

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ГОЛОВНА АСТРОНОМІЧНА ОБСЕРВАТОРІЯ

Шалигіна Оксана Сергіївна

УДК 523.45-852:520.85

**ВЛАСТИВОСТІ СТРАТОСФЕРНОГО АЕРОЗОЛЮ
У ПОЛЯРНИХ ОБЛАСТЯХ ЮПТЕРА ЗА ДАНИМИ
ФОТОПОЛЯРИМЕТРИЧНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ**

01.03.03 – Геліофізика і фізика Сонячної системи

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Київ – 2009

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в НДІ астрономії Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: кандидат фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник
Корохін Віктор Валентинович,
НДІ астрономії Харківського національного
університету імені В. Н. Каразіна МОН України,
завідувач відділу фізики Сонця та планет.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник
Відьмаченко Анатолій Петрович,
Головна астрономічна обсерваторія НАН України,
завідувач відділу фізики тіл Сонячної системи;

доктор фізико-математичних наук, професор
Кручиненко Віталій Григорович,
Астрономічна обсерваторія Київського національного
університету імені Тараса Шевченка.

Захист відбудеться 24 квітня 2009 р. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.208.01 при Головній астрономічній обсерваторії Національної академії наук України за адресою: ГАО НАН України, вул. Академіка Заболотного, 27, 03680 МСП, м. Київ.

Початок засідань о 10 годині.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці ГАО НАН України за адресою: ГАО НАН України, вул. Академіка Заболотного, 27, 03680 МСП, м. Київ.

Автореферат розісланий “21” березня 2009 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
кандидат фізико-математичних наук

І. Е. Васильєва

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Вивчення фізичних умов у верхніх шарах атмосфери Юпітера має важливе значення для фундаментальних і прикладних досліджень Сонячної системи, зокрема, для розуміння процесів утворення аерозольних складових в атмосферах планет, а також для розробки методів дистанційного зондування.

На цей час є небагато робіт, що присвячені дослідженню полярних регіонів Юпітера. У більшості сучасних робіт об'єктом дослідження є насамперед екваторіальні області, а рідкі дослідження полярних областей носять, як правило, суцільно теоретичний характер.

Саме наземні спостереження Юпітера є основним джерелом інформації про планету. Спостереження із космосу мають безсумнівні переваги, але вони носять епізодичний характер, тоді як наземні спостереження можна проводити роками. Атмосфера Юпітера має видиму стабільність, головні компоненти її речовини залишаються практично постійними просторово та мають тільки дуже невеликі часові варіації в глобальному масштабі. Але фізико-хімічні явища (конденсація, хімічні реакції) можуть привести до просторових (вертикальних і горизонтальних) та часових варіацій більш дрібного масштабу.

Проведений у дисертації аналіз унікального за часовим проміжком ряду поляриметричних даних, що були отримані протягом більш ніж двох обертів Юпітера навколо Сонця, дав змогу виявити сезонні зміни стану аерозольної складової стратосфери планети, а також вказати на можливі причини їх виникнення. Такі дані важливі не тільки для розвитку досліджень фізичних властивостей атмосфери Юпітера, але й для розвитку порівняльної планетології.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Представлені в дисертації дослідження виконувалися згідно з планами таких наукових тем відділу фізики Сонця, Місяця та планет НДІ астрономії ХНУ ім. В. Н. Каразіна:

- 8-12-01 “Дослідження фізичних умов на поверхнях та в атмосферах планет” (№ держ. реєстрації 0199U004411).
- 8-12-04 “Астрофізичні дослідження поверхонь та атмосфер планет за даними фотометрії та поляриметрії” (№ держ. реєстрації 0104U000665).
- 8-12-07 “Астрофізичні дослідження та моніторинг Сонця, Юпітера і Місяця за даними наземних та космічних спостережень” (№ держ. реєстрації 0107U000674).

Здобувачка брала участь у виконанні цих досліджень протягом навчання в аспірантурі та роботи у НДІ астрономії ХНУ ім. В. Н. Каразіна в якості лаборанта, інженера та молодшого наукового співробітника.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є дослідження фізичних умов

у верхніх шарах атмосфери Юпітера та властивостей аерозоліу у полярних областях планети. Робота базується на даних наземних фотополариметричних спостережень Юпітера і на використанні теорії формування аерозолів. Досягнення мети в дисертації здійснювалося через низку таких дослідницьких завдань:

- продовжити ряд фотополариметричних спостережень Юпітера, які проводились у НДІ астрономії ХНУ ім. В. Н. Каразіна у 1981–2000 рр.;
- розробити алгоритми та програмні засоби для обробки та аналізу даних нових фотополариметричних ПЗЗ спостережень Юпітера;
- провести обробку та аналіз даних різних років спостережень;
- розглянути можливі механізми виникнення лінійної поляризації в полярних регіонах Юпітера при кутах фази, що близькі до нуля;
- дослідити причини довгоперіодичних змін асиметрії лінійної поляризації у полярних регіонах Юпітера;
- розглянути фізико-хімічні процеси утворення полярного стратосферного аерозольного шару в полярних областях Юпітера.

Об'єкт дослідження – полярні області стратосфери Юпітера, аерозольний стратосферний серпанок.

Предмет дослідження – фізичні умови у стратосфері Юпітера, фізичні та хімічні властивості аерозольного серпанку, які пов'язані з формуванням лінійної поляризації, що спостерігається.

Методи дослідження базуються на фотополариметричних спостереженнях, теоретичному та комп'ютерному моделюванні фізичних процесів формування полярного аерозоліу та розсіяння світла на його частинках.

Наукова новизна одержаних результатів розкривається в таких положеннях:

1. Протягом чотирьох опозицій (2001, 2003, 2004, 2007 рр.) проведено фотополариметричні спостереження Юпітера, які продовжують спостережну програму, що була розпочата у НДІ астрономії ХНУ в 1981 р. За результатами обробки спостережних даних 1998–2007 рр. отримано нові дані про характер асиметрії лінійної поляризації в полярних областях Юпітера.

2. Дістало значний подальший розвиток дослідження довгоперіодичних варіацій поляризації Юпітера. Залучення нових даних, отриманих при особистій участі автора, і даних інших спостерігачів збільшило обсяг матеріалу, що аналізується, майже у два рази. Аналогів цієї бази даних, що описує поведінку поляризації в полярних областях Юпітера протягом 48 років, у світі немає. На основі цих даних уперше виявлено зворотний зв'язок параметра асиметрії лінійної поляризації з інсоляцією, що свідчить про сезонний характер змін поляризації.

3. Уперше запропоновано пояснення виникнення значної лінійної

поляризації в полярних областях Юпітера при кутах фази, близьких до нуля, та її меридіонального ходу. Показано, що значний внесок у поляризацію може давати розсіяне на шарі аерозольного стратосферного серпанку світло від поверхні, яка підстилає (хмар).

4. Уперше показано, що сезонні коливання температури у стратосфері Юпітера є визначальним чинником у процесах формування полярного аерозольного серпанку, який складається з поліароматичних вуглеводнів (ПАВ) – найбільш імовірної речовини аерозолі, що може пояснити сезонні зміни поляризації в полярних областях Юпітера. Уперше відзначена можливість впливу сонячних космічних променів на формування полярного серпанку на Юпітері.

Практичне значення одержаних результатів. Дані фотометрії та поляриметрії Юпітера, які отримані автором за допомогою ПЗЗ-матриці у двох спектральних ділянках ($\lambda_{\text{eff}} = 456$ нм та $\lambda_{\text{eff}} = 669$ нм) при кутах фази $0.2\text{--}3.1^\circ$, представлені в стандартному астрономічному форматі FITS і можуть використовуватись для перевірки моделей та теорій розсіяння світла в атмосфері Юпітера та інших планет.

Розроблене програмне забезпечення для обробки даних ПЗЗ-спостережень Юпітера може бути використане для обробки будь-яких зображень протяжних об'єктів. Розроблений алгоритм побудови карт Юпітера в циліндричній проекції з урахуванням диференційного обертання планети може використовуватись для дослідження тонкої структури утворень в атмосфері Юпітера та інших планет і їхньої еволюції в часі.

Дослідження фізичних властивостей атмосфери Юпітера важливі для розвитку порівняльної планетології. Зокрема, дані, які отримані в дисертаційній роботі, можуть бути використані фахівцями із земної атмосфери.

Особистий внесок здобувача. Основні результати дисертації викладені в роботах [1–4]. Зокрема, автору належить наступне.

У роботі [1], яка присвячена розгляду механізму формування поляризації в полярних областях Юпітера при нульовому куті фази, автором розроблено комп'ютерну програму, що моделює цей механізм, та проведено всі розрахунки.

У роботі [2] здобувачка самостійно провела обробку фотополариметричних даних 2000–2004 рр. Автором отримані нові дані про асиметрію лінійної поляризації в полярних областях Юпітера (чотири нових значень параметра, що характеризує північно-південну асиметрію поляризації). Автором проведена переобробка старих даних (1981–1998 рр.) з використанням розроблених досконаліших методів та комп'ютерних програм обробки спостережень. На основі нових даних та даних інших дослідників автором отримано новий вид сезонних змін асиметрії лінійної поляризації у полярних регіонах Юпітера. Здобувачка брала активну участь у розробці та перевірці фізичного механізму, що пояснює виникнення сезонних варіацій поляризації на

Юпітері. Автором проведена значна частина розрахунків висотних профілів пересичень для аерозолів полярного серпанку на Юпітері та проведено дослідження процесів утворення аерозолів у стратосфері Юпітера в присутності іонів. Автором проведено дослідження впливу сонячної активності на формування поляризації, що спостерігається.

У роботі [3] розглядаються особливості застосування ПЗЗ-матриць для фотополариметричних спостережень планет та інших протяжних об'єктів. Описано алгоритм обробки фотополариметричних спостережень Юпітера, на основі якого розроблено програми, що використовувалися здобувачкою. Автором самостійно проведено обробку даних полариметричних спостережень Юпітера 2006 та 2007 рр. і отримано нові значення північно-південної асиметрії лінійної поляризації.

У роботі [4] представлено підготовлений автором дисертації детальний огляд спостережних даних, що стали основою експериментального матеріалу, на якому базується дисертаційна робота.

Спостережний матеріал 2001–2007 рр. був отриманий здобувачкою разом із В. В. Корохіним, Ю. І. Великодським і Є. В. Шалигіним.

Апробація результатів дисертації. Результати, одержані здобувачкою, пройшли достатню наукову апробацію. Матеріали дисертації доповідалися та обговорювалися на таких конференціях, симпозіумах, семінарах:

– на міжнародній робочій групі “Photometry and Polarimetry of Asteroids: Impact on Collaboration” (Харків, Україна, 2003 р.);

– на робочій групі “Remote Sensing Techniques and Instrumentation: International Cooperation” міжнародної конференції “NATO ASI on polarimetry in remote sensing” (Київ, Україна, 2003 р.);

– на міжнародній науковій конференції “Астрономічна школа молодих вчених. Актуальні проблеми астрономії і космонавтики” (Біла Церква, Україна, 2004 р.);

– на конференції “Astronomy in Ukraine – Past, Present and Future”, присвяченій 60-річчю ГАО НАН України (Київ, Україна, 2004 р.);

– на Каразінських читаннях (Харків, Україна, 2004 р.);

– на науковій конференції “Фізика небесних тіл”, присвяченій 60-річчю з дня створення Кримської астрофізичної обсерваторії (сmt Наукове, Крим, 2005 р.);

– на міжнародній астрономічній школі молодих вчених “13th Open Young Scientists’ Conference on Astronomy and Space Physics” (Київ, Україна, 2006 р.);

– на міжнародних наукових конференціях “Lunar Planetary Scientific Conference” XXXV, XXXVII, XXXVIII (Х’юстон, США, 2004, 2006, 2007 рр.);

– на міжнародній конференції “European Planetary Science Congress 2006” (Берлін, Німеччина, 2006 р.);

- на 10-й міжнародній конференції про електромагнетизм та розсіяння світла “ELS-X”(Бодрум, Турція, 2007 р.);
- на 46-му мікросимпозіумі Вернадського – Брауна з порівняльної планетології (Москва, Росія, 2007 р.);
- на міжнародній конференції “The Solar System Bodies: From Optics to Geology” (Харків, Україна, 2008 р.);
- на науковому семінарі Радіоастрономічного інституту НАН України (Харків, Україна, 2006 р.);
- семінари відділу фізики тіл Сонячної системи Головної астрономічної обсерваторії НАН України (Київ, Україна, 2007 р.);
- астрономічних семінарах НДІ астрономії та кафедри астрономії ХНУ ім. В. Н. Каразіна (Харків, Україна, 2003–2008 рр.).

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 5 статей, у тому числі: 3 статті у спеціалізованих наукових фахових виданнях [1–3], розділ у колективній монографії [4], стаття у збірнику [5] та 15 робіт у збірниках тез конференцій [6–20].

Структура дисертації. Дисертація складається зі вступу, 3 розділів (що включають 12 підрозділів), 48 рисунків та 7 таблиць у тексті, висновків, 2 додатків і списку використаних джерел, що містить 130 найменувань. Повний обсяг роботи – 152 сторінки.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

У **вступі** обґрунтовується вибір і актуальність теми дисертаційної роботи, визначається стан наукової розробки теми, формулюються мета та основні завдання дослідження, методи та теоретичні основи їх вирішення, розкривається наукова новизна положень, які виносяться на захист, визначається теоретичне та практичне значення результатів проведеного дослідження.

Розділ 1. Оптичні властивості верхніх шарів атмосфери Юпітера. Перший розділ присвячено огляду літератури за темою дисертації. Головна увага приділена таким проблемам.

Оскільки роботу присвячено дослідженню фізичних умов у стратосфері Юпітера, спочатку розглядаються основні методи оптичних досліджень атмосфер планет. Ефективними, а часто єдиними методами дослідження атмосфер планет-гігантів є методи оптичного дистанційного зондування. Як відомо, при розсіянні у планетній атмосфері світло поляризується. Саме аналізу поляризаційних даних присвячено дисертаційну роботу. Той факт, що одним з основних механізмів виникнення поляризації є розсіяння випромінювання на електронах, атомах, молекулах і аерозолях, дозволяє використовувати поляриметричні спостереження для дослідження планетних атмосфер.

У розділі розповідається про морфологію та вертикальну структуру атмосфери Юпітера, які відомі за даними дистанційного зондування. Наведено основні результати космічних місій, які досліджували атмосферу Юпітера. Особливу увагу приділено полярним областям планети. За результатами спостережень Юпітера в різних ділянках спектра полярні області виділяються як потемніння, або як області з посиленою яскравістю. Вказано на те, що основою видимої атмосфери Юпітера є шар із хмар, а над щільними шарами атмосфери знаходиться відносно розріджена стратосфера та стратосферний аерозольний серпанок з більшою його концентрацією в полярних областях (наприклад, [21]).

У першому розділі подано огляд відомих спостережних фактів стосовно поляриметричних властивостей атмосфери Юпітера. Наведемо основні:

1. Площина поляризації в заданій точці диска Юпітера орієнтована відносно радіального напрямку (направлена за радіусом або перпендикулярно йому), що прийнято приписувати механізму багатократного розсіяння світла.

2. У центральній частині диска Юпітера поляризація низька (значення біля нуля) і практично не змінюється уздовж центрального меридіана (до планетоцентричних широт $\pm 45^\circ$). Зі збільшенням кута фази до максимально доступних для наземних спостережень значень ($\sim 12^\circ$) ступінь поляризації центра диска планети трохи збільшується.

3. Поляриметричні спостереження Юпітера вказують на зростання ступеня лінійної поляризації за напрямом до полярного лімба до значень $P = 7-8\%$ (за модулем) у синій частині спектра навіть при нульових кутах фази (наприклад, [22]). Космічні дані підтверджують такий хід поляризації.

4. Спостерігається північно-південна асиметрія ступеня лінійної поляризації (наприклад, [22]). Під асиметрією мається на увазі різниця значень ступеня лінійної поляризації для північних і південних високих широт. Як відомо, північно-південна асиметрія Юпітера виявляється практично у всьому. Вона добре помітна на численних зображеннях цієї планети, отриманих як наземними, так і космічними засобами. Наприклад, є суттєва відмінність у структурі зон та смуг для півкуль Юпітера. Поляризація не є виключенням.

5. Спостерігається сильна спектральна залежність поляризації на Юпітері: із зростанням довжини хвилі ступінь поляризації в полярних регіонах зменшується, і в інфрачервоних променях поляризація змінює знак (з перетином нульового значення поблизу $\lambda = 750$ нм).

На основі даних, отриманих за результатами багаторічних поляриметричних спостережень, які проводяться співробітниками НДІ астрономії ХНУ з 1981 р., були виявлені довгоперіодичні варіації асиметрії ступеня лінійної поляризації [22]. Авторами роботи [22] були запропоновані гіпотези про вплив сезонних змін інсоляції та магнітного поля Юпітера на формування асиметрії поляризації в полярних регіонах Юпітера та її сезонні й

довготні варіації. Подальший прогрес досліджень у цьому напрямку був неможливий без розробки оптичних і фізичних моделей, які повинні дати пояснення виникненню значної лінійної поляризації при нульових орбітальних кутах фази, її північно-південної асиметрії та довгоперіодичних варіацій поляризації. Продовженню цієї роботи та поясненню наведених вище спостережних фактів і присвячено дисертацію.

Оригінальні результати подано в розділах 2–3.

Розділ 2. Результати фотополариметричних спостережень Юпітера. Апаратура та алгоритми обробки даних. Для вирішення поставлених у роботі задач протягом чотирьох опозицій були проведені фотополариметричні спостереження Юпітера з ПЗЗ камерою OS-65D Mintron на 20-см рефракторі Цейса (2001, 2003, 2004 рр.) та на 70-см рефлекторі АЗТ-8 (2007 р.) у двох спектральних смугах: синій ($\lambda_{\text{eff}} = 456$ нм, $\Delta\lambda = 107.5$ нм) та червоній ($\lambda_{\text{eff}} = 669$ нм, $\Delta\lambda = 116.5$ нм). Ці спостереження продовжують спостережну програму, яка була розпочата в 1981 р. у НДІ астрономії Харківського національного університету ім. В. Н. Каразіна з метою дослідження поведінки ступеня лінійної поляризації на Юпітері у часі, зокрема його північно-південної асиметрії у полярних областях планети.

Камера OS-65D використовує ПЗЗ-матрицю формату 752 на 582 елементи (розмір світлочутливої секції 4.9 мм на 3.7 мм), яка має добрі технічні показники: високу чутливість, відсутність “сліпих” та “гарячих” пікселів, низький рівень шумів навіть без охолодження, нерівномірність чутливості по полю не більше 1 %. У якості аналізатора лінійної поляризації використовувався поляризаційний фільтр ПФ-40.5, який обертається кроковим двигуном на заданий кут за командою з персонального комп’ютера. Особливістю полариметричних спостережень планет є необхідність використання зображень, отриманих при різних положеннях аналізатора з мінімальними часовими інтервалами. Для цього зміна положень аналізатора відбувається в кроковому режимі в такий спосіб: кадр – потім поворот аналізатора на 45° – знову кадр – знову поворот аналізатора на 45° і так далі. Приблизно за 5 секунд аналізатор робить один повний оберт і реєструється 8 кадрів. Кількість повних обертів аналізатора на одну серію спостережень Юпітера становила від 15 до 50. За одне спостереження реєструвалася серія зі 120–400 кадрів. Для забезпечення максимальної статистичної надійності спостережень цей ряд повинен бути як можна довший. Однак за час спостережень фотометричні властивості земної атмосфери можуть мати значні зміни. Зазначена кількість кадрів встановлена дослідним шляхом як оптимальна. Час накопичення сигналу для одного кадру в синій смузі спектра дорівнює 8/50 секунд. Хоча розрядність оцифрування окремого кадру 8 біт, але за рахунок усереднення великої кількості кадрів і факту, що помилки оцифрування набагато менші за інші випадкові помилки,

динамічний діапазон сигналу розширюється до прийнятних для поляриметрії величин.

Як показали проведені оцінки точності для одиночної серії спостережень, абсолютні похибки визначення поляризації поблизу центра Юпітера становлять приблизно 0.15 % для синьої смуги та 0.05–0.08 % для червоної спектральної смуги. Отримане більше значення помилки для синьої смуги пояснюється меншою чутливістю ПЗЗ і більшою кількістю поляриметричних деталей на диску планети. На високих широтах похибки зростають до 0.4 % для синьої смуги та до 0.5 % для червоної. Це пов'язано з більшим градієнтом поляризації в цьому районі і впливом нестабільності земної атмосфери, яка викликає дефокусування та деформацію зображення. Атмосферне тремтіння практично повністю компенсується за допомогою алгоритму спостережень та обробки. Слід зауважити, що хоча точність одиничного виміру відносно невелика, для одержання підсумкового параметра асиметрії поляризації використовується дуже великий масив поляриметричних даних (тисячі кадрів, усі дані за сезон спостереження), що дозволяє за рахунок усереднення кадрів і застосування спеціальних методів обробки, про які розповідається нижче, статистично зменшити помилки до величин, прийнятних для вивчення сезонних варіацій поляризації.

У цьому розділі детально розглянуто алгоритм первинної обробки даних фотополариметричних спостережень Юпітера та проведено аналіз факторів, що спотворюють дані ПЗЗ-спостережень. Необхідне програмне забезпечення для обробки даних спостережень було розроблене здобувачкою самостійно або у співавторстві з В. В. Корохіним, Є. В. Шалигіним та Ю. І. Великодським на базі програмного комплексу “xIRIS Framework”. Особливості обробки даних впливають з особливостей спостережень та поставленої перед дисертантом задачі про дослідження північно-південної асиметрії лінійної поляризації на Юпітері. Перш за все, проводилася стандартна для фотополариметричних даних первинна обробка: віднімання з кожного кадру серії усередненого темного сигналу, ділення кожного кадру серії на усереднене пласке поле. Ці процедури тривіальні та не потребують коментарів. Після первинної обробки проводилася процедура суміщення зображень Юпітера на всіх кадрах серії (зведення до загального центра) та подальше усереднення кадрів, які відповідають однаковим положенням аналізатора (0° та 180° , 45° та 225° , 90° та 270° , 135° та 315°). Після цієї процедури з декількох сотень кадрів залишаються тільки чотири усереднені кадри (для 0° , 45° , 90° та 135°). Щоб коректно провести усереднення зображень, необхідно привести їх у єдину систему координат. Для цього знаходився центр видимого диска Юпітера за фотометричним центром ваги кільця на зображенні. Щоб виключити вплив північно-південної асиметрії полярних регіонів Юпітера та яскравих неоднорідних ділянок поблизу екватора, зовнішній радіус кільця вибирався

49 пікселів, а внутрішній – 39 пікселів (при радіусі Юпітера 60 пікселів). Розрахунки проводилися з точністю до 0.01 пікселів, що досягалося рекурентним обчисленням фотометричного центра ваги кільця. Досвід показав, що така методика для Юпітера працює більш стійко, ніж, наприклад, при визначенні центра за точкою перегину (нулем другої похідної) на краях диска.

Далі з отриманих зображень віднімався фон неба та проводилася корекція за світло, що розсіялося в оптичній системі, та за інструментальну поляризацію. На кадрі виділялася ділянка у вигляді кільця (зовнішній радіус – 90 пікселів, внутрішній – 75 пікселів), концентрична із центром диска планети, у ній розраховувалося середнє значення фону, яке потім віднімалося з усього кадру. Далі проводилося врахування орієнтації Юпітера відносно небесного екватора, та за відомими формулами отримувалися зображення параметрів Стокса Q та U , інтенсивності I , ступеня поляризації P та кута поляризації у перспективній проекції.

Після проведеної обробки даних за викладеним вище алгоритмом можна приступати до вирішення однієї з основних задач дисертації – дослідження змін у часі північно-південної асиметрії поляризації полярних областей Юпітера. Для опису асиметрії лінійної поляризації зручно використовувати параметр асиметрії $P_N - P_S$, який дорівнює різниці модулів значень ступеня лінійної поляризації P на півночі та на півдні на широтах $\pm 60^\circ$ уздовж центрального меридіана [22]. Застосування у спостереженнях панорамного фотоприймача (ПЗЗ-матриці) дозволило звести до мінімуму помилки, викликані неякісним гідунням, і використовувати для аналізу інформацію, отриману з усього диска планети. Для того, щоб скористатися цими перевагами, методика подальшої роботи з даними була вдосконалена таким чином. Отримані після первинної обробки зображення можна вважати картами розподілу параметрів поляризації по диску Юпітера (для конкретних довгот центрального меридіана), представленими в зовнішній перспективній проекції. Для розрахунку параметра $P_N - P_S$ ці карти зручніше мати в циліндричній проекції, тому проводилася відповідна трансформація зображень. Після одержання карт у циліндричній проекції на широтах $\pm 60^\circ$ відповідно на півночі й півдні виділялися області прямокутної форми розміром 30° за довготою та 10° за широтою, у яких обчислювалися середні значення P та розраховувався параметр асиметрії $P_N - P_S$. І, нарешті, для кожного періоду спостережень обчислювалося усереднене за кілька обертів Юпітера значення асиметрії поляризації (кілька десятків індивідуальних значень $P_N - P_S$ для кожного періоду спостережень). Для подальшого аналізу використовувалася саме ця величина.

Таким чином, після обробки поляриметричних даних 1998–2007 рр. за описаним алгоритмом автором було отримано 223 серії цифрових фотополариметричних зображень диска Юпітера для синьої та 116 серій для червоної ділянок спектра при кутах фази $0.2^\circ - 3.1^\circ$. На їхній основі побудовано

339 карт розподілу параметрів Стокса Q та U , інтенсивності I і ступеня лінійної поляризації P по диску Юпітера.

Було одержано 6 нових значень параметра асиметрії лінійної поляризації $P_N - P_S$: $-0.85\% \pm 0.06\%$ (2000 р.), $-1.15\% \pm 0.04\%$ (2001 р.), $1.04\% \pm 0.1\%$ (2003 р.), $0.89\% \pm 0.04\%$ (2004 р.), $0.74\% \pm 0.1\%$ (2006 р.), $-0.3\% \pm 1.1\%$ (2007 р.) (білі кружки на рис. 1).

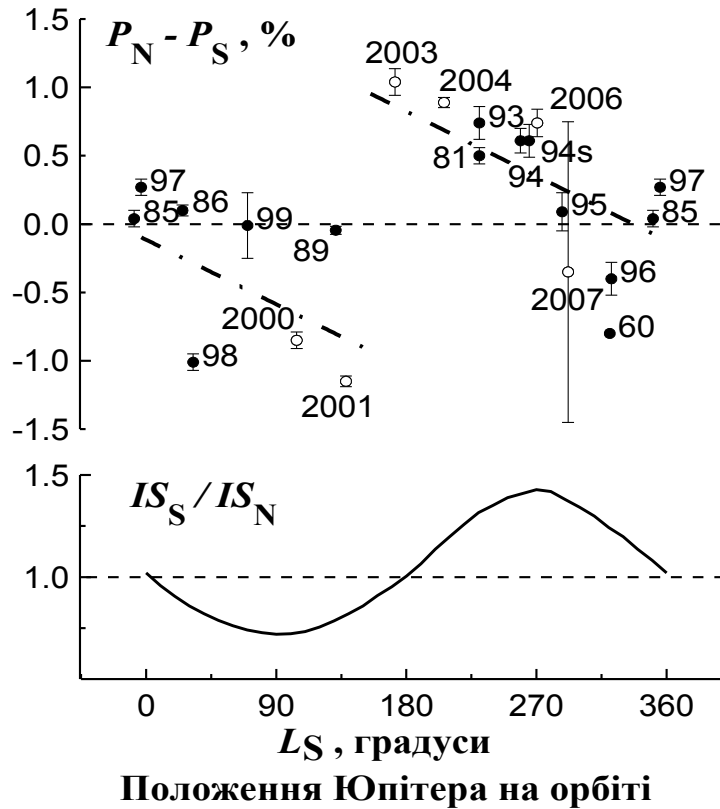


Рис. 1. Зміна північно-південної асиметрії лінійної поляризації (зверху) та інсоляції (знизу) залежно від положення Юпітера на орбіті (L_S – планетоцентрична орбітальна довгота Сонця). Кружки – усереднені за кожний спостережний період параметри $P_N - P_S$, світлі кружки – нові спостережні дані, що були отримані автором, $\lambda = 433\text{--}470$ нм. Суцільна лінія – теоретично розрахована R. F. Veebe та іншими асиметрія інсоляції для полярних регіонів. Штрих-пунктирна лінія – крива апроксимації.

Загалом у дисертаційній роботі аналізуються дані, що описують поведінку поляризації у полярних регіонах Юпітера протягом 48 років. Ця база даних була сформована на основі отриманих автором нових поляриметричних даних (2000–2007 рр.) та доповнена даними інших дослідників: Дж. Хола та Л. Ріллі (1968, 1972–74 рр., $\lambda = 370$ нм), Т. Герельса (1960 р., $\lambda = 433$ нм). Таким чином обсяг даних, що аналізуються, було збільшено майже у два рази порівняно з попередніми дослідженнями [22].

Як було зазначено ще в роботі О. М. Стародубцевої та інших [22], дані

про асиметрію поляризації найкращим чином організуються, якщо їх подати в залежності від положення Юпітера на орбіті (рис. 1). Бари на рис. 1 – це внутрішня точність визначення параметра $P_N - P_S$, розрахована як середньоквадратичне відхилення від середнього значення за даний період спостережень поблизу опозиції (від кількох десятків до кількох сотень індивідуальних значень $P_N - P_S$).

З рис. 1 видно, що існує періодична залежність параметра $P_N - P_S$ від L_S , але вона є негармонійною. Для з'ясування характеру цієї залежності була проведена апроксимація поляриметричних даних різними функціями. Дійсно, пилкоподібна функція виду $F = P_N - P_S (\%) = 1.79 - 0.005 L_S$ для $176^\circ < L_S < 502^\circ$, з періодичним продовженням з періодом 360° (штрих-пунктирна лінія на рис. 1), призводить до значущого зменшення дисперсії на рівні 5 %.

У нижній частині рис. 1 приведена теоретично визначена асиметрія інсоляції для полярних регіонів як відношення величин інсоляції IS_S / IS_N на півдні та на півночі на широтах $\pm 60^\circ$. Як видно з рисунка, спостерігається зворотний зв'язок між параметром асиметрії поляризації $P_N - P_S$ та інсоляцією (зверніть увагу, що на рисунку наведено зворотний параметр IS_S / IS_N). Отже, існування зв'язку між коливаннями поляризації та інсоляції підтверджується новими даними спостережень. Тому можна казати про існування саме сезонних варіацій поляризації. Виявлено стрибкоподібну зміну асиметрії поляризації поблизу $L_S = 180^\circ$. Поясненню цих спостережних фактів присвячено розділ 3.

Наприкінці розділу наводяться результати дослідження фазових змін поляризації на Юпітері у двох спектральних ділянках ($\lambda = 456$ нм та $\lambda = 700$ нм) для центральної області та для полярних регіонів Юпітера. За зрозумілими причинами не завжди вдається проводити спостереження саме в опозицію, а, наприклад, для задачі дослідження асиметрії поляризації у полярних областях Юпітера це може бути важливим чинником, що впливає на дані про поляризацію. Було показано, що в інтервалі кутів фази, принаймні, до 2° , значних змін лінійної поляризації немає ані в полярних, ані в екваторіальних областях, а отже, дані, що отримані в цьому діапазоні фазових кутів, можуть бути використані для задач дослідження довгоперіодичних змін поведінки поляризації на Юпітері.

Розділ 3. Дослідження фізичних властивостей полярного аерозольного шару на Юпітері. Мета третього розділу – інтерпретація спостережних даних, про які йшлося у попередніх розділах.

Підрозділ 3.1 присвячено розгляду ймовірного механізму виникнення поляризації в полярних областях Юпітера при орбітальних кутах фази (кут “Сонце – Юпітер – Земля”), близьких до нуля. Для того, щоб за таких умов виникла істотна поляризація, необхідна наявність великих кутів розсіяння, які можуть реалізовуватись, наприклад, при багатократному розсіянні у хмарах. У дійсності спостерігається суттєво більше зростання поляризації до полюсів, ніж

до східного та західного лімбів. Тому пояснити розподіл поляризації по диску Юпітера тільки багатократним розсіянням у хмарах проблематично.

Припустимо, що поляризація може виникати при одноразовому розсіянні. Для того, щоб отримати необхідні для формування великої поляризації кути розсіяння, які збільшуються до полюсів, очевидно потрібно використовувати іншу конфігурацію освітлювач – розсіювач – спостерігач. Змінити місце розташування приймача світла (спостерігача) та розсіювача (області атмосфери, що спостерігається) ми не можемо. Залишається лише можливість змінювати положення джерела світла. Оскільки положення Сонця також незмінне, необхідно знайти інше джерело світла для розсіювачів. Альbedo тропосферних юпітеріанських хмар достатньо велике, їх можна вважати джерелом світла для шарів атмосфери, що знаходяться вище. Зважаючи на вищесказане, можна запропонувати таку геометрію розсіяння: сонячне світло, відбите від щільних хмар, розсіюється у верхніх розріджених шарах атмосфери і потім реєструється спостерігачем. Така конфігурація дозволяє отримати великі кути розсіяння (у тому числі близькі до 90 градусів на полюсах), що може дати істотну поляризацію при розсіянні, наприклад, на аерозольному стратосферному серпанку.

Як уже згадувалось, дійсно, над щільною хмарною атмосферою Юпітера, знаходиться шар аерозольного серпанку (приблизно на рівні висот із тиском ~20 мбар) з більшою його концентрацією в полярних областях. Найбільш імовірним кандидатом на роль речовини серпанку в стратосфері Юпітера є бензол та поліароматичні вуглеводні, на присутність яких вказують як спостереження (характерні лінії поглинання спостерігалися ще КА “Вояджер”), так і фізико-хімічне моделювання (наприклад, [23]). Чи може розсіяння на стратосферному аерозольному серпанку дати збільшення поляризації до полюсів при нульовому орбітальному фазовому куті спостережень? Для отримання відповіді на це питання було проведено комп’ютерний експеримент. Розглядалася проста модель: на висоті h над шаром хмар Юпітера знаходиться тонкий шар аерозольного серпанку, що складається зі сферичних непоглинаючих бензольних частинок. У такому випадку випромінювання, що реєструє спостерігач, складатиметься з трьох компонентів: $I = I_c + I_{c-h} + I_h$, де I – зареєстрована інтенсивність; I_c – інтенсивність випромінювання, відбитого від хмар; I_{c-h} – інтенсивність розсіяного на аерозолях світла від хмар; I_h – інтенсивність випромінювання, яке прийшло від Сонця і розсіялось аерозольним серпанком безпосередньо до спостерігача. Першопричиною виникнення великої поляризації в полярних областях Юпітера може бути саме розсіяння на шарі аерозольного стратосферного серпанку світла від поверхні, що підстилає (щільного хмарного шару).

Проведення комп’ютерного експерименту показало, що запропонована модель утворення поляризації в полярних областях Юпітера при нульових

орбітальних кутах фази виглядає вельми правдоподібно. Створена програма дозволяє розраховувати ступінь поляризації для ступеня лінійної поляризації для будь-якої точки Юпітера із заданими планетоцентричними координатами. Результатом розрахунків є розподіл ступеня лінійної поляризації по диску Юпітера для заданих областей. Отримані результати в цілому узгоджуються зі спостережними фактами: 1) радіальна орієнтація площини розсіяння; 2) збільшення ступеня поляризації до краю диска; 3) зміна знаку поляризації при збільшенні довжини хвилі; 4) одержана оцінка середнього радіуса частинок 0.5 мкм не суперечить даним інших авторів. Однак абсолютна величина розрахованого ступеня поляризації менша, ніж дають спостереження, що можна пояснити неврахуванням усіх можливих факторів у силу простоти та схематичності запропонованої моделі.

Отже, проведений комп'ютерний експеримент показав, що при побудові точнішої оптичної моделі, що описує процеси розсіяння в атмосфері Юпітера, принаймні, не можна нехтувати внеском аерозольного серпанку у формування поляризації в полярних областях, що спостерігається.

У підрозділі 3.2 розглядаються причини виникнення сезонних варіацій поляризації на Юпітері. Розглядаючи аерозоль як можливу першопричину виникнення значної поляризації в полярних областях Юпітера, логічно припустити, що саме її властивості та їх зміни з часом можуть впливати на зміни поляризаційних властивостей верхніх шарів атмосфери Юпітера. Це можуть бути зміни оптичних параметрів речовини серпанку (наприклад, розподілу частинок за розмірами) та/або варіації концентрації частинок серпанку.

Що може приводити до таких змін? Як відомо, на відміну від Землі, Юпітер має маленький кут нахилу осі обертання ($\sim 3^\circ$), але більший ексцентриситет орбіти (~ 0.05). Це викликає 20-відсоткові варіації у величині потоку сонячного випромінювання. Крім того, перигелій і максимум схилення Сонця на Юпітері майже збігаються у часі. Це приводить, по-перше, до відчутних сезонних варіацій в інсоляції та температурі, а по-друге, – до їх північно-південної асиметрії. Стратосферний серпанок може бути фізичним агентом, чутливим до змін температури. Ймовірно, аерозоль у серпанку знаходиться в нестабільному стані, і навіть невелика зміна фізичних умов може приводити до інтенсивного утворення або розпаду частинок.

Зворотний зв'язок асиметрії поляризації та інсоляції, про який ішлося у розділі 2, може бути пояснений таким чином. Влітку аерозольний шар у стратосфері Юпітера істотно нагрівається сонячним випромінюванням. При цьому зменшується пересичення пари речовини серпанку, і відбувається її випаровування, або, щонайменше, уповільнення конденсації. Швидкість у конденсації пари над плоскою поверхнею, як відомо, пов'язана з температурою таким виразом [24]:

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

де T – абсолютна температура, k – постійна Больцмана; m і ρ – маса молекул і щільність твердої речовини; p – тиск пари в атмосфері; $p_0(T) = p_\infty \exp(-Q/kT)$ – тиск насиченої пари над плоскою поверхнею, де Q – теплота випаровування, p_∞ – тиск насиченої пари при $T = \infty$. Оскільки Q , як правило, значно більше kT , то залежність швидкості конденсації від температури визначається експонентою, а не ступеневою функцією. Урахування кривизни поверхні частинок, що утворюються, збільшує тиск пари, необхідної для конденсації:

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

де r – радіус частинок; α_e – енергія одиниці поверхні (коефіцієнт поверхневого натягнення); для частинок у твердій фазі α_e близькі до значень у рідкій фазі поблизу температури плавлення.

При підвищенні температури концентрація частинок у шарі серпанку буде значно зменшуватися, що зменшить розсіяння світла на частинках, і, як наслідок, значення поляризації. При зниженні температури спостерігатиметься зворотний процес – збільшення концентрації і ступеня лінійної поляризації. Таким чином, сезонні зміни температури можуть приводити до сезонних варіацій поляризації відбитого Юпітером світла. Незважаючи на те, що температура в атмосфері Юпітера протягом сезону змінюється плавно, через експоненціальну залежність (1), (2) у сезонному процесі утворення стратосферного аерозолу повинна мати місце стрибкоподібна зміна концентрації частинок (при досягненні необхідних умов відбувається фазовий перехід речовини аерозолу), що узгоджується з “пилкоподібним” характером залежності параметра $P_N - P_S$ від L_S , який демонструє рис. 1.

Для перевірки цього припущення було проведено дослідження впливу температури на процеси утворення аерозолу в умовах атмосфери Юпітера. Але спочатку було розглянуто найпростіший випадок утворення частинок – гомогенне зародження (процес, який протікає без додаткових центрів конденсації), для того, щоб зрозуміти, чи можуть взагалі в умовах стратосфери Юпітера утворюватися аерозолі, що складаються з бензольних структур. Умовою рівноваги зародка із середовищем є рівність його розміру так званому критичному радіусу r_k . Коли розмір зародка перевищує критичний радіус, то починає відбуватися зародкоутворення. Гомогенне зародження відбувається, коли радіуси критичних зародків близькі до розмірів молекул; при цьому пересичення ξ близько або більше одиниці. Наприклад, для нафталіну

($\alpha_e = 30 \text{ ерг/см}^3$) при $T = 150 \text{ К}$ та $\xi = 10$ критичний радіус $r_k = 6 \text{ \AA}$, тобто при таких пересиченнях в умовах стратосфери Юпітера йде гомогенне зародкоутворення.

Використовуючи концентраційні профілі ПАВ для стратосфери Юпітера [23], були розраховані висотні профілі пересичень ПАВ для температур 120, 150 і 180 К (рис. 2).

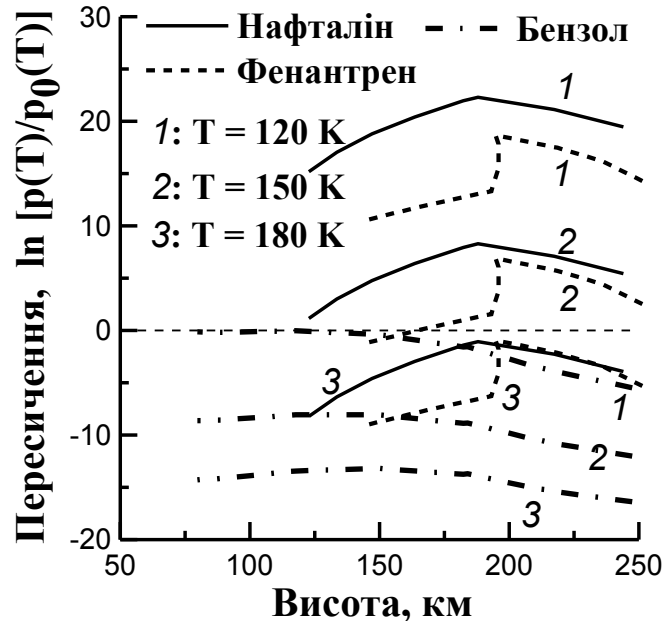


Рис. 2. Розрахунок висотних профілів пересичень для поліароматичних вуглеводнів (бензол, нафталін, фенантрен) при різних температурах

Як відомо, середня температура у стратосфері Юпітера на рівні з тиском біля 20 мбар (на якому ймовірно знаходиться аерозольний серпанок) дорівнює 150 К з амплітудою сезонних коливань 30 К. Оскільки ця температура нижче за потрібні точки для нафталіну (359 К) та бензолу (278 К), вони повинні утворювати кристалічні зародки безпосередньо з газової фази. Цей факт указує на те, що такі частинки повинні швидше за все мати несферичну форму, що важливо для побудови оптичних моделей розсіяння світла в атмосфері Юпітера.

Як видно з рис. 2, бензол не конденсується ніколи (пересичення негативне, тобто має місце недосичення пари), а ймовірність гомогенного зародження нафталіну та фенантрону при температурах 120 і 150 К дуже велика. При температурі 180 К не конденсуються ніякі з розглянутих нами ПАВ. Як бачимо, температура має сильний вплив на конденсацію ПАВ.

Таким чином, полярний аерозольний серпанок може складатися із твердих частинок ПАВ, зокрема – з нафталіну та фенантрону. Оскільки молекули ПАВ можуть конденсуватися на поверхні інших ПАВ, то при зниженні температури спочатку гомогенно утворюються частинки найменш

летючої речовини, а потім вони можуть ставати центрами для конденсації більш летючих речовин. Отже, сезонні коливання температури ймовірно є основним чинником, що приводить до сезонних варіацій поляризації в полярних областях Юпітера: у результаті сезонних змін інсоляції відбуваються сезонні коливання температури; це впливає на утворення стратосферного аерозолу, унаслідок чого змінюється концентрація аерозолів, а отже, і поляризація, що спостерігається на Юпітері.

У підрозділі 3.3 розглянуто нерегулярні процеси, які можуть мати місце під час проведення спостережень та впливати на значення поляризації, що спостерігається. Такий вплив повинен виявлятися, наприклад, у вигляді швидкоплинних змін фізичних умов у атмосфері Юпітера. Тому було проведено дослідження зв'язку між даними про поляризацію на Юпітері та основними величинами, що описують сонячну активність: числами Вольфа, *Kp*-індексом, швидкістю та щільністю частинок у сонячному вітрі, даними про щільність потоку рентгенівського випромінювання, інтенсивністю сонячних космічних променів (протони високих енергій). Це дослідження виявило можливий зв'язок лише з сонячними космічними променями (СКП) – високоенергійними протонами з енергіями $E > 10$ МеВ. Можливо, саме впливом цього чинника можна пояснити дещо підвищене підсумкове значення ступеня лінійної поляризації для південної полярної області, отримане для 1998, 2000, 2001 рр., бо саме для дат цих спостережень (з урахуванням затримки в часі) були зареєстровані протонні спалахи. Це міркування підкріплюється тим, що, згідно з проведеними оцінками, у стратосфері Юпітера до висот, які нас цікавлять, проникає чимала кількість енергійних частинок.

Можливі різні механізми впливу потоку енергійних протонів на утворення аерозолів в атмосфері Юпітера. По-перше, протони високих енергій, потрапляючи в атмосферу, збільшують концентрацію іонів, що беруть участь у хімічних реакціях, у яких утворюється початковий матеріал (молекули ПАВ) для подальшого формування аерозолів. У результаті концентрація молекул ПАВ підвищується, що сприяє збільшенню числа аерозольних частинок. По-друге, іони, що утворилися, можуть бути додатковими центрами конденсації. І, нарешті, хімічні реакції, що стимульовані додатковою іонізацією атмосфери, відбуваються з виділенням або поглинанням тепла, що може змінити температуру верхніх шарів атмосфери (аналогічне явище спостерігається на високих широтах в стратосфері Землі). Це може змінювати концентрацію аерозолу на полюсах і, отже, приводити до зміни значень поляризації полярних областей.

З перелічених механізмів лише другий – зародкоутворення в газі у присутності іонів – піддається строгому кількісному аналізу. Були розраховані зміни термодинамічного потенціалу системи, яка містить частинку, що зародилася на іоні. Як показали розрахунки, додаткова область стійкості,

необхідна для того, щоб реалізовувався процес зародкоутворення, не з'являється в діапазоні розмірів частинок, який нас цікавить (~ 1 мкм), а тільки при розмірах зародків, близьких до атомних. При реальних значеннях заряду (1–2 заряди електрона) стійкість з'являється лише при малих пересиченнях. Отже, механізм утворення частинок аерозолу на зарядах не є ефективним. Проте, як було показано, утворення частинок в атмосфері Юпітера може відбуватися гомогенно, і цього досить для можливості утворення стратосферного аерозолу на Юпітері. Сонячні космічні промені можуть впливати на утворення аерозолів у стратосфері Юпітера, що складаються з ПАВ – та відповідно на значення асиметрії поляризації у полярних регіонах – тільки шляхом безпосередньої участі в серії хімічних реакцій, що приводять до утворення первинного матеріалу для подальшого формування аерозолу.

У додатку А надана загальна інформація про програмний комплекс “xIRIS Framework”, на базі якого здобувачкою розроблялися програми для обробки спостережних даних.

У додатку Б наводяться процедури обробки даних фотополяриметричних спостережень Юпітера, які були розроблені автором для вирішення поставлених у дисертації завдань.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі проведено дослідження фізичних умов у верхніх шарах атмосфери Юпітера та розглянуто властивості стратосферного аерозолу в полярних областях планети за даними фотополяриметричних спостережень. Основні результати дисертаційної роботи:

1. Проведено фотополяриметричні спостереження Юпітера у двох спектральних смугах: синій ($\lambda_{\text{eff}} = 456.4$ нм, $\Delta\lambda = 107.5$ нм) та червоній ($\lambda_{\text{eff}} = 668.7$ нм, $\Delta\lambda = 116.5$ нм) в опозиції 2001, 2003, 2004, 2007 рр. За результатами обробки спостережних даних 1998–2007 рр. отримано 223 серії цифрових фотополяриметричних зображень диска Юпітера для синьої ділянки спектра та 116 серій для червоної при кутах фази 0.2° – 3.1° . На їхній основі побудовано 339 карт розподілу параметрів Стокса Q та U , інтенсивності I і ступеня лінійної поляризації P по диску Юпітера.

2. Одержано 6 нових значень параметра асиметрії лінійної поляризації $P_N - P_S$, що характеризують зміни поляризації в полярних областях Юпітера протягом часу, більшого за половину юпітеріанського року: $-0.85\% \pm 0.06\%$ (2000 р.), $-1.15\% \pm 0.04\%$ (2001 р.), $1.04\% \pm 0.1\%$ (2003 р.), $0.89\% \pm 0.04\%$ (2004 р.), $0.74\% \pm 0.1\%$ (2006 р.), $-0.3\% \pm 1.1\%$ (2007 р.). Використання цих даних та даних інших спостерігачів збільшило обсяг матеріалу для дослідження довгоперіодичних варіацій поляризації Юпітера майже у два рази. Створена

база даних, що описує поведінку лінійної поляризації в полярних областях Юпітера протягом 48 років, не має аналогів у світі. Ґрунтуючись на цих даних уперше виявлено зворотний зв'язок параметра $P_N - P_S$ з інсоляцією, що свідчить про сезонний характер змін поляризації.

3. Запропоновано пояснення виникнення значної лінійної поляризації в полярних областях Юпітера при нульовому куті фази. Проведений комп'ютерний експеримент показав, що значний внесок у поляризацію може давати розсіяне на шарі аерозольного стратосферного серпанку світло від поверхні, яка підстилає (хмар).

4. За допомогою модельних розрахунків процесів гомогенного зародкоутворення було показано, що сезонні коливання температури у стратосфері Юпітера є визначальним чинником у процесах формування полярного аерозольного серпанку, який найбільш імовірно складається з твердих частинок ПАВ (нафталін, фенантрен). Це пояснює сезонність змін поляризації в полярних областях Юпітера.

СПИСОК ПРАЦЬ, ОПУБЛІКОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Спеціалізовані наукові фахові видання:

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.* Фотополяриметрические 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.

Додаткові публікації у наукових виданнях:

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]. – Х. : ХНУ, 2008. – P. 20–21.

Матеріали та тези конференцій:

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 Photopolarimetrical 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 ЦИТОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

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.

АНОТАЦІЯ

Шалигіна О. С. Властивості стратосферного аерозолі у полярних областях Юпітера за даними фотополариметричних спостережень. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.03.03 – Геліофізика і фізика Сонячної системи. – Головна астрономічна обсерваторія НАН України, Київ, 2009.

У дисертаційній роботі проведено дослідження фізичних умов у верхніх шарах атмосфери Юпітера та властивостей аерозолі у полярних областях планети. Робота базується на даних наземних фотополариметричних спостережень Юпітера і на використанні елементів теорії формування аерозолів. Створена на основі власних полариметричних спостережень та даних інших дослідників база даних, яка описує поведінку лінійної поляризації в полярних областях Юпітера протягом 48 років, не має аналогів у світі. Грунтуючись на цих даних, проведено дослідження довгострокових варіацій північно-південної асиметрії лінійної поляризації та знайдено зворотний зв'язок параметра асиметрії з інсоляцією, що свідчить про сезонний характер змін поляризації. Запропоновано пояснення виникнення значної лінійної поляризації в полярних областях Юпітера при кутах фази, близьких до нуля, та її ходу вздовж меридіана: показано, що значний внесок у поляризацію може давати розсіяне на шарі аерозольного стратосферного серпанку світло від поверхні, яка підстилає (хмар). Показано, що сезонні коливання температури у стратосфері Юпітера є визначальним чинником у процесах формування полярного аерозольного серпанку, який найбільш імовірно складається з твердих частинок ПАВ (нафталін, фенантрен). Це може пояснювати сезонні зміни поляризації в полярних областях Юпітера. Відмічається можливість впливу сонячних космічних променів на формування полярного серпанку на Юпітері.

Ключові слова: Юпітер, полариметрія, атмосфера, стратосфера, полярні області, аерозоль.

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 фотополяриметрических 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 фотополяриметрических наблюдений Юпитера с использованием элементов теории формирования аэрозолей.

На протяжении четырех оппозиций (2001, 2003, 2004, 2007 гг.) были проведены фотополяриметрические 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, полариметрия, атмосфера, стратосфера, полярные области, аэрозоль.