



ISSN 1607–2855

Том 5 · № 1–2 · 2004 С. 73–78

УДК 523.45–842–655

О механизме возникновения поляризации в полярных областях Юпитера

О.С. Горюнова, В.В. Корохин, Л.А. Акимов, Е.В. Шалыгин, Ю.И. Великодский

Научно-исследовательский институт астрономии
Харьковского национального университета им. В.Н.Каразина

Предложен механизм возникновения линейной поляризации в полярных областях Юпитера: основной вклад в поляризацию дает излучение, отраженное подстилающей поверхностью и затем рассеянное на частицах аэрозольной дымки. Получено распределение степени линейной поляризации вдоль центрального меридиана для двух областей спектра (0.456 и 0.65 мкм), общий вид которого согласуется с наблюдениями. Оценен размер светорассеивающих частиц ($r_{\text{mean}} = 0.5$ мкм), не противоречащий данным других исследователей.

ПРО МЕХАНІЗМ ВИНИКНЕННЯ ПОЛЯРИЗАЦІЇ У ПОЛЯРНИХ ДІЛЯНКАХ ЮПІТЕРА, Горюнова О.С., Корохін В.В., Акімов Л.О., Шалігін Є.В., Великодський Ю.І. — Запропоновано механізм виникнення лінійної поляризації у полярних ділянках Юпітера: основний внесок у поляризацию дає випромінювання, відбите підстиляючою поверхнею та потім розсіяне на частинках аерозольної мли. Одержано розподіл ступеня лінійної поляризації уздовж центрального меридіану для двох ділянок спектра (0.456 та 0.65 мкм), якісний вид яких узгоджується із спостереженнями. Оцінено розмір розсіювачів ($r_{\text{mean}} = 0.5$ мкм), який не суперечить даним інших дослідників.

ON THE MECHANISM OF POLARIZATION ORIGIN AT THE POLAR REGIONS OF JUPITER, by Goryunova O.S., Korokhin V.V., Akimov L.A., Shalygin E.V., Velikodsky Yu.I. — We have proposed a following mechanism of linear polarization origin at the Jupiter polar regions: the principal contribution in polarization is made by the light reflected by underlying surface and then scattered on aerosol haze particles. We have calculated the linear polarization distributions along the central meridian for 2 spectral bands (0.456 and 0.65 μm). They have a good qualitative agreement with observational data. We have estimated the mean scattering particles radius: $r_{\text{mean}} = 0.5 \mu\text{m}$.

1. ВВЕДЕНИЕ

Как известно, наземные поляриметрические наблюдения Юпитера для видимой области спектра показывают зависимость степени линейной поляризации от фазового угла α . Для центральной части диска Юпитера поляризация меняется от нуля при $\alpha = 0^\circ$ до десятых долей процента при $\alpha = 11^\circ$ [12]. Из наблюдений также известно, что поляризация резко возрастает с увеличением широты (даже при нулевых углах фазы), достигая в полярных областях (на широтах более $45^\circ - 50^\circ$) 7–8% в синей области спектра [2, 3, 14]. Кроме того, наблюдается сильная зависимость поляризации в полярных областях от длины волны с переходом от отрицательной к положительной через ноль на $\lambda = 0.75$ мкм [2] (поворот плоскости поляризации относительно радиального направления).

В НИИ астрономии Харьковского национального университета с 1981 г. проводятся регулярные фотополяриметрические наблюдения Юпитера. На основе этого ряда наблюдений для данных, полученных в синей области спектра, была обнаружена северо-южная асимметрия степени линейной поляризации P и ее временные и пространственные вариации (под асимметрией подразумевается разность значений P для севера и юга на широтах $\pm 60^\circ$ вдоль центрального меридиана) [14].

Известны несколько моделей поляризации света атмосферой Юпитера.

Так, Мороженко и Яновицкий [12] рассчитали рассеяние света для следующих случаев: а) верхние слои атмосферы Юпитера состоят из смеси аэрозольных частиц и молекул, причем их соотношение остается постоянным; б) газовый слой малой оптической толщины расположен над облачным слоем, состоящем из аэрозольных частиц. Эти модели использовались для интерпретации фазовой зависимости поляризации: в центральной части диска Юпитера (область $10''$) и для интегрального значения всего диска. Теоретические расчеты показали хорошее соответствие с наблюдениями и позволили оценить параметры рассеивателей. Позже, Мищенко и Длугач [7], интерпретируя данные спектрополяриметрических наблюдений Юпитера в рамках моделей [12] для центральной части диска, получили физические параметры рассеивателей, представляя их эллипсоидами.

Smith и Tomasko [13] разработали, а Braak et al. [6] использовали для интерпретации космических наблюдений модель, в которой атмосфера принимается состоящей из четырех слоев: 1) чистый (без примесей) газовый слой; 2) слой дымки, состоящий из частиц газа и аэрозолей; 3) слой чистого газа; 4) полубесконечный облачный слой, состоящий из газа и облачных частиц. Данная модель использовалась только для исследования Южной тропической зоны и Южной экваториальной полосы.

Видно, что все существующие на данный момент модели использовались преимущественно для интерпретации наблюдений центральных областей диска Юпитера. Объяснения же 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.

2. ФИЗИЧЕСКИЙ МЕХАНИЗМ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ПОЛЯРИЗАЦИИ В ПОЛЯРНЫХ ОБЛАСТЯХ ЮПИТЕРА

Мы предполагаем, что в полярных областях основной вклад в поляризацию дает излучение, отраженное подстилающей поверхностью и затем рассеянное на частицах аэрозольной дымки.

Данные наблюдений и модельных расчетов свидетельствуют о присутствии в стратосфере Юпитера аэрозольной дымки в слоях с давлением 50–500 мбар с большей ее концентрацией в высокоширотных областях (широты больше $45^\circ - 50^\circ$) [11, 13, 15]. Вероятно, аэрозольное вещество в дымке находится в нестабильном состоянии, и даже небольшое изменение физических условий влияет на интенсивность образования/распада аэрозолей и, следовательно, на процессы рассеяния света. Этим можно качественно объяснить наблюдаемые временные (из-за изменения инсоляции атмосферы) и пространственные (через влияние магнитного поля Юпитера на интенсивность выпадения заряженных частиц в стратосферу) вариации асимметрии степени линейной поляризации.

Итак, пусть на высоте h от облачного стоя (подстилающей поверхности) Юпитера находится тонкий слой аэрозольной дымки (рис. 1).

Тогда регистрируемое наблюдателем излучение состоит из трех компонент: $I = I_c + I_{c-h} + I_h$, где I — регистрируемая интенсивность; I_c — интенсивность излучения, отраженного подстилающей поверхностью; I_{c-h} — интенсивность отраженного подстилающей поверхностью излучения, рассеянного на аэрозолях; I_h — интенсивность излучения Солнца, непосредственно рассеянного аэрозольной дымкой.

По оценочным данным работы [9] концентрация частиц в аэрозольной дымке относительно невелика ($1 - 10 \text{ см}^{-3}$), поэтому большая часть излучения от подстилающей поверхности, скорее всего, пройдет беспрепятственно и внесет основной вклад в суммарную интенсивность. Если считать, что свет от подстилающей по-

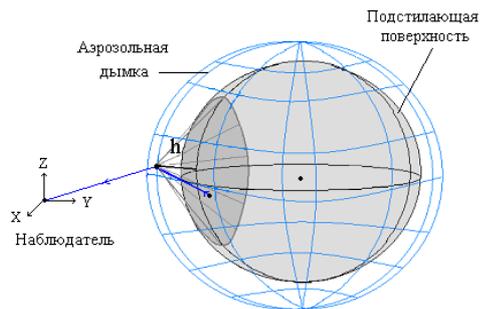


Рис. 1. Схема модели

верхности неполяризован, то вклад компоненты I_c в поляризацию необходимо учитывать в виде деполяризации. Факт такой малой концентрации частичек также позволяет нам предположить, что основной вклад в поляризацию будет вносить однократное рассеяние.

Что касается составляющей I_h , то она при нулевом угле фазы даст несущественный вклад в поляризацию. Поэтому, в первом приближении, составляющей I_h можно пренебречь.

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. 1). Поэтому характерные углы рассеяния на аэрозольной дымке будут существенно отличаться от нуля.

Предложенная модель была реализована в аналитически-компьютерном виде как компонент программного комплекса IRIS [1].

3. ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛИ

Компьютерная модель разрабатывалась в предположении следующих условий:

1. Орбитальный фазовый угол Юпитера равен нулю.
2. Юпитер — шар; на высоте h над облачным слоем находится равномерный тонкий слой аэрозольной дымки.
3. Частицы в дымке считаются сферическими и непоглощающими. Для описания рассеяния света используется теория Ми.
4. Распределение частиц по размерам полидисперсное по нормальному закону с двумя параметрами: r_{mean} — средний размер частиц, σ_r^2 — дисперсия.
5. Учитывается только однократное рассеяние (на частицах дымки).
6. Подстилающая поверхность отражает свет по закону Ламберта.

Входные параметры модели можно условно разделить на две группы: *геометрические* и *физические*.

К *физическим* относятся: показатель преломления частиц дымки m ; параметры закона распределения частиц по размерам; эффективная длина волны излучения λ .

К *геометрическим* относятся: высота h , на которой находится дымка (см. рис. 1); планетоцентрические координаты Солнца и наблюдателя.

Результатом расчетов есть распределение степени линейной поляризации по диску Юпитера для заданных областей.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

На рис. 2 представлены результаты моделирования (толстые линии). При расчетах использовались следующие значения входных параметров модели: $\text{Re}(m) = 1.5$; $\text{Im}(m) = 0.0$; $h = 300$ км; $r_{\text{mean}} = 0.5$ мкм; $r = 0.01$ мкм, $\sigma_r = 0.01$ мкм. При выборе значений физических входных параметров мы столкнулись с рядом сложностей. Поэтому для выбора значений основных параметров мы провели дополнительное исследование, результаты которого изложены в п. 5.

Для сравнения на этом же рисунке приведены наблюдаемые профили (тонкие линии), для построения которых были использованы данные, полученные Корохиным В.В. и Стародубцевой О.М. 10.09.1998 г. на телескопе АЗТ-8 Чугуевской наблюдательной станции НИИ Астрономии ХНУ.

Как видно из графиков, имеет место качественное соответствие модельных и наблюдаемых кривых, однако значения степени линейной поляризации, рассчитанные при помощи модели, получились меньше, чем дают наблюдения.

Также необходимо отметить, что в результатах моделирования резкий рост поляризации с увеличением широты в красном фильтре начинается позже, чем в синем, что соответствует наблюдательным данным.

5. ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ

На рис. 3а представлены результаты варьирования значений высоты, на которой находится дымка. При выборе используемого значения мы руководствовались данными работы [5], дающими оценочное значение 300 км. Эта высота была получена из наблюдений прохождения спутника Юпитера по диску планеты. С другой стороны, по данным работы [9] высота дымки составляет около 150–200 км.

Из рис. 3а видно, что с увеличением высоты дымки поляризация возрастает, однако для использования высоты 1200 км для наших исследований нет разумной аргументации. Поэтому при построении распределения, представленного на рис. 2а, использовалось значение высоты 300 км.

Для нашей модели в качестве аэрозольного вещества был выбран бензол. В работах [5, 9, 16] предлагается вероятная микрофизическая и химическая схема образования полиароматических углеводородов и бензола в стратосфере Юпитера. Бензол был впервые обнаружен в атмосфере Юпитера в 1985 г. с помощью прибора IRIS (Voyager Infrared Interferometer Spectrometer) в северном районе вблизи широты 60° . Наблюдения с коротковолновым спектрометром на Инфракрасной космической обсерватории также указали на присутствие бензола на всех широтах [10]. Комплексный инфракрасный спектрометр на борту космического аппарата Кассини также наблюдал бензол на

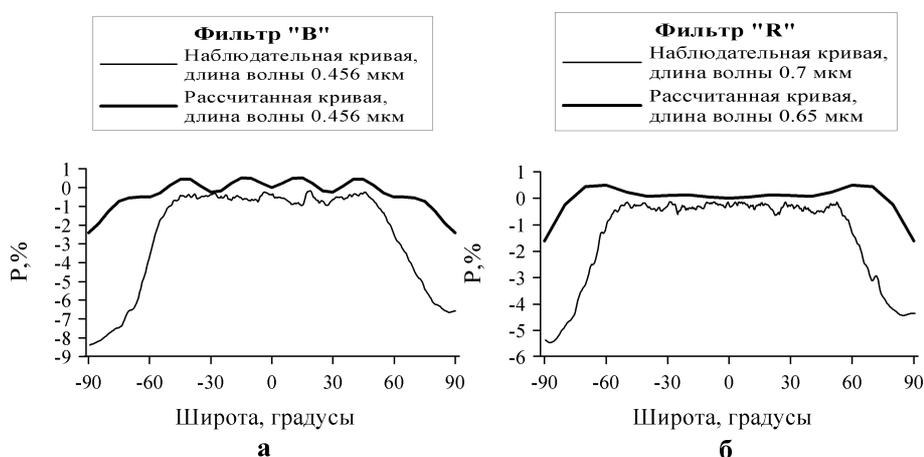


Рис. 2. Зависимость степени линейной поляризации P от широты вдоль центрального меридиана для синей (а) и красной (б) областей спектра



Рис. 3. Зависимость степени линейной поляризации P от широты вдоль центрального меридиана для разных высот, на которых находится аэрозольная дымка (а) и показателей преломления (б)

северных и южных высоких широтах [8].

Показатель преломления этого вещества при нормальных условиях равен 1.5. При построении оптических моделей, подобных предлагаемой в данной работе, вещественная часть показателя преломления для органических веществ принимается равной 1.5. Это значение и стало отправным при построении распределений, представленных на рис. 2а,б.

Однако необходимо иметь в виду, что теория Ми очень сильно чувствительна к изменению показателя преломления. Из рис. 3б видно, что при небольшом изменении значения даже вещественной части показателя преломления значение P меняется очень сильно. Поэтому вопрос о выборе значения этого параметра для аэрозольной дымки Юпитера остается открытым.

По теории Ми рассеяние также сильно зависит и от изменений относительного размера рассеивающих сферических частиц — «размерного параметра» (отношение размера частицы к длине волны).

Рис. 4а демонстрирует сильную зависимость степени поляризации от длины волны (со сменой знака), качественно соответствующую наблюдениям, что свидетельствует в пользу предложенной нами модели. По результатам исследования поведения степени поляризации при варьировании среднего размера частиц в нормальном законе распределения частиц по размерам (рис. 4б), в качестве основного значения было выбрано $r_{\text{mean}} = 0.5$ мкм, т.к. именно при таких значениях радиуса происходит смена знака поляризации, как при наблюдениях. Эта величина несколько отличается от предложенной в работе [2] 1.0...1.5 мкм, однако там предполагалось значение показателя преломления 1.33 и 1.44.

Мы исследовали также поведение степени линейной поляризации в зависимости от изменения значения дисперсии размеров частиц (рис. 4в). Видно, что при увеличении дисперсии картина «замывается». Из-за ограниченных вычислительных ресурсов основным для дальнейших исследований было выбрано значение дисперсии 0.01. Этим и объясняются периодические «колебания» расчетных значений степени поляризации на малых широтах.

6. ВЫВОДЫ

1. Предложен механизм, объясняющий возникновение отрицательной поляризации в полярных областях при нулевом орбитальном угле фазы Юпитера.
2. Разработана аналитически-компьютерная модель, с помощью которой рассчитаны профили рас-

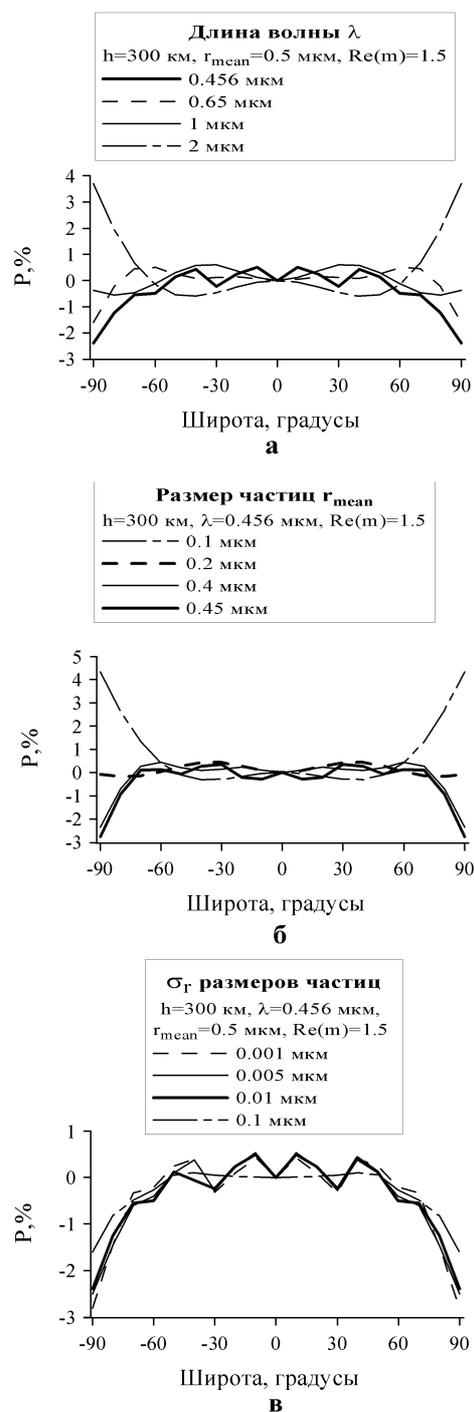


Рис. 4. Зависимость степени линейной поляризации P от широты вдоль центрального меридиана для разных длин волн (а); средних размеров частиц (б) и σ нормального закона распределения частиц по размерам (в).

пределения степени линейной поляризации вдоль центрального меридиана и проведено сравнение их с наблюдениями: а) общий вид распределений похож, однако абсолютные значения степени поляризации в полярных областях, рассчитанные с помощью модели, меньше, чем наблюдаемые; б) получена сильная зависимость степени поляризации от длины волны (со сменой знака в красной области спектра), также соответствующая наблюдениям.

3. Оценен радиус светорассеивающих частиц ($r_{\text{mean}} = 0.5$ мкм), не противоречащий данным других исследователей.

В дальнейшем планируется следующее развитие данной модели: возможность работы с разными законами отражения подстилающей поверхности; учет поглощения в слое между облачным слоем Юпитера и дымкой; учет поглощения в самой дымке; введение механизмов, вызывающих северо-южную асимметрии поляризации, и, конечно, учет неравномерности распределения дымки над поверхностью Юпитера.

1. *Корохин В.В., Белецкий С.А., Великодский Ю.И., Коничек В.В., Синельников И.Е.* Опыт применения ПЗС фотоприемников на Астрономической обсерватории ХНУ // Кинематика и физика небесных тел. — 2000. — **16**, № 1. — С. 80–86.
2. *Стародубцева О.М., Тейфель В.Г.* Поляризация света в полярных областях Юпитера // Астрон. вестн. — 1984. — **18**, № 3. — С. 179–190.
3. *Тейфель В.Г.* Полярные области Юпитера и Сатурна. // Астрон. вестн. — 1985. — **19**, № 1. — С. 48–63.
4. *Ah-San Wong, Anthony Y.T., Yuk L.* Yung Jupiter: Aerosol chemistry in the polar atmosphere // The Astrophysical Journal. — 2000. — **534**. — P. L215–L217.
5. *Anthony Mallama, Bruce F. Krobusek, Donald A. Collins, et al.* The radius of Jupiter and its polar haze // Icarus. — 2000. — **144**. — С. 99–103.
6. *Braak C.J., de Haan J.F., Hovenier J.W., Travis L.D.* Galileo Photopolarimetry of Jupiter at 678 nm // Icarus. — 2002. — **157**, № 2. — P. 401–418.
7. *Dlugach J.M., 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.
8. *Flasar F.M.* CIRS observations of Jupiter // COSPAR abstract, 2002.
9. *Friedson A. James, Wong Ah-San, Yung Yuk L.* Models for Polar Haze Formation in Jupiter's Stratosphere // Icarus. — 2002. — **158**, Issue 2. — P. 389–400.
10. *Kim S.J., Caldwell J., Rivolo A.R., Wagener R., Orton G.S.* Infrared polar brightening on Jupiter // Icarus. — 1985. — **64**. — P. 233–248.
11. *Kim S.J., Drossart P., Caldwell J., Maillard J.P., et al.* The 2-m polar haze of Jupiter // Icarus. — 1991. — **91**. — P. 145–153.
12. *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.
13. *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. — **58**. — P. 35–73.
14. *Starodubtseva O.M., Akimov L.A., Korokhin V.V.* Seasonal variation of the North-South asymmetry of polarized light of Jupiter // Icarus. — 2002. — **157**, № 2. — P. 419–425.
15. *West R.A.* Voyager 2 imaging eclipse observations of the Jovian high altitude haze. // Icarus. — 1988. — **75**. — P. 381–398.
16. *Wong Ah-San, Yung Yuk L.A., James A. Friedson* Benzene and haze formation in the polar atmosphere of Jupiter // Geophysical research letters. — 2003. — **30**. — doi:10.1029/2002GL016661. — P. 30.

Поступила в редакцию 23.11.2004