Jupiter's circular polarization // *Publ. Astron. Soc. Pacif.*—1977.—86, N 514.—P. 1004—1006.
82. *Mishchenko M. I.* Polarization characteristics of the coherent backscatter opposition effects // *Earth, Moon, planets*.—1992.—58, N 2.—P. 127—144.
83. *Mishchenko M. I.* Physical properties of the upper tropospheric aerosols in the equatorial region of Jupiter // *Icarus*.—1990.—84, N 2.—P. 296—304.
84. *Mishchenko M. I., Luck J-M., Nieuwenhuizen T. M.* Full angular profile of the coherent polarization opposition effect // *J. Optic. Soc. Am. A*.—2000.—17, N 5.—P. 888—891.
85. *Morozhenko A. V.* On the sizes of cometary aerosol // *Cometary exploration. II* / Ed. by T. I. Gombosi: *Pros. Inter. Conf. on cometary exploration, November 15—19, 1982, Budapest, Hungary*. — Budapest, 1983.—P. 55—57.
86. *Morozhenko A. V., Yanovitskij E. G.* The optical properties of Venus and Jovian planets. I. The atmosphere of Jupiter according to polarimetric observations // *Icarus*.—1973.—18, N 4.—P. 583—592.
87. *Mukai S., Mukai T.* Infrared properties of the haze particles of Venus // *Icarus*.—1981.—48, N 3.—P. 482—487.
88. *Ohman Y.* Tentative explanation of the polarization in diffuse reflection // *Stockholms. Observ. Ann.*—1955.—18, N 8.—10 p.
89. *Petrova E. V., Jockers K., Kiselev N. N.* Light Scattering by aggregates with sizes comparable to the wavelength: An application to cometary dust // *Icarus*.—2000.—148, N 3.—P. 526—536.
90. *Rosenbush V. K., Avramchuk V. V., Rosenbush A. E., Mishchenko M. I.* Polarization properties of the Galilean satellites of Jupiter: Observations and preliminary analysis // *Astrophys. J.*—1997.—487, N 1.—P. 402—414.
91. *Santer R., Dollfus A.* Optical reflectance polarimetry of Saturn's global and rings // *Icarus*.—1981.—48, N 3.—P. 496—518.
92. *Sato S., Kawara K., Kobayachi, et al.* Infrared polarization of Venus // *Icarus*.—1980.—43, N 3.—P. 288—292.
93. *Smith P. H., Tomasko M. G.* Photometry and polarimetry of Jupiter at large phase angles. II. Polarimetry of the South Tropical Zone, South Equatorial Belt, and the Polar regions from Pioneer 10 and 11 missions // *Icarus*.—1984.—58, N 1.—P. 35—73.
94. *Tomasko M. G., Dose L. R.* Polarimetry and photometry of Saturn from Pioneer 11: Observations and constraints on the distribution and properties of cloud and aerosol particles // *Icarus*.—1984.—58, N 1.—P. 1—34.
95. *Tomasko M. G., Smith P. H.* Photometry and polarimetry of Titan: Pioneer 11 observations and their implications for aerosol properties // *Icarus*.—1982.—51, N 1.—P. 65—95.
96. *Widorn T.* Zur photometrischen bestimmung der durchmesser der kleinen Planeten // *Ann. Univ. Stern. Wien*.—1967.—26.—P. 112—119.
97. *Wolff M.* Theory and Application of the Polarization-Albedo Rules // *Icarus*.—1980.—44, N 4.—P. 780—792.
98. *Wolstencroft R. D., Smith R. J.* Spectropolarimetry of the methane and ammonia bands of Jupiter between 6800 and 8200 Å // *Icarus*.—1973.—18, N 2.—P. 155—165.

Поступила в редакцию 120902