

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
ГЛАВНАЯ АСТРОНОМИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ

Шалыгина Оксана Сергеевна

УДК 523.45-852:520.85

**СВОЙСТВА СТРАТОСФЕРНОГО АЭРОЗОЛЯ В ПОЛЯРНЫХ
ОБЛАСТЯХ ЮПИТЕРА ПО ДАННЫМ
ФОТОПОЛЯРИМЕТРИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ**

01.03.03 – Гелиофизика и физика Солнечной системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание научной степени
кандидата физико-математических наук

Киев – 2009

Диссертация является рукописью.

Работа выполнена в НИИ астрономии Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина Министерства образования и науки Украины.

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник
Корохин Виктор Валентинович,
НИИ астрономии Харьковского национального
университету имени В. Н. Каразина МОН Украины,
заведующий отдела физики Солнца и планет.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник
Видьмаченко Анатолий Петрович,
Главная астрономическая обсерватория НАН
Украины,
заведующий отдела физики тел Солнечной системы;

доктор физико-математических наук, профессор
Кручиненко Виталий Григорьевич,
Астрономическая обсерватория Киевского
национального университету имени Тараса
Шевченко.

Защита состоится 24 апреля 2009 г. на заседании специализированного
ученого совета Д 26.208.01 при Главной астрономической обсерватории
Национальной академии наук Украины по адресу: ГАО НАН Украины,
ул. Академика Заболотного, 27, 03680 МСП, г. Киев.

Начало заседаний в 10 часов.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГАО НАН Украины по
адресу: ГАО НАН Украины, ул. Академика Заболотного, 27, 03680 МСП,
г. Киев.

Автореферат разослан “21” марта 2009 г.

Ученый секретарь
специализированного ученого совета,
кандидат физико-математических наук

И. Э. Васильева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Изучение физических условий в верхних слоях атмосферы Юпитера имеет важное значение для фундаментальных и прикладных исследований Солнечной системы, в частности, для понимания процессов образования аэрозольных составляющих в атмосферах планет, а также для разработки методов дистанционного зондирования.

На настоящий момент существует немного работ, посвященных исследованию полярных регионов Юпитера. В большинстве современных работ объектом исследования являются прежде всего экваториальные области, а редкие исследования полярных областей носят, как правило, сугубо теоретический характер.

Именно наземные наблюдения Юпитера являются основным источником информации о планете. Наблюдения из космоса имеют ряд несомненных преимуществ, но они носят эпизодический характер, тогда как наземные наблюдения можно проводить годами. Атмосфера Юпитера обладает видимой стабильностью, так что главные компоненты ее вещества остаются практически постоянными пространственно и имеют только очень небольшие временные вариации в глобальном масштабе. Но физико-химические явления (конденсация, химические реакции) могут привести к пространственным (вертикальным и горизонтальным) и временным вариациям более мелкого масштаба.

Проведенный в диссертации анализ уникального по временному масштабу ряда поляриметрических данных, полученного на протяжении более двух оборотов Юпитера вокруг Солнца, позволил выявить сезонные изменения в стратосфере планеты, а также указать на возможные причины их возникновения. Такие данные важны не только для развития исследований физических свойств атмосферы Юпитера, но и для развития сравнительной планетологии.

Связь работы с научными программами, планами, темами. Представленные в диссертации исследования выполнялись согласно с планами таких научных тем отдела физики Солнца, Луны и планет НИИ астрономии Харьковского национального университета им. В. Н. Каразина (НИИА ХНУ):

- 8-12-01 “Исследование физических условий на поверхностях и в атмосферах планет” (№ гос. регистрации 0199U004411).
- 8-12-04 “Астрофизические исследования поверхностей и атмосфер планет по данным фотометрии и поляриметрии” (№ гос. регистрации 0104U000665).
- 8-12-07 “Астрофизические исследования и мониторинг Солнца, Юпитера и Луны по данным наземных и космических наблюдений” (№ гос. регистрации 0107U000674).

Диссертант принимал участие в проведении этих исследований на протяжении обучения в аспирантуре и работе в НИИА ХНУ в качестве лаборанта, инженера и младшего научного сотрудника.

Цель и задачи исследования. Целью диссертационной работы является исследование физических условий в верхних слоях атмосферы Юпитера и свойств аэрозоля в полярных областях планеты. Работа основывается на данных наземных фотополариметрических наблюдений Юпитера и на использовании теории образования аэрозолей.

Для достижения указанной цели было необходимо решить следующие задачи:

- продолжить ряд фотополариметрических наблюдений Юпитера, проводившихся в НИИА ХНУ в 1981–2000 гг.;
- разработать алгоритмы и программные средства для обработки и анализа новых данных фотополариметрических ПЗС-наблюдений Юпитера;
- провести обработку и анализ данных разных лет наблюдений;
- рассмотреть возможные механизмы возникновения линейной поляризации в полярных областях Юпитера при углах фазы, близких к нулю;
- исследовать причины долгопериодических изменений асимметрии линейной поляризации в полярных областях Юпитера;
- рассмотреть физико-химические процессы образования полярного стратосферного аэрозольного слоя в полярных областях Юпитера.

Объект исследования: полярные области стратосферы Юпитера, аэрозольная стратосферная дымка.

Предмет исследования: физические условия в стратосфере Юпитера, физические и химические свойства стратосферной аэрозольной дымки, связанные с формированием наблюдаемой линейной поляризации.

Методы исследования: фотополариметрические наблюдения, теоретическое и компьютерное моделирование физических процессов формирования полярного аэрозоля и рассеяния света на его частицах.

Научная новизна полученных результатов раскрывается в таких положениях:

1. На протяжении четырех противостояний (2001, 2003, 2004, 2007 гг.) были проведены фотополариметрические наблюдения Юпитера, которые продолжают наблюдательную программу, начатую в НИИ астрономии ХНУ им. В. Н. Каразина в 1981 г. По результатам обработки наблюдательных данных 2000–2007 гг. получены новые данные, характеризующие асимметрию линейной поляризации в полярных областях Юпитера.

2. Значительное развитие получило исследование долгопериодических изменений поляризации Юпитера. Привлечение новых данных, полученных при непосредственном участии автора, и данных других исследователей увеличило объем анализируемого материала почти в два раза. Аналогов этой

базы данных, описывающей поведение поляризации в полярных областях Юпитера на протяжении 48 лет, в мире нет. На основе этих данных впервые найдена обратная связь параметра асимметрии линейной поляризации с инсоляцией, что свидетельствует о сезонном характере изменений поляризации.

3. Впервые предложено объяснение возникновения значительной линейной поляризации в полярных областях на Юпитере при углах фазы, близких к нулю, и ее меридионального хода. Показано, что значительный вклад в поляризацию света может вносить рассеянный на слое аэрозольной стратосферной дымки свет от подстилающей поверхности (облаков).

4. Впервые показано, что сезонные колебания температуры в стратосфере Юпитера являются определяющим фактором в процессах формирования полярной аэрозольной дымки, состоящей из полиароматических углеводородов (ПАУ) – наиболее вероятного вещества аэрозоля, что может объяснить сезонные изменения поляризации в полярных областях Юпитера. Впервые отмечена возможность влияния солнечных космических лучей на формирование полярной дымки на Юпитере.

Практическое значение полученных результатов. Данные фотометрии и поляриметрии Юпитера, полученные автором с помощью ПЗС-матрицы в двух спектральных областях ($\lambda_{\text{eff}} = 456.4$ нм и $\lambda_{\text{eff}} = 668.7$ нм) при углах фазы $0.2\text{--}3.1^\circ$, представлены в стандартном астрономическом формате FITS и могут использоваться для проверки моделей и теорий рассеяния света в атмосфере Юпитера и других планет.

Разработанное программное обеспечение для обработки данных ПЗС-наблюдений Юпитера может быть использовано для обработки любых изображений протяженных объектов. Разработанный алгоритм построения карт Юпитера в цилиндрической проекции с учетом дифференциального вращения планеты может быть использован для исследования тонкой структуры образований в атмосфере Юпитера и других планет и их эволюции со временем.

Исследования физических свойств атмосферы Юпитера важны для развития сравнительной планетологии. В частности, данные, полученные в диссертационной работе, могут быть использованы специалистами по земной атмосфере.

Личный вклад соискателя. Основные результаты диссертации изложены в работах [1–4]. В частности, автору принадлежит следующее.

В работе [1], посвященной рассмотрению механизма формирования поляризации в полярных областях Юпитера при нулевом угле фазы, автором разработана компьютерная программа, моделирующая этот механизм, и проведены все расчеты.

В работе [2] автором самостоятельно проведена обработка

фотополяриметрических данных 2000–2004 гг. Автором получены новые данные о асимметрии линейной поляризации в полярных областях Юпитера (четыре новых значения параметра, характеризующего северо-южную асимметрию поляризации). Автором проведена переобработка старых данных (1981–1998 гг.) с использованием разработанных усовершенствованных методов и компьютерных программ обработки наблюдений. На основе новых данных и данных других исследователей автором получен новый вид сезонных изменений асимметрии линейной поляризации в полярных областях Юпитера и выявлена обратная связь поляризации с инсоляцией. Автор принимал активное участие в разработке и проверке физического механизма, объясняющего возникновение сезонных вариаций поляризации на Юпитере. Автором проведена значительная часть расчетов высотных профилей пересыщений для аэрозолей полярной дымки на Юпитере и проведено исследование процессов образования аэрозолей в стратосфере Юпитера в присутствии ионов. Автором проведено исследование влияния солнечной активности на формирование наблюдаемой поляризации.

В работе [3] рассматриваются особенности применения ПЗС-матриц для фотополяриметрических наблюдений планет и других протяженных объектов. Описываются алгоритмы обработки фотополяриметрических наблюдений Юпитера, на основе которых разработаны программы, которые использовались диссертантом. Автором самостоятельно проведена обработка данных поляриметрических наблюдений Юпитера 2006 и 2007 гг. и получены новые значения северо-южной асимметрии линейной поляризации.

В работе [4] представлен подготовленный автором подробный обзор наблюдательных данных, которые стали основой экспериментального материала, на котором базируется диссертационная работа.

Наблюдательный материал 2001–2007 гг. был получен автором совместно с В. В. Корохиним, Ю. И. Великодским и Е. В. Шалыгиным.

Апробация результатов диссертации. Результаты, полученные соискателем, прошли достаточную научную апробацию. Материалы диссертации представлялись и обсуждались на таких конференциях, симпозиумах, семинарах:

- на международной рабочей группе “Photometry and Polarimetry of Asteroids: Impact On Collaboration” (Харьков, Украина, 2003 г., тезисы);
- на рабочей группе “Remote Sensing Techniques and Instrumentation: International Cooperation” международной конференции “NATO ASI on polarimetry in remote sensing” (Киев, Украина, 2003 г., тезисы, устный доклад);
- на международной научной конференции “Астрономическая школа молодых ученых. Актуальные проблемы астрономии и космонавтики” (Белая Церковь, Украина, 2004 г., устный доклад);
- на конференции “Astromy in Ukraine – Past, Present and Future”

посвященной 60-летию ГАО НАН Украины (Киев, Украина, 2004 г., устный доклад);

– на Каразинских чтениях (Харьков, Украина, 2004 г., устный доклад);

– на научной конференции “Физика небесных тел”, приуроченной к 60-летию со дня образования Крымской астрофизической обсерватории. (пгт Научный, Крым, 2005 г., стендовый доклад);

– на международной астрономической школе молодых ученых “13th Open Young Scientists’ Conference on Astronomy and Space Physics” (Киев, Украина, 2006 г., устный доклад);

– на международных научных конференциях “Lunar Planetary Scientific Conference” XXXV, XXXVII, XXXVIII (Хьюстон, США, 2004, 2006, 2007 гг., тезисы);

– на международной конференции “European Planetary Science Congress 2006” (Берлин, Германия, 2006 г., тезисы);

– на 10-й международной конференции по электромагнетизму и рассеянию света “ELS-X” (Бодрум, Турция, 2007 г., доклад, постер и расширенные тезисы);

– на 46-м микросимпозиуме Вернадского–Брауна по сравнительной планетологии (Москва, Россия, 2007 г., постер);

– на международной конференции “The Solar System Bodies: From Optics to Geology” (Харьков, Украина, 2008 г., устный доклад);

– на научном семинаре Радиоастрономического института НАН Украины (Харьков, Украина, 2006 г., устный доклад);

– семинаре отдела физики тел Солнечной системы Главной астрономической обсерватории НАН Украины (Киев, Украина, 2007 г., устный доклад);

– на астрономических семинарах НИИ астрономии ХНУ им. В. Н. Каразина (Харьков, Украина, 2003–2008 гг., устные доклады).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 5 статей, в том числе: 3 статьи в специализированных научных изданиях [1–3], глава в коллективной монографии [4], статья в сборнике [5] и 15 работ в сборниках тезисов международных конференций [6–20].

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, 3 разделов (включающих 12 подразделов), 48 рисунков и 7 таблиц в тексте, выводов, 2 приложений и списка цитируемой литературы, который состоит из 130 наименований. Полный объем работы – 152 страницы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** обосновывается выбор и актуальность темы диссертационной работы, определяется состояние научной разработки темы,

формулируются цель и основные задания исследования, методы и теоретические основы их решения, раскрывается научная новизна положений, которые выносятся на защиту, определяется теоретическое и практическое значение результатов проведенного исследования.

Глава 1. Оптические свойства верхних слоев атмосферы Юпитера.

Первый раздел посвящен обзору литературы по теме диссертации. Главное внимание уделено следующим проблемам.

Поскольку работа посвящена изучению физических условий в стратосфере Юпитера, сначала рассматриваются основные методы оптических исследований атмосфер планет. Эффективными, а зачастую единственными методами исследования атмосфер планет-гигантов являются методы оптического дистанционного зондирования. Как известно, при рассеянии в планетной атмосфере свет поляризуется. Именно анализу поляризационных данных посвящена диссертационная работа. Тот факт, что одним из основных механизмов возникновения поляризации является рассеяние света на электронах, атомах, молекулах и аэрозолях, позволяет использовать поляриметрические наблюдения для исследования планетных атмосфер.

В разделе рассказывается про морфологию и вертикальную структуру атмосферы Юпитера, известными по данным дистанционного зондирования. Приведены основные результаты космических миссий, исследовавшие атмосферу Юпитера. Особое внимание уделено полярным областям планеты. Согласно результатам наблюдений Юпитера в разных спектральных областях полярные области выделяются как потемнения или как области с усиленной яркостью. Указано на то, что основой видимой атмосферы Юпитера является облачный слой, а над плотными слоями атмосферы находится относительно разреженная стратосфера и стратосферная аэрозольная дымка с большей ее концентрацией в полярных областях (например, [21]).

В первом разделе приведен обзор известных наблюдательных фактов о поляриметрических свойствах атмосферы Юпитера. Приведем основные:

1. Плоскость поляризации в заданной точке диска Юпитера ориентирована относительно радиального направления (направлена по радиусу или перпендикулярно ему), что принято приписывать механизму многократного рассеяния света.

2. В центральной части диска Юпитера поляризация низкая (значения около нуля) и практически не меняется вдоль центрального меридиана (до планетоцентрических широт $\pm 45^\circ$). С увеличением угла фазы до максимально доступных для наземных наблюдений значений ($\sim 12^\circ$) степень поляризации центра диска планеты немного увеличивается.

3. Поляриметрические наблюдения Юпитера указывают на рост степени линейной поляризации по направлению к полярному лимбу до значений $P = 7-8\%$ (по модулю) в синей области спектра даже при углах фазы, близких к

нулю (например, [22]). Космические данные подтверждают такой ход поляризации.

4. Наблюдается северо-южная асимметрия степени линейной поляризации (например, [22]). Под асимметрией имеется в виду разница значений степени линейной поляризации для северных и южных высоких широт. Как известно, северо-южная асимметрия Юпитера проявляется практически во всем. Она хорошо заметна на многочисленных изображениях этой планеты, полученных как наземными, так и космическими методами. Например, есть существенное различие в структуре зон и полос для полушарий Юпитера. Поляризация не является исключением.

5. Наблюдается сильная спектральная зависимость поляризации на Юпитере: с увеличением длины волны степень поляризации в полярных регионах уменьшается, и в инфракрасных лучах поляризация меняет знак (с пересечением нулевого значения вблизи $\lambda = 750$ нм).

На основе данных, полученным в результате многолетних поляриметрических наблюдений, которые проводятся сотрудниками НИИ астрономии ХНУ с 1981 г., были выявлены долговременные вариации асимметрии степени линейной поляризации [22]. Авторами работы [22] были предложены гипотезы о влиянии сезонных изменений инсоляции и магнитного поля Юпитера на формирование асимметрии поляризации в полярных регионах Юпитера и ее сезонные и долготные вариации. Дальнейший прогресс исследований в этом направлении невозможен без разработки оптических и физических моделей, которые должны дать объяснение возникновению существенной линейной поляризации при орбитальных углах, близких к нулю, ее северо-южной асимметрии и долгопериодических вариаций поляризации. Продолжению этой работы и объяснению приведенных выше наблюдательных фактов и посвящена диссертация.

Оригинальные результаты представлены в разделах 2–3.

Глава 2. Результаты фотополариметрических наблюдений Юпитера. Аппаратура и алгоритмы обработки данных. Для решения поставленных в работе задач на протяжении четырех оппозиций были проведены фотополариметрические наблюдения Юпитера с ПЗС камерой OS-65D Mintron на 20-см рефракторе Цейса (2001, 2003, 2004 гг.) и на 70-см рефлекторе АЗТ-8 (2007 г.) в двух спектральных полосах: синей ($\lambda_{\text{eff}} = 456$ нм, $\Delta\lambda = 107.5$ нм) и красной ($\lambda_{\text{eff}} = 669$ нм, $\Delta\lambda = 116.5$ нм). Эти наблюдения продолжают наблюдательную программу, которая была начата в 1981 г. в НИИ астрономии Харьковского национального университета им. В. Н. Каразина с целью исследования поведения степени линейной поляризации на Юпитере во времени, в частности ее северо-южной асимметрии в полярных областях планеты.

Камера OS-65D использует ПЗС-матрицу формата 752 на 582 элементов

(размер светочувствительной секции 4.9 мм на 3.7 мм), которая имеет хорошие технические показатели: высокую чувствительность, отсутствие “слепых” и “горячих” пикселей, низкий уровень шумов даже без охлаждения, неравномерность чувствительности по полю не больше 1 %. В качестве анализатора линейной поляризации использовался поляризационный фильтр ПФ-40.5, который вращается шаговым двигателем на заданный угол по команде с персонального компьютера. Особенностью поляриметрических наблюдений планет является необходимость использования изображений, полученных при разных положениях анализатора с минимальными временными интервалами. Для этого смена положений анализатора происходит в шаговом режиме таким образом: кадр – потом поворот анализатора на 45° – снова кадр – снова поворот анализатора на 45° и так далее. Приблизительно за 5 секунд анализатор делает один полный оборот и регистрируется 8 кадров. Количество полных оборотов анализатора на одну серию наблюдений Юпитера составляло от 15 до 50. За одно наблюдение регистрировалась серия из 120–400 кадров. Для обеспечения максимальной статистической надежности наблюдений этот ряд должен быть как можно большим. Однако за время наблюдений фотометрические свойства земной атмосферы могут претерпеть значительные изменения. Указанное количество кадров установлено опытным путем как оптимальная. Время накопления сигнала для одного кадра в синей полосе спектра равно $8/50$ секунд. Хотя разрядность оцифровывания отдельного кадра 8 бит, но за счет усреднения большого количества кадров и факта, что ошибки оцифровывания намного меньше, чем другие случайные ошибки, динамический диапазон сигнала расширяется до приемлемых для поляриметрии величин.

Как показали проведенные оценки точности для одиночной серии наблюдений, абсолютные погрешности определения поляризации вблизи центра Юпитера составляют приблизительно 0.15 % для синей полосы та 0.05–0.08 % для красной спектральной полосы. Полученное большее значение ошибки для синей полосы объясняется меньшей чувствительности ПЗС и большим количеством поляриметрических деталей на диске планеты. На высоких широтах погрешности возрастают до 0.4 % для синей полосы и до 0.5 % для красной. Это связано с большим градиентом в этом районе и влиянием нестабильности земной атмосферы, которая вызывает дефокусировку и деформацию изображения. Атмосферное дрожание практически полностью компенсируется при помощи алгоритма наблюдений и обработки. Следует отметить, что хотя точность единичного измерения относительно невелика, для получения итогового параметра асимметрии поляризации используется очень большой массив поляриметрических данных (тысячи кадров, все данные за сезон наблюдения), что позволяет за счет усреднения кадров и применения специальных методов обработки, о которых рассказывается ниже, статистически уменьшить ошибки до величин, приемлемых для исследования

сезонных вариаций поляризации.

В этом разделе детально рассмотрен алгоритм первичной обработки данных фотополариметрических наблюдений Юпитера и проведен анализ факторов, которые искажают данные ПЗС-наблюдений. Необходимое программное обеспечение для обработки данных наблюдений было разработано соискателем самостоятельно или в соавторстве с В. В. Корохиным, Е. В. Шалыгиным и Ю. И. Великодским на базе программного комплекса “xIRIS Framework”. Особенности обработки данных следуют из особенностей наблюдений и поставленной перед диссертантом задачи об исследовании северо-южной асимметрии линейной поляризации на Юпитере. Прежде всего, проводилась стандартная для фотополариметрических данных первичная обработка: вычитание из каждого кадра серии усредненного темнового сигнала, деление каждого кадра серии на усредненное плоское поле. Эти процедуры тривиальны и не требуют комментариев. После первичной обработки проводилась процедура совмещения изображений Юпитера на всех кадрах серии (приведение к общему центру) и дальнейшее усреднение кадров, которые соответствуют одинаковым положениям анализатора (0° и 180° , 45° и 225° , 90° и 270° , 135° и 315°). После этой процедуры из нескольких сотен кадров остаются только четыре усредненные кадры (для 0° , 45° , 90° и 135°). Чтобы корректно провести усреднения изображений, необходимо привести их в единую систему координат. Для этого находился центр видимого диска Юпитера по фотометрическому центру тяжести кольца на изображении. Чтобы исключить влияние северо-южной асимметрии полярных регионов Юпитера и ярких неоднородных областей вблизи экватора, внешний радиус кольца выбирался 49 пикселей, а внутренний – 39 пикселей (при радиусе Юпитера 60 пикселей). Расчеты проводились с точностью до 0.01 пикселей, что достигалось рекуррентным вычислением фотометрического центра тяжести кольца. Опыт показал, что такая методика для Юпитера работает более устойчиво, чем, например, при определении центра по точке перегиба (нулем второй производной) на краях диска.

Далее из полученных изображений вычитался фон неба и проводилась коррекция за рассеянный в оптической системе свет, и за инструментальную поляризацию. На кадре выделялась область в виде кольца (внешний радиус – 90 пикселей, внутренний – 75 пикселей), концентричная с центром диска планеты, в ней рассчитывалось среднее значение фона, которое потом вычиталось из всего кадра. Далее проводился учет ориентации Юпитера относительно небесного экватора, и по известным формулам получались изображения параметров Стокса Q и U , интенсивности I , степени поляризации P и угла поляризации в перспективной проекции.

После проведенной обработки данных по описанному выше алгоритму можно приступать к решению одной из основных задач диссертации –

исследование изменений во времени северо-южной асимметрии поляризации полярных областей Юпитера. Для описания асимметрии линейной поляризации удобно использовать параметр асимметрии $P_N - P_S$, который равен разнице модулей значений степени линейной поляризации P на севере и на юге на широтах $\pm 60^\circ$ вдоль центрального меридиана [22]. Использование в наблюдениях панорамного фотоприемника (ПЗС-матрицы) позволило свести к минимуму ошибки, вызванные некачественным гидированием, и использовать для анализа информацию, полученную со всего диска планеты. Для того, чтоб воспользоваться этими преимуществами, методика дальнейшей работы с данными была усовершенствована таким образом. 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 удобней иметь в цилиндрической проекции, поэтому проводилась соответствующая трансформация изображений. После получения карт в цилиндрической проекции на широтах $\pm 60^\circ$ соответственно на севере и юге выделялись области прямоугольной формы размером 30° по долготе и 10° по широте, в которых вычислялись средние значения P и рассчитывался параметр асимметрии $P_N - P_S$. И, наконец, для каждого периода наблюдений рассчитывалось усредненное за несколько оборотов Юпитера значение асимметрии поляризации (несколько десятков индивидуальных значений $P_N - P_S$ для каждого периода наблюдений). Для дальнейшего анализа использовалась именно эта величина.

Таким образом, после обработки поляриметрических данных 1998–2007 гг. по описанному алгоритму автором было получено 223 серии цифровых фотополяриметрических изображений диска Юпитера для синей и 116 серий для красной областей спектра при углах фазы $0.2^\circ - 3.1^\circ$. На их основе построено 339 карт распределения параметров Стокса Q и U , интенсивности I и степени линейной поляризации P по диску Юпитера.

Было получено 6 новых значений параметра асимметрии линейной поляризации $P_N - P_S$: $-0.85 \% \pm 0.06 \%$ (2000 г.), $-1.15 \% \pm 0.04 \%$ (2001 г.), $1.04 \% \pm 0.1 \%$ (2003 г.), $0.89 \% \pm 0.04 \%$ (2004 г.), $0.74 \% \pm 0.1 \%$ (2006 г.), $-0.3 \% \pm 1.1 \%$ (2007 г.) (белые кружки на рис. 1).

В целом в диссертационной работе анализируются данные, описывающие поведение поляризации в полярных регионах Юпитера на протяжении 48 лет. Эта база данных была сформована на основе полученных автором новых поляриметрических данных (2000–2007 гг.) и дополнена данными других исследователей: Дж. Хола и Л. Рилли (1968, 1972–74 гг., $\lambda = 370$ нм), Т. Герельса (1960 г., $\lambda = 433$ нм). Таким образом объем анализируемых данных был увеличен почти в два раза по сравнению с предыдущими исследованиями [22].

Как было отмечено еще в работе О. М. Стародубцевой и других [22],

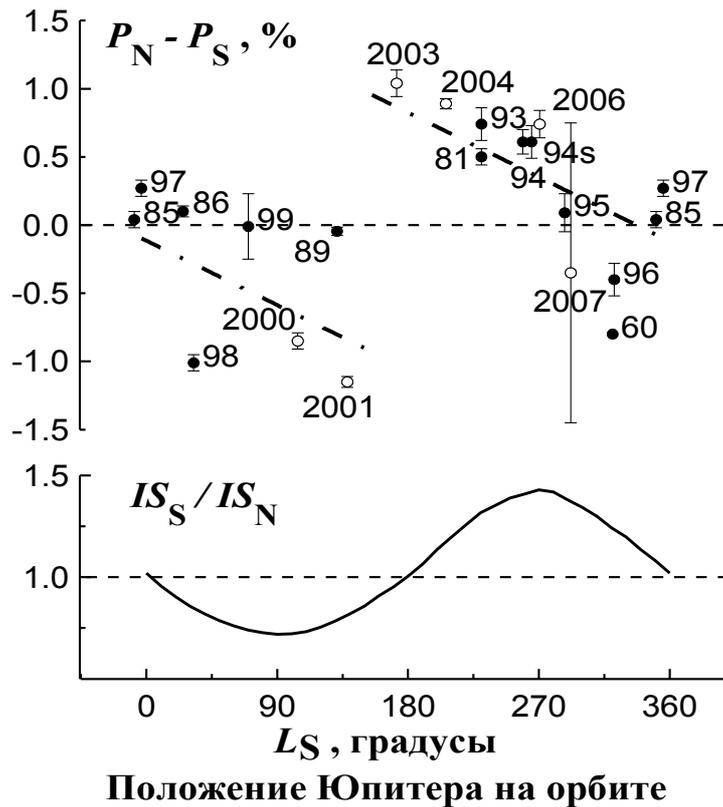


Рис. 1. Изменение северо-южной асимметрии линейной поляризации (вверху) и инсоляции (снизу) в зависимости от положения Юпитера на орбите (L_S – планетоцентрическая орбитальная долгота Солнца). Кружки – усредненные за каждый наблюдательный период параметры $P_N - P_S$, светлые кружки – новые наблюдательные данные, полученные автором, $\lambda = 433\text{--}470$ нм. Сплошная линия – теоретически рассчитанная R. F. Вебе и другими асимметрия инсоляции для полярных регионов. Штрих-пунктирная линия – кривая аппроксимации.

данные об асимметрии поляризации хорошо организуются, если их изобразить в зависимости от положения Юпитера на орбите (рис. 1). Бары на рис. 1 – это внутренняя точность определения параметра $P_N - P_S$, рассчитанная как среднеквадратичное отклонение от среднего значения за данный период наблюдений вблизи оппозиции (от нескольких десятков до нескольких сотен индивидуальных значений $P_N - P_S$).

Из рис. 1 видно, что существует периодическая зависимость параметра $P_N - P_S$ от L_S , но она является негармоничной. Для выяснения характера этой зависимости была проведена аппроксимация поляриметрических данных разными функциями. Действительно, пилообразная функция вида $F = P_N - P_S$ (%) = $1.79 - 0.005 L_S$ для $176^\circ < L_S < 502^\circ$, с периодическим продолжением с периодом 360° (штрих-пунктирная линия на рис. 1), приводит к значимому уменьшению дисперсии на уровне 5 %.

В нижней части рис. 1 приведена теоретически рассчитанная асимметрия инсоляции для полярных регионов как отношение величин инсоляции IS_S/IS_N на юге та на севере на широтах $\pm 60^\circ$. Как видно из рисунка, наблюдается обратная связь между параметром асимметрии поляризации $P_N - P_S$ и инсоляцией (обратите внимание, что на рисунке приведен обратный параметр IS_S/IS_N). Таким образом, существование связи между колебаниями поляризации и инсоляции подтверждается новыми данными наблюдений. Поэтому можно говорить про существование именно сезонных вариаций поляризации. Обнаружено скачкообразное изменение асимметрии поляризации вблизи $L_S = 180^\circ$. Объяснению этих наблюдательных фактов посвящен раздел 3.

В конце главы приводятся результаты исследования фазовых изменений поляризации на Юпитере в двух спектральных областях ($\lambda = 456$ нм и $\lambda = 700$ нм) для центральной области и для полярных регионов Юпитера. По понятным причинам не всегда удается наблюдать наблюдения точно в оппозицию, а, например, для задачи исследования асимметрии поляризации в полярных областях Юпитера это может быть важным фактором, который влияет на поляризационные данные. Было показано, что в интервале углов фаз, по крайней мере, до 2° , значительных изменений линейной поляризации нет ни в полярных, ни в экваториальных областях, а значит, данные, полученные в этом диапазоне углов, могут быть использованы для задач исследования долгопериодических изменений поведения поляризации на Юпитере.

Глава 3. Исследование физических свойств полярного аэрозольного слоя на Юпитере. Цель третьего раздела – интерпретация наблюдательных данных, о которых шла речь в предыдущих главах.

Подраздел 3.1 посвящен рассмотрению вероятного механизма возникновения поляризации в полярных областях Юпитера при орбитальных углах фазы (угол “Солнце – Юпитер – Земля”), близких к нулю. Для того, чтоб при таких условиях возникла существенная поляризация. Необходимо наличие больших углов рассеяния, которые могут реализовываться, например, при многократном рассеянии в облаках. В действительности, наблюдается значительно больший рост поляризации по направлению к полюсам, чем к восточному и западному лимбам. Поэтому объяснить распределение поляризации по диску Юпитера только многократным рассеянием в облаках проблематично.

Допустим, что поляризация может возникать при однократном рассеянии. Для того, чтоб получить необходимые для формирования большой поляризации углы рассеяния, увеличивающиеся к полюсам, очевидно необходимо использовать другую конфигурацию “источник света – рассеиватель – наблюдатель”. Изменить местоположение приемника света (наблюдателя) и рассеивателя (наблюдаемые области атмосферы) мы не можем. Остается только возможность изменить положение источника света. Поскольку положение

Солнца также неизменно, необходимо найти другой источник света для рассеивателей. Альbedo тропосферных юпитерианских облаков достаточно большое, их можно считать источником света для слоев атмосферы, которые находятся выше. Принимая во внимание вышесказанное, можно предложить такую геометрию рассеяния: солнечный свет, отраженный от плотных облаков, рассеивается в верхних разреженных слоях атмосферы и потом регистрируется наблюдателем. Такая конфигурация позволяет получить большие углы рассеяния (в том числе близкие к 90 градусам на полюсах), что может дать существенную поляризацию при рассеянии, например, на аэрозольной стратосферной дымке.

Как уже говорилось, действительно, над плотной облачной атмосферой Юпитера находится слой аэрозольной дымки (приблизительно на уровне высот с давлением ~ 20 мбар) с большей его концентрацией в полярных областях. Наиболее вероятным кандидатом на роль вещества дымки в стратосфере Юпитера является бензол и полиароматические углеводороды, на присутствие которых указывают как наблюдения (характерные линии поглощения наблюдались еще КА “Вояджер”), так и физико-химическое моделирование (например, [23]). Может ли рассеяние на стратосферной аэрозольной дымке дать увеличение поляризации к полюсам при орбитальном угле фазы наблюдений, равном нулю? Для получения ответа на этот вопрос был проведен компьютерный эксперимент. Рассматривалась простая модель: на высоте h над облачным слоем Юпитера находится тонкий слой аэрозольной дымки, состоящий из сферических непоглощающих бензольных частиц. В таком случае регистрируемое наблюдателем излучение будет состоять из трех компонентов: $I = I_c + I_{c-h} + I_h$, где I – зарегистрированная интенсивность; I_c – интенсивность отраженного от облаков излучения; I_{c-h} – интенсивность рассеянного на аэрозолях света от облаков; I_h – интенсивность излучения, пришедшего от Солнца и рассеянного аэрозольным слоем непосредственно к наблюдателю. Первопричиной возникновения большой поляризации в полярных областях Юпитера может быть именно рассеяние на слое аэрозольной стратосферной дымки света от подстилающей поверхности (плотного облачного слоя).

Проведение компьютерного эксперимента показало, что предложенная модель возникновения поляризации в полярных областях Юпитера при нулевом орбитальном угле фазы выглядит довольно правдоподобно. Созданная программа позволяет рассчитать степень поляризации для любой точки Юпитера с заданными планетоцентрическими координатами. Результатом расчетов является распределение степени линейной поляризации по диску Юпитера для заданных областей. Полученные результаты в целом согласуются с наблюдательными фактами: 1) радиальная ориентация плоскости рассеяния; 2) увеличение степени поляризации к краю диска; 3) смена знака поляризации при увеличении длины волны; 4) полученная оценка среднего радиуса частиц

0.5 мкм не противоречит данным других исследователей. Однако абсолютная величина рассчитанной степени поляризации меньше, чем дают наблюдения, что можно объяснить не учетом всех возможных факторов в силу простоты и схематичности предложенной модели.

Таким образом, проведенный компьютерный эксперимент показал, что при построении более точной оптической модели, описывающей процессы рассеяния в атмосфере Юпитера, по крайней мере, нельзя пренебрегать вкладом аэрозольной дымки в формирование наблюдаемой поляризации в полярных областях.

В подразделе 3.2 рассматриваются причины возникновения сезонных вариаций поляризации на Юпитере. Рассматривая аэрозоль как возможную первопричину возникновения существенной поляризации в полярных областях Юпитера, логично предположить, что именно ее свойства и их изменения со временем могут влиять на изменения поляризационных свойств верхних слоев атмосферы Юпитера. Это могут быть изменения оптических параметров вещества дымки (например, распределение частиц по размерам) и/или вариации концентрации частиц дымки.

Что может привести к таким изменениям? Как известно, в отличие от Земли, Юпитер имеет маленький угол наклона оси вращения ($\sim 3^\circ$), но больший эксцентриситет орбиты (~ 0.05). Это вызывает 20-процентные вариации в величине потока солнечного излучения. Кроме того, перигелий и максимум склонения Солнца на Юпитере почти совпадают во времени. Это приводит, во-первых, к ощутимым сезонным вариациям в инсоляции и температуре, а во-вторых, – к их северо-южной асимметрии. Стратосферная дымка может быть физическим агентом, чувствительным к изменениям температуры. Вероятно, аэрозоль в дымке находится в нестабильном состоянии, и даже небольшое изменение физических условий может приводить к более интенсивному образованию или распаду частиц.

Обратная связь асимметрии поляризации и инсоляции, про которую рассказывалось в главе 2, может быть объяснена таким образом. Летом аэрозольный слой в стратосфере Юпитера существенно нагревается солнечным излучением. При этом уменьшается пересыщение паров вещества дымки, и происходит его испарение, или, по меньшей мере, замедление конденсации. Скорость v конденсации пара над плоской поверхностью, как известно, связана с температурой таким выражением [24]:

$$v = \frac{p - p_0(T)}{\rho} \sqrt{\frac{m}{2\pi kT}}, \quad (1)$$

где T – абсолютная температура, k – постоянная Больцмана; m и ρ — масса

молекул и плотность твердого вещества; p – давление пара в атмосфере; $p_0(T) = p_\infty \exp(-Q/kT)$ – давление насыщенного пара над плоской поверхностью, где Q – теплота испарения, p_∞ – давление насыщенного пара при $T = \infty$. Поскольку Q , как правило, значительно больше kT , то зависимость скорость конденсации от температуры определяется экспонентой, а не степенной функцией. Учет кривизны поверхности образующихся частиц увеличивает давление паров, необходимое для конденсации:

$$p_0(T) = p_\infty \exp\left(\frac{2\alpha_e m}{\rho kT r} - \frac{Q}{kT}\right), \quad (2)$$

где r – радиус частиц; α_e – энергия единицы поверхности (коэффициент поверхностного натяжения); для частиц в твердой фазе α_e близки к значениям в жидкой фазе вблизи температуры плавления.

При повышении температуры концентрация частиц в слое дымки будет значительно уменьшаться, что уменьшит рассеяние света на частицах, 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 отраженного Юпитером света. Несмотря на то, что температура в атмосфере Юпитера в течение сезона меняется плавно, в силу экспоненциальной зависимости (1), (2) в сезонном процессе образования стратосферного аэрозоля должно иметь место скачкообразное изменение концентрации частиц (при достижении необходимых условий происходит фазовый переход вещества аэрозоля), что согласуется с “пилообразным” характером зависимости параметра $P_N - P_S$ от L_S , который демонстрирует рис. 1.

Для проверки этого предположения было проведено исследование влияния температуры на процессы образования аэрозоля в условиях атмосферы Юпитера. Но сначала был рассмотрен самый простой случай образования частиц – гомогенное зарождение (процесс, протекающий без дополнительных центров конденсации), для того, чтоб понять, могут ли вообще в условиях стратосферы Юпитера образовываться аэрозоли, состоящие из бензольных структур. Условием равновесия зародыша со средой является равенство его размера так называемому критическому радиусу r_k . Когда размер зародыша превышает критический радиус, то происходит зародышеобразование. Гомогенное зарождение происходит когда радиусы критических зародышей близки к размерам молекул; при этом пересыщение ξ равно или больше единицы. Например, для нафталина ($\alpha_e = 30$ эрг/см³) при $T = 150$ К и $\xi = 10$ критический радиус $r_k = 6$ Å, то есть при таких пересыщениях в условиях

стратосферы Юпитера идет гомогенное зародышеобразование.

Используя концентрационные профили ПАУ для стратосферы Юпитера [23], были рассчитаны высотные профили пересыщений ПАУ для температур 120, 150 и 180 К (рис. 2).

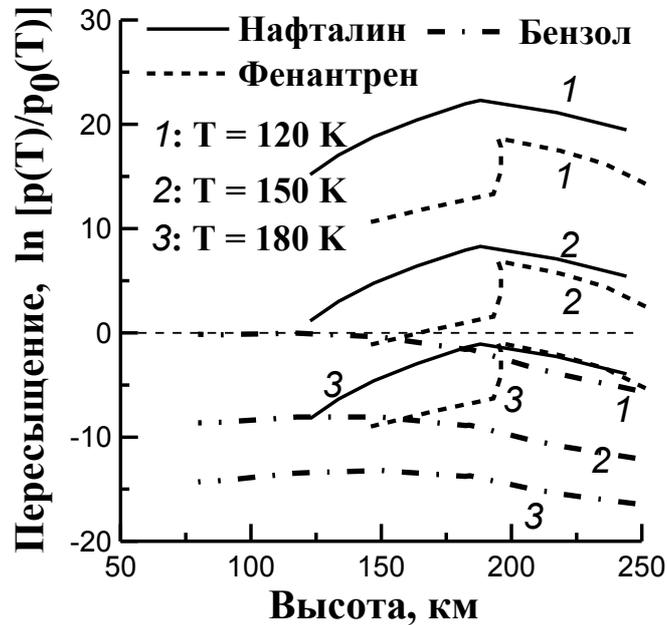


Рис. 2. Расчет высотных профилей пересыщений для полиароматических углеводородов (бензол, нафталин, фенантрен) при разных температурах

Как известно, средняя температура в стратосфере Юпитера на уровне с давлением около 20 мбар (на котором предположительно находится аэрозольная дымка) равна 150 К с амплитудой сезонных колебаний 30 К. Поскольку эта температура ниже температур тройных точек для нафталина (359 К) и бензола (278 К), они должны образовывать кристаллические зародыши непосредственно из газовой фазы. Этот факт указывает на то, что такие частицы должны скорее всего иметь несферическую форму, что важно для построения оптических моделей рассеяния света в атмосфере Юпитера.

Как видно из рис. 2, бензол не конденсируется никогда (пересыщение отрицательное, то есть имеет место недосыщение пара), а вероятность гомогенного зарождения нафталина и фенантрена при температурах 120 и 150 К очень велика. При температуре 180 К не конденсируются никакие из рассмотренных в работе ПАУ. Как видим, температура оказывает сильное влияние на конденсацию ПАУ в атмосфере Юпитера.

Таким образом, полярная аэрозольная дымка может состоять из твердых частиц ПАУ, в частности – из нафталина и фенантрена. Поскольку молекулы ПАУ могут конденсироваться на поверхности других ПАУ, то при понижении температуры сначала гомогенно образуются частицы наименее летучего вещества, а потом они могут становиться центрами для конденсации более

летучих веществ. Сезонные колебания температуры вероятно являются основным физическим фактором, приводящим к сезонным вариациям поляризации в полярных областях Юпитера: в результате сезонных изменений инсоляции происходят сезонные колебания температуры; это влияет на образование стратосферного аэрозоля, вследствие чего меняется концентрация частиц, а значит, и наблюдаемая на Юпитере поляризация.

В подразделе 3.3 рассмотрены нерегулярные процессы, которые могут иметь место во время проведения наблюдений и влиять на значение наблюдаемой поляризации. Такое влияние должно проявляться, например, в виде быстропротекающих изменений физических условий в атмосфере Юпитера. Поэтому было проведено изучение связи между данными о поляризации на Юпитере и основными величинами, описывающими солнечную активность: числами Вольфа, *Kp*-индексом, скоростью и плотностью частиц в солнечном ветре, данными о плотности потока рентгеновского излучения, интенсивностью солнечных космических лучей (протоны высоких энергий). Это исследование выявило возможную связь только с солнечными космическими лучами (СКЛ) – высокоэнергичными протонами с энергиями $E > 10$ МэВ. Возможно, именно влиянием этого фактора можно объяснить несколько завышенные результирующие значения степени линейной поляризации для южного полушария, полученные для 1998, 2000, 2001 гг., так как именно для этих дат наблюдений (с учетом задержки во времени) были зарегистрированы протонные вспышки. Это предположение подкрепляется тем, что согласно проведенным оценкам в стратосферу Юпитера до интересующих нас высот может проникать достаточно большое количество энергичных частиц.

Возможны различные механизмы влияния потока энергичных протонов на образование аэрозолей в атмосфере Юпитера. Во-первых, протоны высоких энергий, попадая в атмосферу, увеличивают концентрацию ионов, участвующих в химических реакциях, где образуется исходный материал (молекулы ПАУ) для дальнейшего формирования аэрозолей. В результате концентрация молекул ПАУ повышается, что способствует увеличению числа аэрозольных частиц. Во-вторых, образовавшиеся ионы могут служить дополнительными центрами конденсации частиц аэрозоля. И, наконец, химические реакции, стимулированные дополнительной ионизацией атмосферы, происходят с выделением или поглощением тепла, что может изменить температуру верхних слоев атмосферы (аналогичное явление наблюдается на высоких широтах в стратосфере Земли). Это может изменить концентрацию аэрозольных частиц на полюсах и, следовательно, привести к изменению значений поляризации полярных областей.

Из перечисленных механизмов лишь второй – зародышеобразование в газе в присутствии ионов – поддается строгому количественному анализу. Были

рассчитаны изменения термодинамического потенциала системы, содержащей частицу, зародившуюся на ионе. Как показали расчеты, дополнительная область устойчивости, необходимая для того, чтоб реализовывался процесс зародышеобразования, не появляется в диапазоне размеров частиц, который нас интересует (~ 1 мкм), а только при размерах зародышей, близких к атомным. При реальных значениях заряда (1–2 заряда электрона) область устойчивости появляется только при малых пересыщениях. Таким образом, механизм образования частиц аэрозоля на зарядах не эффективен. Однако, как было показано, образование частиц в атмосфере Юпитера может происходить гомогенно, и этого достаточно для возможности образования стратосферного аэрозоля на Юпитере. Солнечные космические лучи могут влиять на образование аэрозолей в атмосфере Юпитера, состоящих из ПАУ – и соответственно на значения асимметрии поляризации в полярных регионах – только путем непосредственного участия в серии химических реакций, приводящих к образованию первичного материала для дальнейшего формирования аэрозоля.

В **приложении А** приводится общая информация о программном комплексе “xIRIS Framework”, на базе которого диссертант разрабатывал программы для обработки наблюдательных данных.

В **приложении Б** описаны процедуры обработки данных фотополариметрических наблюдений Юпитера, которые были разработаны автором для решения поставленных в диссертации задач.

ВЫВОДЫ

В диссертационной работе проведено исследование физических условий в верхних слоях атмосферы Юпитера и рассмотрены свойства стратосферного аэрозоля в полярных областях планеты по данным фотополариметрических наблюдений. Основные результаты диссертационной работы:

1. Проведены фотополариметрические наблюдения Юпитера в двух спектральных полосах: синей ($\lambda_{\text{eff}} = 456.4$ нм, $\Delta\lambda = 107.5$ нм) и красной ($\lambda_{\text{eff}} = 668.7$ нм, $\Delta\lambda = 116.5$ нм) в оппозиции 2001, 2003, 2004, 2007 гг. По результатам обработки наблюдательных данных 1998–2007 гг. получено 223 серии цифровых фотополариметрических изображений диска Юпитера для синей области спектра и 116 серий для красной при углах фазы 0.2° – 3.1° . На их основе построено 339 карт распределения параметров Стокса Q и U , интенсивности I и степени линейной поляризации P по диску Юпитера.

2. Получено 6 новых значений параметра асимметрии линейной поляризации $P_N - P_S$, характеризующих изменения поляризации в полярных областях Юпитера на протяжении более половины юпитерианского года:

$-0.85 \% \pm 0.06 \%$ (2000 г.), $-1.15 \% \pm 0.04 \%$ (2001 г.), $1.04 \% \pm 0.1 \%$ (2003 г.), $0.89 \% \pm 0.04 \%$ (2004 г.), $0.74 \% \pm 0.1 \%$ (2006 г.), $-0.3 \% \pm 1.1 \%$ (2007 г.). Использование этих данных и данных других исследователей увеличило объем материала для исследования долгопериодических вариаций поляризации Юпитера почти в два раза. Созданная база данных, описывающая поведение линейной поляризации в полярных областях Юпитера на протяжении 48 лет, не имеет аналогов в мире. Основываясь на этих данных впервые выявлена обратная связь параметра $P_N - P_S$ с инсоляцией, что свидетельствует о сезонном характере изменений поляризации.

3. Предложено объяснение возникновения большой линейной поляризации в полярных областях Юпитера при нулевом угле фазы. Проведенный компьютерный эксперимент показал, что значительный вклад в поляризацию может давать рассеянный на слое аэрозольной стратосферной дымки свет от подстилающей поверхности (облаков).

4. При помощи модельных расчетов процессов гомогенного зародышеобразования было показано, что сезонные колебания температуры в стратосфере Юпитера являются определяющим фактором в процессах формирования полярной аэрозольной дымки, которая вероятно состоит из твердых частиц ПАУ (нафталин, фенантрен). Это объясняет сезонность изменений поляризации в полярных областях Юпитера.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Специализированные научные профильные издания:

1. *Goryunova O. S.* On a mechanism of polarization origin at the polar regions of Jupiter / O. S. Goryunova, V. V. Korokhin, L. A. Akimov, E. V. Shalygin, Yu. I. Velikodsky // Kinematics and Physics of Celestial Bodies. Suppl. Ser. – 2005. – Vol. 5. – P. 443–447.

2. *Шалыгина О. С.* Причины сезонных вариаций асимметрии “север-юг” поляризации Юпитера / О. С. Шалыгина, В. В. Корохин, Л. В. Старухина, Е. В. Шалыгин, Г. П. Марченко, Ю. И. Великодский, О. М. Стародубцева, Л. А. Акимов // Астрономический вестник. – 2008. – Т. 42, № 1. – С. 10–19.

3. *Шалыгина О. С.* Фотополариметрические наблюдения полярных областей Юпитера / О. С. Шалыгина, В. В. Корохин, Е. В. Шалыгин, Ю. И. Великодский // Кинематика и физика небесных тел. – 2008. – Т. 24, № 4. – С. 278–290.

Дополнительные публикации в научных изданиях:

4. Корохин В. В. Поляриметрия полярных областей Юпитера / В. В. Корохин, *О. С. Шалыгина* // 200 лет астрономии в Харьковском университете : [научное издание / науч. ред. проф. Ю. Г. Шкуратов]. – Х. : ХНУ, 2008. – Раздел 2.4. – С. 244–250.

5. *Shalygina O. S.* Jupiter's atmosphere / O. S. Shalygina, V. V. Korokhin, E. V. Shalygin, G. P. Marchenko, Yu. I. Velikodsky, L. V. Starukhina, O. M. Starodubtseva, L. A. Akimov // Institute of astronomy of Kharkiv V. N. Karazin national university [сб. науч. работ / ed. Prof. Yu. G. Shkuratov]. – X. : ХНУ, 2008. – P. 20–21.

Материалы и тезисы конференций:

6. *Goryunova O. S.* Seasonal Variations of Jupiter Polar Haze Polarization / O. S. Goryunova, L. A. Akimov, V. V. Korokhin, O. M. Starodubtseva, E. V. Shalygin and Yu. I. Velikodsky // Abstracts International Workshop “Photometry and Polarimetry of Asteroids: Impact Collaboration”, Kharkiv (Ukraine), 15–18 June 2003. – P. 11–12.

7. *Goryunova O. S.* Seasonal Variations in the North-South Asymmetry of Polarized Light of Jupiter / O. S. Goryunova, L. A. Akimov, V. V. Korokhin, O. M. Starodubtseva, E. V. Shalygin and Yu. I. Velikodsky // Abstracts NATO ASI on Photopolarimetry in Remote Sensing, Yalta, Kiev (Ukraine), 20 September – 4 October 2003. – P. 38.

8. *Горюнова О. С.* О механизме возникновения поляризации в полярных областях Юпитера / О. С. Горюнова, В. В. Корохин, Л. А. Акимов, Е. В. Шалыгин, Ю. И. Великодский // Тезисы докладов на международной конференции “Астрономическая школа молодых ученых. Актуальные проблемы астрономии и космонавтики”, Белая Церковь (Украина), 19–24 мая 2004. – С. 14–15.

9. *Горюнова О. С.* Механизм возникновения поляризации в полярных областях стратосферы Юпитера при нулевых углах фазы / О. С. Горюнова, В. В. Корохин, Л. А. Акимов, Е. В. Шалыгин, Ю. И. Великодский // Тезисы докладов на международной конференции “Каразинские чтения”, Харьков (Украина), 15–17 мая 2004. – С. 83.

10. *Goryunova O. S.* About polarization origin at the polar regions of Jupiter / O. S. Goryunova, V. V. Korokhin, L. A. Akimov., E. V. Shalygin, and Yu. I. Velikodsky // Abstracts International conference “Astronomy in Ukraine – Past, Present and Future”, Kiev (Ukraine), 2004. – P. 180.

11. *Goryunova O. S.* New Data of Photopolarimetric CCD-Observations of Seasonal Variations of the North-South Asymmetry of Linear Polarization Degree of the Light Reflected by Jupiter / O. S. Goryunova, V. V. Korokhin, L. A. Akimov, E. V. Shalygin, and Yu. I. Velikodsky // Lunar Planet. Sci. Conf. 35th. – 2004. – LPI Houston (USA). – Abstract № 1325 (CD-ROM).

12. *Shalygina O. S.* Causes of observed long-periodic variations of the polarization at polar regions of Jupiter / O. S. Shalygina, V. V. Korokhin, L. A. Akimov, O. M. Starodubtseva, G. P. Marchenko, E. V. Shalygin and Yu. I. Velikodsky // Abstracts of the 13th Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics, Kyiv (Ukraine), 25–29 April 2006. – P. 109.

13. **Shalygina O. S.** Causes of observed long-period variations of the polarization at polar regions of Jupiter / O. S. Shalygina, V. V. Korokhin, L. A. Akimov, O. M. Starodubtseva, G. P. Marchenko, E. V. Shalygin, and Yu. I. Velikodsky // Lunar Planet. Sci. Conf. 37th. – 2006. – LPI Houston (USA). – Abstract № 1599 (CD-ROM).

14. **Shalygina O.** Causes of observed long-periodic variations of the polarization at polar regions of Jupiter / O. Shalygina, V. Korokhin, L. Starukhina, E. Shalygin, G. Marchenko, Yu. Velikodsky, L. Akimov, O. Starodubtseva // Abstracts International Congress “European Planetary Science Congress 2006”, Berlin (Germany), 25–29 September 2006. – Abstract ID: EPSC2006-A-00327 (CD-ROM).

15. **Shalygina O. S.** Polar aerosol haze in Jupiter's stratosphere / O. S. Shalygina, L. V. Starukhina, G. P. Marchenko, V. V. Korokhin // Lunar Planet. Sci. Conf. 38th. – 2007. – LPI Houston (USA). – Abstract № 1441 (CD-ROM).

16. **Shalygina O. S.** Causes of Observed Long-Periodic Variations of the Polarization at Polar Regions of Jupiter / O. S. Shalygina, V. V. Korokhin, E. V. Shalygin, G. P. Marchenko, Yu. I. Velikodsky, L. A. Akimov, O. M. Starodubtseva // Proceedings of the 13th Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics, Kyiv (Ukraine), 25–29 April 2006. Режим доступу <http://arxiv.org/abs/astro-ph/0607187>.

17. **Shalygina O. S.** Jupiter's stratosphere: polar aerosol haze / O. S. Shalygina, L. V. Starukhina, G. P. Marchenko, V. V. Korokhin // Abstracts of the 14th Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics, Kyiv (Ukraine), 23–28 April 2007. – P. 42.

18. **Shalygina O. S.** Studying the Physical Conditions in Jupiter's Stratosphere and Polar Aerosol Haze Formation / O. S. Shalygina, V. V. Korokhin, L. V. Starukhina, E. V. Shalygin, G. P. Marchenko, Yu. I. Velikodsky, O. M. Starodubtseva and L. A. Akimov // Proceedings of 10th Conference on Electromagnetic and Light Scattering by Nonspherical Particles (ELS-10), Bodrum (Turkey), 17–22 June 2007. – P. 201–204.

19. **Shalygina O. S.** Researching the physical conditions in Jupiter atmosphere using remote sensing methods / O. S. Shalygina, V. V. Korokhin, L. A. Akimov, O. M. Starodubtseva, L. V. Starukhina, G. P. Marchenko, E. V. Shalygin, Yu. I. Velikodsky // The 46th Vernadsky–Brown Microsymposium on Comparative Planetology, Moscow (Russia), 1–3 November 2007. – Abstract №46 (CD-ROM).

20. **Shalygina O. S.** Polarimetric observations of Jupiter's polar regions / O. S. Shalygina, S. V. Zaitsev, V. V. Korokhin, N. N. Kiselev, E. V. Shalygin, Yu. I. Velikodsky // Abstracts International Conference “The Solar system bodies: from optics to geology”, Kharkiv (Ukraine), 24–26 May 2008. – P. 106–107.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

21. Smith P. H. 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 / P. H. Smith, M. G. Tomasko // *Icarus*. – 1984. – Vol. 58. – P. 35–73.
22. Starodubtseva O. M. Seasonal variation of the North-South asymmetry of polarized light of Jupiter / O. M. Starodubtseva, L. A. Akimov, V. V. Korokhin // *Icarus*. – 2002. – Vol. 157, № 2. – P. 419–425.
23. Friedson A. James Models for Polar Haze Formation in Jupiter's Stratosphere / James A. Friedson, Ah-San Wong, Yuk L. Yung // *Icarus*. – 2002. – Vol. 158, № 2. – P. 389–400.
24. Чернов А. А. Образование кристаллов / Современная кристаллография [научное издание / ред. А. А. Чернов и др.]. – М. : Наука, 1980. – Т. 3.

ABSTRACT

Shalygina O. S. Properties of stratospheric aerosol in polar regions of Jupiter on the base of photopolarimetric observations. – Manuscript.

Thesis for PhD degree by the specialty 01.03.03 – Heliophysics and physics of Solar System. – The Main Astronomical Observatory of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2009.

In the dissertation physical conditions in the upper atmosphere of Jupiter and properties of aerosol in the polar areas of the planet were studied. The work is based on the data of ground-based photopolarimetric observations of Jupiter and on the elements of theory of forming of aerosols. Polarimetric database created by the author on the base of own observations and the data of other researchers, was analysed in the work. This database describes behaviour of Jupiter's polarization during 48 years and it has not the analogues in the world. On the basis of this information, inverse dependence of the parameter of asymmetry of linear polarization on insolation was found: polarization is higher in colder hemisphere, which is ascribed to increasing concentration of aerosol haze. Explanation of the origin of considerable linear polarization in the polar areas of Jupiter at zero phase angle has been proposed. Light from underlying surface (clouds) scattered by the layer of stratosphere aerosol haze is shown to give considerable contribution in the polarization. Seasonal fluctuations of temperature in the stratosphere of Jupiter are shown to control formation the polar aerosol haze that consists most probably of solid particles of polycyclic aromatic hydrocarbons (naphthalene, phenanthrene). This can explain the seasonal changes of polarization in the polar areas of Jupiter. The possibility of influence of solar cosmic rays (high-energy particles) on formation of polar haze on Jupiter is pointed out.

Key words: Jupiter, polarimetry, atmosphere, stratosphere, polar areas, aerosol.

АННОТАЦИЯ

Шалыгина О. С. Свойства стратосферного аэрозоля в полярных областях Юпитера по данным фотополариметрических наблюдений. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.03 – Гелиофизика и физика Солнечной системы. – Главная астрономическая обсерватория НАН Украины, Киев, 2009.

Диссертация посвящена исследованию физических условий в верхних слоях атмосферы Юпитера и свойств аэрозоля в полярных областях планеты. Работа базируется на данных наземных фотополариметрических наблюдений Юпитера с использованием элементов теории формирования аэрозолей.

На протяжении четырех оппозиций (2001, 2003, 2004, 2007 гг.) были проведены фотополариметрические наблюдения Юпитера в синем и красном участках спектра. Эти наблюдения продолжают наблюдательную программу, которая была начата в НИИ астрономии ХНУ им. В.Н. Каразина в 1981 г. и главной задачей которой является исследование поведения линейной поляризации на Юпитере во времени, в частности ее северо-южной асимметрии в полярных областях планеты. В результате обработки наблюдательных данных 1998–2007 гг. получено 223 серии цифровых фотополариметрических изображений диска Юпитера для синей области спектра и 116 серий для красной при углах фазы 0.2° – 3.1° . На их основе построено 339 карт распределения параметров Стокса Q и U , интенсивности I и степени линейной поляризации P по диску Юпитера. Созданная на основе собственных полариметрических наблюдений и данных других исследователей база данных, описывающая поведение поляризации в полярных областях Юпитера на протяжении 48 лет, не имеет аналогов в мире. На основе этих данных впервые обнаружена обратная связь параметра асимметрии линейной поляризации с инсоляцией, что указывает на сезонный характер изменений поляризации.

Известно, что на Юпитере наблюдается широтный рост степени линейной поляризации P , которая даже при углах фазы, близких к нулю, достигает значений $P = 7$ – 8% в полярных областях в синей области спектра, тогда как на экваторе поляризация остается практически равной нулю. В диссертации предложено объяснение возникновения существенной линейной поляризации в полярных областях Юпитера при углах фазы, близких к нулю, и ее меридионального хода. Показано, что значительный вклад в поляризацию может давать рассеянный на слое аэрозольной стратосферной дымки свет от подстилающей поверхности (облаков).

Показано, что полярная аэрозольная дымка может состоять из твердых частиц полиароматических углеводородов (наиболее вероятного вещества аэрозоля), в частности из нафталина и фенантрена. Показано, что сезонные колебания температуры в стратосфере Юпитера являются определяющим

фактором в процессах формирования полярной аэрозольной дымки, состоящей из бензольных молекул, что может объяснять сезонные изменения поляризации в полярных областях Юпитера: в результате сезонных изменений инсоляции возникают сезонные колебания температуры; это влияет на образование стратосферного аэрозоля, вследствие чего меняется концентрация аэрозолей в дымке, а следовательно, и наблюдаемая поляризация на Юпитере.

В работе рассматривается влияние нерегулярных факторов, таких как солнечная активность, на значение наблюдаемой поляризации. Отмечается возможность влияния солнечных космических лучей на формирование полярной дымки на Юпитере путем непосредственного участия в серии химических реакций, которые приводят к образованию первичного материала для дальнейшего формирования стратосферного аэрозоля.

Ключевые слова: Юпитер, поляриметрия, атмосфера, стратосфера, полярные области, аэрозоль.