

УДК 523.45-842-655

О. С. Шалыгина, В. В. Корохин,
Е. В. Шалыгин, Ю. И. Великодский

НИИ астрономии Харьковского национального университета им. В. Н. Каразина,
61022 Харьков, ул. Сумская 35

Фотополяриметрические наблюдения полярных областей Юпитера

Рассматриваются особенности применения ПЗС-матриц для фотополяриметрических наблюдений. Описываются алгоритмы обработки фотополяриметрических и поляриметрических наблюдений Юпитера и других ярких протяженных объектов, проводимых с использованием ПЗС-матриц, учитывающие специфику этих фотоприемников. Представлены новые значения параметра северо-южной асимметрии поляризации Юпитера, полученные из наблюдений 2006 и 2007 гг. Новые значения согласуются с предыдущими наблюдениями.

ФОТОПОЛЯРИМЕТРИЧНІ СПОСТЕРЕЖЕННЯ ПОЛЯРНИХ РЕГІОНІВ ЮПІТЕРА, Шалыгіна О. С., Корохін В. В., Шалыгін Є. В., Великодський Ю. І. — Розглядаються особливості використання ПЗС-матриць для фотополяриметричних спостережень. Описуються алгоритми обробки фотометричних та поляриметричних спостережень Юпітера та інших яскравих протяжних об'єктів, які проводяться з використанням ПЗС-матриць, що враховують специфіку цих фотоприймачів. Представлені нові значення параметра північно-південної асиметрії поляризації Юпітера, отримані за даними спостережень 2006 та 2007 рр. Нові значення узгоджуються з попередніми спостереженнями.

PHOTOPOLARIMETRIC OBSERVATIONS OF JUPITER'S POLAR REGIONS, Shalygina O. S., Korokhin V. V., Shalygin E. V., Velikodsky Yu. I. — Some peculiarities of the use of CCD-matrices for photopolarimetric observations are discussed. We describe some algorithms for processing of CCD photopolarimetric observations of Jupiter and other bright extended objects. New values of the parameter of North-South asymmetry of Jupiter's polarization obtained from new observations (2006, 2007) are present. The new data are in good agreement with the previous observations.

ВВЕДЕНИЕ

Интересное поведение поляризации отраженного излучения в полярных областях Юпитера было обнаружено Лио в 1920-х гг. [14]. В отличие от низкоширотных областей степень линейной поляризации на широтах более 45° начинает резко увеличиваться к полюсам, достигая значений $P = 6-7\%$ в синей области спектра, тогда как в экваториальных областях ее значение остается практически равным нулю [16] (рис. 1). Плоскость поляризации при этом ориентирована примерно вдоль радиуса планеты. Такое поведение поляризации в полярных областях Юпитера не обнаруживает заметной зависимости от угла фазы.

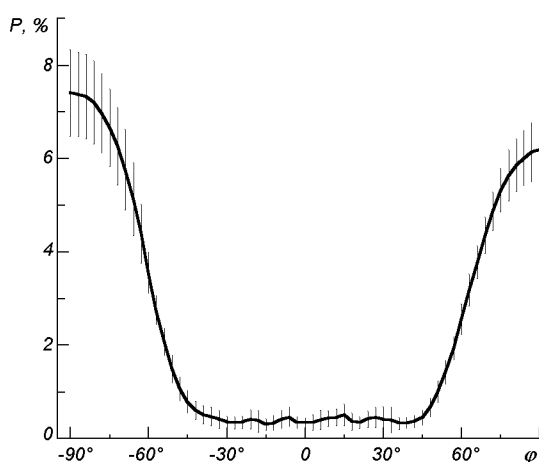


Рис. 1. Типичное распределение вдоль центрального меридиана Юпитера степени P линейной поляризации отраженного света (1998 г., $\lambda = 456$ нм, оппозиция). Усреднено 15 отдельных профилей, бары — ошибки среднего

В дальнейшем эти эффекты были подтверждены и исследованы Дольфусом, который также обнаружил северо-южную асимметрию поляризации в полярных областях и ее изменения во времени [2, 8]. Последующие наблюдения [1, 5, 9—12 и др.] также подтвердили эти эффекты.

Чем же объясняется такое поведение поляризации? 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, концентрация которой в высокоширотных областях (широты выше $40-50^\circ$) значительно больше, чем в низкоширотных областях. 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 [13, 15, 18, 20]. 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 рассеивательных 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 регулярные фотополариметрические наблюдения Юпитера. Полариметрические наблюдения проводились разными исследователями на разных телескопах с использованием разных детекторов излучения — от ФЭУ (1986—1989 гг.) до ПЗС-линейки (1989—1997 гг.). Сводная информация о наблюдениях, проведенных сотрудниками НИИ астрономии ХНУ в 1981—2006 гг., дана в работе [4].

Основной целью этих наблюдений было изучение северо-южной асимметрии поляризации в полярных областях Юпитера и ее поведения во времени. Для описания этого явления удобно использовать так называемый параметр асимметрии $P_N - P_S$, равный разности значений степени линейной поляризации P для севера и юга на широтах $\pm 60^\circ$ вдоль центрального меридиана.

На основе данных наблюдений 1981—1998 гг. О. М. Стародубцевой с сотрудниками была найдена связь параметра поляризации с инсоляцией и выдвинута гипотеза о влиянии сезонных изменений инсоляции на формирование вариаций поляризации [19]. Эта работа была продолжена В. В. Корохиным, О. С. Шалыгиной (Горюновой), Е. В. Шалыгиным и Ю. И. Великодским. Благодаря привлечению данных других исследователей и новым наблюдениям с ПЗС-матрицей в 2000—2007 гг. образовался довольно длинный ряд наблюдений, охватывающий 25 лет, или два оборота этой планеты вокруг Солнца. Анализ этого самого продолжительного ряда данных позволил получить новые интересные сведения о верхних слоях атмосферы Юпитера [7]. Ниже мы рассматриваем особенности полариметрических наблюдений с использованием ПЗС-матриц и представляем результаты новых наблюдений 2006 и 2007 гг.

НАБЛЮДЕНИЯ ЮПИТЕРА С ПЗС-МАТРИЦЕЙ

Начиная с 1998 г. фотополариметрические наблюдения Юпитера в НИИ астрономии ХНУ проводятся с помощью оснащенного ПЗС-матрицей фотополариметра «x_CCD», разработанного В. В. Корохиным [3]. Применение панорамного фотоприемника позволило регистрировать весь диск Юпитера, а не только центральный меридиан, и свести к минимуму ошибки гидирования.

Применяемая камера OS-65D использует ПЗС-матрицу формата 752×582 элементов (размер светочувствительной секции 4.9×3.7 мм) производства фирмы «Sony» и имеет хорошие фототехнические характеристики: высокую чувствительность, отсутствие «слепых» и «горячих» пикселей, низкий уровень темновых шумов даже без охлаждения. Неравномерность чувствительности по полю — не более 1 %.

В качестве анализатора линейной поляризации в приборе применяется поляризационный фильтр ПФ-40.5, который поворачивается шаговым двигателем на заданный угол по команде с персонального компьютера (ПК). Особенностью полариметрических наблюдений планет является необходимость сопоставления изображений, полученных при разных положениях анализатора с минимальными временными интервалами между положениями. Для этого смена положений анализатора происходит в старт-стопном

режиме следующим образом: регистрация кадра — затем поворот анализатора на 45° — снова регистрация — снова поворот анализатора на 45° и так далее. За время порядка 5 с происходит один полный оборот поляроида и регистрируется 8 кадров. За одну серию наблюдений Юпитера количество полных оборотов анализатора составляло от 15 до 50, то есть регистрировалось 120—400 кадров. Очевидно, что для обеспечения максимальной статистической надежности наблюдений этот ряд должен быть как можно длиннее. Однако за время наблюдений фотометрические свойства атмосферы могут претерпевать значительные изменения. Указанное количество кадров было установлено опытным путем как оптимальное. Усреднение кадров серии при дальнейшей обработке позволяет достичь необходимой точности поляриметрии.

Изображения вводятся в ПК в режиме реального времени с разрядностью оцифровки отдельного кадра 8 бит. Такая разрядность, конечно, мала, но усреднение нескольких сотен индивидуальных кадров, полученных при большом отношении сигнал/шум, позволяет расширить динамический диапазон сигнала до величин, приемлемых для поляриметрии (ошибки оцифровки заведомо значительно меньше других случайных ошибок).

Фотополяриметрические наблюдения Юпитера с этим прибором проводились на 70-см рефлекторе АЗТ-8 (1998 г.) на Чугуевской наблюдательной станции НИИ астрономии ХНУ и в Харькове на 20-см рефракторе Цейса (2000, 2001, 2003, 2004 гг.) при углах фазы, близких к нулю, в «синей» и «красной» спектральных полосах, условно названных «В» ($\lambda_{\text{эф}} = 456.4$ нм, $\Delta\lambda = 107.5$ нм) и «R» ($\lambda_{\text{эф}} = 668.7$ нм, $\Delta\lambda = 116.5$ нм).

При наблюдениях такого яркого объекта, как Юпитер, реализуется режим коротких экспозиций (например, на телескопе АЗТ-8 время накопления сигнала индивидуального кадра составляет в полосе «В» 0.16 с, а в полосе «R» — 0.08 с). Это позволяет при дальнейшей обработке благодаря совмещению индивидуальных кадров в серии в значительной степени компенсировать атмосферные дрожания.

Новые поляриметрические наблюдения Юпитера, представляемые здесь, были выполнены нами 1—4 июня 2007 г. с помощью описанного выше прибора, установленного на рефлекторе АЗТ-8, а также Ю. И. Великодским и Н. В. Опанасенко 27—28 августа 2006 г. на 50-см телескопе (г. Майданак, Узбекистан) с помощью поляриметра, оптико-механическая часть которого аналогична прибору «x_CCD», а в качестве фотоприемника использовалась цифровая CMOS-камера Canon 350D.

ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Анализ факторов, искажающих данные ПЗС-наблюдений. Будем считать, что сигнал, несущий информацию об объекте (сначала световой, а затем электрический), претерпевает последовательно следующие искажения.

1. На излучение объекта накладывается рассеянный земной атмосферой свет, что приводит к увеличению яркости во всех точках изображения на некоторую константу.

2. В результате воздействия атмосферной турбуленции изображение любого небесного объекта претерпевает замытие, а протяженного — еще и геометрические искажения, вызванные неизопланатичностью волнового фронта.

3. На всем оптическом пути от объекта до приемника излучения происходит рассеяние света, имеющее изотропный характер.

4. Недостатки конструкции оптической системы (пыль на покровном стекле камеры, виньетирование и т.п.) вызывают неравномерность освещенности ПЗС-матрицы даже при наблюдении однородного источника излучения, формируя тем самым «неравномерность плоского поля». Кроме того, ячейки ПЗС-матрицы, в которых происходит преобразование светового сигнала в электрический, имеют различную чувствительность, что вносит дополнительный вклад в неравномерность плоского поля.

5. На значения отсчетов накладывается «темновой» сигнал, возникающий из-за тепловой генерации фотоэлектронов. При преобразовании аналогового сигнала в цифровой последний оказывается определенным с точностью до некоторой аддитивной константы («электрического нуля»).

Очевидно, что производить коррекцию искажений сигнала, описанных в пунктах 1—8, нужно в обратном порядке.

Факторы 5 мы учитывали, вычитая из изображения темновой сигнал, который содержит как тепловой фон, так и электрический нуль. Для учета факторов 4 обрабатываемое изображение делилось на плоское поле, которое содержит как неравномерность чувствительности вдоль ПЗС-матрицы, так и неравномерность освещенности матрицы.

Влиянием изотропно рассеянного света (фактор 3) мы решили пренебречь, так как его устранение — довольно трудоемкая и не до конца выполнимая задача.

Чтобы свести к минимуму ошибки, вызванные дрожанием атмосферы (фактор 2), мы исключали из серии кадры с плохим качеством, а также совмещали изображения на кадрах непосредственно перед суммированием.

Для устранения фона неба (фактор 1) нужно вычесть из полученного изображения значение фона неба, измеренное на некотором удалении от изображения Юпитера.

Учет систематических ошибок. Для учета темнового сигнала после каждой серии наблюдений (последовательно в двух полосах) регистрировалась серия кадров с перекрытой световой заслонкой, а для учета неравномерности чувствительности ПЗС-матрицы измерялось сумеречное небо.

Кроме искажающих факторов, описанных выше и влияющих на результаты любых наблюдений с использованием ПЗС-приемников, есть эффекты, влияющие только на измерения поляризации. К таковым следует отнести инструментальную поляризацию и деполаризацию. Инструментальная поляризация может возникать в разных частях системы и влиять как на все изображение, так и лишь на его фрагменты: искажения, возникающие в телескопической системе, влияют на все изображение, а искажения, возникающие в матрице, — лишь на отдельные пиксели.

Стандартной процедурой определения инструментальной поляризации является наблюдение поляриметрических стандартов с нулевой поляризацией. Оценка инструментальной поляризации была проведена по наблюдениям в 2001 г. звезды Процион, которая является поляриметрическим стандартом с практически нулевой ($P = 0.005\%$) степенью поляризации. К сожалению, в силу того, что наш поляриметр предназначен для наблюдения ярких объектов, точность измерения поляризации звезд невелика. Кроме того, процедуры наблюдений протяженных объектов и звезд существенно отличаются. Поэтому, несмотря на накопление огромного массива данных наблюдений звезды (4500 кадров), точность определения инструментальной поляризации оказывается невысокой (ошибки около $\pm 0.3\%$). Получаемое

типичное значение $P_{ин} = 0.2 \pm 0.3 \%$ вполне ожидаемо для телескопа-рефрактора и оптической схемы применяемого фотополяриметра.

Особо отметим, что в данной работе нас в основном интересует исследование параметра северо-южной асимметрии поляризации, рассчитываемого как разность степеней линсистой поляризации в северной и южной полярных областях Юпитера. При этом инструментальная поляризация, одинаково входящая в значения величины поляризации для обоих регионов, практически полностью компенсируется при вычитании.

Для определения деполяризации проводятся наблюдения объектов с большой поляризацией. Как уже говорилось выше, наш поляриметр не предназначен для наблюдений слабых объектов, а звезды с большой поляризацией, как правило, еще слабее, чем звезды с нулевой поляризацией, поэтому точность измерений будет еще меньше. Поляризатор ПФ-40.5 по заявлениям разработчиков и результатам лабораторных измерений не имеет большой деполяризации. Поэтому было принято решение пренебречь возможной инструментальной деполяризацией.

Также не стоит ожидать «дрейфа» поляризационных характеристик по полю матрицы, потому что с точки зрения оптики ее можно рассматривать как высококачественную «плоскопараллельную пластинку», а поскольку наблюдения мы проводили при больших значениях фокуса, поле зрения составляло не больше одной угловой минуты. Перед наблюдениями прибор тщательно юстировался, а Юпитер размещался вблизи оптической оси телескопа. Поэтому непараллельностью светового пучка и неперпендикулярностью лучей к матрице, которые теоретически могли бы вызвать дополнительную инструментальную поляризацию, можно пренебречь.

Алгоритм обработки данных фотополяриметрических наблюдений Юпитера. С учетом вышеизложенного был разработан и реализован следующий алгоритм обработки данных фотополяриметрических наблюдений Юпитера.

1. Вычитание из каждого кадра серии усредненного темнового сигнала.
2. Деление каждого кадра серии на усредненное плоское поле.
3. Совмещение изображений Юпитера на всех кадрах серии (приведение к общему центру).
4. Суммирование (усреднение) кадров, которые отвечают одинаковым положениям анализатора (0° и 180° , 45° и 225° , 90° и 270° , 135° и 315°). После этой процедуры из нескольких сотен кадров получаются только четыре усредненных кадра (для 0° , 45° , 90° и 135°).
5. Вычитание из полученного изображения фона неба.
6. Учет инструментальной поляризации.
7. Учет разницы масштабов на матрице по вертикали и горизонтали.
8. Учет ориентации Юпитера относительно небесного экватора.
9. Получение параметров Стокса Q и U , интенсивности I , степени поляризации P , угла поляризации в перспективной проекции и их распределений по диску Юпитера (рис. 2).

Остановимся несколько подробнее на изложенном алгоритме и прокомментируем его поэтапно.

Этапы 1-2 тривиальны и не нуждаются в комментариях. Чтобы корректно провести суммирование изображений (*этап 4*), необходимо привести их в одну систему координат (*этап 3*). Для этого находилась центр видимого диска Юпитера по фотометрическому центру тяжести кольца на изображении. Чтобы исключить влияние ярких неоднородных областей вблизи экватора и северо-южной асимметрии полярных областей Юпитера,

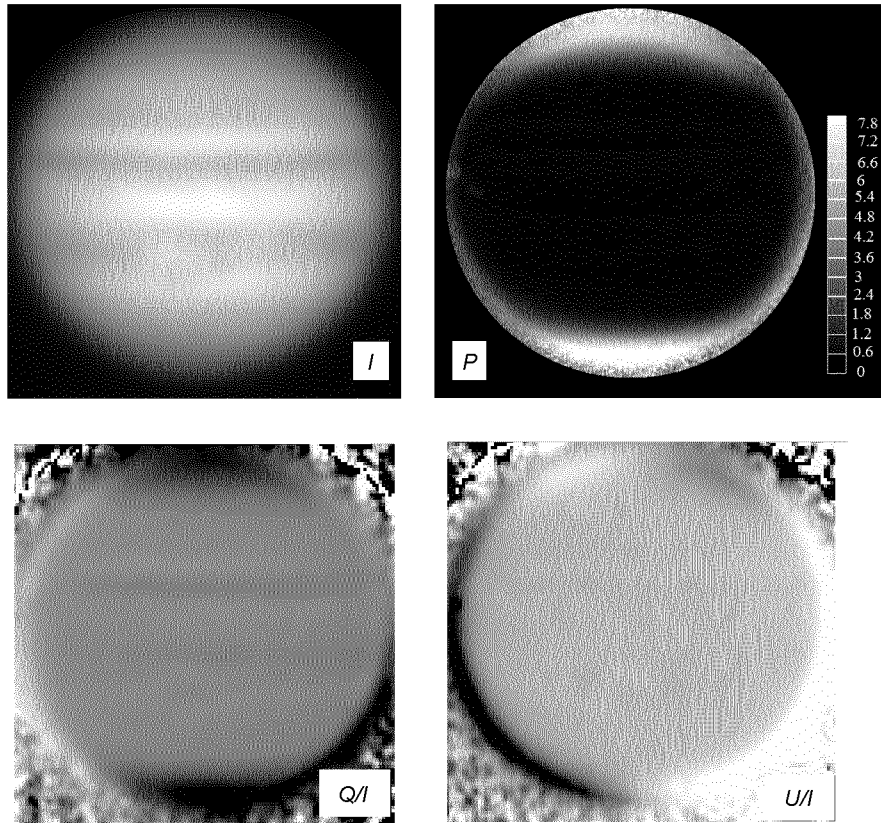


Рис. 2. Типичные изображения Юпитера: интенсивность излучения I , степень линейной поляризации P , параметры Стокса Q и U во внешней перспективной проекции ($\lambda = 456$ нм, $\alpha \approx 0$)

внешний радиус кольца выбирался равным 49 пкл, а внутренний — 39 пкл (при радиусе Юпитера 60 пкл). Расчеты проводились с погрешностью до 0.01 пкл, что достигалось рекуррентным вычислением центра тяжести этой фигуры. Опыт показал, что такая методика для Юпитера работает более устойчиво, чем, например, при определении центра по перегибу (нулю второй производной) на краях диска.

Этапы 5, 6. Для устранения фона неба на кадре выделялась область в виде кольца (внешний радиус — 90 пкл, внутренний — 75 пкл) концентричная с центром диска планеты. В ней рассчитывалось среднее значение фона, которое затем вычиталось из всего кадра.

Этап 7. Для приведения изображений Юпитера к одному стандартному радиусу (60 пкл) необходимо знать масштабные коэффициенты как по горизонтали, так и по вертикали. Для того чтобы найти размер ячейки (пикселя), сравнивались расстояния между компонентами двойной системы α Лебеда ($D = 35''$), снятыми вертикально и горизонтально на снимках и на небе. Отношение масштабов по X и Y оказалось равным 1.03.

Этап 8. Для ориентирования экватора Юпитера на кадрах параллельно оси X (а центральный меридиан — оси Y) необходимо повернуть изображения на угол, равный разности позиционного угла PA проекции оси Юпитера

на небесную сферу (взятого, например, из ежегодника) и угла b , под которым матрица ориентирована относительно круга склонений непосредственно при наблюдениях. Для вычисления угла b проводились наблюдения спутников Юпитера или звезд с остановленным часовым механизмом: угол b определяется по наклону трека спутника (или звезды) к горизонтальной оси матрицы.

Этап 9. После проведения всех вышеперечисленных процедур можно приступить к расчетам параметров линейной поляризации света Юпитера. Степень поляризации P , параметры поляризации U и Q находятся по формулам

$$I = (I^0 + I^{45} + I^{90} + I^{135})/2,$$

$$P = (Q^2 + U^2)^{1/2}/I,$$

$$U = I^{45} - I^{135},$$

$$Q = I^0 - I^{90},$$

где k — значение угла, на который повернут анализатор, I^k — соответствующая интенсивность. Угол плоскости поляризации F (в системе прибора) определяется уравнением

$$\operatorname{tg}2F = U/Q,$$

и его удобно вычислять с помощью алгоритмической функции $F = \operatorname{atan}2(U, Q)/2$, которая по знаку величин U и Q однозначно определяет угол, тангенс которого равен отношению U/Q .

Все программное обеспечение для обработки данных наблюдений разработано авторами на основе программной системы IRIS [3] и ее новой версии xIRIS Framework.

Оценка точности поляриметрических наблюдений Юпитера. На основе поляриметрических данных наблюдений Юпитера 2001 г. была проведена оценка точности измерений. В границах виртуальной круглой диафрагмы для каждого оборота планеты проводились расчеты параметров Стокса U и Q . Таким образом, для каждой серии изображений были получены 20 значений U и Q . Далее вычислялись средние значения и среднее квадратичное отклонение σ для U и Q . Затем отбраковывались кадры, для которых отклонения U и Q превышали 2σ , и снова вычислялись средние значения и среднее квадратичное отклонение σ для U и Q , степень линейной поляризации P , угол поляризации F , значение интеграла в диафрагме I (в условных единицах) и стандартные ошибки U , Q и I . Использовались три диафрагмы радиусами $R_d = 1$ пкл ($0.45''$), 3 пкл ($1.35''$) и 5 пкл ($2.25''$). Расчеты проводились для двух областей — вблизи экватора в середине зоны ($1.75''$ от центра) и в районе северного полярного региона ($21.84''$ от центра). Далее рассматривались ряды значений параметров поляризации, соответствующие различным размерам и положениям виртуальной диафрагмы. Для полученных выборок значений параметров вычислялись средние величины и дисперсии. По результатам проведенных расчетов можно сделать следующие выводы.

1. Погрешности определения поляризации вблизи центра Юпитера составляют примерно 0.15 % для полосы «В» и 0.05—0.08 % для «R». Большее значение ошибки для полосы «В» объясняется меньшей чувствительностью ПЗС и большим количеством поляриметрических деталей.

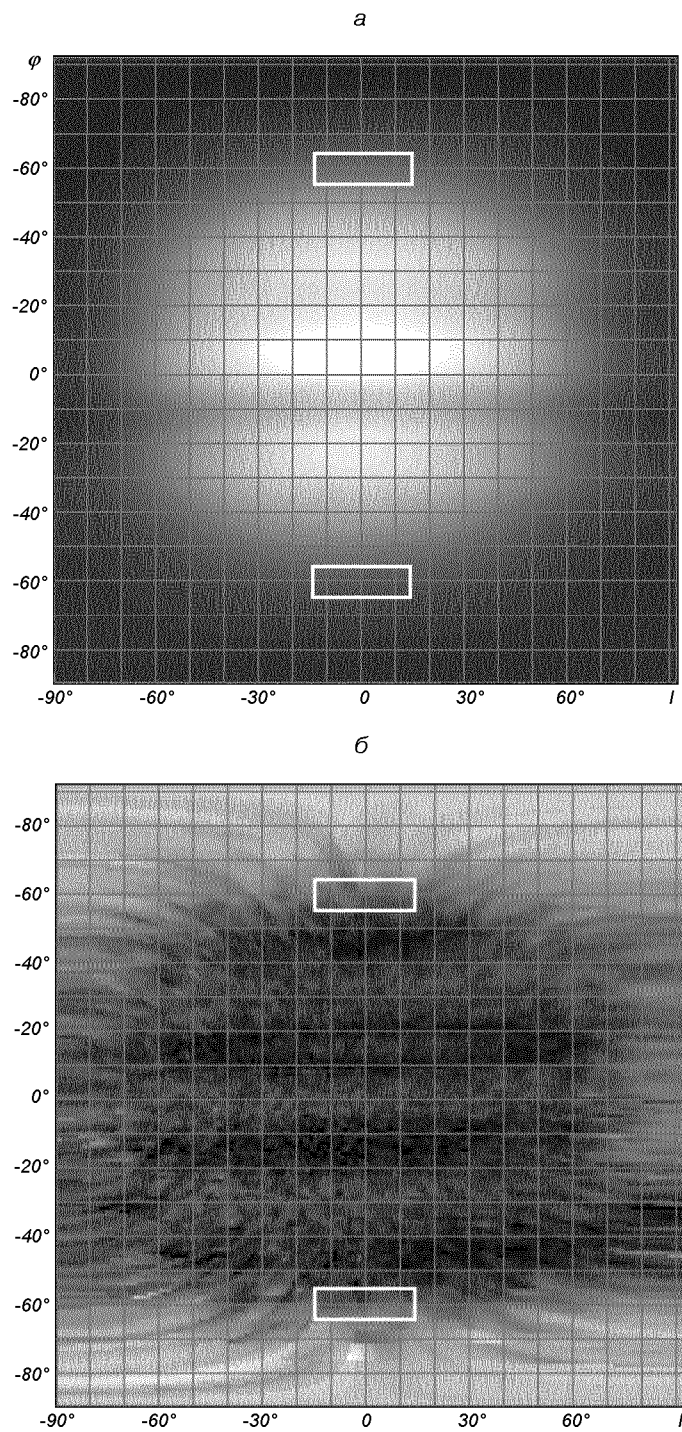


Рис. 3. Карта интенсивности I (а) и степени P линейной поляризации (б) в цилиндрической проекции ($\lambda = 456$ нм, 2001 г., $\alpha \approx 0$). Белыми рамками отмечены области, используемые для расчета асимметрии поляризации

2. На высоких широтах погрешности увеличиваются до 0.25 % для полосы «В» и до 0.5 % для полосы «R». Это связано с большим градиентом поляризации в этом районе. Влияние нестабильности атмосферы на этих широтах значительно возрастает.

3. Основной причиной погрешностей является влияние земной атмосферы, прежде всего дефокусировка и деформирование изображения. Атмосферное дрожание практически полностью компенсируется при помощи алгоритма наблюдений и обработки.

Хотя точность единичного измерения относительно невелика, для получения итогового параметра асимметрии поляризации мы используем очень большой массив поляриметрических данных (тысячи кадров, все данные за сезон наблюдения), что позволяет за счет усреднения и применения специальных методов обработки (см. ниже) уменьшить ошибки до величин, приемлемых для изучения сезонных вариаций поляризации.

Расчет параметра северо-южной асимметрии поляризации. Для изучения изменений поляризационных свойств полярных областей планеты во времени удобно использовать параметр северо-южной асимметрии поляризации $P_N - P_S$ [19].

Полученные после первичной обработки изображения можно считать картами распределения параметров поляризации по диску Юпитера (для конкретных долгот центрального меридиана), представленными во внешней перспективной проекции. Для расчета параметра $P_N - P_S$ эти карты удобнее иметь в цилиндрической проекции. Поэтому производилась соответствующая трансформация изображений по формулам, описанным в работе [17]. Перед построением таких карт в FITS-заголовки файлов данных вносилась дополнительная информация согласно эфемеридам на нужную дату: DE — склонение Земли, PA — позиционный угол проекции оси Юпитера на небесную сферу, геоцентрические и гелиоцентрические координаты Юпитера. На рис. 3 показаны примеры трансформации изображений из перспективной проекции в цилиндрическую.

После получения карт в цилиндрической проекции на широтах $\pm 60^\circ$ на севере и юге выделялись области прямоугольной формы, в которых вычислялись средние значения P . Оптимальные размеры этой области должны обеспечивать минимум ошибок: область должна быть достаточно велика, чтобы сгладить случайные выбросы, и в то же время достаточно мала, чтобы не вносить погрешности, связанные с регулярным ходом поляризации. Таковым оказался размер области 30° по долготе и 10° по широте.

После определения поляризации в полярных областях рассчитывался параметр $P_N - P_S$. И наконец, для каждого периода наблюдений вычислялось усредненное за несколько оборотов Юпитера значение асимметрии поляризации (несколько десятков индивидуальных значений $P_N - P_S$ для каждого года). Для дальнейшего анализа использовалась именно эта величина.

СЕЗОННЫЕ ВАРИАЦИИ СЕВЕРО-ЮЖНОЙ АСИММЕТРИИ СТЕПЕНИ ЛИНЕЙНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ

Известна глобальная северо-южная асимметрия Юпитера. Она хорошо заметна на многочисленных фотометрических изображениях структуры зон и полос. На факт северо-южной асимметрии поляризации впервые указывал Дольфюс в 1960-х гг. [2, 8], однако наиболее полное исследование этого явления было проведено в НИИ астрономии ХНУ.

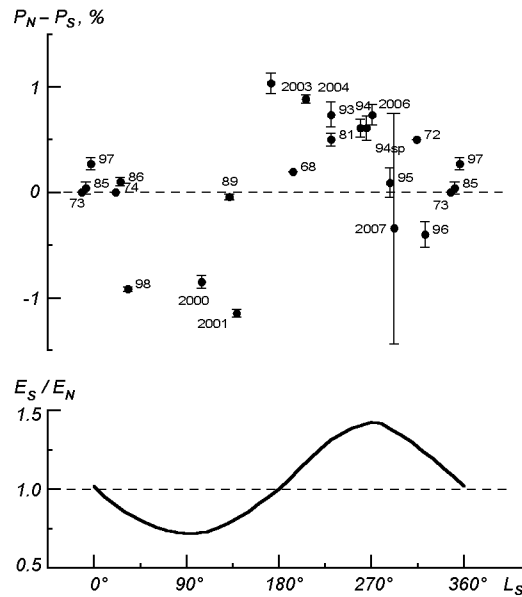


Рис. 4. *a* — зависимость параметра северо-южной асимметрии поляризации $P_N - P_S$ от положения Юпитера на орбите (L_S — планетоцентрическая орбитальная долгота Солнца); *b* — отношение E_S/E_N значений инсоляции для соответствующих полярных регионов

В работе [19] было показано, что значения параметра асимметрии $P_N - P_S$ оказываются довольно хорошо организованными, если их представить в зависимости от планетоцентрической орбитальной долготы Солнца L_S (положение Юпитера на орбите). Объяснению причин возникновения сезонных вариаций поляризации посвящена работа [7]. Основная идея заключается в том, что сезонные изменения температуры приводят к изменению концентрации аэрозолей на высоких широтах Юпитера, а следовательно, — к изменению поляризационных свойств стратосферы планеты в полярных областях. Продолжая исследование, мы приводим новый график изменений северо-южной асимметрии поляризации в зависимости от положения Юпитера на орбите в сравнении с величиной E инсоляции для соответствующих полярных областей (рис. 4). Новые значения параметра асимметрии поляризации $P_N - P_S$ равны 0.74 ± 0.1 % (2006 г., $\lambda_{эф} = 470$ нм) и -0.35 ± 1.1 % (2007 г., $\lambda_{эф} = 456$ нм) и хорошо согласуются с предыдущими наблюдениями.

Как было показано в работе [7], зависимость асимметрии поляризации от положения Юпитера на орбите хорошо аппроксимируется периодическими функциями. Так, аппроксимация синусоидой по сравнению с константой по F-критерию дает уменьшение дисперсии с доверительной вероятностью 0.76. Однако скорость образования аэрозольных частиц, как известно, зависит от температуры экспоненциально [6, 7], и несмотря на то, что температура в атмосфере Юпитера в течение сезона изменяется плавно, в сезонном процессе образования стратосферного аэрозоля должно иметь место скачкообразное изменение концентрации частиц, что и демонстриру-

ют поляризационные данные на рис. 4. Действительно, пилообразная функция вида $P_N - P_S = 1.83 - 0.005L_S$ (%) для $160^\circ < L_S < 520^\circ$ с периодом 360° аппроксимирует данные с доверительной вероятностью 0.96.

ВЫВОДЫ

1. Применение ПЗС-матриц в качестве фотоприемника является эффективным средством для фотометрии и поляриметрии ярких протяженных объектов, в частности Юпитера.

2. Рассмотрены факторы, искажающие фотополяриметрические данные, получаемые с использованием ПЗС-матриц. Показано, что основной причиной неустранимых погрешностей при наблюдениях ярких протяженных объектов является влияние земной атмосферы, прежде всего дефокусировка и деформирование изображения.

3. Разработаны алгоритмы и программное обеспечение для обработки фотометрических и поляриметрических наблюдений Юпитера и других ярких протяженных объектов, проводимых с использованием ПЗС-матриц, учитывающие специфику этих фотоприемников.

4. Проведены новые фотополяриметрические наблюдения Юпитера на 70-см рефлекторе Чугуевской наблюдательной станции НИИ астрономии ХНУ (2007 г.) и на 50-см телескопе Майданакской высокогорной обсерватории (2006 г.), которые являются продолжением непрерывного ряда наблюдений, начатого в 1981 г.

5. По результатам обработки данных в синей области спектра получены следующие значения для параметра асимметрии поляризации: 0.74 ± 0.1 % (2006 г.), -0.35 ± 1.1 % (2007 г.). Новые данные согласуются с предыдущими наблюдениям и подтверждают предложенную ранее интерпретацию возникновения сезонных вариаций поляризации.

6. Программу поляриметрических наблюдений Юпитера целесообразно продолжать и в дальнейшем, так как совместно с другими методами (моделирование физико-химических процессов и рассеяния света в аэрозольном слое и в атмосфере планеты) она позволит выявить новые закономерности в поведении поляризации планеты и расширить наше понимание физических процессов, происходящих в атмосфере Юпитера.

1. Болквядзе О. Р. Исследование поляризационных свойств Юпитера // Бюл. Абастум. астрофиз. обсерватории.—1980.—53.—С. 131—162.
2. Дольфус А. Исследования поляризации планет // Планеты и спутники. — М.: Изд-во иностр. лит., 1963.—С. 346—352.
3. Корохин В. В., Белецкий С. А., Великодский Ю. И. и др. Опыт применения ПЗС фотоприемников на Астрономической обсерватории ХНУ // Кинематика и физика небес. тел.—2000.—16, № 1.—С. 80—86.
4. Корохин В. В., Шалыгина О. С. Исследования полярных областей Юпитера поляриметрическим методом // 200 лет астрономии в Харьковском университете / Под ред. Ю. Г. Шкуратова. — Харьков: ХНУ, 2008.—С. 244—249.
5. Тейфель В. Г. Полярные области Юпитера и Сатурна // Астрон. вестн.—1985.—19, № 1.—С. 48—63.
6. Чернов А. А., Гиваргизов Е. И., Баграсаров Х. С. и др. Современная кристаллография. — М.: Наука, 1980.—Т. 3. Образование кристаллов.—407 с.
7. Шалыгина О. С., Корохин В. В., Старухина Л. В., и др. Причины сезонных вариаций асимметрии «север—юг» поляризации Юпитера // Астрон. вестн.—2008.—42, № 1.—С. 10—19.
8. Dollfus A. Etude des planetes par la polarization de leur lumiere // Ann. Astrophys. Suppl.—1957.—N 4.—(In English, NASA TT F-188).

9. *Hall J. S., Riley L. A.* Photoelectric observations of Mars and Jupiter with a scanning polarimeter // *Lowell Observ. Bull.*—1968.—7, N 145.—P. 83—92.
10. *Hall J. S., Riley L. A.* Polarization measurements of Jupiter and the Great Red Spot // *Planets, Stars and Nebulae Studied with Polarimetry* / Ed. by T. Gehrels. — Tucson, Arizona: Univ. Press, 1974.—P. 593—598.
11. *Hall J. S., Riley L. A.* A polarimetric search for fine structure on Jupiter's disk // *Icarus.*—1976.—29, N 2.—P. 231—234.
12. *Kemp K. G., Rudy R. J., Lebofsky M. J., et al.* Near infrared polarization studies of Saturn and Jupiter // *Icarus.*—1978.—35, N 2.—P. 263—271.
13. *Kim S. J., Caldwell J., Rivolo A. R., et al.* Infrared polar brightening on Jupiter // *Icarus.*—1985.—64, N 2.—P. 233—248.
14. *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).
15. *Mallama A., Krobusek B. F., Collins D. A., et al.* The radius of Jupiter and its polar haze // *Icarus.*—2000.—144, N 1.—P. 99—103.
16. *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, N 4.—P. 583—592.
17. *Shalygin E. V., Velikodsky Yu. I., Korokhin V. V.* Formulas of the Perspective Cartographic Projection for Planets and Asteroids of Arbitrary Shape // *Lunar and Planet. Sci.* 34-d. LPI. — Houston, 2003.—Abstract N 1946.
18. *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, N 1.—P. 35—73.
19. *Starodubtseva O. M., Akimov L. A., Korokhin V. V.* Seasonal variation of the North-South asymmetry of polarized light of Jupiter // *Icarus.*—2002.—157, N 2.—P. 419—425.
20. *West R. A.* Voyager 2 imaging eclipse observations of the Jovian high altitude haze // *Icarus.*—1988.—75, N 3.—P. 381—398.

Поступила в редакцию 21.04.08