

## 2.4. ПОЛЯРИМЕТРИЯ ПОЛЯРНЫХ ОБЛАСТЕЙ ЮПИТЕРА

к.ф.-м.н. В. В. Корохин и О. С. Шалыгина

### Введение

Аномальное поведение поляризации отраженного излучения в полярных областях Юпитера было обнаружено еще в 20-х годах прошлого века Лио [1]. В отличие от низкоширотных областей степень линейной поляризации на широтах более  $35^\circ$  начинает резко возрастать к полюсам, достигая значений  $P = 6-7\%$  (см. рис. 2.4.1). Такое поведение поляризации не обнаруживает зависимости от угла фазы. При этом плоскость поляризации ориентирована вдоль радиуса планеты. В дальнейшем эти эффекты были подтверждены и исследованы Дольфюсом [2,3], который также обнаружил асимметрию поляризации север-юг и ее изменения во времени. Последующие наблюдения Холла и Рили [4-6], Кемпа и др. [7], Болквадзе [8] и других исследователей полностью подтвердили этот эффект.

Многочисленные данные наблюдений (в том числе и прямых наблюдений прохождений спутников по диску Юпитера) и модельных расчетов свидетельствуют о том, что в стратосфере Юпитера находится слой аэрозольной дымки со значительно большей ее концентрацией в высокоширотных областях (широты выше  $40^\circ-50^\circ$ ) по сравнению с низкоширотными. Оценки высот, на которых может находиться этот слой, указывают на атмосферные слои с давлением, равным единицам и десяткам миллибар для полярных регионов и десяткам-сотням миллибар для экваториальных областей [9-16]. Именно при рассеянии света в этом аэрозольном слое может возникать наблюдаемая поляризация. Естественно, что любые изменения физических условий в верхних слоях Юпитера будут приводить к изменениям рассеивающих свойств этого слоя (например, через изменения концентрации частиц и/или их размера), что будет приводить к вариациям поляризации, а это значит, что поляриметрия может быть весьма эффективным методом для изучения верхних слоев атмосферы Юпитера. В 1981 г. в Харьковской обсерватории по инициативе В. Г. Тейфеля (Астрофизический институт АН Казахстана) О. М. Стародубцевой и Л. А. Акимовым были начаты поляриметрические наблюдения Юпитера. В настоящее время эта работа продолжается В. В. Корохиным, Ю. И. Великодским, О. Шалыгиной (Горюновой) и Е. Шалыгиным. Об основных результатах этой работы и пойдет речь в данном разделе.

### Поляриметрические наблюдения Юпитера

Первые наблюдения были проведены О. М. Стародубцевой фотографическим методом в 4-х участках спектра ( $\lambda_{эфф} = 0,630; 0,530; 0,435; 0,365$  мкм) в 1981 г. в течение 22 ночей с марта по июнь на 70-см телескопе АЗТ-8, установленном на Чугуевской наблюдательной станции НИИ астрономии ХНУ (Стародубцева и Тейфель, 1984). В качестве анализатора использовался двоякопреломляющий кристалл исландского шпата, установленный перед фотопластинкой, что обеспечивало одновременное получение изображений в обычных и необыкновенных лучах со взаимно-перпендикулярными плоскостями поляризации. Наблюдения планеты были проведены в диапазоне фазовых углов от  $-1,9^\circ$  до  $+10,3^\circ$ , т.е. практически во всем, доступном с Земли.

В 1985 и 1986 г.г. наблюдения проводились О.М. Стародубцевой (совместно с В. Г. Тейфелем) на высокогорной обсерватории АФИФ АН Казахстана на 1-м телескопе «Карл Цейсс Йена», оборудованном спектрографом низкой дисперсии АСП-9. Так же как и в 1981 г., использовался кристалл исландского шпата. В течение трех ночей в каждый из годов было получено несколько сотен распределений вдоль центрального меридиана относительной интенсивности и степени поляризации во всем интервале долгот. Для 1985 г. спектрограммы измерены в длинах волн 0,42; 0,46; 0,60 мкм. Для 1986 г. – в 0,46 и 0,60 мкм.

В период с 1989 г. по 1997 г. для наблюдений использовался поляриметр, разработанный и созданный Корохиным В. В. на основе линейного ПЗС-фотоприемника, с поляроидом ПФ-40,5 в качестве анализатора (Корохин и др., 1993). Он обеспечивал регистрацию данных в цифровом виде и полностью управлялся с помощью персонального компьютера. Эффективная длина волны спектральной чувствительности системы составляла 472 нм. Во время наблюдений ПЗС-линейка ориентировалась вдоль центрального меридиана планеты. По наблюдениям в каждый из периодов в интервале 1989 – 1997 г.г. было получено несколько сот распределений относительной интенсивности, степени и угла поляризации вдоль центрального меридиана при различных его долготах, полностью охватывающих (большой частью неоднократно) всю планету.

Необходимо отметить, что наблюдения, проведенные в 1989 г. в хороших астроклиматических условиях на высокогорной обсерватории АФИ АН Казахстана при положительном склонении Юпитера, позволили провести подробное исследование долготных вариаций поляризации (Стародубцева и др., 1994). Остальные же данные 1993 – 1997 г.г. получены на Чугуевской наблюдательной станции нашего НИИ в условиях равнинной обсерватории, которая похвастаться высоким качеством астроклимата, к сожалению, не может. Тем не менее, эти данные (вместе с более ранними наблюдениями 1981 – 1986 г.г.) после усреднения для каждого периода наблюдений стали основой для изучения долговременных (сезонных) изменений в поляризации полярных областей Юпитера.

Начиная с 1998 г., наблюдения проводятся с помощью нового фотополяриметра «х\_CCD», оснащенного ПЗС-матрицей (Корохин и др., 2000). Применение панорамного фотоприемника позволило вывести наблюдения на новый качественный уровень – теперь регистрировался весь диск Юпитера, а не только центральный меридиан, что позволило свести к минимуму ошибки, вызванные некачественным гидированием, и использовать для анализа информацию, полученную от всего диска планеты. Во время наблюдений с новым прибором применяется старт-стопный режим вращения анализатора поляризации (поляроид ПФ-40,5): кадр, поворот поляроида на 45°, снова кадр, снова поворот поляроида на 45° и т.д. За один оборот поляроида за время порядка 10 сек регистрируется 8 кадров. Количество полных оборотов анализатора на одну серию наблюдений выбирается, как правило, 50, то есть регистрируется 400 кадров. Подробнее методика наблюдений и обработки данных описана в работе Шалыгина и др. (2007). С 1998 по 2005 год наблюдения с этим прибором проводились на Чугуевской наблюдательной станции НИИ астрономии ХНУ на 70-см телескопе АЗТ-8 и в Харькове на 20-см рефракторе Цейсса. Первые же наблюдения с новым прибором в сентябре 1998 г. оказались весьма удачными. В течение всего 17-дневного периода наблюдений на Чугуевской наблюдательной станции была ясная погода, что позволило получить несколько сотен распределений интенсивности и степени поляризации по диску Юпитера в разных фильтрах для всех долгот центрального меридиана за несколько оборотов планеты. Это дало возможность более детально изучить долготные вариации степени линейной поляризации и показать их возможную связь с магнитным полем Юпитера (Starodubtseva et al., 2002). 9 и 10 сентября 1998 г. качество изображения было не хуже 0,8 – 1,0 сек. дуги. Изображения такого высокого разрешения позволяют исследовать тонкие эффекты в распределении поляризации по диску Юпитера и могут служить хорошей основой для изучения рассеивающих свойств облачного слоя планеты (Shalygin et al., 2004).

В августе-сентябре 2006 г. Ю. И. Великодским и Н. В. Опанасенко были проведены поляриметрические наблюдения Юпитера на горе Майданак (Узбекистан) с поляриметром, оптико-механическая часть которого аналогична прибору «х\_CCD», а в качестве фотоприемника использовалась цифровая CMOS-камера «Canon 350D». Данные этих наблюдений еще не обработаны, но традиционно высокое качество изображений, получаемых на горе Майданак, позволяет надеяться, что они позволят изучать тонкие эффекты в распределении поляризации по диску Юпитера.

Без лишней скромности можно констатировать, что 25-летний цикл поляриметрических наблюдений Юпитера, полученный усилиями двух поколений харьковских астрономов и охвативший 2 оборота этой планеты вокруг Солнца, является самым полным и продолжительным в мире. Анализ этих данных позволил получить новые, интересные сведения о верхних слоях юпитерианской атмосферы, которые кратко представлены ниже.

## Долготные вариации поляризации в приполярных районах Юпитера и их связь с магнитным полем

Изучение поведения степени линейной поляризации в приполярных областях (на широтах  $55^\circ - 75^\circ$ ) выявило следующую особенность (Starodubtseva и др., 1994). При сравнении друг с другом данных разных лет долготные вариации степени поляризации не обнаруживают какой-либо регулярности, если наблюдения представлены в I и II системах долгот. В III же системе долгот (связанной с вращением магнитосферы Юпитера) выявляется систематический сдвиг фазы модуляции степени поляризации в сторону уменьшения долгот, равный примерно  $50^\circ$  в год. Существует ряд явлений, связанных с магнитосферой Юпитера, которые либо беспорядочны, либо дрейфуют в III системе [17]. В связи с этим авторы [17] предложили гипотезу о двойной периодичности магнитосферы Юпитера и ввели IV систему долгот, связанную со значением периода, большим значения периода в III системе на 3%. Наши данные, представленные в IV системе долгот, показывают стабильность фазы модуляции кривой зависимости поляризации от долготы в этой системе от года к году (рис. 2.4.2). Это, с одной стороны, является дополнительным свидетельством реальности существования IV системы и, с другой стороны, позволяет высказать предположение о влиянии магнитосферы планеты на образование стратосферных частиц в полярных областях.

Еще одним доказательством возможной связи между напряженностью поверхностного поля и содержанием дымки может служить наш результат, полученный из наблюдений 1998 г. (Starodubtseva et al., 2002). На рис. 2.4.3 сравнивается долготное распределение степени поляризации, полученное нами, с вариациями напряженности магнитного поля [18]. Видна довольно хорошая обратная корреляция между вариациями поляризации и мощностью поля. Мы рассматриваем полученный результат не как твердо установленный факт, а как основание для дальнейших исследований такого рода, ибо, если предположение о влиянии магнитосферы на аэрозольную дымку является верным, это имеет значение для дальнейшего развития работ по исследованию физических условий в атмосфере Юпитера.

## Сезонные вариации северо-южной асимметрии поляризации и их причины

Как известно, северо-южная асимметрия Юпитера проявляется практически во всем. Она хорошо заметна на многочисленных изображениях этой планеты, полученных как наземными, так и космическими средствами: взять хотя бы различие в структуре зон и полос для полушарий. Поляризация не является исключением. И хотя впервые на факт северо-южной асимметрии поляризации указывал еще Дольфус [2,3], наиболее полное исследование этого явления было проведено в НИИ астрономии ХНУ.

Для описания северо-южной асимметрии поляризации удобно использовать параметр  $P_N - P_S$ , равный разности модулей значений степени линейной поляризации  $P$  для севера и юга на широтах  $\pm 60^\circ$  вдоль центрального меридиана. Было показано (Starodubtseva et al., 2002), что значения параметра  $P_N - P_S$  довольно хорошо организованы, если их изобразить в зависимости от планетоцентрической орбитальной долготы Солнца. Поэтому была выдвинута гипотеза о влиянии сезонных изменений инсоляции на вариации поляризации.

После выхода работы (Starodubtseva et al., 2002) исследования были продолжены с участием уже нового поколения харьковских астрономов (Шальгины Оксана и Евгений, Великодский Ю. И.) Была проведена переобработка данных старых наблюдений с использованием улучшенного алгоритма первичной обработки и расчета асимметрии поляризации. Кроме того, к анализу были привлечены данные, полученные Холлом и Рили в ультрафиолетовой области спектра ( $\lambda = 370$  нм) в 1968 и 1972 – 1974 г.г. [4-6], что позволило значительно расширить ряд данных для исследования сезонных вариаций поляризации.

Новый график изменений северо-южной асимметрии поляризации в зависимости от положения Юпитера на орбите ( $L_S$ ) представлен на рис. 2.4.4 (верхний график). Из рисунка видно, что существует некоторая явно периодическая зависимость параметра  $P_N - P_S$  от  $L_S$ . Для выяснения характера этой зависимости была проведена ее аппроксимация различными функциями. Ранее, в работе (Starodubtseva et al., 2002), использовалась синусоидальная функция с периодом  $180^\circ$ , которую трудно интерпретировать физически. По новым данным аппроксимацию такой функцией провести не удалось. В то же время периодические функции с периодом  $360^\circ$  хорошо описывают зависимость: синусоидальная функция (рис. 2.4.4 и 2.4.5, кривая 1) дает значимое уменьшение дисперсии по сравнению с аппроксимацией

константой с доверительной вероятностью 0,76 по F-критерию; пилообразная функция ( $P_N - P_S$  (%) = 1,83 - 0,005 $L_S$  для  $160^\circ < L_S < 520^\circ$ , с периодическим продолжением с периодом  $360^\circ$ ) имеет доверительную вероятность 0,96. Для проверки устойчивости решения был проведен следующий эксперимент. Аппроксимационная функция находилась только по части данных (1989 – 2004 г.г.) (рис. 2.4.5, кривая 2). Если продлить найденную зависимость, то видно, что наши более ранние данные и данные Холла и Рили хорошо согласуются с предлагаемой аппроксимацией. Таким образом, можно утверждать, что существуют *периодические вариации* поляризации.

В нижней части рис. 2.4.4. приведена теоретически рассчитанная асимметрия инсоляции для полярных регионов  $\frac{I_N}{I_S}$  (отношение величин инсоляции на севере и юге на широтах  $\pm 60^\circ$ ). Коэффициент корреляции между параметрами асимметрии поляризации  $P_N - P_S$  и инсоляции  $\frac{I_N}{I_S}$  составляет -0,7, что говорит о значимой антикорреляции. Таким образом, высказанное ранее предположение о существовании связи между колебаниями поляризации и инсоляции (Starodubtseva et al., 2002) подтвердилось новыми данными, и можно говорить о существовании *сезонных вариаций* поляризации.

Каким же образом сезонные изменения инсоляции могут приводить к вариациям поляризации? Как известно, в отличие от Земли, Юпитер имеет маленький угол наклона оси вращения ( $\sim 3^\circ$ ), но большой эксцентриситет орбиты ( $\sim 0,05$ ). Это вызывает 20%-ные вариации в величине потока солнечного излучения. Кроме того, перигелий и максимум склонения Солнца почти совпадают по времени для северного полушария. Это приводит, во-первых, к ощутимым сезонным вариациям в инсоляции и температуре ( $\pm 25^\circ\text{K}$ ), а во-вторых, к их северо-южной асимметрии [19-21].

Как уже было отмечено в начале главы, фактором, чувствительным к изменениям температуры в атмосфере Юпитера, может быть полярная стратосферная аэрозольная дымка. Вероятно, аэрозоль в дымке находится в нестабильном состоянии, и даже небольшое изменение физических условий может приводить к более интенсивному образованию или распаду частиц. Антикорреляция асимметрии поляризации и инсоляции может быть объяснена следующим образом. Летом аэрозольный слой в стратосфере Юпитера может существенно нагреваться солнечным излучением. При этом уменьшается пересыщение пара вещества дымки, и его конденсация будет замедляться. В результате концентрация частиц в слое дымки будет значительно уменьшаться, что уменьшит рассеяние света на частицах дымки и, следовательно, значение поляризации. При понижении температуры будет наблюдаться обратный процесс – увеличение концентрации и степени линейной поляризации. Таким образом, сезонные изменения температуры могут приводить к сезонным вариациям поляризации света, отраженного Юпитером, в его полярных областях.

### **Исследование физических свойств стратосферного аэрозольного слоя Юпитера**

В 2005 году мы перешли от исключительно «феноменологических» исследований поведения поляризации света аэрозольным слоем Юпитера (распределения поляризации по диску, долготной и сезонной зависимостей) к рассмотрению физико-химических процессов в нем. И хотя эта работа сейчас находится только в самом начале, тем не менее, уже получены первые результаты, касающиеся свойств частиц аэрозольной дымки (Шалыгина и др., 2007).

За последнее время вышло много работ, в которых в качестве вещества полярной аэрозольной дымки принимаются бензол и полиароматические углеводороды (ПАУ), такие как нафталин, фенантрен, пирен. Бензол был впервые обнаружен на Юпитере в 1985 г. [22] с помощью инструмента IRIS (Voyager Infrared Interferometer Spectrometer) в северном полушарии вблизи широты  $60^\circ$ , который также указал на присутствие бензола на всех широтах. А данные комплексного инфракрасного спектрометра на борту космического аппарата «Кассини» подтвердили его присутствие на северных и южных высоких широтах [23].

На базе предложенной в работах [24, 25] микрофизической и химической модели образования бензола и полиароматических углеводородов в атмосфере Юпитера мы провели исследование условий образования полярной аэрозольной дымки. Средняя температура в стратосфере Юпитера имеет величину порядка 150 K [26]. Поскольку эта температура ниже тройных точек для нафталина (359 K) и бензола (278 K), они должны образовывать

кристаллические зародыши непосредственно из газовой фазы. Причем, как показали наши расчеты (Шалыгина и др., 2007), имеет место гомогенное образование частиц, то есть процесс зарождения, который протекает без дополнительных центров конденсации. А это означает, что в стратосфере Юпитера есть все условия для образования достаточно плотного аэрозольного слоя, состоящего из полиароматических веществ.

Для исследования влияния изменения температуры на образование ПАУ в стратосфере Юпитера мы рассчитали высотные профили пересыщений ПАУ. При этом были использованы высотные профили концентраций ПАУ из работы [25]. В первом приближении можно предположить, что с изменением температуры зависимость атмосферного давления от высоты и, следовательно, высотный профиль давления паров ПАУ остаются прежними, а меняется только давление насыщения. На рис. 2.4.6 показаны высотные профили пересыщений для температур 120, 150 и 180 °К, которые выбраны из следующих соображений: средняя температура на уровне дымки равна 150 К [26], а ее сезонные изменения на севере и юге составляют около  $\pm 30$  °К. Как видно из рисунка, в условиях стратосферы Юпитера бензол не конденсируется при температурах  $T > 120$  К (пересыщение отрицательно при всех рассмотренных температурах), а вероятность гомогенного зарождения фенантрена и последующего образования нафталина при температурах 120 и 150 К очень велика. При температуре 180 °К не конденсируются никакие из рассмотренных нами ПАУ. То есть наше предположение, что изменения температуры оказывают значительное влияние на процесс гомогенного зародышеобразования в стратосфере Юпитера, хорошо подтверждается.

Кроме рассмотренных выше сезонных колебаний температуры, на физико-химические процессы в стратосфере Юпитера может оказывать влияние солнечная активность. Поэтому был проведен поиск возможных связей между параметрами, характеризующими солнечную активность, и наблюдаемой асимметрией поляризации (Шалыгина и др., 2007). К сожалению, он не позволил дать уверенный ответ на вопрос: какие из факторов (солнечный ветер, рентгеновские лучи) оказывают непосредственное влияние на аэрозольный слой Юпитера. Это связано с недостаточным количеством данных как о солнечной активности, так и об асимметрии поляризации. Тем не менее, можно ставить вопрос о возможном влиянии высокоэнергичных протонов (солнечных космических лучей) на процессы образования аэрозолей в полярных областях. Это соображение подкрепляется тем, что, как показывают наши расчеты, в стратосферу Юпитера до интересующих нас высот проникает достаточно большое количество энергичных частиц, которые могут участвовать в серии химических реакций, в результате которых образуется «строительный материал» для дальнейшего формирования стратосферного аэрозоля. Образование же зародышей частиц на этих ионах не происходит (Шалыгина и др., 2007).

### **Моделирование рассеяния света полярной аэрозольной дымкой**

Чтобы провести разумную интерпретацию поляриметрических наблюдений Юпитера и увязать их с результатами теоретического моделирования физико-химических процессов в аэрозольном слое, необходимо иметь адекватную модель рассеяния света в нем.

К настоящему времени известны несколько моделей поляризации света атмосферой Юпитера. Это, прежде всего, модели Мороженко и Яновицкого [27], Мищенко и Длугач [28] и Smith and Tomasko [12]. Однако все они разрабатывались и применялись преимущественно для интерпретации наблюдений центральных областей диска Юпитера. Объяснения поведения степени линейной поляризации в полярных регионах и, в частности, механизма возникновения поляризации при нулевых орбитальных углах фазы они не дают. Поэтому нами была предпринята попытка разработать такую модель, чтобы применить ее для интерпретации наших наблюдений (Goryunova et al., 2005).

В рамках этой модели мы полагаем, что в полярных областях основной вклад в поляризацию дает излучение, отраженное подстилающей поверхностью и затем рассеянное на частицах аэрозольной дымки, находящейся на высоте  $h$  (рис. 2.4.7). Регистрируемое наблюдателем излучение  $I$  состоит из трех компонент:  $I = I_c + I_{c-h} + I_h$ , где  $I_c$  – интенсивность излучения, отраженного подстилающей поверхностью облаков;  $I_{c-h}$  – интенсивность отраженного подстилающей поверхностью излучения, рассеянного на аэрозолях;  $I_h$  – интенсивность излучения Солнца, непосредственно рассеянного аэрозольной дымкой.

По оценочным данным различных работ (например, [25, 29]) концентрация частиц размером  $r \sim 0,5$  мкм на уровне давлений 20 миллибар, на котором может находиться

аэрозольный слой, относительно невелика ( $0,5 - 1,0 \text{ см}^{-3}$ ), поэтому можно предположить, что большая часть излучения от подстилающей поверхности, скорее всего, пройдет беспрепятственно и внесет основной вклад в суммарную интенсивность. Если считать, что свет от подстилающей поверхности неполяризован, то вклад компоненты  $I_c$  в поляризацию необходимо учитывать в виде деполяризации. Факт такой малой концентрации частиц также позволяет нам предположить, что основной вклад в поляризацию будет вносить однократное рассеяние. Что касается составляющей  $I_h$ , то она при углах фазы, близких к нулю, дает несущественный вклад в поляризацию.

Таким образом, механизм возникновения поляризации в полярных областях Юпитера заключается в рассеянии излучения, отраженного подстилающей поверхностью, на аэрозольной дымке. Очевидно, что в участок дымки излучение приходит с поверхности, ограниченной линией горизонта (конус на рис. 2.4.7). Поэтому характерные углы рассеяния на аэрозольной дымке будут существенно отличаться от нуля.

Предложенная модель была реализована в аналитически-компьютерном виде и, при своей явной упрощенности, показала неплохое качественное согласие с наблюдениями (рис. 2.4.8). В нашей работе (Goryunova et al., 2005) приведены результаты подробного исследования модели: зависимость от высоты дымки, длины волны, размера частиц, функции распределения по размерам, коэффициента преломления вещества и прочее. Эти результаты показали вполне разумное поведение. Более того, по смене знака поляризации, которое наблюдается для полярных регионов Юпитера при изменении длины волны [7], нами был оценен характерный размер аэрозольных частиц, который составил  $0,5 \text{ мкм}$ , что не противоречит данным других исследователей.

Дальнейший прогресс исследований невозможен без разработки количественной модели рассеяния света атмосферой Юпитера, которая позволит максимальным образом учесть все факторы, которые могут влиять на наблюдаемое поведение поляризации. Одним из возможных подходов к решению этой задачи могут быть численные расчеты рассеяния света методом Монте-Карло. Разработка такого алгоритма, позволяющего моделировать рассеяние в многокомпонентной среде, состоящей из произвольных частиц и имеющей произвольную пространственную конфигурацию, ведется в нашем отделе (основной разработчик Е. В. Шалыгин). Сейчас идет процесс интенсивного тестирования алгоритма, и в ближайшее время мы собираемся на его основе начать разработку новой модели рассеяния света аэрозольной стратосферной дымкой и облачным слоем Юпитера.

### Перспективы исследований

Конечно же, мы планируем продолжить наш 25-летний ряд поляриметрических наблюдений Юпитера. Однако основной акцент в ближайшее время будет сделан на изучение физико-химических процессов в аэрозольном слое и моделирование рассеяния света, как этим слоем, так и облаками Юпитера. В частности, планируется построение высотного профиля стратосферного аэрозольного слоя (размеров частиц и их концентрации), изучение влияния магнитного поля планеты, космических и метеорологических факторов на процессы формирования этого слоя. Также мы планируем проводить исследования тонких эффектов в распределении поляризации по диску Юпитера и закона отражения света облачным слоем на базе изображений с высоким разрешением, полученных нами в 1998 и 2006 годах, и данных космических аппаратов, к которым мы имеем доступ.

### Литература

1. *Lyot B.* Recherches sur le polarization de la lumiere des planets et de quelques substances terrestres // Ann. Obs. Paris (Meudon). – 1929. VIII, (In English, NASA TT F-187).
2. *Dollfus A.* Etude des planets par la polarization de leur lumiere. – Theses. Ser. A, 1955, No 2869, Paris.
3. *Дольфус А.* Исследования поляризации планет // Планеты и спутники. – М.: Изд-во иностр. лит., 1963. – С. 3-6-352.
4. *Hall J. S., Riley L. A.* Photoelectric observations of Mars and Jupiter with a scanning polarimeter // Lowell Obs. Bull. – 1968. – V.7. No.145. – P. 83-92.

5. *Hall J. S. and Riley L. A.* Polarization measurements of Jupiter and the Great Red Spot // *Planets, Stars and Nebulae Studied with Polarimetry* / Ed. Gehrels T. Tucson, Arizona: University of Arizona Press, 1974. –P.593-598.
6. *Hall J. S., Riley L. A.* A polarimetric search for fine structure on Jupiter's disk // *Icarus*. – 1976. –V. 29. – P.231-234.
7. *Kemp K. G., Rudy R. J., Lebofsky M. J. et al.* Near infrared polarization studies of Saturn and Jupiter // *Icarus*. – 1978. – V.35.№2. – P. 263-271.
8. *Болквядзе О. П.* Исследование поляризационных свойств Юпитера // *Бюл. Абст. АО*, 1980, № 53. – С. 131-162.
9. *Kim S.J., Drossart P., Caldwell J., Maillard J.P., Goorvitch D., Moorwood A., Moneti A., Lecacheux J.* The 2-  $\mu\text{m}$  polar haze of Jupiter // *Icarus*. – 1991. – V. 91. – P.145-153.
10. *Mallama A., Krobusek B.F., Collins D.A., Nelson P., Park J.* The radius of Jupiter and its polar haze// *Icarus*. – 2000. – V.144. – P. 99-103.
11. *Hord C. W., West R. A., Simmons K. E., Coffeen D. L., Sato M., Lane A. L., Bergstralh J. T.* Photometric observations of Jupiter at 2400 angstroms // *Science*. – 1979. – V. 206. – P.956-959.
12. *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 the Pioneer 10 and 11 missions // *Icarus*. – 1984. – V. 58. – P. 35-73.
13. *Тейфель В.Г.* Полярные области Юпитера и Сатурна // *Астрон. вестн.* – 1985. – Т.19. N.1. – С. 48-63.
14. *West R. A.* Spatially resolved methane band photometry of Jupiter. I. Absolute reflectivity and center-to-limb variations in the 6190-, 7250-, and 8900-Å bands // *Icarus*. – 1979. – V.38. – P. 12-33.
15. *West R. A.* Voyager 2 imaging eclipse observations of the Jovian high altitude haze // *Icarus*. – 1988. – V.75. – P.381-398.
16. *West R. A., Tomasko M. G.* Spatially resolved methane band photometry of Jupiter. III. Cloud vertical structures for several axisymmetric bands and the Great Red Spot // *Icarus*. – 1980. – V.41. –P.278-292.
17. *Sandel B. R., Dessler A. J.* Dual periodicity of the Jovian Magnetosphere // *J.Geophys.Res.* – 1988. – V.93,N A6. – P. 5487-5504.
18. *Connerney, J.E.P.* Magnetic fields of the outer planets. *J. Geophys. Res.* – 1993. – V. 98, No E10. – P.18,659-18,679.
19. *Beebe R. F., Suggs R. M., Little T.* Seasonal north-south asymmetry in solar radiation incident on Jupiter's atmosphere // *Icarus*. – 1986. – V. 66. – P. 359-365.
20. *Beebe R. F., Orton G. S., West R. A.* Time-variable nature of the Jovian cloud properties and thermal structure: an observational perspective // *Time-Variable Phenomena in the Jovian System* / Ed. Belton M.J.S., West R.A., Rahe J. National Aeronautics and Space Administration Office of Management. Scientific and Technical Information Division, Washington, DC. – 1989. – P. 245-288.
21. *Caldwell J., Cess R. D., Carlson B. E.* Temporal Characteristics of the Jovian atmosphere // *Astrophys. J.* – 1979. – V. 234. – P.L155-L158.
22. *Kim S. J., Caldwell J., Rivolo A.R., Wagener R., and Orton G. S.* Infrared polar brightening on Jupiter // *Icarus*. – 1985. – V. 64. – P. 233–248.
23. *Flasar F. M.* CIRS observations of Jupiter // *COSPAR abstract*, 2002.
24. *Wong Ah-San, Anthony Y. T., Yung Yuk L.* Jupiter: Aerosol chemistry in the polar atmosphere // *Astrophys. J.* – 2000. – V.534. – P. L215-L217.
25. *Friedson A. James, Wong Ah-San, Yung Yuk L.* Models for Polar Haze Formation in Jupiter's Stratosphere // *Icarus*. – 2002. – V.158, Issue 2. – P. 389-400.
26. *Trafton L. M. et al.* High-resolution spectra of Jupiter's northern auroral ultraviolet emission with the Hubble Space Telescope // *Astrophys. J.* – 1994. – V.421. – P.816-827.
27. *Morozhenko, A. V., Yanovitskii E. G.* The optical properties of Venus and the jovian planets. I. The atmosphere of Jupiter according to polarimetric observations // *Icarus*. – 1973. – 18. – P. 583-592.
28. *Dlugach J. M. and Mishchenko M. I.* The effect of particle shape on physical properties of the Jovian aerosols obtained according earth-based spectropolarimetric observations // *Abstracts of NATO ASI*, 2003.
29. *Rages K., Beebe R., Senske D.* Jovian stratospheric hazes: The high phase angle view from Galileo // *Icarus*. – 1999. – V.139. – P. 211–226.