

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ГОЛОВНА АСТРОНОМІЧНА ОБСЕРВАТОРІЯ

Шубіна Олена Сергіївна

УДК 523.6

**ОСОБЛИВОСТІ КОРОТКОПЕРІОДИЧНИХ ТА  
ДОВГОПЕРІОДИЧНИХ КОМЕТ НА ОСНОВІ  
ДАНИХ ПОЛЯРИМЕТРИЧНИХ ТА  
СПЕКТРАЛЬНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ**

01.03.03 – Геліофізика і фізика Сонячної системи

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата фізико-математичних наук

Київ – 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Головній астрономічній обсерваторії НАН України.

**Науковий керівник:** кандидат фізико-математичних наук,  
старший дослідник  
**Іванова Олександра Вікторівна,**  
Головна астрономічна обсерваторія НАН України,  
старший науковий співробітник.

**Офіційні опоненти:** доктор фізико-математичних наук,  
старший науковий співробітник  
**Бельська Ірина Миколаївна,**  
НДІ астрономії Харківського національного  
університету імені В. Н. Каразіна МОН України,  
завідувач відділу фізики астероїдів і комет;

кандидат фізико-математичних наук  
**Решетник Володимир Миколайович,**  
Київський національний університет  
імені Тараса Шевченка,  
доцент кафедри астрономії та фізики космосу.

Захист відбудеться “15” листопада 2019 р. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.208.01 при Головній астрономічній обсерваторії НАН України за адресою: м. Київ, 03143, вул. Академіка Заболотного, 27, ГАО НАН України.

Початок засідань о 10 годині.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці ГАО НАН України за адресою: м. Київ, 03143, вул. Академіка Заболотного, 27, ГАО НАН України.

Автореферат розіслано “10” жовтня 2019 р.

Вчений секретар  
Спеціалізованої вченої ради  
кандидат фізико-математичних наук

І. Е. Васильєва

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Дослідження комет є важливим з різних точок зору, зокрема космогонії Сонячної системи, походження та еволюції малих тіл, виникнення життя на Землі та кометно-астероїдної безпеки нашої планети. Актуальними питаннями у сучасній фізиці комет лишаються встановлення характеристик пилових частинок (хімічний склад, структура, форма, орієнтація) та їх зміна із віддаленням від ядра у комах та хвостах як довгоперіодичних і динамічно нових комет, так і короткоперіодичних комет, ядра яких зазнали значних еволюційних змін. Також досить активно обговорюється питання про природу пилу в кометах, активних за орбітою Юпітера, яка може відрізнятися від природи пилу в кометах, активних на близьких відстанях від Сонця.

Кометний пил являє собою мінливу сукушність частинок. Властивості самих пилинок змінюються із відстанню від ядра. Пил у кометній комі не обов'язково є ідентичним пилові у струменях (джетях), оболонках та інших структурних утвореннях коми. Зміни у складі частинок можуть бути результатом селективної сублімації або фрагментації (руйнування) пилових зерен, наприклад сублімації льоду або випаровування/фрагментації органічної речовини. Це може також бути результатом хімічних реакцій, які змінюють оптичні властивості матеріалу, з якого складаються пилові частинки.

Історично першими були фотометричні дослідження комет, але вони не втратили свою актуальність і на сьогоднішній день. Спостерегаючи комети за допомогою різних фільтрів, можна отримати інформацію про властивості пилової складової, виявити активність на кометі, зробити певні висновки про фізичні параметри самого ядра, наприклад розмір чи альbedo поверхні.

Вивчення властивостей розсіяного кометними пилинками світла на сьогоднішній день є важливою та актуальною задачею, необхідною для розуміння як фізичних властивостей розсіюючого середовища та фізики комет у цілому, так і самих механізмів розсіяння світла та його моделювання. Для дослідження цієї проблеми одним із ефективних методів є поляриметрія, яка чутливо реагує на незначні зміни характеристик частинок.

Спектральні дослідження комет надають не менш важливу інформацію про хімічний склад кометних атмосфер. Це є ключовим моментом у вивченні речовини, з якої складаються комети зараз, та речовини, з якої вони формувалися на етапі створення Сонячної системи. У видимому діапазоні довжин хвиль у кометних спектрах спостерігаються так звані дочірні молекули. Ідентифікація спостереженого емісійного випромінювання молекул та визначення темпу їх продукування дозволяють робити висновки про те, які батьківські молекули містяться у ядрі комети, а отже, з яких речовин воно формувалося, та які були умови і властивості оточуючого середовища.

Отже, у світлі сказаного вище, застосування поляриметричних, спектральних і фотометричних методів є актуальним для сучасної кометної

науки, а результати, отримані з їх використанням у дисертаційному дослідженні, мають велике значення для більш глибокого розуміння фізики комет та застосування у теоретичному моделюванні процесів, які проходять в ядрах та атмосферах комет.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дослідження, представлені у дисертаційній роботі, виконувалися під час навчання в бакалавратурі та магістратурі на кафедрі астрономії та фізики космосу Київського національного університету імені Тараса Шевченка та були продовжені під час навчання в аспірантурі у лабораторії фізики малих тіл Сонячної системи Головної астрономічної обсерваторії НАН України. Робота виконувалася в межах наукової теми “Фізичні характеристики комет, астероїдів та супутників планет за дослідженнями в оптичній ділянці спектра”, шифр 1.4.9.2/1.5.1-334В, номер держреєстрації 0113U006608, 2014–2018 рр. У зазначеній темі авторка брала участь як виконавець. Частина роботи виконувалася у межах Національної стипендіальної програми Словацької республіки, за фінансової підтримки якої авторка протягом трьох місяців (червень–серпень 2017 року) проходила стажування в Астрономічному інституті Словацької академії наук. Частина дослідження виконана у межах спільного україно-словацького дослідницького проекту 2017–2019 рр.

**Мета і задачі дослідження.** Мета дисертаційної роботи полягає у дослідженні фізичних властивостей газової та пилової складових ком вибраних комет різних динамічних груп на основі спектральних, поляриметричних та фотометричних спостережень. Для її досягнення було поставлено такі задачі:

- оновити існуючу базу даних апертурної поляриметрії комет, доповнивши її результатами спостережень за останні роки;
- проаналізувати фазову залежність ступеня лінійної поляризації у різних спектральних діапазонах у залежності від динамічного класу комет;
- провести детальний аналіз спектральних, фотометричних та поляриметричних спостережень вибраних комет;
- провести ототожнення емісійних смуг та ліній в отриманих спектрах вибраних комет з метою визначення хімічного складу коми і пошуку нових емісій;
- розрахувати газопродуктивність, колір та нормований градієнт відбивної здатності пилу та інші фізичні параметри атмосфер вибраних комет;

- дослідити вплив газових емісій на поляризацію розсіяного випромінювання комет з низьким рівнем континууму на великих фазових кутах, де цей ефект найбільше проявляється;
- дослідити варіації кольору пилу у вибраних кометах.

*Об'єкт дослідження:* короткоперіодичні та довгоперіодичні комети.

*Предмет дослідження:* властивості газової та пилової складових ком вибраних комет.

*Методи дослідження:* поляриметричні, фотометричні, спектральні, узагальнення результатів, порівняльний аналіз отриманих даних.

### **Наукова новизна отриманих результатів.**

1. Оновлено Базу даних кометної поляриметрії із доповненням її майже однією тисячею нових спостережень. Нова База розміщена у Міжнародній базі даних NASA “Planetary Data System” (<https://pdssbn.astro.umd.edu/holdings/pds4-compil-comet:polarimetry-v1.0/SUPPORT/dataset.html>).
2. Вперше на основі строгої вибірки із оновленої Базы даних DBCP V2.0 побудовано і проаналізовано фазові залежності ступеня лінійної поляризації та пораховано їх параметри для вибраних груп комет з використанням майже 500 вимірювань лінійної поляризації розсіяного випромінювання 34 довгоперіодичних та короткоперіодичних комет.
3. Ґрунтуючись на побудованому розподілі ступеня лінійної поляризації по комі комети 2P/Encke, показано, що на величину спостережної поляризації впливають і співвідношення пилу до газу, і реальні зміни властивостей пилинок після вильоту із ядра. Також показано, що врахування впливу газових емісій значно збільшує ступінь поляризації комети.
4. Для комети C/2012 J1 (Catalina) вперше побудовано карти розподілу ступеня лінійної поляризації по комі та визначено темпи продукування вибраних молекул і спектрофотометричний градієнт.
5. Вперше виявлено, що показник кольору пилу в кометі C/2013 UQ4 (Catalina) зазнавав значних короткострокових варіацій.
6. Досліджено розподіл енергії в спектрах комет 2P/Encke (дві появи), 103P/Hartley 2, C/2009 P1 (Garradd), C/2004 Q2 (Machholz) і C/2012 J1 (Catalina), створено список ототожнених емісій та визначено швидкості продукування ряду молекул.

**Практичне значення одержаних результатів.** Нова база даних поляриметрії комет, яка розміщена у Міжнародній базі даних NASA “Planetary

Data System”, може бути спостережною основою для розвитку теорії розсіювання світла, чисельного моделювання, визначення фізичних властивостей пилу в атмосферах комет, класифікації комет і вибору майбутніх цілей космічних місій. Визначені у роботі параметри фазових залежностей поляризації можуть бути використані для отримання фізичних характеристик кометного пилу (альbedo, розмір, пористість, показник заломлення пилових частинок), а також при моделюванні хімічного складу пилових зерен. Створені карти розподілу величини поляризації по комі комети можна використовувати не тільки для дослідження розсіювальних властивостей пилюнок у кометних атмосферах, але і при побудові теоретичних моделей еволюції пилюнок із віддаленням від кометного ядра.

Ґрунтуючись на отриманих у цій роботі ступені лінійної поляризації і спектральному градієнті відбивної здатності пилу, автори [27], застосувавши методи чисельного моделювання, встановили, що відтворити спостережені результати для коми комети C/2012 J1 (Catalina) можна, використовуючи речовину з показником заломлення  $m = 1.6 + 0.03i$ . Це відповідає збагаченням магнієм силікатам з невеликим вмістом аморфного вуглецю [27].

Дослідження подібності й відмінності розсіюючих властивостей пилу комет різних динамічних груп, отриманих поляриметричними методами, можуть бути використані для розуміння впливу місця походження і/або еволюції комети на їх фізичні характеристики.

Отримані величини швидкості продукування газу і пилу дозволяють вивчати рівень активності комети зі зміною геліоцентричної відстані.

**Достовірність та обґрунтованість результатів досліджень.** Результати роботи опубліковано у фахових реферованих журналах та апробовано на міжнародних наукових конференціях.

**Особистий внесок здобувача.** У роботі [1] авторка брала участь в обробці спостережень, ототожненні молекулярних емісій у спектрі, написанні статті.

У роботі [2] авторка брала участь у фотометричних спостереженнях, разом зі співавторами проводила обробку отриманих зображень, розраховувала значення параметра  $Af\rho$ , який характеризує темп виробництва пилу ядром комети, та брала участь у оформленні статті.

У роботі [3] авторка виконала первинну обробку отриманих спектрів комети, провела виділення емісійної складової та ототожнення молекулярного складу. Провела порівняльний аналіз отриманих співавторами величин газопродуктивності з існуючими в літературі та брала участь у написанні статті.

У роботі [4] авторка виконала обробку отриманих співавторами поляриметричних і спектральних зображень комети. Порахувала ступінь лінійної поляризації та позиційний кут площини поляризації, на основі чого було побудовано карти розподілу зазначених параметрів поляризації по комі комети. Дисертантка провела аналіз спектральних спостережень: виконала

первинну обробку спектрів, виділила емісійний спектр, ототожнила молекулярні емісії, розрахувала темп продукування молекул CN. Брала участь у написанні статті.

У роботі [5] авторка приймала участь у обробці та обговоренні результатів.

У роботі [6] авторка провела первинну обробку отриманих співавторами спектральних спостережень, виділила емісійний спектр, проаналізувала розподіл енергії у неперервному спектрі, ототожнила молекулярні емісії, розрахувала темп продукування окремих молекул за допомогою моделі Хазера, параметр  $Af\rho$  і нормований спектральний градієнт відбивної здатності пилу та писала текст статті.

У роботі [7] авторка на основі першої версії Бази даних кометної поліариметрії [32] створила другу версію Бази, DVCP V2.0. Для цього авторка перевірила наявні у Базі спостережні дані та доповнила їх усіма наявними в літературі новими вимірюваннями лінійної та кругової поляризації, створила програмне забезпечення для роботи з Basisю.

**Апробація результатів дисертації.** Результати, представлені у дисертаційній роботі, доповідалися та обговорювалися на наступних міжнародних конференціях:

- XIX–XXV Міжнародні конференції молодих вчених з астрономії та фізики космосу, Київський національний університет імені Тараса Шевченка, 2012–2018 рр., Київ, Україна;
- V Міжнародна астрономічна конференція “Astrophisica Nova”, 2013 р., Ченстохова, Польща;
- XXIII Щорічна міжнародна студентська конференція “Week of Doctoral Students”, 2014 р., Прага, Чеська республіка;
- VII–VIII Міжнародні конференції пам’яті Б. Т. Бабія “Вибрані питання астрономії та астрофізики”, 2014, 2016 рр., Львів, Україна;
- V міжнародна літня школа в Бюракані, присвячена 70-річчю Бюраканської астрофізичної обсерваторії, 2016 р., Бюракан, Вірменія;
- Міжнародні конференції “Астрономія та фізика космосу в Київському національному університеті імені Тараса Шевченка”, 2017–2018 рр., Київ, Україна;
- Міжнародна кометна робоча група 2017 “Comet formation paradigm after Rosetta. What is the hallmark of cometary nuclei formation in protoplanetary discs inherited from Rosetta?”, 2017 р., Софія, Болгарія;
- Літня школа Europlanet 2017 “Space missions: ground-based observations and science communication”, 2017 р., Молетайська астрономічна

обсерваторія Інституту теоретичної фізики та астрономії Вільнюського університету, Молетай, Литва;

- VIII міжнародний симпозіум у Москві з досліджень Сонячної системи, 2017 р., Москва, Російська Федерація;
- Міжнародна робоча група “Physics of comets after the Rosetta mission: Unsolved problems”, 2018 р., Стара Лесна, Словачька республіка.

Результати роботи також були представлені та обговорені на наукових семінарах Головної астрономічної обсерваторії НАН України та Астрономічного інституту Словачької академії наук.

**Публікації.** Результати дисертаційної роботи опубліковано у 6 статтях у реферованих фахових журналах [1–6], в одній Базі даних [7] та у 12 тезах міжнародних конференцій [8–19].

**Структура дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку літератури та п'яти додатків. Загальний обсяг тексту роботи становить 143 сторінки. Текст роботи містить 15 таблиць, 27 рисунків та 156 найменувань у списку використаних джерел.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**Вступ.** У вступі обґрунтовано актуальність теми дослідження, визначено мету та основні задачі, описано методи, які необхідні для розв'язання поставлених завдань, а також вказано наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, відмічено особистий внесок дисертантки і рівень апробації результатів.

**Розділ 1. “Апаратура, методика спостережень та редукція даних”.** У розділі подано інформацію про технічні характеристики обладнання, на якому було отримано поляриметричні спостереження комет C/2012 J1 (Catalina) і 2P/Encke, спектральні спостереження комет 2P/Encke, 103P/Hartley 2, C/2004 Q2 (Machholz), C/2009 P1 (Garradd) і C/2012 J1 (Catalina), фотометричні спостереження комет 103P/Hartley 2 і C/2013 UQ4 (Catalina). Зазначені комети спостерігалися на різних телескопах Спеціальної астрофізичної обсерваторії Російської академії наук (Карачаєво-Черкеська Республіка, Російська Федерація), Андрушівської астрономічної обсерваторії “Липневий ранок” (Житомирська обл., Україна), обсерваторії на Скальнатову Плесі (Астрономічний інститут Словачької академії наук, Словаччина) і обсерваторії Siding Spring (Австралія). У розділі указано параметри цих телескопів та деякі характеристики використаних для спостережень приладів, наприклад приймачів випромінювання, фільтрів, ґраток.



У підрозділах 1.1, 1.2 і 1.3 розділу 1 на прикладі вибраних комет описано первинну обробку отриманих поляриметричних, спектральних і фотометричних спостережень відповідно. Вона включає віднімання кадрів електронного зміщення та темнового струму і корекцію за плоске поле. Також описано послідовність дій та особливості обробки окремо для кожного із використаних методів (поляриметрії, спектроскопії і фотометрії), яких дотримувалася авторка для отримання результуючих поляриметричних зображень, одновимірних спектрів та кінцевих фотометричних зображень комет, що використовувалися безпосередньо для аналізу.

Окрім послідовності обробки спостережень, розділ 1 містить алгоритми отримання деяких фізичних параметрів кометної коми. Наведено основні формули для розрахунку газопродуктивності вибраних молекул за моделлю Хазера [25] зі спектрів комет. Також подано формули для оцінки відносної продуктивності пилу (параметр  $Af\rho$ ) на основі спектральних і фотометричних спостережень. Нормований градієнт відбивної здатності у дисертаційній роботі було отримано як зі спектральних, так і з фотометричних спостережень, відповідні формули указані для обох випадків. У поляриметричних дослідженнях були використані модифіковані формули Фесенкова, за якими було знайдено величину ступеня лінійної поляризації та значення кута повороту площини поляризації.

У **Розділі 2 “База даних кометної поляриметрії”** подано опис оновленої електронної Бази даних кометної поляриметрії, її порівняння із попередньою версією та проаналізовано причини, які можуть впливати на величину лінійної поляризації та призводити до її відхилення від середнього ходу фазової залежності ступеня лінійної поляризації, характерної для пилових комет.

База даних кометної поляриметрії (DBCP) була ініційована у 2005 році [32] з метою каталогізувати усі наявні дані вимірювання поляризації комет. У ній містилася інформація про 2653 спостереження 64 комет у проміжку із 1940 до 2005 р. З моменту виходу першої версії пройшло більше десяти років, тому виникла необхідність оновити Базу, доповнивши її новими результатами спостережень лінійної та кругової поляризації. Це дало можливість не тільки збільшити кількість даних, але і розширити діапазони параметрів, у межах яких було отримано спостереження. Друга версія Бази даних кометної поляриметрії DBCP V2.0 [7] містить 3441 рядок даних про лінійну і кругову поляризацію 95 комет, що спостерігалися з 1881 по 2016 року, у діапазонах довжин хвиль 0.26–2.30 мкм, геліоцентричної 0.012–7.010 а.о. та геоцентричної відстаней 0.01–6.52 а.о., фазових кутів 0.0–122.1°. Перед оновленням проведено перевірку усіх даних першої версії Бази на помилки, які було виправлено. Нова версія Бази даних кометної поляриметрії, як і попередня, містить результати як опубліковані, так і частину результатів поляризаційних спостережень, які ще не опубліковані у реферованих виданнях. Але, на відміну від першої версії, у другій версії Бази даних вони виділені в окремий файл, де доповнені інформацією про інструменти, використані для їх отримання. Це було зроблено для того, щоб потенційні

користувачі Бази даних мали змогу одразу для себе визначити рівень довіри до приведених результатів. На відміну від першої версії, для DVSP V2.0 було розроблено програмне забезпечення, яке значно полегшило роботу з Базою.

На основі оновленої Бази даних кометної поляриметрії досліджено фазові залежності лінійної поляризації (ФЗП) для вибраних груп комет. ФЗП є джерелом інформації про фізичні властивості кометного пилу. Її параметри безпосередньо пов'язані із такими характеристиками частинок, як показник заломлення (склад), розмір частинки, пористість, форма, орієнтація. Щоб знайти параметри ФЗП, які потім можна використовувати у теоретичних моделюваннях, з Бази DVSP V2.0 були вибрані спостереження лінійної поляризації комет, які відповідали наступним критеріям:

- Спостереження проводилися у вузькосмугових кометних фільтрах. За основу було взято фільтри BC ( $\lambda_{\text{cent}}/\Delta\lambda = 484.5/6.5$  нм, де  $\lambda_{\text{cent}}$  — центральна довжина хвилі фільтра, а  $\Delta\lambda$  — ПШПВ фільтра) та RC (684/9 нм) і доповнено даними, отриманими в інших вузькосмугових фільтрах, центральна довжина хвилі яких є близькою до основних. Ці дві групи було умовно названо “синьою” і “червоною” відповідно. Така умова є необхідною, тому що вузькосмугові фільтри виділяють область спектру, яка є найменш забруднена молекулярними емісіями, що дозволяє вивчати характеристики саме пилового компонента кометної атмосфери.
- На момент отримання поляриметричних даних у кометі не спостерігалися активні процеси (спалахи, викиди речовини або процеси розділення ядра), які можуть змінити оптичні властивості досліджуваного пилу.
- Лінійну поляризацію отримано в апертурі, яка виділяла центральну частину коми комети, тобто відкидалися вимірювання поляризації у хвостах, джетах або периферійних частинах коми.
- Відношення похибки лінійної поляризації до ступеня лінійної поляризації ( $\sigma P/P$ ) у відібраних кометах не перевищує 0.75.

Слід зауважити, що короткоперіодичні (short-period, SP) і довгоперіодичні (long-period, LP) комети досліджувалися окремо. У такий спосіб після селекції було сформовано чотири вибірки: довгоперіодичні (1) і короткоперіодичні (2) комети у синій області спектру, довгоперіодичні (3) і короткоперіодичні (4) комети у червоній області спектру.

Для виділених груп комет було побудовано синтетичні ФЗП за допомогою апроксимації спостережних даних тригонометричним поліномом, приведеним у [35]. На основі цих кривих було пораховано наступні параметри: положення ( $\alpha_{\text{min}}$ ) та величину ( $P_{\text{min}}$ ) мінімуму поляризації, значення кута інверсії ( $\alpha_{\text{inv}}$ ) та поляриметричного нахилу ( $h$ ), положення ( $\alpha_{\text{max}}$ ) та величину ( $P_{\text{max}}$ ) максимуму поляризації. У табл. 1 представлено результати

наших розрахунків. Оскільки дані у вибірках представлені нерівномірно на усіх фазових кутах, а на деяких зовсім відсутні, як показано на рис. 1, тому апроксимація проводилася окремо для кількох ділянок, межі яких відображено у крайньому правому стовпчику табл. 1.

У табл. 1 відсутні кілька значень параметрів. Зокрема, не для всіх виділених груп було отримано величину і положення мінімуму та максимуму ФЗП, які показані на рис. 1. На приведених рисунках видно, що на ділянках ФЗП, необхідних для визначення указаних параметрів, відсутні спостереження у вузькосмугових фільтрах.

Таблиця 1

Параметри фазових залежностей лінійної поляризації для вибраних груп комет у виділених спектральних діапазонах

Параметр	Синій діапазон		Червоний діапазон		$\Delta\alpha$ , град <sup>*</sup>
	LP	SP	LP	SP	
Кількість точок	115	128	109	144	
$P_{\min}$ , %	$-1.98 \pm 0.08$	$-1.55 \pm 0.09$	–	$-1.89 \pm 0.09$	0–30
$\alpha_{\min}$ , град	10.1	11.2	–	9.4	0–30
$\alpha_{\text{inv}}$ , град	$20.25 \pm 0.50$	$21.20 \pm 0.63$	–	$17.79 \pm 0.41$	0–35
$h$ , %/град	$0.24 \pm 0.01$	$0.32 \pm 0.01$	$0.30 \pm 0.02$	$0.23 \pm 0.01$	18–35
$P_{\max}$ , %	$24.39 \pm 0.14$	–	$26.52 \pm 0.10$	$31.24 \pm 0.12$	$30-\alpha'$ **
$\alpha_{\max}$ , град	95.4	–	94.63	109.0	$30-\alpha'$ **

\* діапазон фазових кутів, у межах якого було пораховано відповідні параметри.

\*\* максимальне значення фазового кута, яке є серед даних у виділеній групі комет.

На сьогоднішній день у науковій спільноті дискутується питання, як сильно впливає розмір апертури, з якою проводиться спостереження, на отриману величину ступеня лінійної поляризації. Ми дослідили це питання на основі Бази DVCP V2.0. Із Бази були вибрані спостереження комет, які проводилися на одному фазовому куті, в одному фільтрі (перевага надавалася вузькосмуговим фільтром), але з апертурами різних розмірів. Було виявлено, що у переважній більшості випадків нашої вибірки ступінь лінійної поляризації зменшується зі збільшенням розміру апертури. Хоча у деяких випадках спостерігається протилежна залежність або зберігається майже однакове значення. Можна припустити, що однією із можливих причин є те, що ці величини поляризації отримані з використанням методів апертурної поляриметрії. При такому підході ступінь лінійної поляризації є усередненим значенням в апертурі. Але у діафрагму можуть потрапляти ділянки кометної коми або хвоста, у яких пил має різні оптичні властивості. Їх сумарне значення і дає спостережену в апертурі середню величину

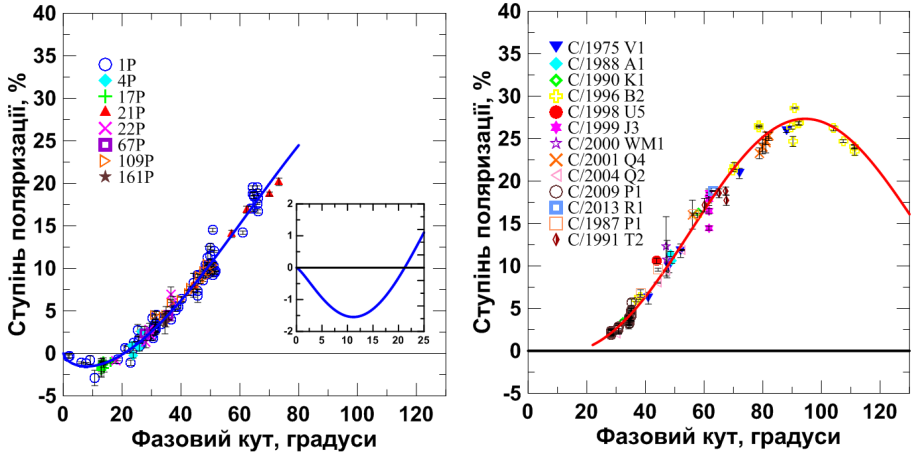


Рис. 1. Фазові залежності величини лінійної поляризації для виділених груп комет: короткоперіодичних у синьому діапазоні довжин хвиль (ліворуч) та довгоперіодичних у червоному діапазоні (праворуч). Вставлена панель на зображенні ліворуч показує від'ємну гілку ФЗП у збільшеному вигляді.

лінійної поляризації.

Так само, як і апертурна залежність, на величину лінійної поляризації може впливати активність комети, що спричиняє відхилення ступеня поляризації від середнього ходу ФЗП, характерного для пилових комет. Під активністю комет маються на увазі спалахи, викиди речовини з поверхні ядра, значні варіації співвідношення пил/газ, джетова активність, які можуть бути спричинені викидом речовини з поверхні ядра. Дисертанткою проведено дослідження щодо існування такої залежності на основі оновленої бази даних кометної поляриметрії. Із Бази DBCP V2.0 відбиралися комети, які демонструють відхилення ступеня поляризації від середнього ходу ФЗП, а потім аналізувалися можливі причини відхилення, при цьому комети з апертурною залежністю вилучалися з розгляду. Спалаховою активністю пояснюються аномальні величини поляризації розсіяного випромінювання комет 29P/Schwassmann–Wachmann 1 [30] та C/1990 K1 (Levy) [41]. Ці комети демонструють додатний ступінь лінійної поляризації, хоча на фазових кутах, де спостерігалися ці комети, відповідно до теоретичних розрахунків він повинен бути від'ємним. Викидом дрібного пилу можна пояснити зростання ступеня лінійної поляризації у кометі C/2000 WM1 (LINEAR) [28], а зміною співвідношення пил/газ — у кометах 47P/Ashbrook–Jackson і C/1979 S1 (Meier) [31]. Комета C/2012 S1 (ISON) демонструє не тільки вплив джетової активності на величину лінійної поляризації, але і апертурну залежність поляризації [26].

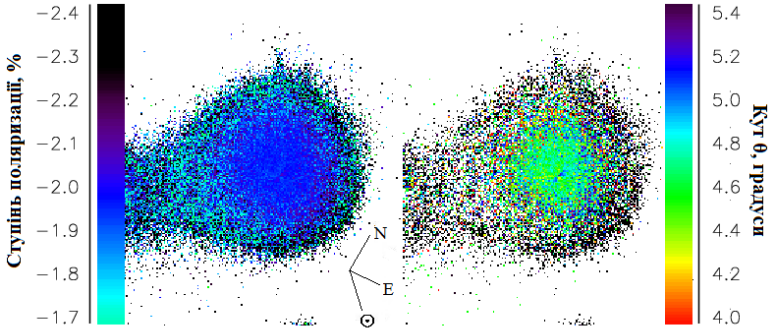
Результати цього розділу опубліковано у базі даних [7] та тезах конференцій [13–14].

У Розділі 3 “Дослідження просторового розподілу поляризації у кометах” представлено результати поверхневої поляриметрії довгоперіодичної комети C/2012 J1 (Catalina), отримані у фільтрі V системи Джонсона–Козінса, коли комета перебувала на геліоцентричній відстані 3.17 а.о. і фазовому куті  $14.02^\circ$ , та короткоперіодичної комети 2P/Encke, отримані у фільтрах SED500 і r-sdss, коли комета була на геліоцентричній відстані 1.06 а.о. і фазовому куті  $46.8^\circ$ . Ці комети належать до різних динамічних груп і демонструють різну поведінку ступеня лінійної поляризації по комі.

Ступінь лінійної поляризації та позиційний кут площини поляризації розсіяного випромінювання комети C/2012 J1 (Catalina) були порашовані за допомогою модифікованих формул Фесенкова [40]. На основі цих результатів побудовано карти розподілу параметрів поляризації по комі комети (рис. 2, вгорі). Аналіз отриманих карт розподілу поляризації та радіальних профілів ступеня поляризації по комі комети, побудованих через фотометричний центр, показав, що кома комети C/2012 J1 (Catalina) є однорідною у поляризованому світлі. Тобто ступінь лінійної поляризації майже не змінюється з відстанню від ядра, немає областей з різною поляризацією, а отже, можна припустити, що спостережена кома складається із пилових частинок, які мають однакові оптичні характеристики. Середнє значення ступеня лінійної поляризації у кометі C/2012 J1 (Catalina) знаходиться на рівні  $\sim -2\%$ .

На основі поляриметричних спостережень короткоперіодичної комети 2P/Encke у фільтрах SED500 і r-sdss також побудовано карти розподілу ступеня лінійної поляризації по комі (рис. 2, внизу) і профілі поляризації вздовж напрямку на Сонце, фен та у напрямках, перпендикулярних до вказаних. На відміну від результату, отриманого для комети C/2012 J1 (Catalina), комета 2P/Encke демонструє неоднорідний розподіл поляризації по комі. На карті розподілу поляризації чітко видно складну структуру коми у поляризованому світлі: фен на освітленій стороні комети, всередині якого спостерігається джеоподібна деталь, що має вищий ступінь поляризації, ніж навколишня кома, оболонка з порівняно високим ступенем поляризації. Слід відмітити, що зареєстрований в напрямку на Сонце фен є характерною особливістю цієї комети, яка спостерігається майже у кожній її появі. Радіальні профілі поляризації та кольору комети 2P/Encke є подібними до отриманих для комети 67P/Churyumov–Gerasimenko [40] і передбачають певну еволюцію властивостей частинок пилу при віддаленні від ядра. Моделювання на основі Sh-матричного методу для гауссівських частинок показали, що спостережні радіальні тренди кольору та поляризації можна пояснити зменшенням розміру пилинок зі зростанням відстані від ядра [33].

## C/2012 J1 (Catalina)



## 2P/Encke

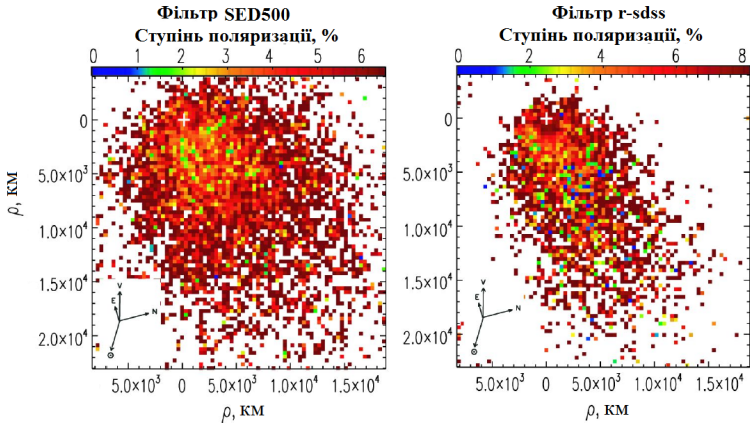


Рис. 2. Результати поверхневої поляриметрії досліджуваних комет. Карти розподілу лінійної поляризації та позиційного кута площини поляризації ( $\theta$ ) по комі комети C/2012 J1 (Catalina), отримані у фільтрі V. Унизу представлено карти розподілу поляризації по комі комети 2P/Encke, отримані у фільтрах SED500 і r-sdss. Шкали градування наведено біля кожної карти. Також указано напрямки на Північ (N), Схід (E), Сонце ( $\odot$ ) і вектор швидкості комети (V).

Ще одним аспектом поляриметричних досліджень комети 2P/Encke було кількісне визначення впливу молекулярного випромінювання на величину лінійної поляризації у континуумі (рис. 3).

Використовуючи у якості додаткової інформації спектральні спостере-

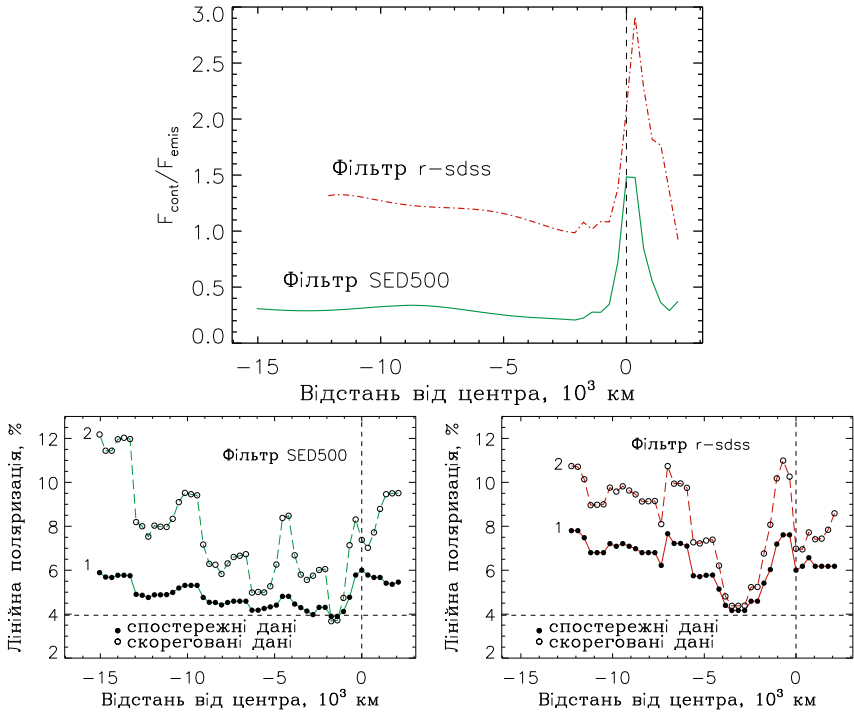


Рис. 3. Вплив газових емісій на величину поляризації розсіяного випромінювання комети 2P/Енске. Верхня панель: зміна співвідношення пил/газ  $k(\rho) = F_{\text{cont}}(\rho)/F_{\text{em}}(\rho)$ , знайдена вздовж висоти щілини спектрографа, з відстанню від фотометричного центра коми для використаних фільтрів. Нижня панель: радіальні профілі поляризації по комі комети 2P/Енске у фільтрах SED500 (ліворуч) і r-sdss (праворуч). Крива 1 показує хід спостереженої поляризації по комі комети, а крива 2 показує, як змінюється ступінь лінійної поляризації в континуумі із урахуванням газового забруднення; горизонтальна пунктирна лінія відповідає ступеню поляризації молекулярних емісій, розрахованому за формулою Емана для фазового кута  $46.8^\circ$ .

ження комети 2P/Енске, які детально описані у розділі 4, було знайдено, що пил у кометі переважно концентрується у навколядерній області, водночас у периферійних частинах коми досить суттєвий вклад газового компонента. Для аналізу впливу газу на поляризацію у континуумі пораховано співвідношення потоків у континуумі та емісійному спектрі та розглянуто його залежність вздовж щілини спектрографа у проекції на кому комети.

Оскільки спостереження комети 2P/Encke були проведені з використанням ширококутових фільтрів, а у спектрі комети зареєстровано сильні молекулярні емісії, то необхідно врахувати рівень газового забруднення. У смугу пропускання фільтра SED500 потрапляє випромінювання молекули  $C_2$  (0,0), а у фільтр r-sdss — молекул  $NH_2$  (0,7,0) і  $C_2$  (0,1). Дисертанткою оцінено внесок цих газових емісій, який складає 69.76% і 43.77% у фільтрах SED500 і r-sdss відповідно. Вимірювання потоків у вказаних емісіях зроблено по висоті щілини, а також в областях, які потрапляють у континуумні фільтри. У підсумку виявлено, що пил у кометі 2P/Encke концентрується у навколоядерній області (рис. 3, верхня панель). Для чисельної оцінки розміру вкладу газових емісій у величину поляризації із врахуванням даних  $k(\rho) = F_{\text{cont}}(\rho)/F_{\text{em}}(\rho)$ , представлених на рис. 3, використано співвідношення

$$P_{\text{cont}}(\rho) = \frac{P_{\text{cont+em}}^{\text{obs}}(\rho)(k(\rho) + 1) - P_{\text{em}}}{k(\rho)},$$

де  $P_{\text{cont+em}}^{\text{obs}}(\rho)$  — це виміряна спостережна поляризація, а  $P_{\text{em}} = 3.95\%$  — це ступінь поляризації газу, розрахований для фазового кута  $\alpha = 46.8^\circ$  за формулою Емана [37]. На нижній панелі рис. 3 показано профілі поляризації без урахування (крива 1) та із урахуванням (крива 2) внеску газових емісій у використаних фільтрах. Отже, рисунки чітко показують, що потрібно враховувати рівень газового забруднення під час обрахунків ступеня лінійної поляризації у континуумі, якщо внесок емісійної складової є значним.

На прикладі досліджених комет C/2012 J1 (Catalina) і 2P/Encke показано доцільність проведення саме поверхневої поляриметрії комет. Адже, на відміну від апертурної поляриметрії, можна отримати інформацію про розподіл поляризації по комі, побачити, чи є морфологічні особливості у поляризованому світлі, як змінюються властивості пилинок з віддаленням від ядра тощо.

Результати розділу опубліковано у статті [4] та тезах конференцій [9–10].

**У Розділі 4 “Спектральні та фотометричні дослідження комет”** описано результати обробки спектральних спостережень комет 2P/Encke (отримані у 2003 і 2017 роках), 103P/Hartley 2, C/2004 Q2 (Machholz), C/2009 P1 (Garradd) і C/2012 J1 (Catalina). Також представлено результати фотометричних спостережень комет 103P/Hartley 2 та C/2013 UQ4 (Catalina). Для прикладу на рис. 4 показано результуючі спектри комети 2P/Encke, отримані у появі комети у 2003 році, із ототожненими емісійними деталями.

У спектрах усіх досліджуваних комет проведено ототожнення молекулярних емісій, які представлено у табл. 2. Детальні списки ототожнених емісій приведені у додатках до дисертації.

На основі моделі Хазера [25], основні положення та формули якої описано у розділі 1 дисертації, пораховано швидкості продукування молекул



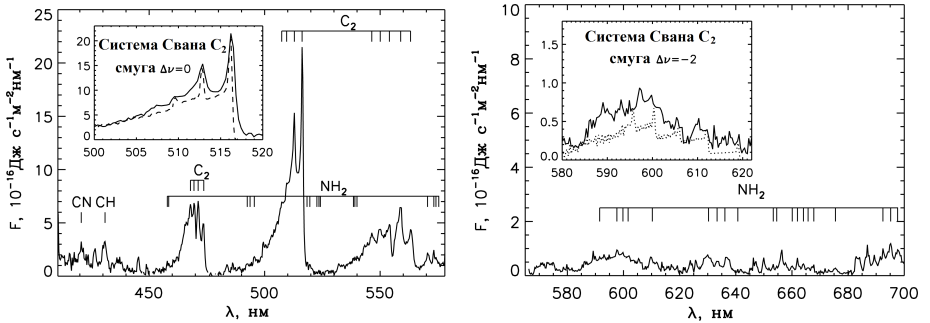


Рис. 4. Емісійні спектри комети 2P/Енске, отримані 15 (ліворуч) і 22 (праворуч) листопада 2003 року, з ототожненими молекулярними смугами. На вставлених панелях показано смуги Свана молекули  $C_2$ : суцільна лінія відповідає спостережному спектру комети, а пунктирна — розрахованому, який узято з роботи [38].

Таблиця 2

Загальна статистика ототожнених молекулярних емісій у спектрах досліджуваних комет

Комета	Кількість емісій	Молекули
2P/Encke, 2003	52	CN, $C_2$ , CH, $NH_2$ ,
2P/Encke, 2017	62	CN, $C_2$ , $C_3$ , $NH_2$ , $CO^+$ , CH
103P/Hartley 2	65	CN, $C_2$ , $C_3$ , $CO^+$ , $CH^+$ , CH, $NH_2$
C/2004 Q2 (Machholz)	171	CN, $C_2$ , $C_3$ , $CH^+$ , CH, $NH_2$ , $H_2O^+$
C/2009 P1 (Garradd)	148	CN, $C_2$ , $C_3$ , $CO^+$ , $CH^+$ , CH, $NH_2$
C/2012 J1 (Catalina)	1	CN

$C_2$ ,  $C_3$ , CN і  $NH_2$ . Отримані результати наведено у табл. 3. Окрім газового компонента, дисертанткою досліджено континуум зазначених комет. За спектральними спостереженнями комети 2P/Encke визначено рівень пилепродуктивності, який характеризується параметром  $Af\rho$ . Для цього використовувалися ділянки спектру, які співпадають зі смугами пропускання кометних фільтрів BC, GC і RC. Також для комет 2P/Encke і C/2012 J1 (Catalina) пораховано нормований градієнт відбивної здатності,  $S'$ . Результати обчислень параметра  $Af\rho$  і спектрального градієнта представлено у табл. 4 і табл. 5 відповідно. Для комети 103P/Hartley 2 параметр  $Af\rho$  у фільтрах BC і RC було визначено із фотометричних спостережень. Отримані значення параметра  $Af\rho$  є близькими до результатів інших авторів для досліджуваних комет, але є значно нижчими, ніж, наприклад, для пи-

лової комети C/2010 S1 (LINEAR), в обробці фотометричних спостережень якої авторка дисертації також брала участь [2].

Таблиця 3

Темп продукування вибраних молекул в атмосферах досліджуваних комет в одиницях молекул за секунду

Молекула	2P/Encke		103P/ Hartley 2	C/2009 P1 (Garradd)	C/2012 J1 (Catalina)
	2003 р.	2017 р.			
C <sub>2</sub> (0,0)	$1.12 \times 10^{25}$	$3.26 \times 10^{25}$	$1.04 \times 10^{25}$	$4.84 \times 10^{26}$	–
C <sub>2</sub> (0,1)	$9.26 \times 10^{24}$	–	–	–	–
C <sub>3</sub>	–	$0.17 \times 10^{25}$	$8.42 \times 10^{25}$	$2.16 \times 10^{25}$	–
CN(0–0)	–	$3.19 \times 10^{25}$	$0.99 \times 10^{25}$	$2.66 \times 10^{26}$	$3.7 \times 10^{23}$
NH <sub>2</sub> (0,10,0)	$3.82 \times 10^{24}$	–	–	–	–
NH <sub>2</sub>	–	$0.82 \times 10^{25}$	$1.49 \times 10^{25}$	–	–

Таблиця 4

Параметр  $Af\rho$  (у сантиметрах) у межах апертури з радіусом  $\rho$ , який характеризує пилепродуктивність досліджуваних комет

Фільтр	2P/Encke		103P/Hartley 2*
	Поява 2003 р.	Поява 2017 р.	
$\rho$ , км	4500	11000	4500
BC	$77 \pm 9$	$41 \pm 6$	69.2
GC	$81 \pm 9$	$40 \pm 6$	–
RC	$79 \pm 9$	$196 \pm 12$	64.1

\* значення параметра  $Af\rho$  для комети 103P/Hartley 2 є усередненим за три ночі спостережень.

Результати фотометричних досліджень довгоперіодичної комети C/2013 UQ4 (Catalina) показали короткострокові варіації кольору. На рис. 5 показано отримані значення спектрального градієнта відбивної здатності пилу комети як функцію фазового кута. Очевидно, що пиловий компонент коми зазнавав значних короткострокових варіацій. Про це може свідчити той факт, що, наприклад, спектральний градієнт протягом періоду у два дні, 16–18 липня, зростав від  $(-4.43 \pm 6.90)\%$  на 100 нм до  $(18.88 \pm 8.44)\%$  на 100 нм, а протягом наступного періоду в один день, 18–19 липня, — спадає від  $(18.88 \pm 8.44)\%$  на 100 нм до  $(4.34 \pm 7.36)\%$  на 100 нм. Причому,

Нормований градієнт відбивної здатності  $S'$  для досліджуваних комет

Комета	Рік спостережень	$S'$ , % на 100 нм	$\Delta\lambda$ , нм
2P/Encke	2003	$11.9 \pm 3.4$	450–567
		$7.9 \pm 2.8$	565–676
	2017	$9.4 \pm 3.1$	484.5–684
C/2012 J1 (Catalina)	2012	$17 \pm 4$	484.5–684

\* величина  $\Delta\lambda$  вказує діапазон довжин хвиль, для якого проводилися розрахунки.

у першому випадку має місце якісна зміна спектрального градієнта комети, від від'ємного до додатного. Цей результат має важливе значення, оскільки наочно демонструє, що одиничне спостереження не може дати однозначне уявлення про колір комети. Середні значення також не завжди може бути достовірним. Серед значень градієнтів, представлених для комети C/2013 UQ4 (Catalina) на рис. 5, тільки чотири із восьми включають значення середнього спектрального градієнта у межах своїх похибок, тоді як решта — суттєво відрізняється.

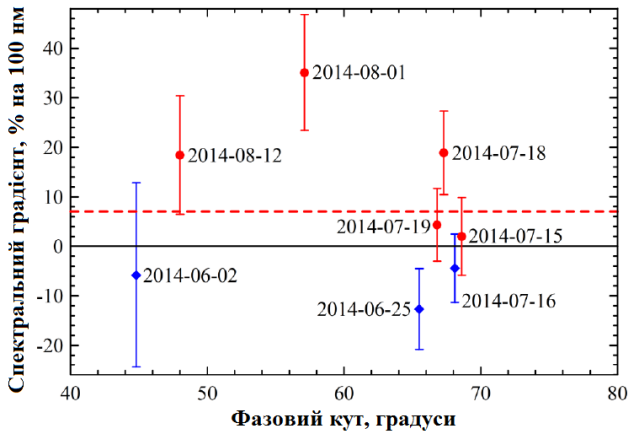


Рис. 5. Залежність спектрального градієнта від величини фазового кута для комети C/2013 UQ4 (Catalina). Червоними і синіми символами показано додатні і від'ємні значення спектрального градієнта відповідно. Біля кожної точки написано дату, коли було проведено відповідні спостереження.

Червона пунктирна лінія відповідає середньому значенню спектрального градієнта для восьми спостережень.

Результати розділу опубліковано у статтях [1, 3–6] та тезах конференцій [8, 10–12, 15–19].

**Додаток А** містить список опублікованих праць за матеріалами роботи та відомості про апробацію результатів дисертаційного дослідження.

У **додатку Б** дисертаційної роботи подано список ототожнених молекулярних емісій у спектрі довгоперіодичної комети C/2009 P1 (Garradd).

**Додаток В** дисертації містить список ототожнених молекулярних емісій у спектрі короткоперіодичної комети 103P/Hartley 2.

**Додаток Г** містить списки ототожнених молекулярних емісій у спектрах короткоперіодичної комети 2P/Encke, отриманих у 2003 і 2017 роках.

У **додатку Д** представлено таблицю модельних параметрів, які використовувалися для розрахунку за моделлю Хазера швидкості продукування газових молекул у досліджуваних кометах, а саме: характерні масштаби пробігів батьківських і дочірніх молекул, фактор ефективної флуоресценції та показник його степеневі залежності від геліоцентричної відстані.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі приведено результати поляриметричних, спектральних та фотометричних досліджень вибраних комет різних динамічних груп. Отримано параметри фазових залежностей лінійної поляризації для різних груп комет. Проаналізовано результати спектральних спостережень вибраних комет, які належать до різних динамічних класів. Крім того, виконано фотометричні дослідження динамічно нової комети та отримано ряд характеристик пилової складової кометної коми.

Основні результати дисертаційної роботи наступні:

1. Проведено оновлення і доповнення Базу даних кометної поляриметрії. За роки, що пройшли після публікації першої версії Базу (DBCP, 2006 р.), об'єм поляриметричних досліджень комет значно виріс. Апертурна поляриметрія доповнена вимірюваннями з віртуальними апертурами поляриметричних ПЗЗ-зображень. У результаті створено нову електронну Базу даних кометної поляриметрії DBCP V2.0. Для ефективної роботи з Базою розроблено програмне забезпечення. Новостворена база розміщена у Міжнародній базі даних NASA "Planetary Data System".
2. Вперше на основі новоствореної Базу даних DBCP V2.0 досліджено 4 групи комет різних динамічних класів, для яких побудовано і проаналізовано фазові залежності лінійної поляризації в різних спектральних діапазонах та визначено параметри  $P_{\min}$ ,  $\alpha_{\min}$ ,  $\alpha_{\text{inv}}$ ,  $h$ ,  $P_{\max}$

і  $\alpha_{\max}$ . Виявлено, що в діапазоні фазових кутів 20–60° хід ФЗП є однаковим для коротко- і довгоперіодичних комет; на малих фазових кутах у червоному діапазоні довжин хвиль і на великих фазових кутах у синьому — недостатньо експериментальних даних для отримання достовірних значень параметрів. Виявлено, що у червоній ділянці спектру величина максимуму вища для довгоперіодичних комет, а мінімум глибший для короткоперіодичних комет. Чітко вираженої спектральної залежності для параметрів  $\alpha_{\text{inv}}$  і  $h$  не виявлено. Підтверджено наявність апертурної залежності величини лінійної поляризації. Виявлено, що основними причинами, які викликають відхилення ступеня лінійної поляризації від характерного для пилових комет значення, є наступні: апертурна залежність поляризації, вплив молекулярних емісій, активність комети, морфологічні особливості комети.

3. Грунтуючись на картах розподілу ступеня лінійної поляризації по комах комет 2P/Encke і C/2012 J1 (Catalina), виявлено наступне:
  - Комета C/2012 J1 (Catalina) має однорідний просторовий розподіл поляризації по комі. Середнє значення ступеня лінійної поляризації складає  $P \approx (-2 \pm 0.7)\%$ .
  - Кома комети 2P/Encke у поляризованому світлі має складну структуру: виділяються фен у напрямку на Сонце, оболонка і джет, причому вони мають різну величину поляризації. Оцінено величину впливу газових емісій на поляризацію у континуумі. Показано, що на величину спостережної поляризації впливають як співвідношення пил/газ, так і реальні зміни властивостей пилюнок після їх вильоту із ядра.
4. Досліджено спектри 5 комет — 2P/Encke (дві появи), 103P/Hartley 2, C/2004 Q2 (Machholz), C/2009 P1 (Garradd) і C/2012 J1 (Catalina), у яких ототожнено емісії радикалів CN, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>, NH<sub>2</sub>, CN та іонів H<sub>2</sub>O<sup>+</sup>, CO<sup>+</sup> і CH<sup>+</sup>. На основі аналізу спектрів комет отримано наступні результати:
  - *Комета 2P/Encke*. Створено списки молекулярних емісій, ототожнених у спектрах комети, отриманих у 2003 і 2017 роках в оптичному діапазоні довжин хвиль; пораховано швидкості продукування молекул C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>, CN, NH<sub>2</sub>; оцінено параметр  $Af\rho$  у фільтрах BC, GC і RC та спектральний градієнт відбивної здатності пилю. Отримані результати підтвердили, що комета 2P/Encke належить до класу газових комет: в її атмосфері мало пилю, причому він зосереджений переважно у навколоядерній області коми.
  - *Комета 103P/Hartley 2*. Ототожнено молекулярні емісії у спектрі комети, пораховано темпи продукування молекул C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>, CN, NH<sub>2</sub>. Із фотометричних спостережень отримано параметр

$Af\rho$  у вузькосмугових фільтрах BC і RC. Проведені дослідження підтвердили високу активність комети 103P/Hartley 2, яку називають гіперактивною.

- *Комета C/2004 Q2 (Machholz)*. Отримано розподіл енергії у спектрі комети в широкому діапазоні довжин хвиль ( $\Delta\lambda = 360\text{--}920$  нм) та ототожнено молекулярні емісії, характерні для геліоцентричної відстані 1.2 а.о.
- *Комета C/2009 P1 (Garradd)*. Ототожнено емісії у спектральному діапазоні  $\Delta\lambda = 380\text{--}540$  нм, серед яких було виявлено досить сильні емісії іона  $\text{CO}^+$ . За моделлю Хазера розраховано швидкості продукування молекул  $\text{C}_2$ ,  $\text{C}_3$  і CN. Спектральні дослідження підтвердили, що комета C/2009 P1 (Garradd) належить до класу CO-збагачених комет.
- *Комета C/2012 J1 (Catalina)*. У спектрі цієї динамічно нової комети, отриманому на геліоцентричній відстані 3.17 а.о., виявлено тільки емісію молекули CN, для якої розраховано швидкість продукування. Отримана величина показує низький рівень активності комети на цій відстані від Сонця. Знайдений градієнт відбивної здатності добре узгоджується із середнім значенням для кометного пилу [21].

5. За результатами моніторингових фотометричних спостережень комети C/2013 UQ4 (Catalina) виявлено короткострокові варіації кольору, причому спектральний градієнт змінює знак з від'ємного на додатний. Таку спостережену зміну кольору можна пояснити гетерогенністю коми, яка складається щонайменше із двох компонентів. Перший, який продукує синій колір, відповідає збагаченим магнієм силікатам. Для другого компонента, який продукує червоний колір, можливі три варіанти: залізо-магнієві силікати, керогени типу II або оброблена низькою дозою ультрафіолетового випромінювання органічна речовина [5].

Виконана робота показала, що оновлена і удосконалена База даних поляриметрії комет DVCP V2.0 дає більш широкі можливості для вивчення фізичних і оптичних властивостей комет. База DVCP V2.0 може бути використана як спостережна основа для розвитку теорії розсіяння світла, чисельного моделювання, інтерпретації фазових і спектральних залежностей поляризації та визначення фізичних характеристик пилу в атмосферах комет, класифікації комет і вибору цілей майбутніх космічних місій. Визначені у роботі параметри фазових залежностей поляризації можуть бути використані для таксономії комет, отримання фізичних властивостей кометних пилинок (альbedo, розмір, пористість, показник заломлення), а також при моделюванні хімічного складу пилових частинок. Створені карти просторового розподілу величини поляризації по комі комети можна використовувати не тільки для дослідження морфології кометних атмосфер,

але і при побудові теоретичних моделей еволюції пилинок з віддаленням від кометного ядра. Отримані темпи продукування молекул та пилових частинок дозволяють вивчати еволюцію активності комет з відстанню від Сонця. Вперше виявлені короткострокові варіації кольору комети C/2013 UQ4 (Catalina) демонструють важливість спостережень комет у режимі моніторингу для достовірного визначення фізичних та хімічних властивостей кометного пилу.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### Статті, опубліковані у фахових реферованих виданнях

1. Shubina O. Low-resolution spectrum of comet C/2004 Q2 (Machholz) / Shubina O., Korsun P., and Ivashchenko Yu. // *Advances in Astronomy and Space Physics* – 2012. – V. 2 – P. 173–176.
2. Shubina O. Photometry of distant active comet C/2010 S1 (LINEAR) / Shubina O., Kulyk I., Korsun P., and Romanjuk Ya. // *Advances in Astronomy and Space Physics* – 2014. – V. 4 – P. 38–41.
3. Шубина Е. С. Спектр кометы C/2009 P1 (Garradd) в оптическом диапазоне длин волн / Шубина Е. С., Корсун П. П. и Афанасьев В. Л. // *Кинематика и физика небесных тел.* – 2014. – Т. 30. – №6. – С. 27–41.
4. Ivanova O. Polarimetric and spectroscopic observations of a dynamically new comet C/2012 J1 (Catalina) / Ivanova O., Shubina O., Moiseev A., and Afanasiev V. // *Astrophysical Bulletin.* – 2015. – V. 70. – №3. – P. 349–354.
5. Ivanova O. Colour variations of Comet C/2013 UQ4 (Catalina) / Ivanova O., Zubko E., Videen G., Mommert M., Hora J. L., Seman Křišandová Z., Svoreň J., Novichonok A., Borysenko S., Shubina O. // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* – 2017. – V. 469. – №3. – P. 2695–2703.
6. Шубина Е. С. Спектр короткопериодической кометы 2P/Енске в появлении 2003 г. / Шубина Е. С., Борисов Н. В., Иванова А. В. и Розенбуш В. К. // *Кинематика и физика небесных тел.* – 2018. – Т. 34. – №4. – С. 67–80.

### Електронна база даних

7. Kiselev N. Database of Comet Polarimetry V2.0. Compilation of Comet Polarimetry from Published and Unpublished Sources, urn:nasa:pds:compil-comet:polarimetry:: 1.0 / Kiselev N., Shubina E., Velichko S., Jockers K., Rosenbush V., Kikuchi S. (Eds.) // *NASA Planetary Data System.* – 2017.

**Публікації у матеріалах та тезах конференцій**

8. Shubina O. Low-resolution spectrum of comet C/2004 Q2 (Machholz) / Shubina O. and Korsun P. // 19th Open Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics. April 23–28, 2012, Kyiv, Ukraine: Abstracts. – К.: ВПЦ “Київський університет”, 2012. – P. 25.
9. Shubina O. Photometry of distant active comet C/2010 S1 (LINEAR) / Shubina O., Kulyk I., Korsun P., and Romanjuk Ya. // 20th Open Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics. April 22–27, 2013, Kyiv, Ukraine: Abstracts. – К.: ТОВ “Компанія ВАІТЕ”, 2013. – P. 50.
10. Shubina O. Spectral and polarimetry investigation of the comet C/2012 J1 (Catalina) at 6 meter telescope SAO RAS / Shubina O., Ivanova O., and Afanasiev V. // 21th Open Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics. April 28–May 3, 2014, Kyiv, Ukraine: Abstracts. – К.: ВПЦ “Київський університет”, 2014. – P. 14.
11. Shubina O. Spectral and polarimetric investigation of the comet C/2012 J1 (Catalina) at 6 meter telescope SAO RAS / Shubina O., Ivanova O., and Afanasiev V. // VII International Scientific Conference “Selected issues of astronomy and astrophysics” in Honor of Bohdan Babiy. October 7–10, 2014, Lviv, Ukraine: Book of Abstracts. — Л.: Львівський національний університет імені Івана Франка, 2014. – P. 42.
12. Shubina O. Photometric and spectral investigation of the comet 103P/Hartley 2 / Shubina O., Ivanova O., Kiselev N., and Afanasiev V. // 22th Open Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics. April 20–25, 2015, Kyiv, Ukraine: Abstracts. – К.: ВПЦ “Київський університет”, 2015. – P. 50.
13. Shubina O. Upgrad to a new version the Database of comet polarimetry / Shubina O., Kiselev N., Rosenbush V., and Ivanova O. // 23th Open Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics. April 25–30, 2016, Kyiv, Ukraine: Abstracts. – К.: ВПЦ “Київський університет”, 2016. – P. 45.
14. Shubina O. A new version of the Database of comet polarimetry (DBCP V2.0) / Shubina O., Kiselev N., Rosenbush V., and Ivanova O. // VIII International Scientific Conference “Selected issues of astronomy and astrophysics” in Honor of Bohdan Babiy. October 17–20, 2016, Lviv, Ukraine: Book of Abstracts. — Л.: Львівський національний університет імені Івана Франка, 2016. – P. 43.
15. Shubina O. Colour variations of Comet C/2013 UQ4 (Catalina) / Shubina O., Ivanova O., Zubko E., et al. // 24th Open Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics. April 24–29, 2017, Kyiv, Ukraine: Abstracts. – К.: ВПЦ “Київський університет”, 2017. – P. 47.



16. Shubina O. Dust colour variations in the comet C/2013 UQ4 (Catalina) / Shubina O., Ivanova O., Zubko E., et al. // International Conference “Astronomy and Space Physics at the University of Kyiv”. May 23–26, 2017, Kyiv, Ukraine: Book of Abstracts. – K.: ВПЦ “Київський університет”, 2017. – P. 85.
17. Shubina O. Color-slope interpretation of comet C/2013 UQ4 (Catalina) using the model of agglomerated debris particles / Shubina O., Ivanova O., Zubko E., et al. // The Eight Moscow Solar System Symposium. October 9–13, 2017, Moscow, Russia: Abstracts. – M., 2017. – P. 139-141abstract.
18. Shubina O. Optical spectra of the short-period comet 2P/Encke in 2003 and 2017 appearance / Shubina O., Ivanova O., Rosenbush V., et al. // 25th Open Young Scientists’ Conference on Astronomy and Space Physics. April 23–28, 2018, Kyiv, Ukraine: Abstracts. – K.: ВПЦ “Київський університет”, 2018. – P. 26.
19. Shubina O. Spectra of short-periodic comet 2P/Encke in 2003 apparition / Shubina O., Borisov N., Ivanova O., and Rosenbush V. // International Conference “Astronomy and Space Physics at the University of Kyiv”. May 29 – June 1, 2018, Kyiv, Ukraine: Book of Abstracts. – K.: ВПЦ “Київський університет”, 2018. – P. 54.

## СПИСОК ЦИТОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

20. Добровольский О. В., Кометы, Москва, Наука, 1966, 288 с.
21. A’Hearn M. F. The ensemble properties of comets: Results from narrowband photometry of 85 comets, 1976-1992 / A’Hearn M. F., Millis R. L., Schleicher D. G., et. al. // Icarus – 1995. – V. 118. – P. 223–270.
22. Douglas A. E. Band spectrum and structure of the CH<sup>+</sup> molecule: Identification of three interstellar lines / Douglas A. E. and Herzberg G. // Canadian J. Res. – 1942. – V. 20. – P. 71–82.
23. Dressler K. The electronic absorption spectra of NH<sub>2</sub> and ND<sub>2</sub> / Dressler K., Ramsay D. A. // Phil. Trans. Roy. Soc. Lond. Ser. A. Math. Phys. Sci. – 1959. – V. 251. – P. 553–604.
24. Gausset L. Analysis of the 4050 Å group of the C<sub>3</sub> molecule / Gausset L., Herzberg G., Lagerqvist A., Rosen B. // Astrophys. J. – 1965. – V. 142 – P. 45–76.
25. Haser L. Distribution d’intensite dans la tete d’une comete / Haser L. // Bull. Acad. Roy. Belgique Classe des Sciences – 1957. – V. 43 – P. 740–750.
26. Hines D. C. Hubble Space Telescope pre-perihelion ACS/WFC imaging polarimetry of Comet ISON (C/2012 S1) at 3.81 AU / Hines D. C., Vi-

- deen G., Zubko E., et al. // *The Astrophysical Journal Letters*. – 2014. – V. 780. – №2. – pp. 6.
27. Ivanova O. Constraints on dust in Comet C/2012 J1 (Catalina) inferred from its color and polarimetric response / Ivanova O., Zubko E., Afanasiyev V., Videen G., and Moiseev A. // *Abstract in Electromagnetic & Light Scattering XV, Leipzig*. – 2015.
  28. Joshi U. C. Polarization studies of comet C/2000 WM1 (LINEAR) / Joshi U. C., Baliyan K. S., and Ganesh S. // *Astron. Astrophys.* – 2003. – V. 405. – P. 1129–1135.
  29. Kim S. J. Ultraviolet and visible spectroscopic database for atoms and molecules in celestial objects / Kim S. J. // *J. Korean Astron. Soc.* – 1994. – V. 9. – P. 111–166.
  30. Kiselev N. N. Photometry and polarimetry during flares of comet Schwassmann-Wachmann I / Kiselev N. N. and Chernova G. P. // *Soviet Astronomy Letters*. – 1979. – V. 5. – P. 156–159.
  31. Kiselev N. N. Phase functions of polarization and brightness and the nature of cometary atmosphere particles / Kiselev N. N. and Chernova G. P. // *Icarus*. – 1981. – V. 48. – P. 473–481.
  32. Kiselev N. Database of Comet Polarimetry. EAR-C-COMPIL-5-DBCOMET-POLARIMETRY-V1.0 / Kiselev N., Velichko S., Jockers K., Rosenbush V., Kikuchi S. (Eds.) // *NASA Planetary Data System* – 2006.
  33. Kolokolova L. Modeling cometary photopolarimetric characteristics with Sh-matrix method / Kolokolova L. and Petrov D. // *American Geophysical Union, Fall Meeting 2017*. – 2017. – #P11D-2532.
  34. Lew H. Electronic spectrum of  $\text{H}_2\text{O}^+$  / Lew H. // *Canadian Journal of Physics*. – 1976. – V. 54. – P. 2028–2049.
  35. Lumme K. A two-parameter system for linear polarization of some Solar system objects / Lumme K. and Muinonen K. // *IAU Symp.* – 1993. – V. 160. – P. 194.
  36. Luque J. LIFBASESRI International Report MP / Luque J., Crosley D. R. // 1999. – 99–009.
  37. Öhman Y. Measurements of polarization in the spectra of comet Gunnigam (1940 C) and comet Paraskevopoulos (1941 C) / Öhman Y. // *Stockholm Obs. Ann.* – 1941. – V. 13. – P. 3–15.
  38. Phillips J. G. The Swan System of the  $\text{C}_2$  Molecule / Phillips J. G., Davis S. P. // *Berkeley and Los Angeles: Univ. California Press* – 2002. – 260 p.

39. Reach W. T. Survey of cometary CO<sub>2</sub>, CO, and particulate emissions using the Spitzer Space Telescope / Reach W. T., Kelley M. S., and Vaubaillon J. // *Icarus*. – 2013. – V. 226. – № 1. – P. 777–797.
40. Rosenbush V. K. Spatial variations of brightness, colour and polarizati-  
on of dust in comet 67P/Churyumov–Gerasimenko / Rosenbush V. K.,  
Ivanova O. V., Kiselev N. N., Kolokolova L. O., Afanasiev V. L. // *Mon.  
Not. R. Astron. Soc.* – 2017. – V. 469. – P. 475–491.
41. Rosenbush V. K. Comets Okazaki-Levy-Rundenko (1989 19) and Levy  
(1990 20): Polarimetry and stellar occultations / Rosenbush V. K.,  
Rosenbush A. E., and Dement'ev M. S. // *Icarus*. – 1994. – V. 108. –  
№1. – P. 81–91.
42. Simões da Silva A. Contributo para a identificação nos cometas do si-  
stema de Phillips da molécula C<sub>2</sub> / Simões da Silva A. // *Separata de O  
INSTITUTO, CXXXII, Coimbra Editora.* – 1968. – P. 1–83.

## АНОТАЦІЯ

**Шубіна О. С. Особливості короткоперіодичних і довгоперіодич-  
них комет на основі даних поляриметричних та спектральних  
спостережень.** — Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-матема-  
тичних наук за спеціальністю 01.03.03 — геліофізика і фізика Сонячної  
системи (10 — Природничі науки; 104 — Фізика та астрономія). — Головна  
астрономічна обсерваторія НАН України; Головна астрономічна обсерва-  
торія НАН України, Київ, 2018.

Дисертаційна робота присвячена дослідженню фізичних властивостей  
пиллової та газової складових ком вибраних комет різних динамічних класів  
на основі даних поляриметричних, спектральних та фотометричних спосте-  
режень.

Проведено оновлення Бази даних поляриметрії комет, створеної у 2005  
році. На основі строгої вибірки із Бази DVCP V2.0 вперше проаналізовано  
фазові залежності лінійної поляризації для різних динамічних груп комет  
у різних спектральних діапазонах та визначено їх параметри  $P_{\min}$ ,  $\alpha_{\min}$ ,  
 $\alpha_{\text{inv}}$ ,  $h$ ,  $P_{\max}$  і  $\alpha_{\max}$ .

Аналіз побудованих карт розподілу ступеня лінійної поляризації по ко-  
мах показав, що комета C/2012 J1 (Catalina) має рівномірний розподіл по-  
ляризації, а кома комети 2P/Encke демонструє складну структуру. На при-  
кладі газової комети 2P/Encke показано, що врахування впливу газових  
емісій значно збільшує ступінь поляризації комети.

На основі спектральних спостережень комет 2P/Encke, 103P/Hartley 2,  
C/2004 Q2 (Machholz), C/2009 P1 (Garradd) і C/2012 J1 (Catalina) створено  
списки ототожнених молекулярних емісій, пораховано швидкості продуку-  
вання молекул і пилинок та нормований спектральний градієнт. Фотоме-

тричні дослідження комети 103P/Hartley 2 підтвердили низький рівень її пилепродуктивності.

За результатами моніторингових фотометричних спостережень комети C/2013 UQ4 (Catalina) вперше виявлено короткострокові варіації кольору, причому спектральний градієнт відбивної здатності пилу змінював знак з від'ємного на додатний.

**Ключові слова:** комета, поляриметрия, фотометрія, спектроскопія, спектр, емісії, континуум, пил, газ.

## АННОТАЦИЯ

**Шубина Е. С. Особенности короткопериодических и долгопериодических комет на основе данных поляриметрических и спектральных наблюдений.** — Квалификационный научный труд на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.03 — гелиофизика и физика Солнечной системы (10 — Естественные науки; 104 — Физика и астрономия). — Главная астрономическая обсерватория НАН Украины; Главная астрономическая обсерватория НАН Украины, Киев, 2018.

Диссертационная работа посвящена исследованию физических свойств пылевой и газовой составляющих ком выбранных комет разных динамических групп на основе данных поляриметрических, спектральных и фотометрических наблюдений.

Проведено обновление Базы данных кометной поляриметрии, созданной в 2005 году. Основываясь на строгой выборке из Базы DVCP V2.0, впервые проанализированы фазовые зависимости линейной поляризации для разных динамических групп комет в разных спектральных диапазонах и рассчитаны их параметры  $P_{\min}$ ,  $\alpha_{\min}$ ,  $\alpha_{\text{inv}}$ ,  $h$ ,  $P_{\max}$  и  $\alpha_{\max}$ .

Анализ построенных карт распределения степени линейной поляризации по комах показал, что комета C/2012 J1 (Catalina) имеет равномерное распределение поляризации, а кома кометы 2P/Encke демонстрирует сложную структуру. На примере газовой кометы 2P/Encke показано, что учет влияния газовых эмиссий значительно увеличивает степень поляризации кометы.

На основе спектральных наблюдений комет 2P/Encke, 103P/Hartley 2, C/2004 Q2 (Machholz), C/2009 P1 (Garradd) и C/2012 J1 (Catalina) созданы списки отождествленных молекулярных эмиссий, посчитаны скорости продуцирования молекул и пылевых частиц, а также нормированный спектральный градиент. Фотометрические исследования кометы 103P/Hartley 2 подтвердили низкий уровень ее пылепроизводительности.

По результатам мониторинговых фотометрических наблюдений кометы C/2013 UQ4 (Catalina) впервые обнаружены краткосрочные вариации

цвета, причем спектральный градиент отражательной способности пыли менял знак с отрицательного на положительный.

**Ключевые слова:** комета, поляриметрия, фотометрия, спектроскопия, спектр, эмиссии, континуум, пыль, газ.

## ANNOTATION

**Shubina O. S. Peculiarities of short-periodic and long-periodic comets based on polarimetric and spectral observations.** — Qualification scientific work on the rights of manuscripts.

Candidate's thesis in Physics and Mathematics, speciality 01.03.03 — heliophysics and physic of Solar System (10 — Natural sciences; 104 — Physics and astronomy). — Main Astronomical Observatory of the NAS of Ukraine; Main Astronomical Observatory of the NAS of Ukraine, Kyiv, 2018.

The thesis is devoted to the study of physical properties of dust and gas components in selected comets belonging to different dynamic classes based on polarimetric, spectral, and photometric observations.

The database of comet polarimetry, created in 2005, has been updated. It was added about 1000 observations compared the previous version. Parameter ranges got wider. The second version of the database contains 3441 measurements on linear and circular polarization of 95 comets within ranges of wavelengths 0.26–2.30  $\mu\text{m}$ , phase angles 0.0–122.1°, heliocentric 0.012–7.010 AU and geocentric 0.01–6.52 AU distances. Phase-angle dependencies of linear polarization for different dynamic groups and spectral regions were created and analyzed for the first time based on strict samples from the database DBCP V2.0. Their parameters such as  $P_{\min}$ ,  $\alpha_{\min}$ ,  $\alpha_{\text{inv}}$ ,  $h$ ,  $P_{\max}$ , and  $\alpha_{\max}$  were calculated. It was revealed that within the phase angle range of 20–60° the phase-angle dependency trend is equal for both short- and long-periodic comets; that in the red spectral domain the polarization maximum is higher for long-periodic comets and the polarization minimum is deeper for short-periodic ones. At the same time, parameters  $\alpha_{\text{inv}}$  and  $h$  did not demonstrate spectral dependency. It was found that the aperture dependence of polarization degree, the influence of molecular emissions on polarization in a cometary continuum, the activity of a comet, the morphological features of the comet are main causes of linear polarization degree deviations from the average trend of the phase-angle dependence characteristic for dusty comets.

Analysis of created polarization distribution maps of the comet C/2012 J1 (Catalina) revealed polarization homogeneity over the coma. This is confirmed by the observed radial profiles of polarization across the coma in different directions. The mean value of polarization degree over the cometary coma of the comet C/2012 J1 (Catalina) is  $(-2 \pm 0.7)\%$ . As compared to the previous one, the coma of the comet 2P/Encke demonstrated a complex structure: a

circumnucleus halo, a jet and a fan. As far as 2P/Encke is well-known gassy comet we decided to investigate the influence of molecular emissions on polarization in the cometary continuum. It was showed that after correction for the gas contamination, using the gas-to-dust ratio from the spectroscopy, the gas-free polarization degree of the dust increased by  $\sim 2\%$  in SED500 and  $\sim 4\%$  in r-sdss band in the near-nucleus coma, whereas at the distance about 12000 km increased by  $\sim 6\%$  and  $\sim 3\%$ , respectively.

Lists of identified molecular emissions were created based on spectral observations of comets 2P/Encke, 103P/Hartley 2, C/2004 Q2 (Machholz), and C/2009 P1 (Garradd). The emissions of CN, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>, NH<sub>2</sub>, CH molecules and H<sub>2</sub>O<sup>+</sup>, CO<sup>+</sup>, and CH<sup>+</sup> ions were detected in these spectra. It was identified only one emission line of CN molecule in the spectrum of the comet C/2012 J1 (Catalina) at heliocentric distance of 3.17 AU. The gas production rates of CN, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>, NH<sub>2</sub> molecules were calculated using Haser's model for comets 2P/Encke, 103P/Hartley 2, and C/2009 P1 (Garradd). The relative dust productivity ( $Af\rho$  parameter) was estimated within wavelength ranges of narrowband cometary filters BC, GC, and RC based on spectra of the comet 2P/Encke. Photometric observations of the comet 103P/Hartley 2 confirmed a low dust production rate using values of  $Af\rho$  parameter in BC and RC filters. The normalized gradient of the reflective dust capability was computed for spectra of comets 2P/Encke and C/2012 J1 (Catalina).

For the first time short-term variations of the spectral gradient of the comet C/2013 UQ4 (Catalina) were detected based on the results of monitoring photometric observations. It should be mentioned that spectral gradient of dust reflectivity changed the sign from the negative value to the positive one. Revealed colour changes are explained by heterogeneity of the coma, which consist of two components at least.

**Keywords:** comet, polarimetry, photometry, spectroscopy, spectrum, emissions, continuum, dust, gas.