

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ГОЛОВНА АСТРОНОМІЧНА ОБСЕРВАТОРІЯ

Зайцев Сергій Васильович

УДК 523.4+ 523.44

**ВІД'ЄМНА ПОЛЯРИЗАЦІЯ РОЗСІЯНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ
ВИБРАНИХ БЕЗАТМОСФЕРНИХ ТІЛ СОНЯЧНОЇ СИСТЕМИ**

01.03.03 – Геліофізика і фізика Сонячної системи

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Київ – 2016

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Головній астрономічній обсерваторії НАН України.

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук,
головний науковий співробітник
Кисельов Микола Миколайович,
Головна астрономічна обсерваторія
НАН України.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор
Лупішко Дмитро Федорович,
НДІ астрономії
Харківського національного університету
імені В. Н. Каразіна МОН України,
провідний науковий співробітник
відділу фізики астероїдів та комет;

кандидат фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник
Лук'яник Ігор Васильович,
Астрономічна обсерваторія
Київського національного університету
імені Тараса Шевченка,
заступник директора з наукової роботи.

Захист відбудеться « 1 » квітня 2016 р. на засіданні Спеціалізованої вченої ради Д 26.208.01 при Головній астрономічній обсерваторії НАН 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 розіслано « 24 » лютого 2016 р.

Вчений секретар
Спеціалізованої вченої ради
кандидат фізико-математичних наук

І. Е. Васильєва

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Дослідження поляризаційних характеристик випромінювання, розсіяного поверхнями безатмосферних малих тіл Сонячної системи (БКТ), є основою для дослідження фізико-хімічних властивостей їх поверхонь, походження і еволюції. Такі дослідження необхідні для подальшого розвитку теоретичних уявлень про механізми розсіювання, які призводять до виникнення поляризованого випромінювання, та побудови фізичних і космогонічних моделей досліджуваних об'єктів. Фазова залежність лінійної поляризації є однією з найінформативніших поляризаційних характеристик. За її допомогою можна визначити альbedo, приблизний композиційний склад, розмір частинок, з яких складається розсіююча поверхня. Але перехід від спостережних властивостей розсіяного випромінювання до фізичних властивостей розсіюючого середовища і, власне, характеристик небесних тіл можливий лише за умови наявності надійної спостережної бази, за допомогою якої можна було б зробити вибір на користь одного чи іншого теоретичного механізму розсіювання чи моделі, яка б описувала фотометричні і поляриметричні опозиційні явища та інші ефекти.

Протягом останніх десятиліть спостерігався суттєвий прогрес як у теоретичному, так і в експериментальному напрямках досліджень властивостей розсіяного випромінювання БКТ [27, 28, 44]. Для низки об'єктів був виявлений поляриметричний опозиційний ефект [29–31, 40, 42, 48]. Для інтерпретації наявних фазових залежностей поляризації і блиску було запропоновано низку фізичних механізмів розсіювання світла [27, 28, 45]. Але для їх перевірки, уточнення і розробки нових механізмів потрібно було отримати принципово нові дані. Так, для уточнення механізмів виникнення фотометричного опозиційного ефекту (ФОЕ) і поляриметричного опозиційного ефекту (ПОЕ) потрібен великий набір поляриметричних даних на малих фазових кутах. Виявлення вторинного мінімуму поляризації на малих фазових кутах для високоальбедних астероїдів і супутників Юпітера поставило питання про можливість його виявлення у високоальбедних супутників Сатурна, для яких поляриметричні дані досі були вкрай нечисленними через складні умови їх спостережень. Також вимагала уточнення поведінка поляризації на малих фазових кутах для об'єктів, для яких наявність поляризаційних опозиційних ефектів була встановлена раніше. Таким чином, виникла необхідність у нових інтенсивних телескопічних спостереженнях, результати яких повинні були б сприяти розвитку модельних досліджень для виявлення ефективності того або іншого механізму розсіювання світла з урахуванням оптичних і фізичних властивостей розсіювальних поверхонь. Усе це визначає актуальність теми дослідження.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалася в межах програм фундаментальних досліджень, що проводилися в ГАО НАН України, а саме:

1. Тема №224В. «Активність комет та оптичні властивості безатмосферних малих тіл Сонячної системи» (2006–2008 рр., номер держреєстрації 0106U004541);

2. Тема № 262В. «Фізичні властивості комет та поверхонь вибраних безатмосферних тіл Сонячної системи за даними спектрофотометрії, фотометрії та поляриметрії» (2009–2013 рр., номер держреєстрації 0108U011183);

3. Розділ «Стратифікація оптичних та фізичних характеристик малих тіл Сонячної системи з відстанню від Сонця» Цільової теми № III-31-12 (299Ц) «Фундаментальні властивості обраних об'єктів Всесвіту: теоретичні та спостережні аспекти» (2012–2016 рр., номер держреєстрації 0112U001007);

4. Тема № 334В. «Фізичні характеристики малих тіл Сонячної системи за дослідженнями в оптичній ділянці спектру» (2014–2018 рр., номер держреєстрації 0113U006608).

Частина досліджень астероїдів і супутників планет проведена в межах спільних програм із Кримською астрофізичною обсерваторією, НДІ астрономії Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, НДІ «Астрономічна обсерваторія» Одеського національного університету імені І.І. Мечникова та з зарубіжними науковцями. В усіх перерахованих наукових програмах та темах здобувач брав участь як виконавець.

Мета і задачі дослідження. Основною метою роботи є дослідження властивостей випромінювання, розсіяного поверхнями вибраних високоальбедних супутників систем Юпітера і Сатурна та астероїдів в області опозиції. Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні задачі:

- проведення апертурних фотоелектричних поляриметричних спостережень вибраних астероїдів і супутників планет у широкому діапазоні фазових кутів і довгот;
- дослідження фазових і довготних залежностей лінійної поляризації вибраних астероїдів та супутників планет, їх порівняння;
- спостережне підтвердження теоретичного висновку про те, що вузький фотометричний опозиційний ефект повинен супроводжуватися поляризаційним опозиційним ефектом у вигляді вторинного мінімуму поляризації поблизу опозиції, визначення його амплітудних, кутових і спектральних параметрів;
- аналіз подібності та відмінності фотометричних та поляриметричних опозиційних ефектів у різних класів об'єктів, порівняння їх з існуючими моделями, уточнення механізмів формування.

Об'єкт дослідження – супутники великих планет, астероїди.

Предмет дослідження – особливості процесів розсіяння світла на малих фазових кутах, фізичні характеристики поверхонь супутників планет і астероїдів.

Методи досліджень – апертурна фотоелектрична поляриметрія, обробка спостережних даних, узагальнення та порівняльний аналіз даних, порівняння результатів спостережень із існуючими моделями і механізмами розсіяння світла.

Наукова новизна одержаних результатів. З 2007 до 2015 рр. отримано значний обсяг нових даних з поляриметричних спостережень високоальбедних астероїдів 44 Ніза і 64 Ангеліна, галілеєвих супутників Юпітера Іо, Європи, Ганімеда і Каллісто та супутників Сатурна Енцелада, Реї, Діони і Япета, на основі якого виявлені нові закономірності і ефекти у відбитому випромінюванні цих об'єктів:

1. Підтверджено поляризаційні опозиційні ефекти у вигляді вторинних мінімумів від'ємної поляризації близько опозиції у супутників Юпітера Іо, Європи, астероїдів 44 Ніза і 64 Ангеліна, а також поляризаційний опозиційний ефект у вигляді асиметричної фазової кривої від'ємної поляризації Ганімеда, у веденої півкулі супутника Сатурна Япета. Показано, що у середньоальбедного супутника Каллісто і низькоальбедної ведучої півкулі Япета поляризаційний опозиційний ефект відсутній.

2. Вперше отримано надійні фазові залежності поляризації відбитого світла супутників Сатурна Енцелада, Реї і Діони та визначено їх параметри. Виявлено довготну залежність поляризації Реї з амплітудою $\approx 0.2\%$. Для ведучої півкулі ($L \approx 90^\circ$) є характерним менший ступінь поляризації у порівнянні з веденою півкулею ($L \approx 270^\circ$), що свідчить про більш високе альbedo ведучої півкулі супутника Реї.

3. Виявлено, що фазові залежності поляризації (ФЗП) для супутників Сатурна, які спостерігаються у вигляді асиметричних кривих з мінімумом на малих фазових кутах, значно відрізняються за параметрами і формою від ФЗП для супутників Юпітера, що може свідчити про стратифікацію поляриметричних властивостей об'єктів Сонячної системи з віддаленням від Сонця.

4. Створено базу поляриметричних даних супутників планет, що є частиною міжнародної бази даних NASA Planetary Data System (Polarimetry of Planetary Satellites V1.0. NASA Planetary Data System, EAR-SA-COMPIL-3-SATPOL-V1.0).

5. Розроблено програмне забезпечення, необхідне для обробки результатів поляриметричних спостережень і створення пошукових карт, що показують конфігурацію супутників Юпітера, Сатурна і Урана.

Практичне значення одержаних результатів. Практична цінність роботи визначається великим обсягом оригінальних поляриметричних даних, отриманих для вибраних астероїдів і супутників планет. Отримані результати є емпіричною базою для моделювання та інтерпретації процесів розсіяння, для планування космічних місій до супутників планет і астероїдів. Дані неодноразово використовувалися і будуть використані надалі для уточнення старих та розробки нових механізмів і моделей розсіяння світла на реголітових поверхнях. Практичну цінність мають розроблені програми для обробки результатів спостережень і створення пошукових карт супутників планет. Результати дисертаційної роботи можуть бути використані в таких наукових установах, як ГАО НАН України, НДІ астрономії ХНУ, АО КНУ, АО ОДУ, ІПА РАН, ГАІШ МГУ, Астрономічного інституту ім. В.В. Соболева СПбДУ та

в інших астрономічних закладах і обсерваторіях ближнього та дальнього зарубіжжя.

Достовірність і обґрунтованість результатів досліджень підтверджується узгодженням отриманих даних з результатами спостережень, виконаними на 8-м телескопі VLT (ESA) [42, 43], з результатами інших авторів [29], а також впливає з ретельного аналізу похибок вимірювань та обчислень. Результати досліджень були апробовані на міжнародних конференціях в Україні та за її межами.

Особистий внесок здобувача:

- У роботах [1–3, 5, 7] автором були проведені поляриметричні спостереження спільно із співавторами, проведена обробка результатів спостережень, автор брав участь в обговоренні і написанні тексту статей.
- У роботах [4, 8] автор займався пошуком опублікованих даних, їх систематизацією, створенням поляриметричної бази супутників планет і написанням тексту.
- У роботі [6] автор брав участь в проведенні спостережень і первинній обробці даних.
- Автор розробив програму для обробки результатів поляриметричних спостережень в інтерактивному режимі і програму для розрахунку та візуалізації конфігурації супутників Юпітера, Сатурна і Урана, яка може широко використовуватися різними спостерігачами.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертаційної роботи доповідались особисто автором на багатьох міжнародних конференціях, таких як:

- Solar System bodies: from optic to geology (26–29 травня 2008 р., Харків);
- 15–20th Open Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics (2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013 рр., Київ);
- International Conference of Young Astronomers (07–13 вересня 2009 р., Краків, Польща);
- NATO ASI on Special Detection Technique (Polarimetry) and Remote Sensing (12–25 вересня 2010 р., Київ);
- Vatican Observatory Summer School “The Chemistry of the Universe” (29 травня – 24 червня 2010 р., Рим, Італія);
- International Astronomical School of Young Scientists (12–14 травня 2011 р., Чернігів).

Окрім того, результати представлялися у спільних доповідях співавторами на міжнародних конференціях, таких як:

- ACM 2012 (12–16 травня 2012 р., Ніїгата, Японія);
- The 6th Cosmic Dust Conference (5–9 серпня 2013 р., Кобе, Японія);
- The 14th Electromagnetic and Light Scattering Conference (17–21 червня 2013 р., Лілль, Франція);
- IX міжнародна конференція “Electronics and applied physics” (23–26 жовтня 2013 р., Київ);

- The 15th Electromagnetic and Light Scattering Conference (21–27 червня 2015 р., Лейпциг, Німеччина);
- Conference Sobolev100 (21–25 вересня 2015 р., Санкт-Петербург, Росія);

Матеріали дисертаційної роботи доповідалися на наукових семінарах Головної астрономічної обсерваторії НАН України.

Публікації. Матеріали дисертації викладені у 26 публікаціях, з яких 7 [1–7] – статті у спеціалізованих фахових виданнях, база даних [8], а також 18 [9–26] – у збірниках тез та матеріалах міжнародних конференцій.

Структура роботи. Дисертаційна робота складається з переліку умовних позначень та скорочень, вступу, 5 розділів, висновків до розділів, загальних висновків, списку використаних джерел. Повний обсяг дисертації становить 129 сторінок, з них 19 сторінок – список використаних джерел. Текст роботи містить 35 рисунків, 11 таблиць, 192 найменування у списку використаних джерел.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Вступ. Обґрунтовано актуальність дослідження поляриметричних характеристик вибраних супутників планет і астероїдів, а також зв'язок роботи з науковими програмами і темами. Сформульовано мету, основні задачі та методи їх вирішення. Відображено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів. Описано особистий внесок автора, вказано відомості про апробацію та публікації результатів роботи за темою дисертації.

Розділ 1. Сучасний стан поляриметричних і фотометричних досліджень безатмосферних малих тіл Сонячної системи. Розділ містить спостережні закономірності взаємодії світла з різними середовищами. Відмічено, що в області опозиції для більшості БКТ спостерігаються два ефекти: фотометричний опозиційний ефект і від'ємна фазова крива поляризації.

Розглянуто основні механізми виникнення опозиційних ефектів. В якості основних фізичних механізмів формування фотометричного і поляриметричного опозиційних ефектів нині розглядаються [27 і посилання там]: а) взаємне затінювання часток або елементів поверхні; б) когерентне посилення зворотного розсіяння; в) ефекти ближнього поля; с) одноразове розсіяння світла на окремих частинках. Відзначено, що відносний вклад різних механізмів залежить від фізичних властивостей (складу, пористості, структури, форми, розміру частинок та ін.) оптично активного шару і геометрії розсіяння. Розглянуто сучасний стан поляриметрії БКТ і актуальні завдання дослідження високоальбедних супутників Юпітера і Сатурна та астероїдів. Наведено огляд публікацій за темою роботи. Сформульовано й обґрунтовано актуальні проблеми й задачі, на вирішення яких були спрямовані наші дослідження.

Розділ 2. Апаратура і методика поляриметричних спостережень малих тіл Сонячної системи. У цій частині дисертації подано інформацію про телескопи і апаратуру, яка використовувалася для спостережень. Поляриметричні спостереження галілеєвих супутників Юпітера, вибраних

супутників Сатурна (Енцелад, Рея, Діона, Япет) і високоальбедних астероїдів 44 Ніза і 64 Ангеліна було проведено автором впродовж 2007–2015 рр. на 2.6-м, 1.25-м, 1-м телескопах Кримської астрофізичної обсерваторії і 0.7-м телескопі Чугуївської спостережної станції НДІ астрономії ХНУ імені В.Н. Каразіна.

У розділі наведено опис інструментів, апаратури і методик спостережень. Він містить основні схематичні будови фотометрів-поляриметрів, за допомогою яких були виконані поляриметричні спостереження, та детальний опис принципів їх роботи.

Також розділ містить методику проведення апертурних поляриметричних спостережень. У ньому наведено методику та формули редукції поляриметричних спостережень. Розділ містить теоретичні основи та алгоритми для розрахунку параметрів Стокса за даними поляриметричних спостережень у режимі вимірювання лінійної поляризації для використовуваних фотометрів-поляриметрів. Наведено також параметри інструментальної поляризації як основної з характеристик інструментальної системи телескоп + фотометр-поляриметр.

Оскільки спостережувані поляризаційні ефекти для вибраних об'єктів були малі (приблизно 0.1–0.5%), особлива увага в роботі приділялася оцінкам точності і достовірності спостережень. Наведено основні формули, за допомогою яких обчислювалися вимірювані величини та їх похибки. Для врахування випадкових і систематичних похибок при визначенні ступеня поляризації і позиційного кута площини поляризації систематично спостерігалися поляриметричні стандарти.

Для фінальної обробки спостережень, отриманих за допомогою фотометра-поляриметра 2.6-м телескопа ДТШ, автором була розроблена програма "Polar_ZTSh.exe". Приклади інтерфейсу програми надані на рис. 1.

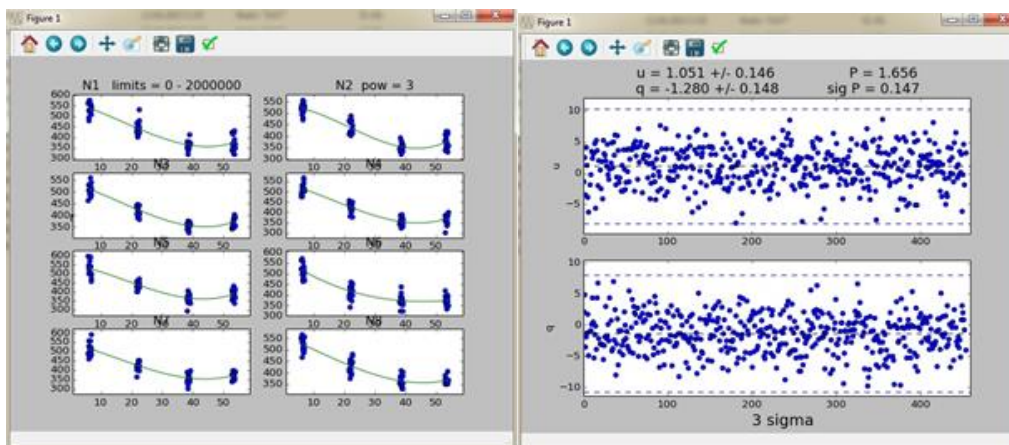


Рис. 1. Інтерфейс програми "Polar_ZTSh.exe" для обробки вимірів лінійної поляризації на фотометрі-поляриметрі 2.6-м телескопа КрАО.

Програма дозволяє в інтерактивному режимі візуалізувати, редагувати і апроксимувати значення інтенсивності фону неба і спостережуваного об'єкта,

видаляти спостереження з аномальними значеннями інтенсивності об'єкта, а також враховувати інструментальну поляризацію.

Методика поляриметричних спостережень супутників Юпітера і Сатурна має свої особливості, обумовлені близьким розташуванням супутників до планет. Для визначення видимої конфігурації основних супутників Юпітера, Сатурна і Урана на будь-який момент часу автором була написана програма "SatConfig.exe".

Таким чином, у другому розділі показано, що використана методика планування, проведення та обробки поляриметричних спостережень, яка була відпрацьована на багаторічному досвіді співробітників ГАО НАН України, Кримської астрофізичної обсерваторії та НДІ астрономії ХНУ імені В.Н. Каразіна, дозволила отримати надійні спостережні дані і знайти нові тонкі поляриметричні та фотометричні ефекти в досліджуваних об'єктах, дає змогу досягти точності поляриметрії, потрібної для дослідження спостережуваних поляризаційних ефектів для вибраних об'єктів.

Розділ 3. Результати поляриметричних спостережень високоальбедних астероїдів. У розділі розглянуті основні характеристики високоальбедних астероїдів Е-типу за даними різних авторів з урахуванням фотометричних, радіометричних і спектральних даних. Результати поляриметричних спостережень автора представлено в таблицях і на графіках (див. рис. 2). Отримані дані підтвердили бімодальний характер фазової кривої від'ємної поляризації цих об'єктів, виявлений раніше В. К. Розенбуш [30, 31], і уточнили їх характеристики.

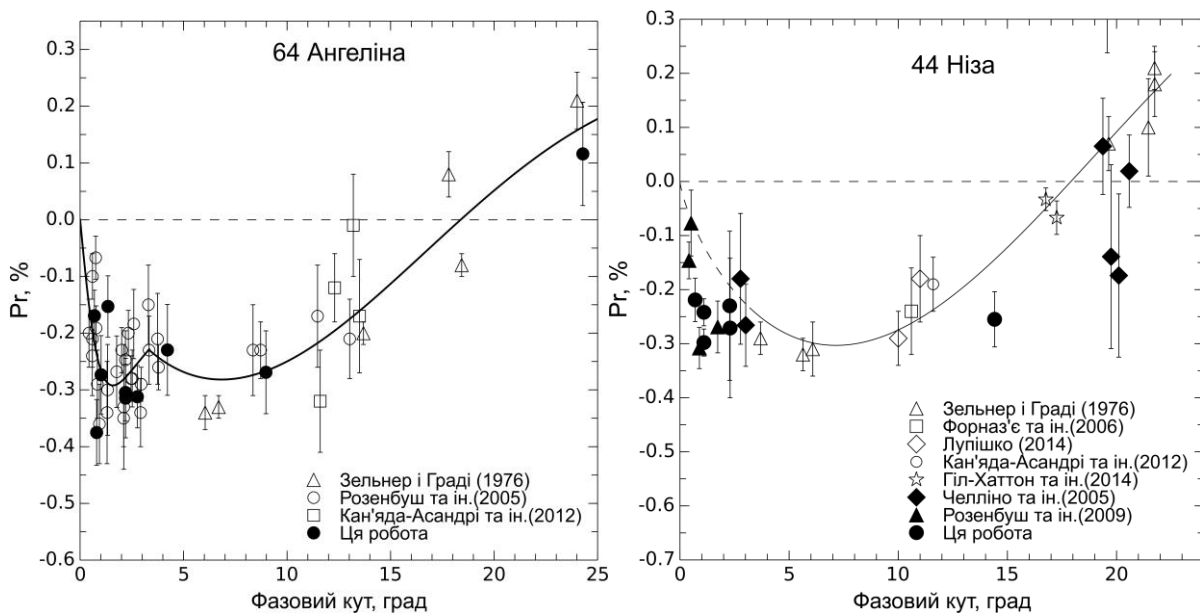


Рис. 2. Фазові залежності поляризації астероїдів 64 Ангеліна і 44 Ніза.

ФЗП високоальбедних астероїдів 64 Ангеліна і 44 Ніза складаються із вторинного локального мінімуму поляризації ПОЕ з параметрами ($P_{min,POE} \approx -0.3\%$ на фазовому куті $\alpha_{min,POE} \approx 1.6^\circ$) і регулярної фазової кривої від'ємної поляризації ($P_{min} \approx -0.3\%$ на $\alpha_{min} \approx 5^\circ$). Відзначено, що клас високоальбедних

астероїдів Е-типу нечисленний, і тільки ці два астероїди є доступними для поляризаційних спостережень на використовуваних нами телескопах. Окрім того, можливість спостереження астероїдів на гранично малих фазових кутах у край обмежена через те, що орбіти астероїдів нахилені до площини екліптики.

На цей час поляризаційні дані отримані тільки для 7 астероїдів Е-типу. Серед них 44 Ніза [30, 32–35, 37, 38], 64 Ангеліна [31, 32, 34], 214 Ашера [35–37], 1251 Гедера [37], 2867 Штейнс [37], 620 Драконія [36] і АЗЗ 33342 (1998 WT 24) [39]. Ці спостереження, окрім дуже неточних спостережень астероїда Драконії, наведено на рис. 3 разом з результатами нашої роботи.

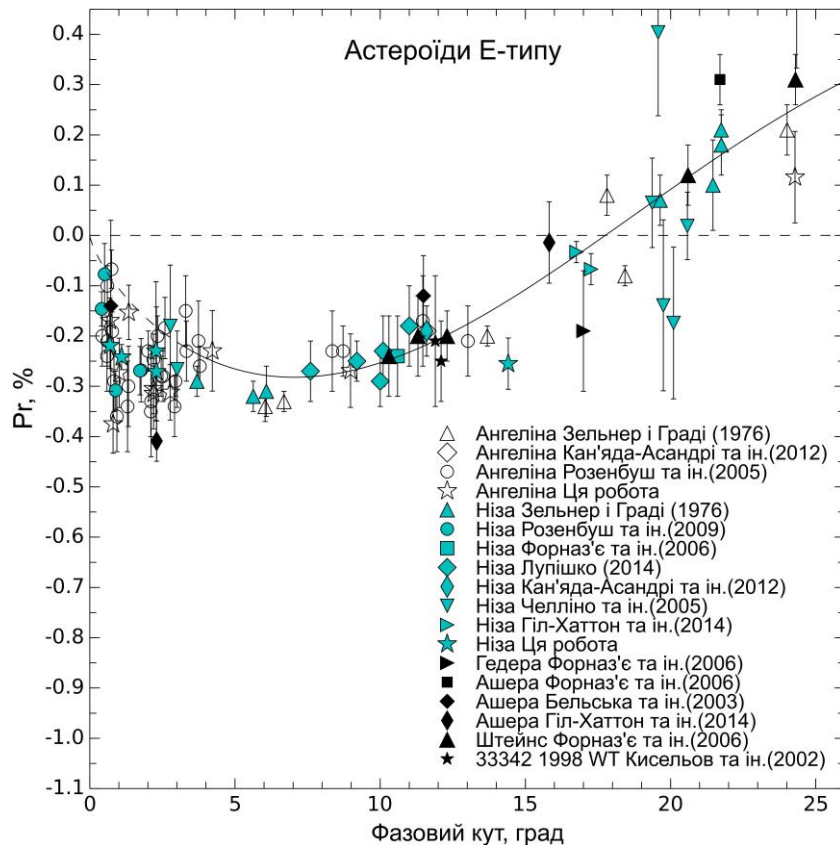


Рис. 3. Зведена фазова залежність поляризації високоальбедних астероїдів Е-типу: 44 Ніза [30, 32–35, 37, 38], 64 Ангеліна [31, 32, 34], 214 Ашера [35–37], 1251 Гедера [37], 2867 Штейнс [37] і АЗЗ 33342 [39].

Розділ 4. Поляриметричні спостереження галілеєвих супутників Юпітера та їх аналіз. У цьому розділі наводиться інформація про властивості галілеєвих супутників Юпітера і про попередні поляриметричні спостереження різних авторів. Відзначено обмеженість поляриметричних даних для широкого набору фазових довгот і фазових кутів та суперечливість результатів, отриманих різними авторами. Саме це стало причиною для продовження програми їх дослідження автором. Спостереження галілеєвих супутників Юпітера Іо, Європи, Ганімеда і Каллісто проводилися з червня 2007 р. до січня 2014 р. у спектральних смугах U, B, V, R, I. Результати спостережень представлено в дисертації у вигляді таблиць і рисунків (див. рис. 4).

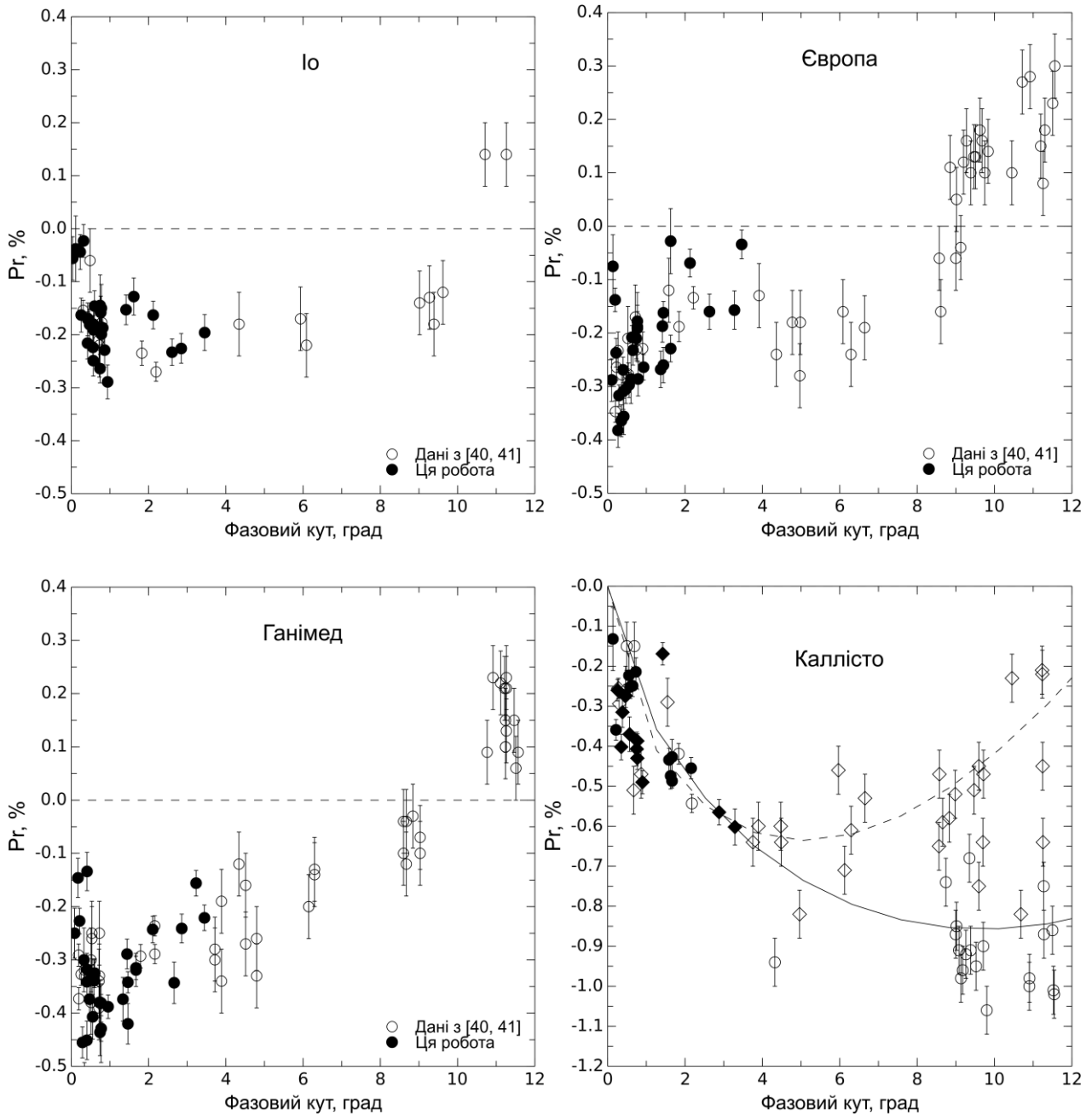


Рис. 4. Фазові залежності лінійної поляризації Іо, Європи, Ганімеда і Каллісто у спектральних смугах V і R за даними представленої роботи (закриті символи) і у спектральній смузі V за даними робіт [40, 41] (відкриті символи). Для Каллісто круглими символами позначено дані для ведучої півкулі, ромбами – для веденої, суцільна і пунктирна криві – апроксимації даних для ведучої і веденої півкулі.

Наші дані підтверджують поляриметричний опозиційний ефект для Іо – вузький мінімум від’ємної поляризації $P_{min,IOE} \approx -0.25\%$ на фазових кутах $\alpha < 1^\circ$. Регулярна фазова крива від’ємної поляризації виглядає пласкою. Розсіяння даних, що спостерігається для обох півкуль Іо у широкому діапазоні фазових кутів, може бути результатом локальних неоднорідностей поверхні

супутника (у тому числі альбедних варіацій, пов'язаних з його вулканічною активністю), які накладаються на глобальні відмінності поляриметричних властивостей ведучої і веденої півкуль.

Поляриметричний опозиційний ефект для Європи представлено вузьким вторинним мінімумом від'ємної поляризації з характеристиками $P_{min,ПОЕ} \approx -0.3\%$ на фазових кутах $\alpha < 1^\circ$. Форма фазової кривої від'ємної поляризації бімодальна з глибиною регулярної гілки $P_{min} \approx -0.2\%$ на $\alpha_{min} \approx 5^\circ$. Для Європи від'ємна поляризація випромінювання збільшується зі зменшенням фазового кута, починаючи приблизно з 2° , тоді як для Іо спостерігається різке збільшення поляризації з $\alpha \approx 1^\circ$.

Для Ганімеда фазова крива від'ємної поляризації має різко асиметричну форму. У діапазоні фазових кутів $0^\circ \leq \alpha \leq 1^\circ$ ступінь поляризації різко зменшується, досягаючи мінімуму від'ємної поляризації $P_{min,ПОЕ} \approx -0.4\%$. Далі, зі збільшенням фазового кута, ступінь поляризації поступово зменшується, досягаючи точки інверсії на $\alpha_{inv} \approx 10^\circ$.

Наші дані не показують наявності поляриметричного опозиційного ефекту для Каллісто, що підтверджує той факт, що ПОЕ проявляється тільки для високоальбедних об'єктів, як і передбачав Міщенко [45]. Для Каллісто спостерігається яскраво виражена довготна залежність поляризації, яка детально вивчена в роботі Розенбуш [46].

Підсумовуючи надану у розділі інформацію, варто зазначити, що форма фазових кривих від'ємної поляризації трьох супутників Іо, Європи і Ганімеда, які мають близькі за величинами альbedo, значно відрізняється. Це свідчить про те, що альbedo не є основною характеристикою поверхні БКТ. Різний мінералогічний склад поверхні – сполуки сірки, що надходять з діючих вулканів Іо, однорідна крижана поверхня Європи і поєднання мінеральної компоненти з крижаною для Ганімеда – є, напевно, причиною спостережуваної різноманітності форм фазових кривих від'ємної поляризації цих супутників.

Розділ 5. Поляриметричні спостереження вибраних високоальбедних супутників Сатурна та їх аналіз. Об'єктами досліджень були супутники Сатурна Япет, Енцелад, Рея і Діона. У першому підрозділі розглядаються результати поляриметричних спостережень Япета, який є найцікавішим об'єктом з точки зору дослідження і порівняльного аналізу особливостей фазових залежностей блиску та поляризації, зокрема фотометричного і поляриметричного опозиційних ефектів. Особливістю цього супутника є дуже велика різниця у значеннях альbedo його світлої веденої півкулі ($p_v = 0.5-0.6$) і темної ведучої півкулі ($p_v = 0.02-0.05$). На рис. 5 наведені результати поляриметричних спостережень автора, а також раніше отримані дані [42–44, 47, 48].

Можна відмітити, що характеристики і форма фазової кривої від'ємної поляризації дуже відрізняються для двох півкуль. Дані для темної ведучої півкулі (планетографічна довгота $0^\circ < L < 180^\circ$) краще описуються слабо асиметричною кривою з мінімумом фазової кривої від'ємної поляризації $P_{min} \approx -1.1\%$ на $\alpha_{min} \approx 5^\circ$.

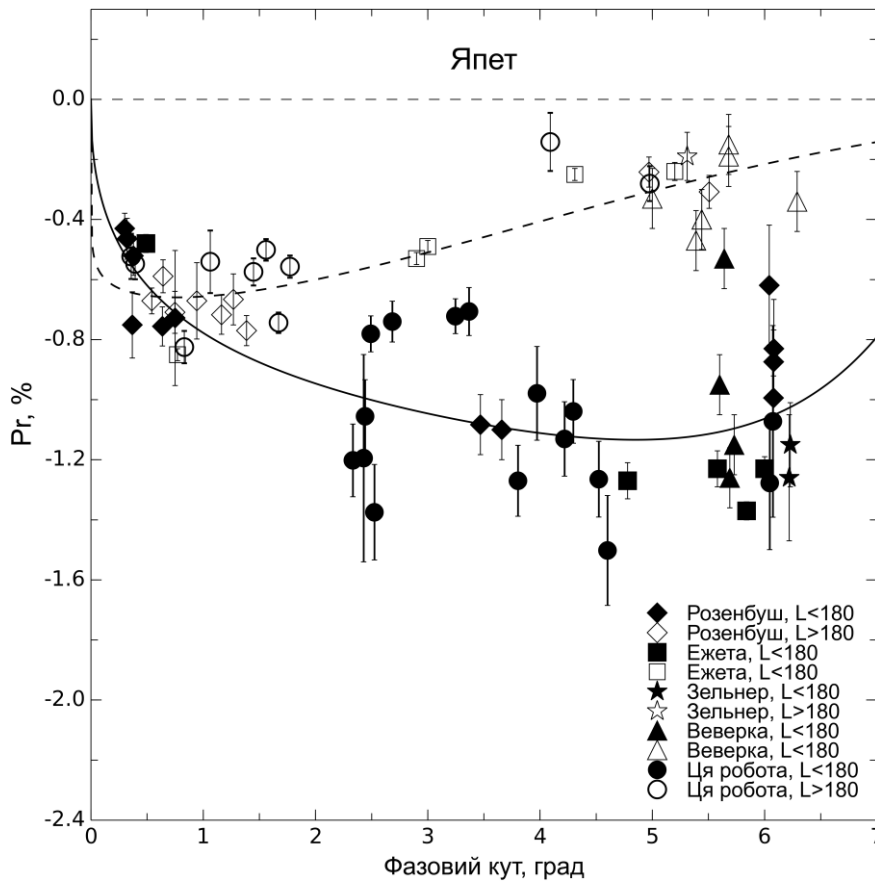


Рис. 5. Фазова залежність лінійної поляризації Япета. Круглі символи – спостереження, отримані автором, у фільтрах R і WR. Ромби – дані у фільтрі R, отримані Розенбуш та ін. [47], квадрати – дані Ежети та ін. [42–44] у фільтрі R, трикутники – дані з роботи Веверки [49] і зірочки – дані Зельнера у фільтрі V [50]. Суцільні символи відповідають даним для ведучої темної півкулі, а відкриті – даним для світлої веденої півкулі. Пунктирна і суцільна криві є апроксимацією даних для світлої (веденої) і темної (ведучої) півкуль відповідно.

Апроксимація даних для світлої веденої півкулі (планетографічна довгота $180^\circ < L < 360^\circ$) є більш асиметричною кривою. Як можна бачити, наші спостереження для світлої сторони Япета, отримані на 2.6-м телескопі КрАО, дуже добре узгоджуються з результатами спостережень на 8-м телескопі VLT Європейської Південної Обсерваторії (ESO) [42–44]. Для цієї півкулі глибина фазової кривої від'ємної поляризації в середньому складає $P_{min} \approx -0.7\%$, а сам мінімум досягається на $\alpha_{min} \approx 1^\circ$.

На рис. 6 наведено довготну залежність поляризації Япета, побудовану за відхиленнями значень лінійної поляризації на фазових кутах 3° – 7° від апроксимуючої кривої за даними для усіх довгот L . Довготна залежність поляризації апроксимована виразом $P = 0.105 + 0.116\cos L - 0.542\sin L + 0.063\cos 2L + 0.095\sin 2L$, отриманим за допомогою методу найменших квадратів. Максимум і мінімум поляризації досягаються на довготах $L \approx 105^\circ$ (ведуча темна півкуля) і $L \approx 255^\circ$ (ведена світла півкуля). У наведеній карті

розподілу альbedo по поверхні Япета в еквідистантній проекції, побудованій за допомогою мозаїк знімків Кассіні [51], довготи відповідають довготам на графіку. Як можна бачити, довготна залежність лінійної поляризації Япета узгоджується з довготним розподілом альbedo по поверхні супутника [51].

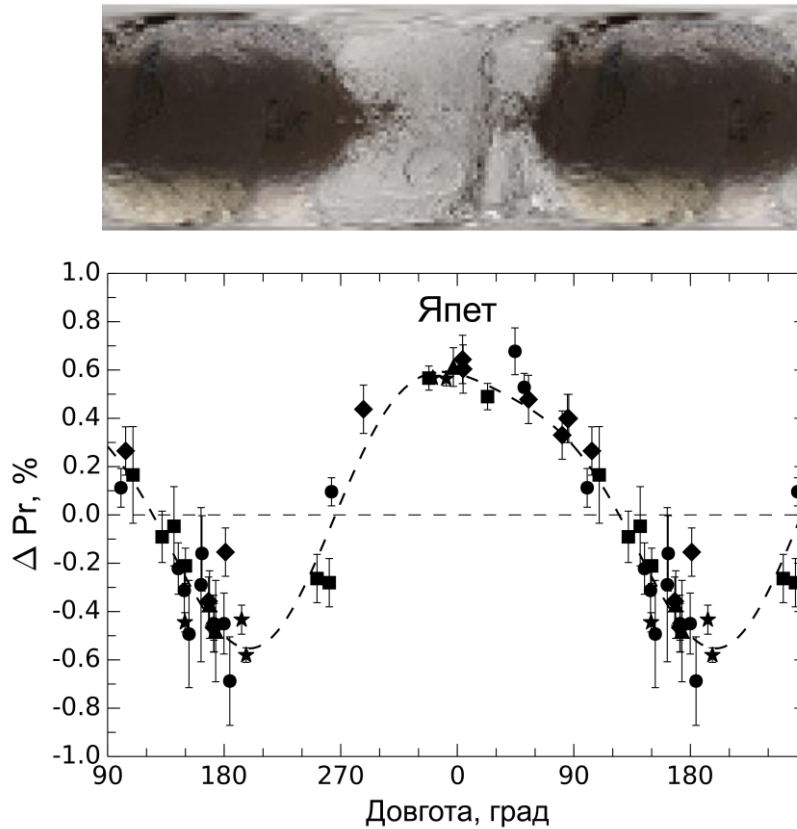


Рис. 6. Довготна залежність лінійної поляризації Япета у діапазоні фазових кутів 3° – 7° . Вгорі для порівняння надано карту розподілу альbedo по поверхні Япета в еквідистантній проекції [51]. Позначення такі ж, що і на рис. 5.

У другому підрозділі наведено результати поляриметричних спостережень Реї. Рея є другим за величиною супутником Сатурна і одним з високоальбедних безатмосферних тіл Сонячної системи (геометричне альbedo на довжині хвилі 510 нм – 0.81 [53]), що демонструють наявність фотометричного опозиційного ефекту. Незважаючи на стійкий інтерес до досліджень Реї, поляриметричних спостережень супутника проведено дуже мало [52]. Результати наших поляриметричних спостережень [2] наведено на рис. 7. Для порівняння відкритими символами нанесені результати поляриметричних спостережень Кулик [52] у спектральній смузі RX (ефективна довжина хвилі $\lambda = 694$ нм). Суцільною кривою показана апроксимація наших спостережень поляризації Реї тригонометричним виразом.

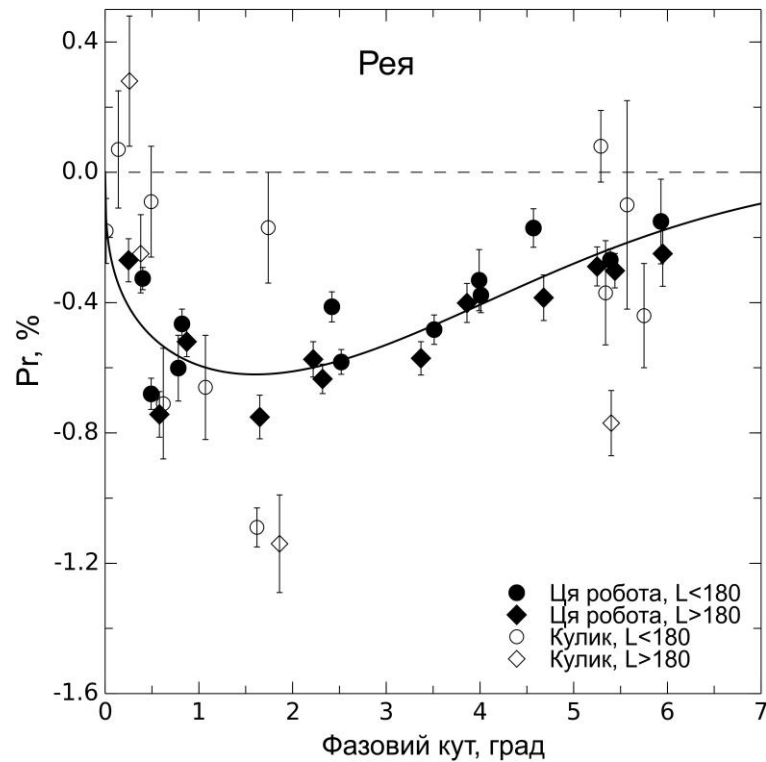


Рис. 7. Фазова залежність лінійної поляризації Reі. Круглими символами показано результати спостережень, отриманих для світлішої ведучої півкулі, а ромбами – для темнішої веденої півкулі. Заповнені символи – наші спостереження, відкриті символи – спостереження Кулик [52].

Отримані дані дозволяють стверджувати, що фазова залежність поляризації Reі має асиметричну форму з мінімумом поляризації $P_{min} \approx -0.6\%$ на фазовому куті $\alpha_{min} \approx 1.5^\circ$. Розкид результатів спостережень може бути обумовлений як похибками спостережень, так і довготною залежністю поляризації. Аналіз довготної залежності поляризації Reі, побудованої за відхиленнями спостережуваної поляризації від кривої апроксимації в діапазоні фазових кутів 4° – 6° , показав, що дані для ведучої півкулі ($L \approx 90^\circ$) лежать систематично вище (ступінь поляризації менший за абсолютною величиною), ніж для веденої ($L \approx 270^\circ$), що узгоджується з результатом Кулик [52] і з фотометричною відмінністю двох півкуль.

У **третьому підрозділі** наведено результати поляриметричних спостережень Енцелада. Супутник Сатурна Енцелад є унікальним об'єктом – геометричні альbedo його ведучої і веденої півкуль складають 1.00 і 1.06 відповідно на довжині хвилі 900 нм [53] і є найбільшими в Сонячній системі. Унікальність Енцелада полягає ще і в тому, що він проявляє кріовулканічну і тектонічну активність. Незважаючи на унікальні властивості Енцелада, поляриметричні спостереження супутника не проводилися. Ми надаємо результати перших поляриметричних спостережень Енцелада [5].

Фазову залежність поляризації розсіяного випромінювання Енцелада наведено на рис. 8. Заповненими круглими символами і ромбами показано дані для ведучої і веденої сторін супутника відповідно. Для порівняння відкритими

круглими символами і ромбами нанесені результати поляриметричних спостережень високоальбедного супутника Сатурна Реї в тій самій спектральній смузі [2] і дані лабораторних поляриметричних вимірів MgO (квадрати), виконаних Ліо [54]. Суцільна крива відповідає апроксимації наших спостережень поляризації Енцелада тригонометричним виразом. З рисунка видно, що фазова залежність поляризації випромінювання Енцелада має помітно асиметричну форму з мінімумом поляризації $P_{min} \approx -0.51\%$ на фазовому куті $\alpha_{min} \approx 2.4^\circ$.

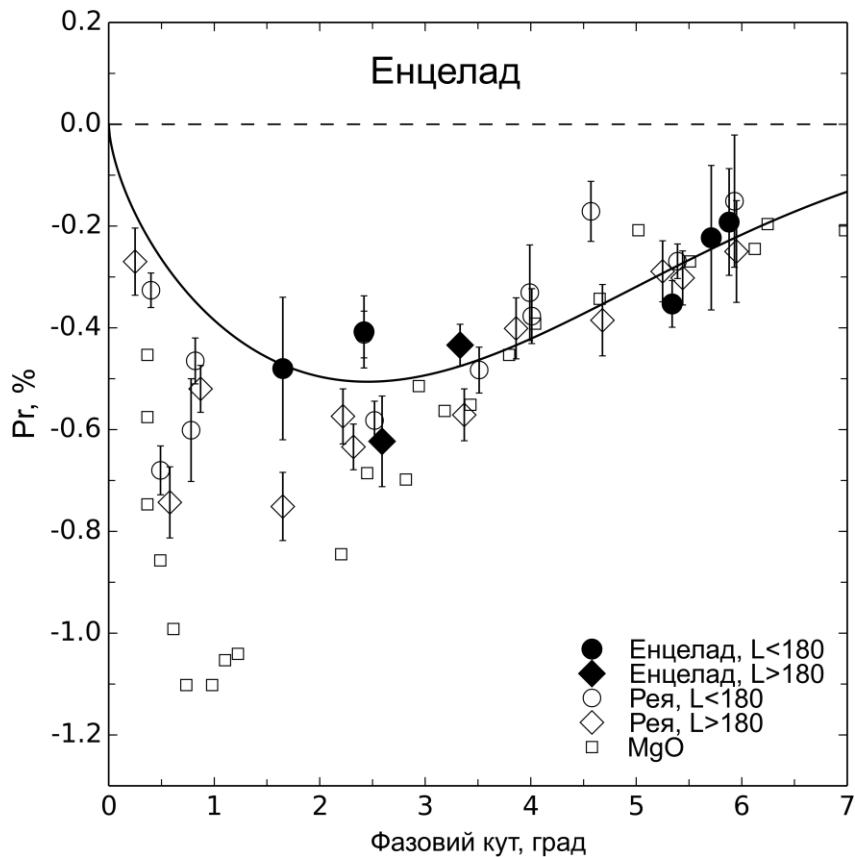


Рис 8. Фазові залежності лінійної поляризації випромінювання супутників Сатурна Енцелада (заповнені круглі символи і ромби), Реї (відкриті круглі символи і ромби) і MgO (квадрати).

Форма фазової залежності поляризації випромінювання Енцелада і її параметри дуже близькі до тих, які були виявлені для Реї ($P_{min} \approx -0.6\%$ і $\alpha_{min} \approx 2.2^\circ$). У той же час, згідно [53], геометричні альbedo ведучої і веденої сторони Реї дорівнюють 0.87 і 0.74 відповідно, що помітно відрізняється від альbedo Енцелада. Також фазова залежність поляризації випромінювання Енцелада сильно відрізняється від даних для MgO [54], альbedo якого є наближеним до альbedo супутника. Також було зроблено висновок, що Енцелад не має сильної довготної залежності поляризації.

У **четвертому підрозділі** наведено результати поляриметричних спостережень Діони. На рис. 9 наведено фазову залежність лінійної поляризації Діони і апроксимуючу її криву. Глибина фазової кривої від'ємної поляризації

для Діони більша, ніж для Реї і Енцелада. Її передбачувана величина досягає майже -0.7% на фазовому куті $\alpha \approx 1.6^\circ$. Глибина фазової кривої від'ємної поляризації Діони трохи більша, ніж для Реї, альbedo якої є наближеним до альbedo Діони.

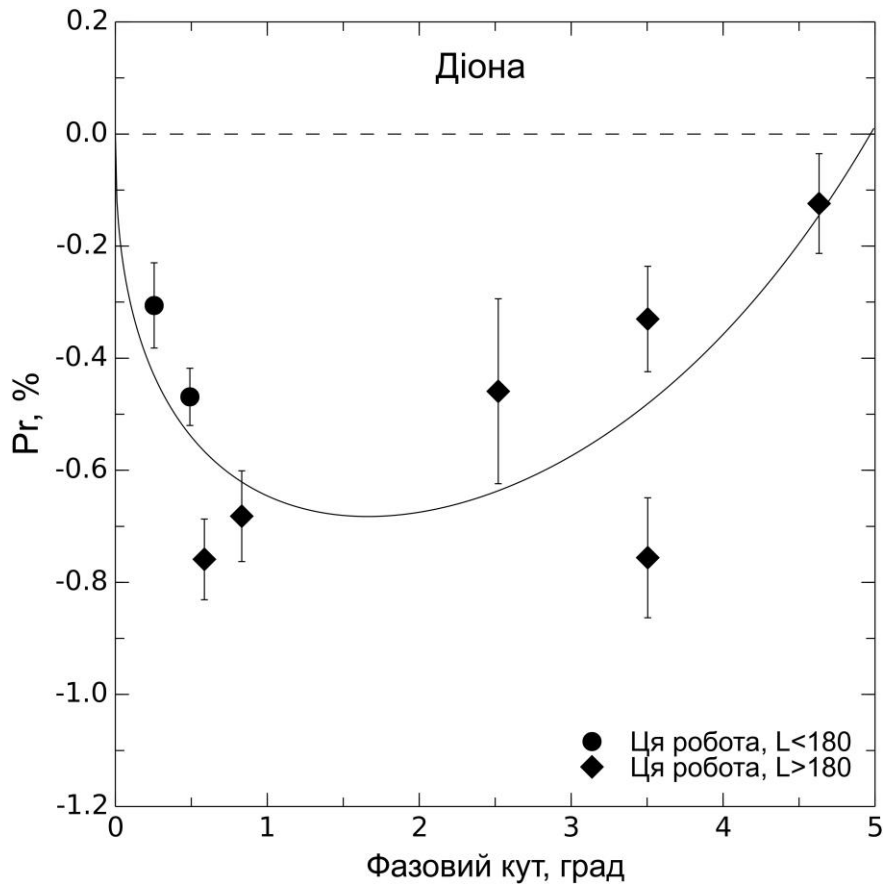


Рис. 9. Фазова залежність лінійної поляризації Діони. Круглі символи – дані для ведучої півкулі, ромби – дані для веденої півкулі.

У **підрозділі 5** наведено опис бази даних поляриметрії супутників планет [8]. Доступна версія каталогу включає 2460 вимірів поляризації супутників планет. Серед них 15 вимірів поляризації супутників Марса (Фобоса і Деймоса), 2318 вимірів п'яти супутників Юпітера (Іо, Європи, Ганімеда, Каллісто і Гімалії), 127 вимірів двох супутників Сатурна (Титана і Япета). Дані були зібрані з усіх доступних опублікованих джерел літератури і охоплюють результати спостережень, проведених з 1966 до 2012 рр. Базу даних описано в роботі [4], вона розміщена на сайті міжнародної бази планетних даних космічного агентства США NASA (NASA Planetary Data System) за електронною адресою <http://sbn.psi.edu/pds/resource/satpol.html> і доступна через INTERNET. Вона може бути використана для теоретичного моделювання, інтерпретації фазової і спектральної залежностей поляризації супутників планет, дослідження міжпланетного простору і вибору об'єктів для майбутніх космічних місій.

ВИСНОВКИ

Дисертація присвячена дослідженню поляризаційних характеристик випромінювання супутників Юпітера, Сатурна та астероїдів Е-типу, а також аналізу їх фізичних характеристик з метою дослідження фазових і довготних залежностей лінійної поляризації та спостережного підтвердження теоретичного висновку про те, що у випадку когерентного посилення зворотного розсіяння фотометричний опозиційний ефект повинен супроводжуватись поляризаційним опозиційним ефектом у вигляді вторинного мінімуму поляризації близько опозиції або асиметричної форми фазової кривої від'ємної поляризації з мінімумом на малих фазових кутах.

Для вирішення поставленої задачі був отриманий значний обсяг нових поляриметричних спостережних даних для високоальбедних астероїдів 44 Ніза і 64 Ангеліна, галілеєвих супутників Юпітера Іо, Європи, Ганімеда і Каллісто, а також супутників Сатурна Енцелада, Реї, Діони та Япета.

Основні результати дисертаційної роботи наступні:

1. Для астероїдів 44 Ніза і 64 Ангеліна підтверджено бімодальний вигляд фазової залежності поляризації, яка складається з регулярної фазової кривої від'ємної поляризації з параметрами $P_{min} \approx -0.27\%$ на $\alpha_{min} \approx 6.5^\circ$ і вторинного локального мінімуму близько опозиції ($P_{ПОЕ,min} \approx -0.35\%$, $\alpha_{ПОЕ,min} \approx 1.5^\circ$). Уточнено профілі ПОЕ для супутників Юпітера Іо, Європи і Ганімеда. Для Іо спостерігається ПОЕ у вигляді різкої зміни поляризації від 0% до -0.25% на $\alpha \approx 1^\circ$ і пласкої фазової кривої від'ємної поляризації. Для Європи спостерігається явно виражена бімодальна фазова залежність поляризації з параметрами для ПОЕ $P_{ПОЕ,min} \approx -0.3\%$, $\alpha_{ПОЕ,min} \approx 0.6^\circ$ і параметрами для регулярної ФЗП $P_{min} \approx -0.3\%$ і $\alpha_{min} \approx 5^\circ$. Для Ганімеда ФЗП має різко асиметричну форму з мінімумом поляризації $P_{min} \approx -0.4\%$ на $\alpha_{min} < 1^\circ$. Для середньоальбедного супутника Каллісто ПОЕ не спостерігається.

2. Вперше отримано ФЗП для високоальбедних крижаних супутників Сатурна Енцелада, Реї і Діони та визначено їх параметри: для Енцелада $P_{min} \approx -0.6\%$ на $\alpha_{min} \approx 2.4^\circ$; для Реї $P_{min} \approx -0.5\%$, $\alpha_{min} \approx 1.6^\circ$; для Діони $P_{min} \approx -0.7\%$, $\alpha_{min} \approx 1.6^\circ$. Виявлено довготну залежність поляризації з амплітудою $\sim 0.2\%$ для супутника Сатурна Реї. Для ведучої півкулі ($L \approx 90^\circ$) є характерним менший ступінь поляризації у порівнянні з веденою півкулею ($L \approx 270^\circ$), що свідчить про більш високе альbedo ведучої півкулі Реї. Довготна залежність поляризації Енцелада, ймовірно, є незначною, що свідчить про більш однорідний розподіл альbedo по його поверхні. Отримано детальні фазові і довготні залежності поляризації для світлої (веденої) і темної (ведучої) півкуль супутника Сатурна Япета, параметри яких є наступними: для світлої півкулі $P_{min} \approx -0.7\%$ на $\alpha_{min} \approx 1^\circ$; для темної півкулі $P_{min} \approx -1.1\%$ на $\alpha_{min} \approx 5^\circ$. Для опису довготної залежності поляризації Япета запропоновано емпіричний вираз.

3. Показано, що ФЗП для супутників Сатурна, які мають вигляд асиметричних кривих з мінімумом на малих фазових кутах, значно відрізняються за параметрами і формою від ФЗП для супутників Юпітера, що

може свідчити про відмінність фізичних характеристик часток поверхневого шару реголіту, таких як розмір, форма, показник заломлення, пористість.

4. Створено базу поляриметричних спостережень супутників планет, яка є складовою частиною міжнародної бази даних NASA Planetary Data System (<http://sbn.psi.edu/pds/resource/satpol.html>). Розроблено нове програмне забезпечення, необхідне для обробки результатів поляриметричних спостережень і створення пошукових карт, що показують конфігурацію супутників Юпітера, Сатурна і Урана. Отримано значний обсяг нових даних з поляриметричних спостережень високоальбедних астероїдів 44 Ніза і 64 Ангеліна, галілеєвих супутників Юпітера Іо, Європи, Ганімеда і Каллісто, а також супутників Сатурна Енцелада, Реї, Діони та Япета, на основі якого уточнено і встановлено нові властивості поляризованого випромінювання, розсіяного реголітними поверхнями цих малих безатмосферних тіл Сонячної системи, що є принципово важливим для розвитку модельних і теоретичних досліджень механізмів розсіяння світла і визначення фізичних характеристик цих та інших астрофізичних об'єктів.

ПУБЛІКАЦІ ОСНОВНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ

Публікації в спеціалізованих наукових фахових виданнях:

1. Зайцев С.В. Поляриметрия астероида Е-типа 64 Ангелина / Зайцев С.В., Киселев Н.Н., Розенбуш В.К., Колесников С.В., Антонюк К.А. // Кинематика и физика небесных тел. – 2014. – Т. 30, № 3. – С. 71–80.

2. Зайцев С.В. Поляриметрия спутника Сатурна Реи / С.В. Зайцев, Н.Н. Киселев, В.К. Розенбуш, С.В. Колесников // Кинематика и физика небесных тел. – 2015. – Т. 31, № 6. – С. 23–31.

3. Zaitsev S. Polarimetric observations of the Galilean satellites near opposition in 2011 / S.V. Zaitsev, N.N. Kiselev, V.K. Rosenbush, F.P. Velichko, S.V. Kolesnikov, K.A. Antonyuk, V.N. Psarev // Advances in Astronomy and Space Physics. – 2012. – Vol. 2. – P. 177–179.

4. Zaitsev S.V. Database of satellite polarimetry / S.V. Zaitsev, V.K. Rosenbush, N.N. Kiselev // Advances in Astronomy and Space Physics. – 2013. – V. 3. – P. 109–112.

5. Zaitsev S.V. Polarimetry of Saturnian satellite Enceladus / S. V. Zaitsev, N.N. Kiselev, V. K. Rosenbush, S.V. Kolesnikov, D.N. Shakhovskoy // Advances in Astronomy and Space Physics. – 2015. – V. 5. – P. 29–32.

6. Kiselev N. Polarimetry of the Galilean satellites and Jupiter near opposition / N. Kiselev, V. Rosenbush, F. Velichko, S. Zaitsev // Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer. – 2009. – V. 110, No. 14–16. – P. 1713–1718.

7. Zaitsev S. Polarimetry of Galilean satellites of Jupiter near opposition in 2012 – 2014 / S. Zaitsev, N. Kiselev, V. Rosenbush, F. Velichko, N. Kolesnikov // Вісник Київ. університету, Сер. Радіофізика та електроніка. – 2014. – Вип.1/2(20/21). – С. 49–51.

8. Zaitsev S. Polarimetry of planetary satellites V1.0 [Електронний ресурс] / S. Zaitsev, V. Rosenbush, N. Kiselev // NASA Planetary Data System – 2012. – Режим доступу до ресурсу: <http://sbn.psi.edu/pds/resource/satpol.html>

В тезах і матеріалах конференцій:

9. 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 // International Conference "The Solar System bodies: from optics to geology". Kharkiv, Ukraine – Book of Abstracts. – 26–29.05.2008. – P. 106–107.

10. Kiselev N.N. Polarimetry of the Galilean satellites and Jupiter near opposition / N.N. Kiselev, V.K. Rosenbush, F.P. Velichko, S.V. Zaitsev // International Conference "The Solar System bodies: from optics to geology". Kharkiv, Ukraine. – Book of Abstracts. – 26–29.05.2008. – P. 57–58.

11. Kiselev N.N. Polarimetry of the Galilean satellites and Jupiter near opposition / N.N. Kiselev, V.K. Rosenbush, F.P. Velichko, S.V. Zaitsev. Extended Abstract of the International Conference Eleven International Conference on Electromagnetic & Light Scattering. Hertfordshire, United Kingdom. – 07–12.09.2008. – P. 165–168.

12. Zaitsev S. Polarimetry of Iapetus near opposition / S.V. Zaitsev, N.N. Kiselev // 16th Open Young Scientists Conference on Astronomy and Space Physics. Kyiv, Ukraine. – Book of Abstracts. – 27.04–02.05.2009. – P. 32.

13. Zaitsev S. Polarimetry of Iapetus near opposition / S. Zaitsev // International Conference of Young Astronomers. Cracow, Poland. – Book of Abstracts. – 07–13.09.2009. – P. 32.

14. Zaitsev S. Polarimetry of Iapetus near opposition / S. Zaitsev, N. Kiselev // National Taras Shevchenko University. Proceedings of 16th Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics. – 2009. – P. 75–78.

15. Zaitsev S. The phase-angle and longitude dependence of polarization for Iapetus near opposition / S. Zaitsev // 17th Open Young Scientists Conference on Astronomy and Space Physics. Kyiv, Ukraine. – Book of Abstracts. – 26.04–01.05.2010. – P.19.

16. Zaitsev S. The phase-angle and longitude dependence of polarization for Iapetus near opposition / S. Zaitsev, N. Kiselev, V. Rosenbush // NATO Advanced Study Institute on Special Detection Technique (Polarimetry) and Remote Sensing. Kyiv, Ukraine. – Book of Abstracts. – 12–25.09.2010. – P. 120.

17. Kiselev N. Near-opposition polarimetry of small bodies of the Solar System with small telescopes / N. Kiselev, V. Rosenbush, S. Zaitsev, M. Mishchenko // International conference "Big Science with Small Telescopes: The role of 2-4m Telescopes in the ERA of the Large and Extremely Large Telescopes". In celebration of the 50th Anniversary of the Karl Schwarzschild Observatorium Tautenburg. Thuringia, Germany. – Book of Abstracts. – 19–22.10.2010. – P. 19.

18. Zaitsev S. Polarimetry of the Galilean satellites near opposition / S. Zaitsev, N. Kiselev, V. Rosenbush // 18th Open Young Scientists Conference on Astronomy and Space Physics. Kyiv, Ukraine. – Book of Abstracts. – 02–07.05.2011. – P. 29.

19. Зайцев С.В. Поляриметрія супутників Сатурна Япета і Енцелада / С.В. Зайцев // Міжнародна наукова конференція «Астрономічна школа молодих вчених». Чернігів, Україна. – Тези. – 12–14.05.2011. – С. 25.
20. Zaitsev S. Polarimetric observations of the Galilean satellites near opposition in 2011 / S. Zaitsev, N. Kiselev, V. Rosenbush, F. Velichko, S. Kolesnikov, K. Antonyuk // 19th Open Young Scientists Conference on Astronomy and Space Physics. Kyiv, Ukraine. – Book of Abstracts. – 23–28.04.2012. – P. 22.
21. Rosenbush V.K. Opposition Optical Phenomena in Solar System Bodies. Observational Results / V.K. Rosenbush, N.N. Kiselev, S.V. Zaitsev, V.L. Afanasiev, S.V. Kolesnikov, K.A. Antoniuk // Proceedings of the conference “Asteroids, Comets, Meteors 2012”. Niigata, Japan. – 16–20.05.2012. – No. 1667, id.6130. 2012.
22. Kiselev N. Diversity among the polarization opposition effects for high-albedo atmosphereless Solar System Bodies / N. Kiselev, V. Rosenbush, S. Zaitsev, S. Kolesnikov, F. Velichko, D. Shakhovskoy // The 6th Cosmic Dust Conference. Kobe, Japan. – Book of Abstracts. – 05–09.08.2013. – P. 54.
23. Kiselev N. N. On the polarization opposition effect for various high-albedo Solar System bodies / N.N. Kiselev, V.K. Rosenbush, S.V. Zaitsev, S.V. Kolesnikov, F.P. Velichko // The 14th Electromagnetic and Light Scattering Conference. Lille, France. – Book of Abstracts. – 17–21.06.2013. – P. 78.
24. Kiselev N. The polarization opposition effect for high-albedo asteroids and satellites of planets / N.N. Kiselev, V.R. Rosenbush, S.V. Zaitsev, F.P. Velichko, S.V. Kolesnikov, D.N. Shakhovskoy // IX International Conference “Electronics and Applied Physics”. Kyiv, Ukraine. – Book of Abstracts. – 23–26.10.2013. – P. 89.
25. Kiselev N. Similarity and diversity of the polarization opposition effects for high-albedo atmosphereless Solar System bodies / N. Kiselev, V. Rosenbush, S. Zaitsev, S. Kolesnikov, D. Shakhovskoy // The 15th Electromagnetic and Light Scattering Conference. Leipzig, Germany. – Book of Abstracts. – 21–27.06.2013. – P. 45.
26. Kiselev N. Polarimetric properties of icy moons of the outer planets / N. Kiselev, V. Rosenbush, S. Zaitsev, V. Afanasiev, S. Kolesnikov, D. Shakhovskoy // International conference “Radiation mechanisms of astrophysical objects: classics today”. St. Petersburg, Russia. – Book of Abstracts. – 21–25.09.2015. – P. 53.

СПИСОК ЦИТОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

27. Petrova E.V. Light scattering by morphologically complex objects and opposition effects (a review) / E.V. Petrova, V. P. Tishkovets // Solar System Research. – 2011. – Vol. 45, № 4. – P. 304–322.
28. Mishchenko M.I., Rosenbush V.K., Kiselev N.N., et al. Polarimetric Remote Sensing of Solar System Objects. – Kyiv: Akadempriodika, 2010. – 291 p.
29. Розенбуш В. К. Свойства рассеянного излучения малых тел Солнечной системы: дис. доктора физ.-мат. наук: 01.03.03 / Розенбуш Вера Калениковна. – Киев, 2006. – 350 с.

30. Rosenbush V. K. Polarization and brightness opposition effects for the E-type asteroid 44 Nysa / V. K. Rosenbush, V. G. Shevchenko, N.N. Kiselev et al. // *Icarus*. – 2009. – Vol. 201, N. 2. – P. 655–665.

31. Rosenbush V. K. Polarization and brightness opposition effects for the E-type asteroid 64 Angelina / V. K. Rosenbush, N. N. Kiselev, V. G. Shevchenko et al. // *Icarus*. – 2005. – Vol. 178, N. 2. – P. 222–234.

32. Zellner B. Minor planets and related objects. XX. Polarimetric evidence for the albedos and compositions of 94 asteroids / B. Zellner, J. Gradie // *Astron. J.* – 1976. – Vol. 81, № 4. – P. 262–280.

33. Cellino A. Asteroid polarimetric observations using the Torino UBVRI photopolarimeter / A. Cellino, R. Gil-Hutton R., M. di Martino et al. // *Icarus*. – 2005. – V. 179. – P. 304–324.

34. Cañada-Assandri M. Polarimetric survey of main-belt asteroids. III. Results for 33 X-type objects / M. Cañada-Assandri, R. Gil-Hutton, P. Benavidez // *Astronomy and Astrophysics*. – 2012. – V. 542. – P. A11.

35. Gil-Hutton R. Polarimetric survey of main-belt asteroids. IV. New results from the first epoch of the CASLEO survey / R. Gil-Hutton, A. Cellino, Ph. Bendjoya // *Astron. Astrophys.* – 2014. – Vol. 569. – P. A122.

36. Belskaya I. N. Opposition polarimetry and photometry of S- and E-type asteroids / I.N. Belskaya, V.G. Shevchenko, N.N. Kiselev et al. // *Icarus*. – 2003. – V. 166. – P. 276–284.

37. Fornasier S. Polarimetric survey of asteroids with the Asiago telescope / S. Fornasier, I. N. Betskaya, Yu. G. Shkuratov et al. // *Astronomy and Astrophysics*. – 2006. – V. 455. – P. 371–377.

38. Lupishko D. Asteroid Polarimetric Database V8.0. [Электронный ресурс] / D. Lupishko // NASA Planetary Data System. – 2014. – Режим доступа до ресурсу: <https://pds.nasa.gov/ds-view/pds/viewDataset.jsp?dsid=EAR-A-3-RDR-APD-POLARIMETRY-V8.0>

39. Kiselev N. N. Polarimetry of near-Earth asteroid 33342 (1998 WT24). Synthetic phase angle dependence of polarization for the E-type asteroids / N.N. Kiselev, V.K. Rosenbush, K. Jockers, et al. // *Proceedings of Asteroids, Comets, Meteors – ACM 2002* (B. Warmbein, ed.) – ESA SP–500. – Noordwijk, The Netherlands. – 2002. – P. 887–890.

40. Rosenbush V.K. Polarization properties of the Galilean satellites of Jupiter: Observations and preliminary analysis / V.K. Rosenbush, V.V. Avramchuk, A.E. Rosenbush, M.I. Mishchenko // *Astrophys. J.* – 1997. – Vol. 487. – P. 402–414.

41. Rosenbush V.K. Polarization opposition effect for the Galilean satellites of Jupiter / V.K. Rosenbush, N.N. Kiselev // *Icarus*. – 2005. – Vol. 179. – P. 490–496.

42. Ejeta C. Spectro-polarimetry of the bright side of Saturn's moon Iapetus / C. Ejeta, H. Boehnhardt, S. Bagnulo, G. P. Tozzi // *Astron. Astrophys.* – 2012. – Vol. 537. – P. A23.

43. Ejeta C. Polarization of Saturn's moon Iapetus. II. Comparison of the dark and the bright sides / C. Ejeta, H. Boehnhardt, S. Bagnulo, et al. // *Astron. Astrophys.* – 2013. – Vol. 549. – P. A61.

44. Ejeta C. Polarization of Saturn's moon Iapetus. III. Models of the bright and the dark sides / C. Ejeta, K. Muinonen, H. Boehnhardt, et al. // *Astron. Astrophys.* – 2013. – Vol. 554. – P. A117.

45. Mishchenko M.I. On the nature of the polarization opposition effect exhibited by Saturn's rings / M.I. Mishchenko // *Astrophys. J.* – 1993. – Vol. 411. – P. 351–361.

46. Rosenbush V.K. The phase-angle and longitude dependence of polarization for Callisto / V.K. Rosenbush // *Icarus.* – 2002. – Vol. 159. – P. 145–155.

47. Rosenbush V.K. Optical polarimetry of the Galilean satellites, Iapetus, and 64 Angelina near opposition / V.K. Rosenbush, N.N. Kiselev, K. Jockers, et al. // *Kinem. Phys. Cel. Bodies. Suppl. Ser.* – 2000. – Vol. 3. – P. 227–230.

48. Rosenbush V. Photometric and polarimetric phenomena exhibited by solar system bodies / V. Rosenbush, N. Kiselev, V. Avramchuk, M. Mishchenko // *Optics of cosmic dust* (G. Videen, M. Kocifaj, eds.) – Kluwer Acad. Publ., Dordrecht. – 2002. – P. 191–226.

49. Veverka J. Polarimetry of satellite surfaces. In: *Planetary satellites* (J. A. Burns, ed.), 210–230, University of Arizona Press, Tucson. – 1977. – P. 210–230.

50. Zellner B.H. On the nature of Iapetus / B.H. Zellner // *Astrophys. J.* – 1972. – Vol. 174. – P. L107–L109.

51. Albers S. [Електронний ресурс] – 2008. – Режим доступу до ресурсу: <http://laps.noaa.gov/albers/sos/saturn/iapetus/>.

52. Kulyk I. Brightness and polarization opposition effects at low phase angles of the Saturnian satellites Tethys, Dione, and Rhea // *Planet. Space Sci.* – 2012. – 73. – P. 407–424.

53. Pitman K. M. Disk-integrated bolometric bond albedos and rotational light curves of Saturnian satellites from Cassini visual and infrared mapping spectrometer / K. M. Pitman, B. J. Buratti, J. A. Mosher // *Icarus.* – 2010. – Vol. 206, N. 2. – P. 537–560.

54. Lyot B. Recherche sur la polarisation de la lumiere des planetes et de quelques substances terrestres / Lyot B. // *Ann. Obs. Meudon VIII.* – 1929. – Vol. 8, № 1. – P. 1–161. English translation NASA TT F-187. – 1964.

АНОТАЦІЯ

Зайцев С. В. Від'ємна поляризація розсіяного випромінювання вибраних безатмосферних тіл Сонячної системи. – 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, 2016.

Робота присвячена дослідженню поляризаційних характеристик випромінювання супутників Юпітера, Сатурна та астероїдів E-типу, а також аналізу їхніх фізичних характеристик.

Підтверджено поляризаційні опозиційні ефекти у вигляді вторинних мінімумів від'ємної поляризації близько опозиції у супутників Юпітера Іо, Європи, астероїдів 44 Ніза і 64 Ангеліна, а також поляризаційний опозиційний ефект у вигляді асиметричної фазової кривої від'ємної поляризації Ганімеда і у веденої півкулі супутника Сатурна Япета. Показано, що у середньоальбедного супутника Каллісто і низькоальбедної ведучої півкулі Япета поляризаційний опозиційний ефект відсутній. Вперше отримано високоточні фазові залежності поляризації відбитого світла супутників Сатурна Енцелада, Реї і Діони та визначено їх параметри. Отримано довготні залежності поляризації Реї і Япета, які відповідають розподілу альbedo по поверхні цих супутників. Виявлено, що фазові залежності поляризації для супутників Сатурна, які спостерігаються у вигляді асиметричних кривих з мінімумом на малих фазових кутах, значно відрізняються за параметрами і формою від фазових залежностей поляризації для супутників Юпітера, що може свідчити про стратифікацію поляриметричних властивостей об'єктів Сонячної системи з віддаленням від Сонця. Створено базу поляриметричних даних супутників планет, що є частиною міжнародної бази даних NASA Planetary Data System. Розроблено програмне забезпечення, необхідне для обробки результатів поляриметричних спостережень і створення пошукових карт, що показують конфігурацію супутників Юпітера, Сатурна і Урана.

Ключові слова: супутники планет, астероїди, фазова залежність поляризації, фотометричний і поляриметричний опозиційні ефекти, альbedo, поляриметрия.

АННОТАЦИЯ

Зайцев С.В. Отрицательная поляризация рассеянного излучения избранных безатмосферных тел Солнечной системы. – 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, 2016.

Работа посвящена исследованию поляризационных характеристик излучения избранных высокоальбедных спутников Юпитера, Сатурна и астероидов E-типа в области оппозиции, а также анализу их физических характеристик. С этой целью в 2007–2015 годах на 1.25-м, 2.6-м и 1-м телескопах Крымской астрофизической обсерватории (КрАО) и 0.7-м рефлекторе АЗТ-8 Чугуевской наблюдательной станции НИИ астрономии Харьковского национального университета имени В.Н. Каразина был получен обширный наблюдательный материал. На основе анализа полученного обширного объема поляриметрических наблюдений сделаны выводы о поляризационных характеристиках излучения, рассеянного поверхностями избранных высокоальбедных спутников систем Юпитера и Сатурна и астероидов.

В диссертации подведены итоги многолетних поляриметрических исследований высокоальбедных спутников планет и астероидов, выполненных как в Главной астрономической обсерватории НАН Украины, так и за рубежом. Уточнены и установлены новые свойства поляризованного излучения, рассеянного реголитовыми поверхностями малых безатмосферных тел Солнечной системы, что принципиально важно для развития модельных и теоретических исследований механизмов рассеяния света и определения физических характеристик пыли этих и других астрофизических объектов.

Подтверждены поляризационные оппозиционные эффекты в виде вторичных минимумов отрицательной поляризации вблизи оппозиции у спутников Юпитера Ио, Европы, астероидов 44 Низа и 64 Ангелина, а также поляризационный оппозиционный эффект в виде асимметричной фазовой кривой отрицательной поляризации Ганимеда и ведомого полушария спутника Сатурна Япета. Показано, что у среднеальбедного спутника Каллисто и низкоальбедного ведущего полушария Япета поляризационный оппозиционный эффект отсутствует.

Впервые получены точные фазовые зависимости поляризации отраженного света спутников Сатурна Энцелада, Реи и Дионы и определены их параметры. Обнаружена долготная зависимость поляризации Реи. Для ведущего полушария характерна меньшая степень поляризации по сравнению с ведомым полушарием, что свидетельствует о более высоком альбедо ведущего полушария спутника Реи.

Обнаружено, что фазовые зависимости поляризации высокоальбедных спутников Сатурна, которые наблюдаются в виде асимметричных кривых с минимумом на малых фазовых углах, значительно отличаются по параметрам и форме от фазовых зависимостей поляризации высокоальбедных спутников Юпитера, что может свидетельствовать о стратификации поляриметрических свойств объектов Солнечной системы с удалением от Солнца.

Была создана база поляриметрических данных спутников планет, являющаяся частью международной базы данных NASA Planetary Data System. Для финальной обработки наблюдений, полученных с помощью фотоэлектрического фотометра-поляриметра 2.6-м телескопа КрАО разработано программное обеспечение, позволяющее в интерактивном режиме визуализировать, редактировать и аппроксимировать значения интенсивности фона неба и наблюдаемого объекта, удалять выбросы в значениях интенсивности объекта или полученных индивидуальных значениях поляризации, а также учитывать инструментальную поляризацию. Для создания поисковых карт разработано программное обеспечение, показывающее конфигурацию спутников Юпитера, Сатурна и Урана.

Ключевые слова: спутники планет, астероиды, фазовая зависимость поляризации, фотометрический и поляриметрический оппозиционные эффекты, альбедо, поляриметрия.

ANNOTATION

Zaitsev S.V. The negative polarization of the scattered radiation of selected atmosphereless Solar System bodies. – Manuscript.

Thesis for a PhD degree by the specialty 01.03.03 – Heliophysics and physics of the Solar System. – The Main Astronomical Observatory of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2016.

The work is devoted to investigation of the polarization characteristics of radiation satellites of Jupiter, Saturn and E-type asteroids and analysis of their physical characteristics. Polarization opposition effect in a form of narrow secondary minimum of negative polarization at small phase angles was confirmed for Jupiter's moons Io, Europa, asteroids 44 Nysa and 64 Angelina. Polarization opposition effect in a form of asymmetrical negative polarization branch was confirmed for Jupiter's moon Ganymede and trailing hemisphere of Saturn's moon Iapetus. It was shown that polarization opposition effect is absent for moderate-albedo satellite Callisto and leading hemisphere of Saturn's moon Iapetus. Phase dependences of polarization of Saturn's Enceladus, Dione and Rhea were obtained. Iapetus and Rhea show longitude dependences of polarization which are in agreement with distribution of albedo over their surfaces. It was shown that phase dependences of polarization for satellites of Saturn were observed in the form of asymmetric curve with a minimum at low phase angles, and their form and parameters differ on ones for Jupiter's moons. It may indicate stratification of polarimetric properties of objects in the solar system with distance from the sun. We have compiled the database of planetary satellite polarimetry which is a part of an international database of NASA Planetary Data System. The software required for processing the results of polarimetric observations search and creating maps of the configuration of the satellites of Jupiter, Saturn and Uranus was developed.

Key words: planetary satellites, asteroids, the phase dependence of the polarization, photometrical and polarization opposition effects, albedo, polarimetry.