

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ГОЛОВНА АСТРОНОМІЧНА ОБСЕРВАТОРІЯ

ІВАНОВА Олександра Вікторівна

УДК 523.64-1/-8

**ФІЗИЧНІ ТА ДИНАМІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ
АКТИВНИХ МАЛИХ ТІЛ СОНЯЧНОЇ СИСТЕМИ**

01.03.03 – Геліофізика і фізика Сонячної системи

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора фізико-математичних наук

Київ – 2021

Дисертацією є кваліфікаційна наукова праця у формі наукової доповіді.

Робота виконана в Головній астрономічній обсерваторії Національної академії наук України, м. Київ.

Науковий консультант:

доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник
Розенбуш Віра Калениківна,
Астрономічна обсерваторія
Київського національного університету імені Тараса Шевченка МОН України,
головний науковий співробітник
сектору астрометрії та малих тіл Сонячної системи.

Офіційні опоненти:

член-кореспондент НАН України, доктор фізико-математичних наук,
професор
Шкуратов Юрій Григорович,
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна МОН України,
завідувач відділу дистанційного зондування планет НДІ астрономії,
завідувач кафедри астрономії і космічної інформатики;

доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник
Тишковець Віктор Павлович,
Радіоастрономічний інститут НАН України,
завідувач відділу космічної радіофізики;

доктор фізико-математичних наук, професор
Черемних Олег Костянтинівич,
Інститут космічних досліджень НАН України та ДКА України,
заступник директора з наукової роботи.

Захист відбудеться 8 квітня 2021 р. на засіданні Спеціалізованої вченої ради
Д 26.208.01 при Головній астрономічній обсерваторії НАН України
за адресою: 03143, м. Київ, вул. Академіка Заболотного, 27, ГАО НАН України.

Початок засідань о 10 годині.

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

Автореферат розіслано «_4_» березня 2021 р.

Вчений секретар Спеціалізованої вченої ради

кандидат фізико-математичних наук

І.Е. Васильєва

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Наша Сонячна система (СС) є найближчою планетною системою, що, природньо, викликає першочерговий інтерес до вивчення її утворення та еволюції. Планетна космогонія розглядає малі тіла Сонячної системи (МТСС) в єдиному процесі утворення, формування та еволюції планет, супутників, астероїдів та комет. Донедавна, згідно гіпотези О.Ю. Шмідта, вважалося, що всі тіла СС утворилися з так званих планетезималей, а хімічний склад та фізичні характеристики тіл визначалися гарячою центральною областю протопланетної хмари. Так, летючі речовини були «викинуті» на периферію і, відповідно, стали джерелом кометних ядер, а більш тверда фракція залишилася у внутрішній частині, слугуючи матеріалом для кам'янистих планет. Однак прогрес засобів спостережень, включаючи використання орбітальних телескопів, призвів до відкриття тисяч об'єктів як на навколосемній орбіті чи орбіті Юпітера, так і в транснептуновій області. Це, в свою чергу, дало нову загальну картину розподілу МТСС в СС, визначаючи, таким чином, актуальність вивчення питань, пов'язаних з місцем їхнього утворення, формуванням, динамічною та хімічною еволюцією. Відповіді на ці питання тісно пов'язані, або навіть визначаються, дослідженнями проявів їхньої активності залежно від відстані до Сонця, вивченням фізичних і динамічних характеристик МТСС, включно з питанням взаємозв'язку між ними, в тому числі і генетичного.

Загалом генетичний зв'язок між кометами, астероїдами та супутниками планет наразі має надзвичайно важливе значення. Адже іноді важко визначити, до якого класу МТСС належить той чи інший об'єкт. Наприклад, досить багато супутників планет, які мають ретроградні орбіти, більш схожі на захоплені астероїди, ніж на інші планетні супутники, які обертаються в площині екватора круговими орбітами. Також відкрито об'єкти, що одночасно належать як до класу астероїдів, так і до комет. Характерною особливістю об'єктів цієї групи є те, що вони мають динамічні характеристики астероїдів (їхні орбіти є зазвичай астероїдними) і водночас проявляють кометну активність, яка виражається в появі у них пилової коми та хвостів. Кометна активність таких астероїдів має як періодичний, так і одноразовий характер. Кілька механізмів втрати маси для 11 таких об'єктів розглянуто в роботі [65, 71], де вони названі «активними астероїдами» (АА).

Слід також згадати і об'єкти, як зараз вважається, перехідного класу з динамічної точки зору – Кентаври. Вони є проміжним класом між транснептуновими об'єктами і короткоперіодичними кометами. Серед цих об'єктів спостерігаються і активні, що дозволяє вивчати механізми їхньої активності та фізико-хімічні зміни для того, щоб краще розуміти їхній генетичний зв'язок із кометами. Тільки 13 відсотків серед відомих кентаврів проявляють кометну активність [69, 70].

Разом з тим, зараз склалася ситуація, коли активне дослідження МТСС призвело до накопичення великої кількості даних як про короткоперіодичні комети, так і довгоперіодичні комети на близьких (менш ніж 2 а.о.) до Сонця відстанях. Спостереження комет із перигелієм більш ніж 4 а.о. проводилися рідко, що спричинило значний дефіцит інформації саме про комети, що проявляють активність на великих відстанях від Сонця. Така незбалансованість інформації щодо комет призвела до того, що відкритим залишається питання їхньої таксономії.

Дотепер не вдалося виділити групи комет на основі їхніх фізичних та хімічних характеристик, окрім групи комет з дефіцитом вуглецю. Хоча, можливо, саме таксономія комет може бути пов'язана з місцем їхнього формування в Сонячній системі, а не, наприклад, з еволюцією їхніх фізичних чи хімічних характеристик.

За останні 20 років 5 космічних апаратів досліджували 5 кометних ядер із близької відстані. Така увага до комет зумовлена двома основними причинами: (i) комети, очевидно, зберігають речовину в незмінному вигляді з моменту утворення СС; (ii) комети містять значні обсяги водяного льоду і органічних сполук і, можливо, є джерелом цих речовин на Землі. Хоча отримано значний обсяг нової інформації щодо фізичних характеристик та умов у кометних атмосферах, що дозволило прояснити низку питань, однак постало ще більше нових запитань та загадок. Наприклад, дані космічної місії Rosetta показали відмінний від земного ізотопний склад молекул води в кометі 67P/Churyumov–Gerasimenko [64], тоді як у кометі 103P/Hartley 2 склад води повністю відповідає земному. Проте космічні місії не можуть бути дуже частими, а коло досліджуваних об'єктів обмежується екліптичними кометами (окрім єдиної комети 1P/Halley, яка належить до групи майже ізотропних комет). Одиначними також залишаються поляриметричні дослідження активних МТСС з борта космічних апаратів. Тільки в 2019 р. Європейське космічне агентство вперше підтримало нову місію Comet Interceptor до довгоперіодичної комети в рамках програми Cosmic Vision¹, яка буде включати й поляриметричні дослідження.

Таким чином, дослідження, виконані в межах дисертаційної роботи, а саме: комплексний аналіз нестаціонарних процесів та механізмів, які їх викликають у активних МТСС (комети різних динамічних типів, активні кентаври і астероїди), варіацій швидкості продукування газу і пилу, розподілу кольору і поляризації по комі, хімічного складу окремих фрагментів під час дезінтеграції ядра і пилового компонента атмосфер активних МТСС та пошук взаємозв'язків між цими об'єктами СС, у повній мірі визначають її актуальність.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Представлені в дисертації дослідження виконувалися згідно з планами наступних наукових тем лабораторії фізики малих тіл Сонячної системи Головної астрономічної обсерваторії НАН України: (1) «Активність комет та оптичні властивості безатмосферних малих тіл Сонячної системи», шифр 1.4.9.2/7-224В, номер держреєстрації 0106U004541, 2006–2008 рр., виконавець; (2) «Фізичні властивості комет та поверхонь вибраних безатмосферних тіл Сонячної системи за даними спектрофотометрії, фотометрії та поляриметрії», шифр 1.4.9.2/7-262В, номер держреєстрації 0108U011183, 2009–2013 рр., виконавець; (3) «Модельний аналіз пилових хвостів вибраних довгоперіодичних комет» (тема №330Кт), 3 кв. 2013 р.–4 кв. 2014 р., керівник; (4) «Дослідження кометної активності тіл Сонячної системи на великих геліоцентричних відстанях» (тема №325КТ), 2 кв.–4 кв. 2013 р., виконавець; (5) «Фундаментальні властивості обраних об'єктів Всесвіту: теоретичні та спостережні аспекти» (тема III-31-12 (299 Ц), номер держреєстрації 0112U001007), 1 кв. 2012 р.–4 кв. 2016 р., виконавець; (6) «Визначення фізичних параметрів тіл Сонячної системи, планетних систем і зірок з дисковими структурами» (тема III-35-14 (332 В), номер держреєстрації

¹ http://esa.int/Our_Activities/Space_Science/ESA_s_new_mission_to_intercept_a_comet

0113U008322), 01.2014–12.2018 рр., виконавець; (7) «Фізичні характеристики малих тіл Сонячної системи за дослідженнями в оптичній ділянці спектра» (тема III-37-14 (334 В), номер держреєстрації 0113U006608), 01.2014–12.2018 рр., виконавець; (8) «Активність малих тіл Сонячної системи за результатами спостережень у широкому діапазоні геліоцентричних відстаней та чисельного моделювання», тема III-54-19 (410 В), номер держреєстрації 0119U000156, 2019–2022 рр, виконавець. Частина досліджень виконана згідно з планами науково-дослідних робіт Астрономічної обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка: (1) «Космічні чинники земних катаклізмів. Спостереження, аналіз, інформатизація», номер держреєстрації 0116U002526, 2018 р., виконавець; (2) «Фізичні та динамічні властивості малих тіл Сонячної системи як індикатори їхніх місць походження та еволюції», номер держреєстрації 0119U100332, 2019–2021 рр, виконавець. Низка результатів отримана у рамках двох міжнародних програм: «The 67P/Churyumov–Gerasimenko observation campaign in support of the Rosetta mission» та «4*P Coma Morphology Campaign».

Мета дослідження: визначити фізичні характеристики і хімічний склад комет різних динамічних класів, активних астероїдів і кентаврів за даними фотометрії, спектроскопії та поляриметрії; провести діагностику фізичних та оптичних властивостей пилу в об'єктах різних популяцій шляхом чисельного моделювання; виконати пошук зв'язку між фізичними і динамічними характеристиками МТСС для виявлення особливостей, пов'язаних з різними областями їхнього утворення в СС чи різною еволюцією.

Завдання дослідження сформовані, виходячи з актуальності досліджень МТСС, яка визначається їх роллю в космогонії та еволюції СС.

1. Визначити фізичні та оптичні характеристики спостережених об'єктів, зокрема альbedo, колір, лінійну і кругову поляризацію, період осьового обертання, розмір ядра, масу пилу, викинутого під час спалахів, оптичну товщину кометних атмосфер та ін., і хімічний склад пилового компонента.
2. Виявити і дослідити морфологічні особливості атмосфер спостережених МТСС задля виявлення низькоконтрастних структур (фен, джети, оболонки, арки та ін.) за допомогою методів цифрової фільтрації.
3. Ототожити молекулярні емісії у спектрах далеких комет і обчислити пило- та газопродуктивності, а в разі їх відсутності оцінити верхню межу для цих характеристик.
4. Виявити і дослідити часові варіації кольору і спектральної залежності відбивної здатності пилу в активних об'єктах різних динамічних класів.
5. Вивчити просторовий розподіл інтенсивності випромінювання основних кометних молекул, іонів та пилу, а також кольору і поляризації (лінійної та кругової) в комах та виявити закономірності у кометах різних сімейств.
6. Вивчити особливості нестационарних процесів в активних МТСС: визначити швидкості продукування основних кометних молекул і пилових частинок та дослідити їх варіації з часом і геліоцентричною відстанню; провести пошук фотометричних та спектральних відмінностей між фрагментами ядер комет, які розвалилися, для виявлення неоднорідностей внутрішньої будови ядер; механізми активності МТСС.

7. Використовуючи різні модельні підходи до задачі розсіяння сонячного світла на реголітових та кометних частинках, встановити фізичні та оптичні властивості пилу в об'єктах різних популяцій.
8. Виявити подібність і відмінність у фізичних і динамічних характеристиках активних малих тіл різних популяцій, які залежать від генетичних факторів чи еволюційних процесів.
9. Провести квазіодносимультанні фотометричні, поляриметричні та спектральні спостереження комет, насамперед далеких комет, активних астероїдів і кентаврів, та моніторингові спостереження для отримання довгих рядів для дослідження еволюції оптичних та фізичних характеристик об'єктів у широкому діапазоні геліоцентричних відстаней, фазових кутів і довжин хвиль з використанням доступних світових телескопів у межах спільних проектів.

Об'єкти дослідження: комети різних динамічних класів, активні астероїди, кентаври.

Предмет дослідження: фізичні та динамічні характеристики МТСС у широких просторових та часових діапазонах; діагностика пилу та хімічного складу досліджуваних об'єктів на основі моделювання результатів спостережень; нестационарні процеси в МТСС; процеси розсіювання світла пиловими частинками в атмосферах комет.

Методи досліджень передбачають комплексний підхід до проведення спостережень методами ПЗЗ-фотометрії, спектроскопії в режимі довгої щілини, просторової лінійної та кругової поляриметрії, спектрополяриметрії, узагальнення, порівняльний аналіз та моделювання результатів спостережень.

Наукова новизна одержаних результатів: Під час виконання роботи отримано наступні нові результати:

1. Вперше запропоновано і виконано програму комплексних досліджень далеких (у яких перигелійна відстань $q > 4$ а.о.) комет, основними результатами якої є наступні: (i) вперше побудовано детальні карти просторового розподілу параметрів поляризації розсіяного світла далеких комет та виявлено, що їхній ступінь лінійної поляризації вищий, ніж у близьких до Сонця комет на однакових фазових кутах; (ii) за результатами моделювання фотометричних, поляриметричних та спектральних даних визначено склад частинок у комах далеких комет, який є відмінним від складу пилу в короткоперіодичних кометах; (iii) висунуто ідею, згідно з якою кристалізація аморфного льоду в кометах, враховуючи не лише водяний лід, а й більш летючі льоди CO і CO₂ та еволюцію ерозії поверхні, може мати немонотонний характер; (iv) за результатами динамічного моделювання вперше показано, що спалахова активність комет може бути спричинена бомбардуванням метеороїдами поверхонь їхніх ядер.
2. На основі комплексних спостережень комети-кентавра 29P/Schwassmann–Wachmann 1 упродовж 2007 – 2009 рр. на геліоцентричних відстанях 5.7 – 6.0 а.о. вперше: (i) знайдено швидкість продукування іонів CO⁺, яка змінювалася протягом періоду спостережень від 7.0×10^{24} до 1.2×10^{26} іонів с⁻¹, та пилу (у сенсі $A_f \rho$ параметра) – від 3393 ± 93 см до 8561 ± 240 см; (ii) побудовано карти просторового розподілу пилу та іона CO⁺ і показано, що ударна іонізація частинками сонячного вітру найбільш ймовірна для іонізації CO в кометі 29P/Schwassmann–Wachmann 1 і є основним механізмом іонізації в кометах на

великих відстанях від Сонця; (iii) вперше в далекій кометі виміряно кругову поляризацію розсіяного випромінювання пилу та лінійну поляризацію в джетоподібній структурі, яка становить $-(6 \pm 0.1)\%$, тоді як в комі – в середньому $-(2 \pm 0.1)\%$ на фазовому куті 6.2° ; (iv) за результатами моделювання та аналізу динамічної історії комети-кентавра показано, що поверхня її ядра зазнала суттєвих змін і не може більше розглядатися як первісна.

3. Комплексні дослідження далеких комет виявили низку важливих результатів для фізики комет, серед яких найголовнішими є: (i) у спектрах більшості досліджених комет, окрім комети C/2011 KP36 (Spacewatch), емісії відсутні; (ii) пилопродуктивність комет значно вища до перигелію, ніж у короткоперіодичних комет; (iii) у комі комети C/2014 A4 (SONEAR) домінують субмікронні частинки, що складаються з великої кількості льоду та толіно-подібних органічних речовин; (iv) кома комети C/2011 KP36 (Spacewatch) формується частинками різних розмірів, що складаються з водяного льоду, льоду CO₂ та тугоплавкого матеріалу.
4. Вперше отримано з великою роздільною здатністю просторові розподіли яскравості, кольору та поляризації по комі комети 67P/Churyumov–Gerasimenko на основі поляриметричних, фотометричних і спектральних спостережень комети в рамках міжнародної програми підтримки космічної місії Rosetta. Виявлені взаємопов'язані варіації поляризації й кольору по комі (характерні також для комети 2P/Encke) свідчать про еволюцію фізичних властивостей частинок з віддаленням від ядра комети і можуть бути діагностикою для таких характеристик пилу, як швидкість фрагментації пилинок, їхній початковий розмір та склад.
5. Вперше проведено квазіодночасні поляриметричні, фотометричні та спектральні спостереження комети 2P/Encke, на основі яких визначено швидкості продукування молекул CN, C₂, C₃, NH₂ і пилу та побудовано карти розподілу поляризації й кольору в комі. Вперше в кометних дослідженнях, на прикладі двох комет – 2P/Encke і C/2011 KP36 (Spacewatch), визначено поляризацію відбитого ядром світла і її вплив на поляризацію пилової коми. Кількісно показано, що внесок молекулярних емісій в континуумні кометні фільтри досить значний і його потрібно враховувати для точного визначення ступеня лінійної поляризації комет в континуумі та фізичних властивостей пилових частинок.
6. Вперше встановлено, що виявлені за допомогою методів цифрової фільтрації низькоконтрастні морфологічні структури (хвости, джети, фени, оболонки, арки та ін.) у внутрішніх комах спостережених активних МТСС, спричинені потоками пилу і газу з активних ділянок на ядрі, мають різні радіальні профілі поляризації і кольору, що може свідчити про неоднорідність ядра.
7. Вперше виявлено короткочасні зміни кольору пилу в комі довгоперіодичної комети C/2013 UQ4 (Catalina). За допомогою моделі пилових частинок у вигляді агломератів показано, що причиною зміни кольору є поповнення коми пилом різного хімічного складу з різних активних областей внаслідок обертання ядра комети.
8. Вперше отримано просторовий розподіл кругової поляризації в комі довгоперіодичної комети C/2009 P1 (Garradd) та виявлено її змінність з часом. Лівостороння (від'ємна) кругова поляризація зі ступенем від $-0.06 \pm 0.02\%$ до

– 0.5 ± 0.02 % зареєстрована на відстанях до 3×10^4 км від кометного ядра. Вперше проведена спектрополяриметрия комети показала збільшення величини лінійної поляризації з довжиною хвилі зі спектральним градієнтом $+5.1 \pm 1.1$ %/100 нм.

9. Вперше на основі комплексних спостережень комети C/2011 J2 (LINEAR), ядро якої розпалося, показано, що нестационарні процеси і фрагментація ядер комет є індикатором неоднорідності їх композиційного складу і структури. Виявлені зміни показників кольору пилу пов'язані з неоднаковим вкладом пилової складової різних фрагментів в загальний потік випромінювання. Під час покриття зорі кометою, визначено оптичну товщину її пилової атмосфери та отримано відносну швидкість руху компонента В.
10. Результати спостережень активних астероїдів та їхнього чисельного моделювання вперше дали можливість: (i) визначити метеорний потік, відповідальний за кометоподібну активність астероїдів (596) Scheila та (6478) Gault, що підтверджує обґрунтованість використання ударного механізму для пояснення короткочасної активності астероїдів; (ii) побудувати карти кольору та дослідити його варіації вздовж хвоста астероїда (6478) Gault; (iii) дослідити морфологію активних утворень та зміну кольору коми в астероїді (596) Scheila і (6478) Gault під час та після їхнього спалаху; (iv) визначити геометричне альbedo потенційно небезпечного для Землі активного астероїда (3200) Phaeton на великих фазових кутах, яке відповідає типовим значенням для темних астероїдів F-типу.
11. Вперше отримано великий обсяг квазіодносимчасних фотометричних, поляриметричних, спектрополяриметричних та спектральних даних для 24 комет з різних динамічних груп, 3 активних астероїдів і 1 кентавра. Поляриметричні спостереження далеких комет проведено вперше в кометних дослідженнях. На основі спостережних даних визначено фізичні, оптичні та хімічні характеристики пилового, газового та плазмового компонентів атмосфер комет, ком і хвостів активних астероїдів та кентавра, які істотно доповнюють і уточнюють сучасні знання про фізику та хімію активних МТСС. Результати досліджень представлено в 36 реферованих публікаціях та на 24 міжнародних конференціях.

Практичне значення отриманих результатів. Найбільшу наукову й практичну цінність становить масив квазіодносимчасних фотометричних, спектральних і поляриметричних спостережень 24 комет з різних динамічних сімейств, 3 (з приблизно 20 відкритих) активних астероїдів та 1 активного кентавра, на основі якого отримано нові дані та знання про фізичні та хімічні властивості досліджуваних об'єктів.

Практична цінність роботи визначається: (i) великою кількістю отриманих фізичних, хімічних і динамічних характеристик досліджуваних об'єктів та інтерпретацією виявлених ефектів і закономірностей; (ii) використанням отриманих даних при підготовці й здійсненні наукових програм наземних і космічних проектів, як це було у випадку космічної місії Rosetta до комети 67P/Churyumov–Gerasimenko; (iii) отримані результати щодо хімічного складу далеких комет можуть бути використані для переосмислення теорій місця та умов формування комет у СС та

космогонії СС загалом. Результати дисертаційної роботи уже застосовуються і можуть бути застосовані в подальшому в наукових установах України — ГАО НАН України, АО КНУ, Інституті астрономії ХНУ, АО ОНУ; в астрономічних установах і обсерваторіях близького і далекого зарубіжжя, а також у навчальному процесі.

Достовірність та обґрунтованість отриманих результатів підтверджуються використанням нових методик підготовки і проведення спостережень та застосуванням сучасних методів їх обробки і визначення похибок вимірювань. Моделі, які використовувалися для аналізу результатів спостережень, ґрунтуються на сучасних знаннях про кометний пил і процеси формування пилових, нейтральних та плазмових атмосфер активних МТСС. Основні наукові результати досліджень апробовано у фахових міжнародних журналах, на міжнародних наукових конференціях і семінарах.

Особистий внесок здобувача. Основні результати дисертації викладено в 36 роботах [1–36]. Робота [30] написана автором одноосібно. У роботах [1–5, 7, 8, 10, 11, 15–17, 22, 23, 26, 27, 31] дисертантка є першим автором і їй належить постановка задачі, відбір об'єктів для спостережень, проведення більшості спостережень, частково їхня обробка, участь в аналізі отриманих результатів, підготовці та написанні статей. У роботах [24, 33] автор брала участь у спостереженнях та в аналізі отриманих результатів, виконала цифрову обробку зображень та інтерпретацію виявлених активних структур у комах активного астероїда та комети-кентавра. У роботах [9, 14, 28] автор брала участь в постановці задачі, їй належить відбір об'єктів, участь в обговоренні та аналізі результатів, написанні текстів статей. У роботі [12] автор брала участь у спостереженнях комети, виконала обробку фотометричних зображень, провела їхній аналіз та інтерпретацію, брала участь у написанні тексту статті. У роботі [13] автор брала участь у спостереженнях комети на 6-м телескопі, виконала обробку фотометричних зображень з вузькосмуговими фільтрами, провела їхній аналіз та інтерпретацію, брала участь в написанні тексту статті. У роботі [18] автору належить відбір об'єкта, участь в обговоренні результатів та написанні тексту статті. У роботі [20] автор брала участь у спостереженнях комети 67P/Churyumov–Gerasimenko в рамках Міжнародної програми наземної підтримки місії Rosetta і виконала обробку фотометричних, поляриметричних та спектральних зображень, отриманих на 6-м телескопі, брала участь в аналізі результатів. У роботах [19, 32, 34] автор брала участь у спостереженнях, виконала обробку поляриметричних і фотометричних зображень, брала участь в обробці спектрів, побудувала карти розподілу кольору та поляризації по комах комет, виконала цифрову обробку зображень і провела аналіз морфології структур у комі, брала участь в інтерпретації отриманих результатів та обговоренні й написанні статей. У роботах [6, 21] автору належить відбір та спостереження об'єктів, обробка поляриметричних і фотометричних зображень, автор приймала участь в аналізі отриманих результатів, обговоренні та написанні текстів статей. У роботах [25, 29, 35, 36] брала участь в обробці спостережень, обговоренні результатів та написанні текстів статей.

Апробація результатів дисертації. Основні результати досліджень оприлюднювалися й обговорювалися на таких конференціях: JENAM 2009 (Велика Британія, Гартфордшир, 2009); European Planetary Science Congress 2010 (Італія, Рим,

2010); IAU XXVIII General Assembly (Китай, Пекін, 2012); VII International Conference «Astronomy and Space Physics in Kyiv University» (Україна, Київ, 2014); ACM2014 (Фінляндія, Гельсінкі, 2014); The 15th Electromagnetic and Light Scattering Conference (Німеччина, Лейпциг, 2015); COSPAR Symposium (Бразилія, Фос-ду-Ігуасу, 2015); Europlanet NA1 Workshop (Австрія, Грац, 2016); COSPAR Scientific Assembly (Туреччина, Стамбул, 2016); Workshop «A new vision after Rosetta/Philae» (Франція, Тулуза 2016); AGU Fall Meeting (США, Сан-Франциско, 2016); Astronomy and Space Physics in Kyiv University (Україна, Київ, 2017); The 16th Electromagnetic and Light Scattering Conference (США, Вашингтон, 2017); ACM2017 (Уругвай, Монтевідео, 2017); European Planetary Science Congress 2017 (Латвія, Рига, 2017); AS/Division for Planetary Sciences Meeting (США, Прово, 2017); Workshop «Physics of comets after the Rosetta mission: Unresolved problems» (Словаччина, Стара Лесна, 2018); European Planetary Science Congress 2018 (Німеччина, Берлін, 2018); New Cometary Insights from the Close Approach of 46P/Wirtanen: A Symposium in Celebration of Mike A'Hearn (США, Вашингтон, 2019); Astronomy and Space Physics in Kyiv University (Україна, Київ, 2020). Результати роботи також обговорювалися на семінарах відділу фізики субзоряних та планетних систем ГАО НАН України, сектору астрометрії та малих тіл Сонячної системи АО КНУ і відділу фізики астероїдів і комет НДІ ІА ХНУ; загальних семінарах АІ САН (Словаччина, Стара Лесна) та Інститута геофізики і позаземної фізики Технічного університету Брауншвейга (Німеччина, Брауншвейг) та інших.

Публікації. Результати дисертаційної роботи викладено у 60 публікаціях, з яких 36 статей [1–36] опубліковано у виданнях, віднесених до першого, другого та третього квартилів (Q1, Q2 та Q3), відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank або Journal Citation Reports: «Astronomy and Astrophysics» – 3 (Q1), «Icarus» – 12 (Q1), «Monthly Notices of the Royal Astronomical Society» – 6 (Q1), «Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences» – 1 (Q1), «Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer» – 1 (Q1), «Planetary and Space Science» – 5 (Q2), «Solar System Research» – 5 (Q3), «Astrophysical Bulletin» – 2 (Q3) та «Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso» – 1 (Q3), а 24 публікації [37–60] представлено в тезах міжнародних та вітчизняних конференцій.

Структура й обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, 3 розділів, висновків, списку використаної літератури і 2 додатків. Повний обсяг дисертації – 422 сторінки.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Дисертацією є **кваліфікаційна наукова праця у формі наукової доповіді**, яка містить аналіз сучасного стану наукової проблеми, опис апаратури, методики спостережень та редукції даних і результатів, детально представлених в опублікованих працях.

У **Вступі** обґрунтовано актуальність наукової проблеми, обраної для дослідження, визначено її мету, задачі та методи розв'язання поставлених задач, вказано на зв'язок дисертаційної роботи з науковими програмами і темами,

сформульовано наукову новизну дослідження, показано наукову і практичну цінність отриманих результатів, наведено дані про особистий внесок здобувача, апробацію роботи, публікації.

Апаратура, методика спостережень та редукція даних. За своєю суттю подана робота є в основному спостережною. Для отримання досліджуваного матеріалу використано комплексний підхід, який полягає, зокрема, у поєднанні методів спостережень (квазіоднчасні фотометричні, поляриметричні, спектрополяриметричні та спектральні спостереження), використанні великих телескопів і проведенні моніторингових спостережень для отримання довгих рядів даних. Спостереження отримувалися на 18 телескопах різних розмірів, як закордонних (зокрема й з Південної півкулі Землі), так і вітчизняних. Основні спостереження МТСС проведено на 6-м телескопі БТА (САО РАН) з багаторежимними фокальними редукторами SCORPIO [61] і SCORPIO-2 [62, 63]. Більшість моніторингових фотометричних та спектральних спостережень проводилися на телескопах діаметром: 4.1-м (SOAR, Чилі), 2-м (FTS, Австралія), 2-м (МЦ АМЕД, Терскол, Україна), 1.6-м (NLA, Бразилія), 1.3-м (SPO, Словаччина), 1-м (SOIA, Таджикистан), 0.7-м (АО КНУ, Лісники, Україна), 0.127-м (Т9, Австралія) та ін. Для отримання якісного спостережного матеріалу в широкому діапазоні геліоцентричних відстаней, фазових кутів і довжин хвиль, з високими часовою, просторовою та спектральною роздільними здатностями використовувалися сучасні прилади на основі ПЗЗ-матриць. Для обробки отриманих оригінальних зображень застосовувалися сучасні програми та цифрові робастні методи, які були адаптовані під особливості спостережень активних МТСС, що забезпечило високоякісний матеріал для подальшого аналізу.

Великий обсяг спостережного матеріалу для вибраних активних МТСС отримано автором протягом 2006 – 2020 рр. Для спостережень та обробки даних на різних телескопах використовувалися аналогічні підходи, фільтри та програми редукцій, що й для 6-м телескопа [61–63], коротко описаного нижче. Особлива увага приділялася вивченню систематичних і випадкових похибок вимірювань і оцінкам точності отриманих даних.

Фотометрія. Фотометричні спостереження МТСС на телескопах здійснювалися з широкосмуговими ($B, V, R, I, g-, r-sdss$) і вузькосмуговими ($BC, GC, RC, SED415, SED500, SED537$) фільтрами. Для корекції плоского поля проводилися спостереження сутінкового неба через ті самі фільтри. Для контролю середніх коефіцієнтів екстинкції та нуля-пункту для показників кольору спостерігалися зорі стандарти [67, 73, 78].

Лінійна поляриметрия. Поляриметричні спостереження проводилися з тими ж фільтрами, що і під час фотометрії. Для визначення ступеня лінійної та кругової поляризації комети використовувався дихроїчний аналізатор світла, названий POLAROID [63]. Кожний цикл вимірювань лінійної поляризації складався із серії зображень з $\lambda/2$ фазовою пластиною на трьох фіксованих позиційних кутах $+60^\circ, 0^\circ$ і -60° . Інструментальна поляризація визначалася за спостереженнями зір стандартів з малою поляризацією. Після корекції інструментальної поляризації спостережений ступінь поляризації стандартних зір з високою поляризацією відхилявся від каталожних величин [68] у середньому на 0.2 %, а позиційний кут площини

поляризації – на 0.5° . Ці значення приймалися як точність наших інтегральних поляриметричних вимірювань, отриманих за допомогою аналізатора POLAROID.

Кругова поляриметрия. Для вимірювань кругової поляризації використовувалася фазова пластинка $\lambda/4$. Пластинка обертається у двох фіксованих кутах, 0° і 90° . Фазову пластинку встановлюють у конвергентному ($F/4$) потоці, щоб уникнути великої інструментальної поляризації. Ця методика вимірювання кругової поляризації інструментом SCORPIO-2 дозволяє усунути похибки фазового зсуву фазової пластинки, але вимагає стабільної атмосфери. Точність наших поляриметричних вимірювань для кругової поляризації становила в середньому 0.02%.

Спектрополяриметрия. Призма Волластона (WOLL-1) використовувалася як аналізатор для вимірювання поляризації в кометах. WOLL-1 має кут розходження звичайних, $I_o(\lambda)$, і незвичайних, $I_e(\lambda)$, променів 5° . За щілиною, у фокальній площині, встановлюється суперахроматична пластинка з фазою $\lambda/2$ або $\lambda/4$, яка обертається. Для фіксованих положень $\lambda/2$ фазової пластинки, 0° , 45° , 22.5° і 67.5° , на виході спектрографа отримуємо серію пар спектрів $I_o(\lambda)$ і $I_e(\lambda)$ у взаємно перпендикулярних площинах поляризації. Висота щілини становила $6'$, а її ширина змінювалася в діапазоні $0.5-22''$. Лампа He-Ne-Ar використовувалася для калібрування за довжиною хвилі. Експозиція для кожного вимірювання обиралася таким чином, щоби забезпечити найкраще співвідношення сигнал/шум (S/N) і мінімізувати деполаризуючий ефект атмосфери Землі. Зображення спектрів лампи неперервного спектру використовувалися для корекції плоского поля, яке отримувалося для кожного кута фазової пластинки.

Обробка спостережень. Оригінальні зображення оброблялися за допомогою програмного забезпечення на основі IDL, адаптованого автором під особливості спостережень MTCC. Обробка включала корекцію шуму зчитування (bias) і плоского поля (flat field), видалення слідів космічних частинок, визначення фону, урахування атмосферного поглинання, калібрування потоків, суміщення зображень та ін. Автором були застосовані сучасні методи обробки спостережних даних, включаючи різні статистичні методи аналізу даних, зокрема робастний метод та метод гістограм. Урахування фону проводилося за допомогою методу гістограм для кожного зображення окремо до того, як зображення склалися. Інтенсивність фону неба визначалася в тих частинах зображення (в основному на краях), на яких не було слідів кометної коми, хвоста або зір. Відлік, що відповідає максимуму гістограми, вважався рівнем фону неба, який потім було віднято із зображення комети. Видалення слідів космічних променів було зроблено на заключній стадії редукції за допомогою робастних оцінок параметрів для зменшення зміщення (bias), спричиненого окремими викидами [66]. Щоб збільшити співвідношення S/N і виявити більш слабкі деталі та протяжні структури в комі, всі окремі зображення були просумовані за допомогою методу робастного усереднення [81]. Використання робастної оцінки пояснюється тим, що вона є більш стабільною щодо випадкових похибок і дозволяє обчислювати незміщене середнє значення вимірюваних величин [75]. Вирівнювання і суміщення зображень проводилося за допомогою центральних піків яскравості в комі (оптоцентр), які визначалися ізофотами кометної коми. Ця процедура дає змогу центрувати зображення з точністю близько 0.1 пкл.

Для аналізу розподілу енергії в кометному спектрі та пошуку можливих молекулярних емісій одновимірні спектри отримувалися шляхом складання відліків вздовж щілини в межах фіксованої відстані від ядра. Зазвичай спектри комет складаються з неперервного спектру (континууму), утвореного внаслідок розсіяння сонячного світла на пилових частинках, і емісійного спектру, який містить емісійні смуги молекул та іонів (і ліній металів у випадку близьких до Сонця комет), які виникають в результаті резонансної флуоресценції сонячного випромінювання. Щоб ізолювати емісійний спектр комети, необхідно від спостереженого кометного спектру відняти масштабований сонячний спектр [77].

У **Розділі 1 «Результати поляриметричних, фотометричних та спектральних досліджень комет»** представлено основні результати комплексних спостережень 24 комет різних динамічних сімейств (3 короткоперіодичних комети [16, 19, 20, 29, 35], 1 комета типу Enke [32, 34], 4 довгоперіодичних комети на геліоцентричній відстані менше 3 а.о. [4, 15, 17, 36], 16 далеких комет на геліоцентричних відстанях більше 4 а.о. [1, 2, 5–10, 12, 13, 21, 23, 27, 30, 59]). Отримані результати інтерпретовано в рамках наявних теорій електромагнітного розсіяння світла пиловими частинками і моделей речовинного складу газової складової атмосфер активних малих тіл, в результаті чого визначено оптичні, фізичні й хімічні властивості досліджуваних об'єктів. Для визначення фізичних властивостей пилу (речовинного складу, розмірів і структури) застосовано різні моделі до сукупних результатів, отриманих з фотометричних, спектральних та поляриметричних спостережень МТСС. Загалом для теоретичного моделювання спостережених результатів були використані такі моделі пилових частинок: агрегати, агломератні частинки, випадкові гауссові частинки, а також шорсткі сфероїди.

Модель пилинок у вигляді агрегатів [74] була використана для аналізу результатів апертурних поляриметричних спостережень комет C/2010 S1 (LINEAR) [6, 21], C/2010 R1 (LINEAR) [6, 21], C/2011 KP36 (Spacewatch) [21, 59], C/2012 J1 (Catalina) [46], C/2013 V4 (Catalina) [36] та C/2014 A4 (LINEAR) [27].

Для інтерпретації просторових розподілів лінійної поляризації та кольору далеких комет C/2014 A4 (LINEAR) та C/2011 KP36 (Spacewatch) [27, 59] використовувалася модель шорстких сфероїдів, описана в статті [72]. Значною перевагою моделі є те, що запропонована модель може забезпечити інтерпретацію результатів колориметричних і поляриметричних спостережень комет з використанням реалістичних характеристик пилових частинок.

Для дослідження варіацій кольору кометного пилу, його хімічного складу та розсіювальних властивостей використовувалася альтернативна модель, так звана агломератна модель пилинок [82–84]. Ця модель була використана для аналізу поляриметричних і фотометричних спостережень комет: 21P/Giacobini–Zinner [29], C/2018 V1 (Machholz–Fujikawa–Iwamoto) [36], 29P/Schwassmann–Wachmann 1 [28], 46P/Wirtanen [35], C/2013 UQ4 (Catalina) [17], C/2012 J1 (Catalina) [46] та C/2011 J2 (LINEAR) [10].

Для дослідження розсіюючих властивостей пилинок також застосовувався метод Sh-матриць, в якому пил представляється у вигляді випадкових гауссових частинок [79, 80]. Цей підхід є ефективним для імітації розсіяння світла частинками складної форми та структури поверхні. Ґрунтуючись на T-матричному методі [76], цей підхід відокремлює фактори, що залежать від форми, від факторів, що залежать від розміру

та показника заломлення, представляючи форму як матрицю форми, або Sh-матрицю. Цю модель було використано для інтерпретації результатів комплексних спостережень короткоперіодичної комети 2P/Encke [32].

За допомогою методів цифрової фільтрації, які застосовувалися до фотометричних зображень, досліджувалися морфологічні структури (хвости, джети, фени, оболонки, арки та ін.) у внутрішніх комах активних МТСС, спричинені потоками речовини з активних ділянок на ядрі [1, 15, 19, 27, 34]. Показано, що різні структури мають свій специфічний розподіл поляризації і кольору, що може свідчити про неоднорідність ядра.

Досліджено і запропоновано механізми активності комет на великих геліоцентричних відстанях [2, 7] та пояснено довгострокову активність далеких комет з перигелійною відстанню більшою ніж 3 а.о. [2, 23]. Розглянуто зв'язок між поляриметричними і фотометричними, а також морфологічними і динамічними, характеристиками комет.

1.1 Результати комплексних досліджень короткоперіодичних комет. У цьому підрозділі зібрано результати комплексних досліджень 4 короткоперіодичних комет сімейства Юпітера – 21P/Giacobini–Zinner [29], 46P/Wirtanen [35], 67P/Churyumov–Gerasimenko [16, 19, 20] і 2P/Encke [32, 34]. Спостереження цих комет проведено в період з 2013 по 2019 роки.

Проведені комплексні спостереження та аналіз результатів вибраних комет дозволив отримати з великою роздільною здатністю просторовий розподіл яскравості, кольору та поляризації по комах комет 2P/Encke [32, 34, 58] і 67P/Churyumov–Gerasimenko [16, 19, 20]. Виявлені взаємопов'язані варіації поляризації і кольору по комах комет 2P/Encke і 67P/Churyumov–Gerasimenko свідчать про еволюцію фізичних властивостей частинок з віддаленням від ядра комети і можуть бути діагностикою для таких характеристик пилу, як швидкість фрагментації частинок, їхній початковий розмір та склад пилу. Вперше в кометних дослідженнях кількісно визначено вплив ядра комети 2P/Encke на колір і поляризацію навколоядерної пилової коми. Після урахування внесків емісій в континуумні кометні фільтри і ядра, колір пилової коми $BC-RC$ зменшився від 1.43 зор.вел. поблизу ядра до 0.4 зор.вел. на відстані 2500 км від ядра [32]. Максимальна величина внеску ядра в поляризацію коми становила 0.7 % [34]. Варіації кольору і поляризації в кометі 2P/Encke вказують на зміни фізичних властивостей пилових частинок з відстанню від ядра.

В кометі 46P/Wirtanen [35, 58] виявлено зменшення продукування пилу за період з 1991 по 2018 рік, що свідчить про вікові зміни ядра і згасання комети. Моделювання результатів комплексних спостережень показало, що навколо ядра комети пил може складатися принаймні з двох типів частинок: багатих на Mg слабо поглинаючих силікатних частинок та вуглецевих частинок [35].

За результатами фотометричних та поляриметричних спостережень комети 21P/Giacobini–Zinner [29] виявлено просторові та часові зміни поляризації. Результати моделювання показали двокомпонентний склад пилу: кома переважно складається з багатих на Mg силікатних частинок ($Re(m) = 1.6 - 1.7$ та $Im(m) = 0.01 - 0.02$) та аморфно-вуглецевих частинок ($m = 2.43 + 0.59i$). Зміна відносного вмісту компонентів викликає варіації поляризації по комі комети.

Комета 67P/Churyumov–Gerasimenko (далі 67P/C-G), яка була ціллю космічної місії Rosetta Європейського космічного агентства, відкрита 11 вересня 1969 р. українськими астрономами К. Чурюмовим та С. Герасименко. Це короткоперіодична комета сімейства Юпітера з орбітальним періодом 6.45 р.

За результатами спостережень 8 листопада та 9 грудня 2015 р. в спектрах комети 67P/C-G виявлено емісії CN, C₂, C₃ та CO⁺ (див. рис. 1), емісію NH₂ ототожнено лише в спектрах від 8 листопада 2015 р., 4 квітня 2016 р. в спектрі комети було виявлено лише емісію CN. Величина $\log [Q(C_2)/Q(CN)] = -0.43$ відповідає класу комет з «дефіцитом» молекул C₂. Спектральний градієнт у діапазоні довжин хвиль λ 465–620 нм становив $8.2 \pm 1.7 \%$ /100 нм.

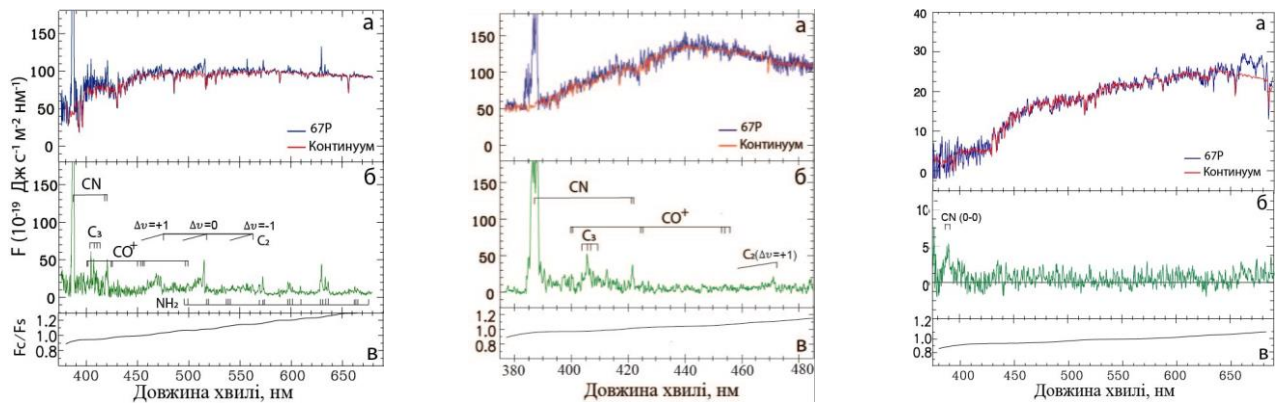


Рис. 1. Спектри комети 67P/C-G, отримані 8 листопада (ліворуч) та 9 грудня (посередині) 2015 р. і 3 квітня 2016 р. (праворуч): а – спостережний спектр комети з накладеним континуумом; б – емісійний спектр; в – поліном, що використовувався для трансформації сонячного спектру.

Морфологічний аналіз показав (рис. 2), що протягом усього періоду спостережень в кометі спостерігалися два сильних джета (J1 і J2), які реєструють майже в кожній появі комети, і довгий пиловий хвіст. Радіальні профілі поверхневої яскравості, кольору і поляризації для коми, джетів і хвоста суттєво відрізнялися.

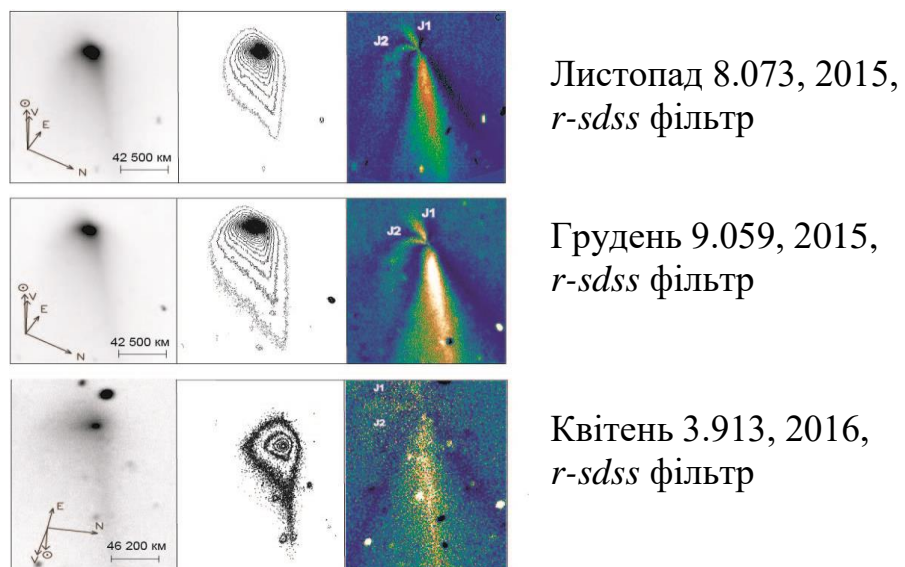


Рис. 2. Прямі зображення комети 67P/C-G (ліворуч), відносні ізофоти (середина), зображення з джетами J1 і J2 і пиловим хвостом після застосування цифрового фільтра (праворуч). Стрілки вказують напрямки до Сонця (☉), півночі (N) і сходу (E) та напрям проекції вектора швидкості комети на небо (V).

Пилопродукування (в сенсі параметра $A\beta$, який характеризує темп виносу пилу з поверхні ядра) зменшилося з 162 см на $r = 1.615$ а.о. до 51 см на $r = 2.723$ а.о., що свідчить про зміну активності комети зі зміною її відстані до Сонця; маса викинутого пилу складала 18 – 70 та 10 – 39 кг/с в листопаді-грудні 2015 р. і 4 – 17 кг/с в квітні 2016 р., в залежності від вибраного розподілу частинок за розмірами. Нормований спектральний градієнт відбивної здатності пилу знизився з 12.5 до 11.3 %/100 нм в діапазоні геліоцентричних відстаней 1.62 – 2.72 а.о.

Колір пилу ($g-r$) поступово змінювався від 0.8 зор.вел. у внутрішній комі до 0.4 зор.вел. у зовнішній (рис. 3). Колір джетів і хвоста був значно червонішим, ніж навколишня кома, що могло бути пов'язано з присутністю великих частинок та/або частинок різного складу, можливо, більш багатих органічними речовинами.

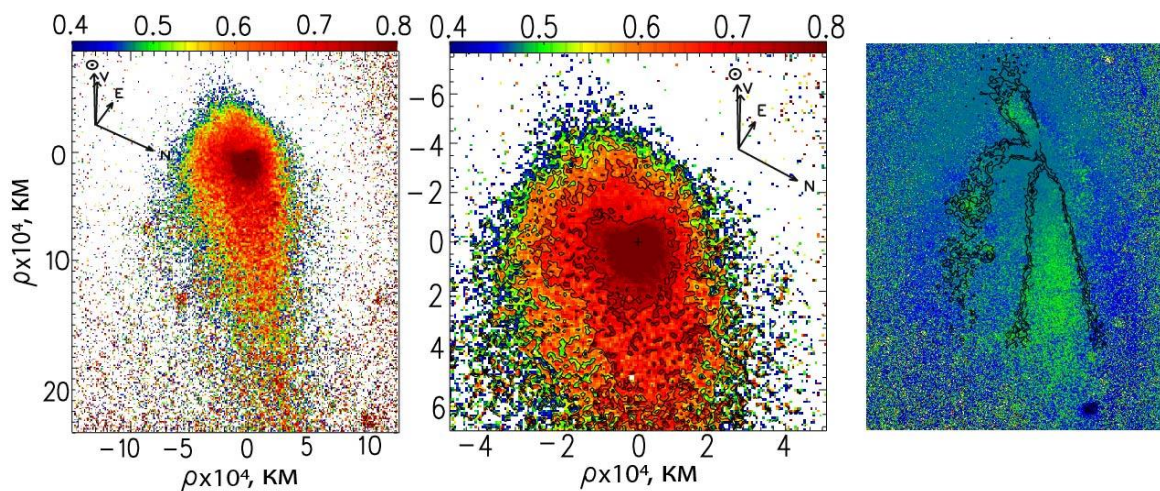


Рис. 3. Розподіл показника кольору ($g-r$ -sdss) в кометі 67P/C-G, отриманий 8 листопада 2015 р. (ліворуч). На середньому зображенні представлено навколоядерну область коми у збільшеному масштабі. Праворуч показано зображення кольору, оброблене цифровим фільтром, з ізофотами, накладеними на зображення.

На основі поляриметричних спостережень побудовано детальні карти поляризації (рис. 4), які показують дуже складну структуру коми в поляризованому світлі: поблизу оптоцентра, < 1500 км, ступінь лінійної поляризації становить $P \approx 8\%$, у внутрішній комі, 1500 – 5000 км, різко падає до $\sim 2\%$, причому швидкість падіння є приблизно однаковою для всіх структур у комі, що відображає дуже швидко зміну властивостей частинок. Далі поляризація поступово, хоча і з деякими хвилеподібними варіаціями, збільшується до максимуму $\sim 9\%$ на відстані 35000 – 40000 км. На картах видно асиметричну щодо оптоцентра оболонку шириною 5000 – 15000 км з низькою поляризацією (1.5 – 2%). У квітні 2016 р., коли $r = 2.7$ а.о. і $\alpha = 10.4^\circ$, поляризація в комі змінювалась від $\sim -0.6\%$ біля ядра до $\sim -4\%$ на периферії коми. Похибки в ступені лінійної поляризації варіювали від 0.1 до 0.2 %.

Розподіл векторів поляризації по комі не показав глобальної орієнтації частинок. Проте відхилення позиційних кутів площини поляризації від перпендикуляра до площини розсіяння в джеті J2 було систематично більшим, ніж у сусідній комі, в середньому на $2.8 \pm 0.7^\circ$ в листопаді і $3.5 \pm 0.5^\circ$ в грудні. У квітні вектори поляризації збігалися з площиною розсіяння по всій комі. Кругова поляризація в кометі 67P/C-G не була виявлена.

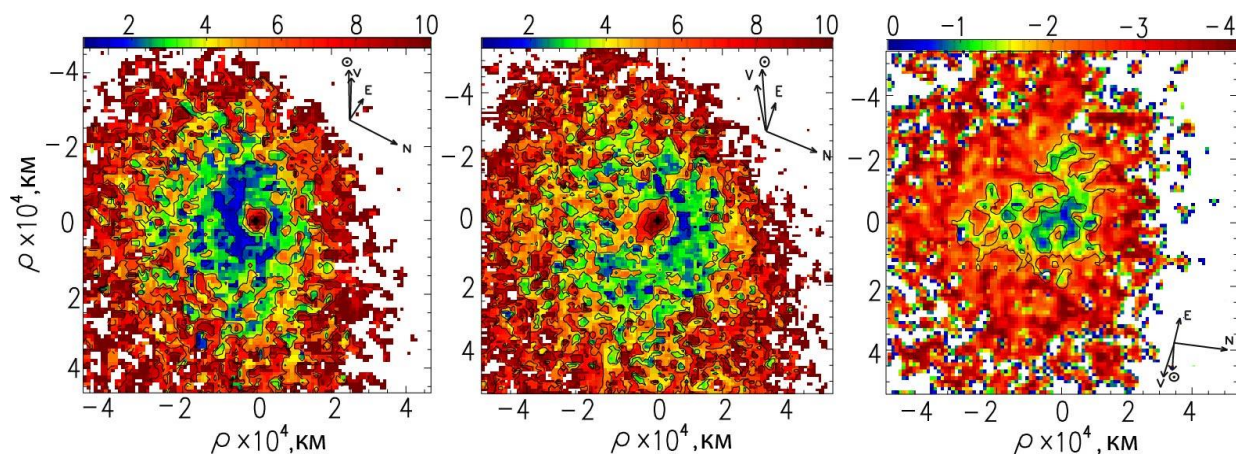


Рис. 4. Просторовий розподіл ступеня лінійної поляризації випромінювання комети 67P/C-G навколо ядра у фільтрі *r-sdss* для трьох дат спостережень: 8 листопада 2015 р. (ліворуч), 9 грудня 2015 р. (середина) і 5 квітня 2016 р. (праворуч).

Аналіз профілів лінійної поляризації та кольору в кометі 67P/C-G показав (рис. 5, ліворуч), що показник кольору пилу поступово зменшується з відстанню від ядра, хоча з більшим градієнтом у внутрішній комі, тоді як поляризація спочатку різко зменшується на перших 5000 км від ортоцентра від $\sim 8\%$ до $\sim 2\%$, а потім поступово збільшується, досягаючи $\sim 7\%$ на 36000 км. Така поведінка кольору та поляризації також спостерігалася у кометі 2P/Encke (рис. 5, праворуч) [32, 34], хоча комети дуже різні: комета 67P/C-G – багата на пил, а 2P/Encke – дуже бідна на пил. Однак обидві комети багаті на великі пилові частинки.

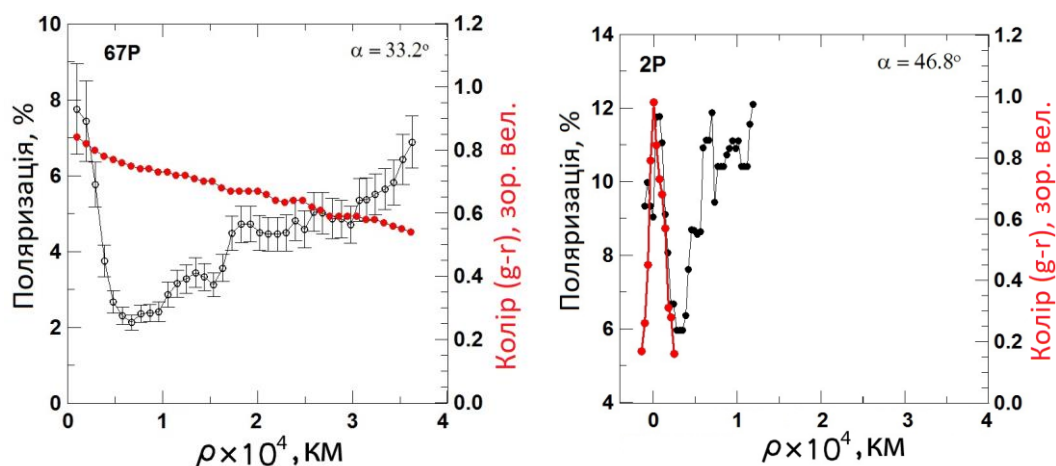


Рис. 5. Варіації поляризації і кольору з відстанню від ядра в кометах 67P/C-G (ліворуч) і 2P/Encke (праворуч).

Як показано в роботі [19], виявлені в комі комети 67P/C-G систематичні варіації поляризації і кольору свідчать про еволюцію фізичних властивостей частинок з віддаленням від ядра комети, зокрема їхнього розміру і складу. Такий самий результат отримано і для комети 2P/Encke на основі чисельного моделювання з використанням методу Sh-матриці для гауссових частинок [34], що підтвердило наш висновок, згідно з яким виявлені тенденції зміни поляризації та кольору в комі комети можна пояснити зміною розміру частинок пилу після того, як вони покинули ядро.

1.2 Результати комплексних досліджень довгоперіодичних комет на геліоцентричних відстанях $r < 3$ а.о. У цьому підрозділі зібрано результати комплексних досліджень 3 довгоперіодичних комет: C/2009 P1 (Garradd) [4, 15],

C/2013 UQ4 (Catalina) [17] та C/2018 V1 (Machholz–Fujikawa–Iwamoto) [36]. Спостереження цих комет проведено в період з 2010 по 2018 роки.

На основі результатів комплексних спостережень комети C/2009 P1 (Garradd) вперше отримано з великою роздільною здатністю просторові розподіли яскравості і кругової поляризації в комі, а також спектральний розподіл лінійної поляризації [15]. Згідно відношення газ/пил комета відноситься до групи пилових комет [4].

Вперше виявлено та детально досліджено зміну протягом тижня кольору пилу від синього до червоного в кометі C/2013 UQ4 (Catalina) [17]. Моделювання показало хімічно неоднорідну кому комети, яка складалася щонайменше з двох компонентів: багатих на Mg силікатів, які продукують синій колір, тоді як червоний колір можуть давати або Mg-Fe силікати, або керогени II типу, або органічні речовини, оброблені низькою дозою ультрафіолетового випромінювання. Таку зміну в хімічному складі пилової коми протягом короткого часу пояснено наявністю активних ділянок на поверхні ядра, які продукують пил різного хімічного складу.

Грунтуючись на поляриметричних спостереженнях комети C/2018 V1 (Machholz–Fujikawa–Iwamoto) [36], визначено поляризацію $P_{\max} \approx (6.8 \pm 1.8) \%$, яка виявилася досить низькою на фазових кутах $\alpha \approx 83 - 91^\circ$. Використовуючи модель агломерованих частинок, визначено склад кометного пилу, який складається з силікатів з високим вмістом Mg та невеликим вмістом Fe або без нього. Показано, що газова складова може бути відповідальною за низьке значення максимуму поляризації.

Комета C/2009 P1 (Garradd) (далі 2009P1) спостерігалася 2 і 14 лютого 2012 р. на геліоцентричній відстані $r \approx 1.67$ а.о. та 14 і 21 квітня 2012 р., $r \approx 2.2$ а.о. [4, 15]. Спостереження отримано з SCORPIO-2 в режимах прямих ПЗЗ-зображень, спектрополяриметрії з низькою роздільною здатністю і панорамної кругової поляриметрії. В оброблених цифровими фільтрами зображеннях комети 2009P1, отриманих 2 і 14 лютого 2012 р., виявлено дві структури (пиловий і плазмовий хвости), орієнтовані в сонячному і антисонячному напрямках, що дозволило визначити період обертання ядра, рівний 11.1 ± 0.8 годин [15].

Спектрополяриметричні спостереження комети 2009P1 використано для отримання розподілу енергії з довжиною хвилі та ототожнення емісій у спектрі комети, в якому виявлено емісії нейтральних молекул CN, CH, C₂, C₃, NH і NH₂ та іонів CO⁺ і H₂O⁺, а також високий рівень пилового континууму (рис. 6).

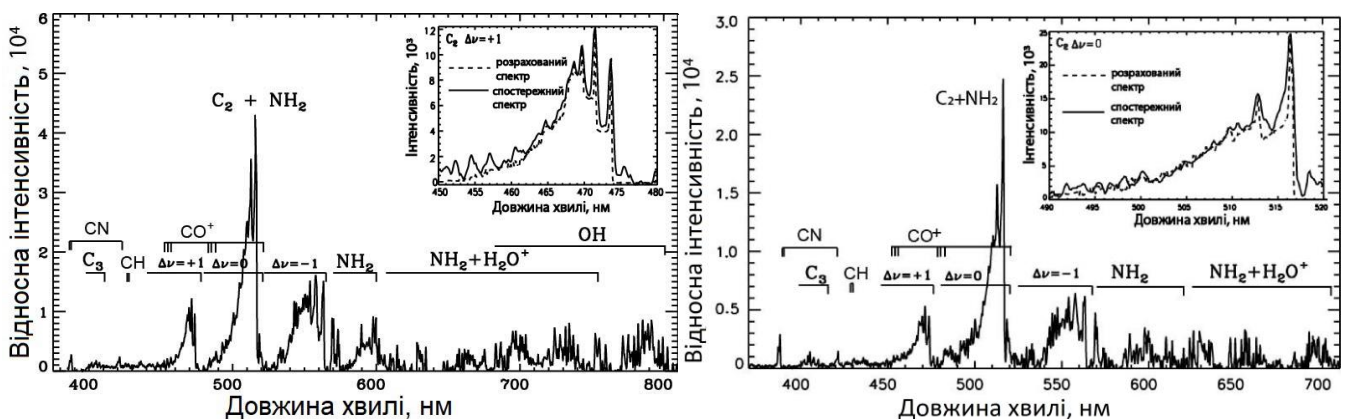


Рис. 6. Спектри комети C/2009 P1 (Garradd), отримані 2 лютого (ліворуч) та 14 квітня 2012 р. (праворуч). Вилучено фон неба і кометний континуум. Вставки показують спостережений спектр (суцільна лінія) та теоретично розрахований спектр (штрихова лінія) смуг Свана C₂ ($\Delta v = + 1$) (ліворуч) і C₂ ($\Delta v = 0$) (праворуч).

На рис. 7 показано спектри інтенсивності (верхня панель) та ступеня лінійної поляризації (нижня панель) як функції довжини хвилі для 2 лютого 2012 р. Спостережений ступінь лінійної поляризації в емісійних смугах менший, ніж у сусідньому неперервному спектрі. Після урахування вкладу континууму, поляризація в смузі Свана C_2 ($\Delta v = 0$) становила $P \approx 3.3\%$, що трохи вище, ніж теоретичне значення 2.5% на $\alpha = 35.9^\circ$. Виявлено невелике збільшення лінійної поляризації з довжиною хвилі із спектральним градієнтом в середньому $\Delta P/\Delta\lambda = +5.1 \pm 1\%$ /100 нм. Величина лінійної поляризації вказує на те, що цю багату пилом комету можна віднести до класу комет з високим P_{\max} .

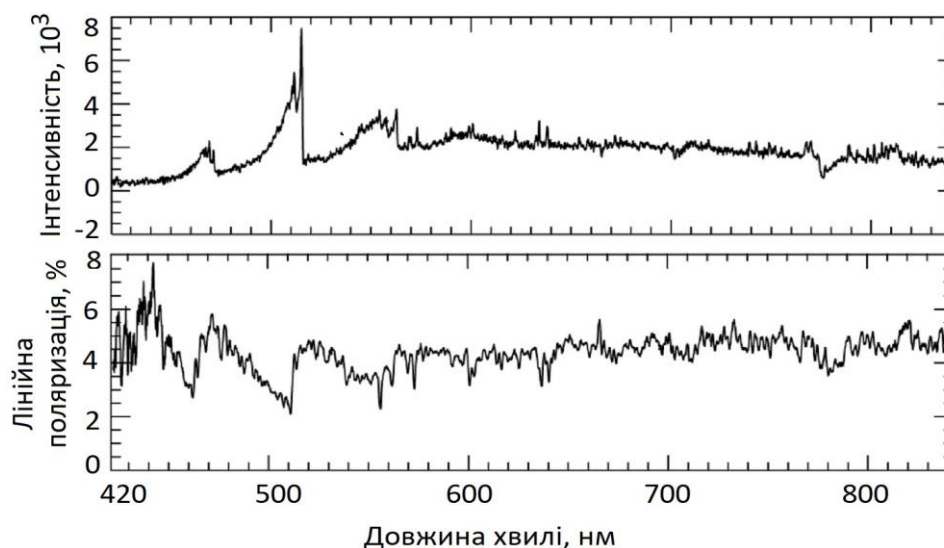


Рис. 7. Розподіл енергії (верхня панель) та ступеня лінійної поляризації (нижня панель) в спектрі комети C/2009 P1 (Garradd), отриманому 2 лютого 2012 р. Рівень потоку для $\lambda < 460$ нм дуже низький, тому поляризація на цих довжинах хвиль є артефактом.

Зображення комети 2009P1 в циркулярно поляризованому світлі отримано 14 лютого і 21 квітня 2012 р. у вузькосмуговому континуумному фільтрі RC (рис. 8). По всій комі кругова поляризація була лівосторонньою, а її величина 14 лютого становила $P_c = -(0.06 \pm 0.02)\%$ і була майже постійною до відстані ~ 30000 км від ядра комети. 21 квітня в навколядерній області $-(0.12 \pm 0.02)\%$, а на відстані від ядра ~ 25000 км $P_c = -(0.4 \div 0.05)\%$. Систематичне зростання кругової поляризації з відстанню від ядра, ймовірно, пов'язане зі збільшенням дрібних пилинок у комі.

1.3 Активність комет на великих геліоцентричних відстанях $r > 4$ а.о. У цьому підрозділі об'єднано результати комплексних спостережень 14 віддалених комет (з перигелійною відстанню більше 4 а.о.) [1, 2, 5–7, 9, 10, 12, 13, 21, 27, 30, 59], 1 комети перехідного типу [8] та 1 комети сімейства Крейца [23], активних на великих геліоцентричних відстанях, які проводилися в рамках запропонованої і виконаної автором довготривалої спостережної програми на 6-м телескопі.

За винятком комет C/2002 VQ94 (LINEAR) [2, 30], C/2011 KP36 (Spacewatch) [59] і C/2012 J1 (Catalina) [8], в спектрах інших далеких комет не було зареєстровано емісійні смуги [7, 12, 30]. Пилопродуктивність далеких комет, як і у більшості нових комет, які входять вперше у внутрішню область Сонячної системи, значно вища, ніж у короткоперіодичних комет, що може вказувати саме на еволюційні відмінності в кометах різних динамічних груп [1, 5, 7, 9, 10, 12, 23, 27, 30].

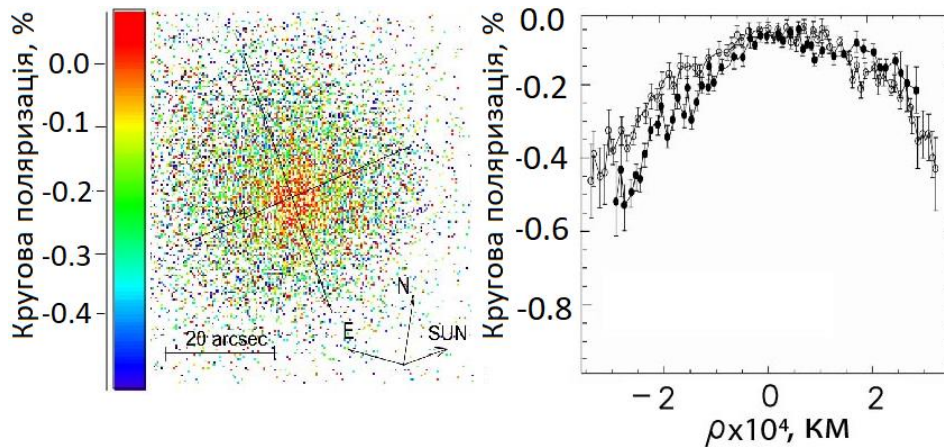


Рис. 8. Розподіл кругової поляризації в комі комети C/2009 P1 (Garradd) 21 квітня 2012 р. (ліворуч) та її варіації з відстанню від ядра вздовж і перпендикулярно до напрямку на Сонце (праворуч).

Ступінь лінійної поляризації в далеких кометах значно вищий, ніж у близьких до Сонця комет на однакових фазових кутах [6, 8, 21, 27, 59]. Результати моделювання фотометричних, спектральних та поляриметричних спостережень дали можливість визначити склад пилових частинок у комах далеких комет, який є відмінним від складу короткоперіодичних комет [6, 21, 27, 46, 59]. Зокрема, показано, що в атмосферах далеких комет присутня дуже велика кількість льоду [6, 21].

Для пояснення активності комет на великих геліоцентричних відстанях запропоновано ідею, згідно з якою кристалізація аморфного льоду (H_2O , CO і CO_2) та еволюція ерозії поверхні можуть мати немонотонний характер [2]. Показано, що для пояснення довготривалої активності далеких комет, поверхня їхніх ядер повинна постійно оновлюватися за рахунок відшаровування, а механізм кристалізації аморфного водяного льоду (принаймні в існуючій формі) не може пояснити тривалої активності комет на великих геліоцентричних відстанях [2, 23]. В той же час, згідно результатів динамічного моделювання, спалахова активність окремих далеких комет може бути спричинена бомбардуванням метеороїдами поверхонь їхніх ядер [7].

Моніторингові спостереження комети C/2006 W3 (Christensen) в широкому діапазоні геліоцентричних відстаней [13] дали можливість дослідити еволюцію активності та її зміни в залежності від відстані до Сонця. Вдалося прослідкувати поступову появу газових емісій при наближенні комети до Сонця та дослідити зміну пило- та газопродуктивності зі зміною геліоцентричної відстані. Автором побудовано карти розподілу пилової та іонної (CO^+) коми комети та отримано швидкість продукування іонів CO^+ [13].

Проведені дворічні фотометричні спостереження комети C/2011 J2 (LINEAR), ядро якої розпалося, дали можливість дослідити нестаціонарні процеси і фрагментацію ядра комети на різних геліоцентричних відстанях [10]. Виявлено зміни показників кольору пилу, які пояснено різним вкладом пилової складової різних фрагментів в загальний потік випромінювання. Визначено оптичну товщину пилової атмосфери під час покриття кометою зорі, $\tau = 0.034 \pm 0.1$. Спостереження двох компонентів ядра дозволило отримати відносну швидкість руху В-компонента ($\sim 0.17''/\text{добу}$).

Вперше на основі чисельного моделювання результатів спостережень довгоперіодичної комети сімейства Крейца C/2012 S1 (ISON) обґрунтовано

недоцільність використання параметра $Af\rho$ [см] для кількісної оцінки маси винесеного з ядра пилу Q [кг/с]. Показано, що величина маси викинутого пилу сильно залежить від динамічних (наприклад, ефективної густини і площі поперечного перерізу), а також оптичних (наприклад, коефіцієнта розсіяння і фазової функції) характеристик пилових частинок. Невеликі відхилення у вказаних характеристиках можуть призводити до кардинальних змін в оцінці абсолютної пилопродуктивності [23].

Комета C/2014 A4 (SONEAR) (далі 2014A4) спостерігалася на 6-м телескопі CAO 5 листопада 2015 р., коли вона перебувала на геліоцентричній відстані 4.2 а.о [27]. Для аналізу морфології коми використано зображення комети у фільтрах $g\text{-}sdss$ (λ 465/650 нм) і $r\text{-}sdss$ (λ 620/600 нм). У комети спостерігалася протяжна кома з сильною концентрацією матеріалу у навколяядерній області коми та довгим хвостом в антисонячному напрямку. Аналіз радіальних профілів поверхневої яскравості коми і хвоста показав наявність суттєвих відмінностей між їхніми профілями, а також між профілями в напрямку на Сонце і в перпендикулярному до нього. Відтак, можна припустити неізотропний витік пилу з ядра, який утворює певні структури в комі.

Карта кольору ($g-r$) пилової коми та хвоста показана на рис. 9 (ліворуч). Як видно, колір пилу в кометі 2014A4 в основному червоний, зокрема поблизу ядра він становить ~ 0.75 зор.вел. Уздовж хвоста колір змінюється від 0.45 до 0.8 зор.вел. У напрямку на Сонце комета показала аномальний розподіл кольорів: у цій області колір пилу переважно нейтральний ($\sim 0.4^m$) у порівнянні з кольором Сонця (колір ($g-r$) для Сонця становить 0.44 зор.вел.). Розраховане пилопродукування (в сенсі параметра $Af\rho$) в кометі становить 680 ± 18 см. Зменшення $Af\rho$ з відстанню від ядра комети 2014A4, переважно крутіші за $1/\rho$ радіальні профілі поверхневої яскравості, що свідчить про зменшення розміру частинок, а також помітну різницю в радіальних профілях для фільтрів $r\text{-}sdss$ і $g\text{-}sdss$ можна пояснити фрагментацією частинок (для далеких комет мається на увазі сублімація льодяних частинок).

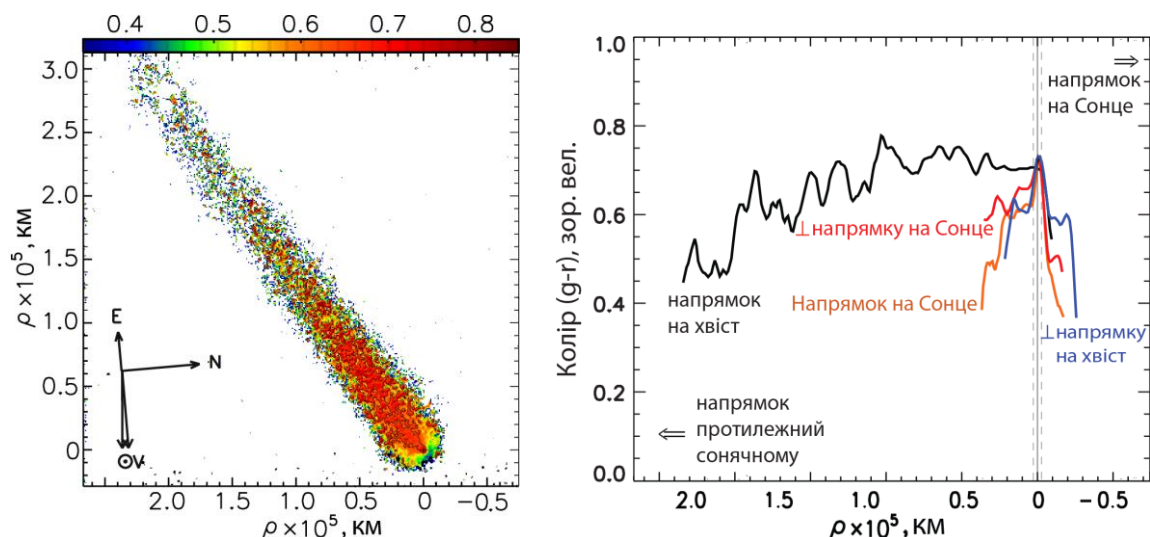


Рис. 9. Карта кольору ($g-r$) пилу в кометі C/2014 A4 (SONEAR) (ліворуч) та радіальні профілі кольору через ядро в різних напрямках (праворуч).

Спектр комети 2014A4 (рис. 10в) демонструє відсутність газових емісійних смуг. Однак рівень зашумлення досить великий, і, очевидно, що навіть в разі присутності слабких емісійних ліній, ми їх не побачимо. Тому було визначено верхні межі

можливих потоків для молекул CN, C₃, C₂ і CO⁺ та верхні межі їхньої швидкості продукування (за винятком CO⁺) [27]. Досліджено варіації відбивної здатності $S'(\lambda)$ вздовж дисперсії, яка виражається через спектр комети $F_{com}(\lambda)$, поділений на масштабований спектр Сонця $F_{sun}(\lambda)$: $S'(\lambda) = F_{com}(\lambda)/F_{sun}(\lambda)$. У результаті отримано величину спектрального градієнта на рівні $21.6 \pm 0.2 \%$ /100 нм для всієї досліджуваної області довжин хвиль, λ 465–620 нм.

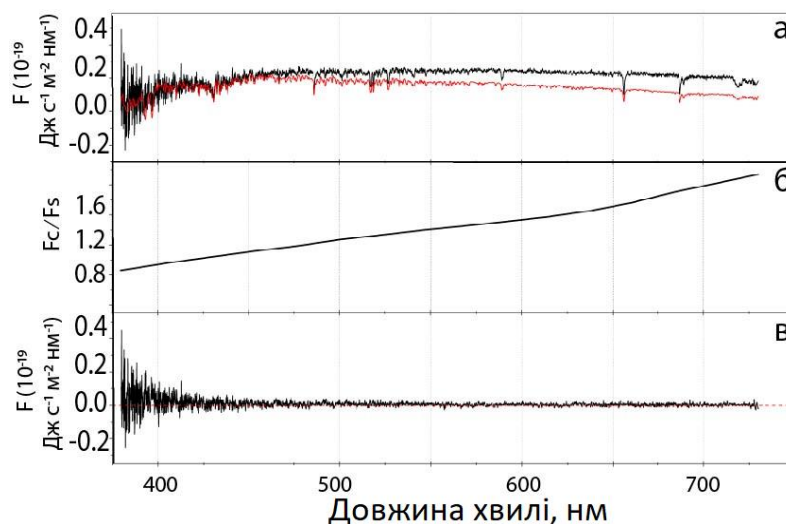


Рис. 10. Результати обробки спектру комети C/2014 A4 (SONEAR): (а) – розподіл енергії у спостереженому кометному спектрі (чорна лінія) та нормалізованому спектрі Сонця (червона лінія); (б) – поліном, що використовувався для трансформації сонячного спектру; (в) – емісійний компонент кометного спектру.

Детальні карти просторового розподілу параметрів поляризації, ступеня лінійної поляризації і векторів поляризації, отримані в широкосмуговому фільтрі R, показано на рис. 11. Спостерігається віялоподібна область високої поляризації ($\sim 6\%$) навколо ядра на відстані ~ 10000 км і область низької поляризації ($\sim 1\%$) на відстанях $10000 - 30000$ км від оптичного центра в протилежному від Сонця напрямку. Похибки в ступені лінійної поляризації коливалися від 0.12% до 1.1% .

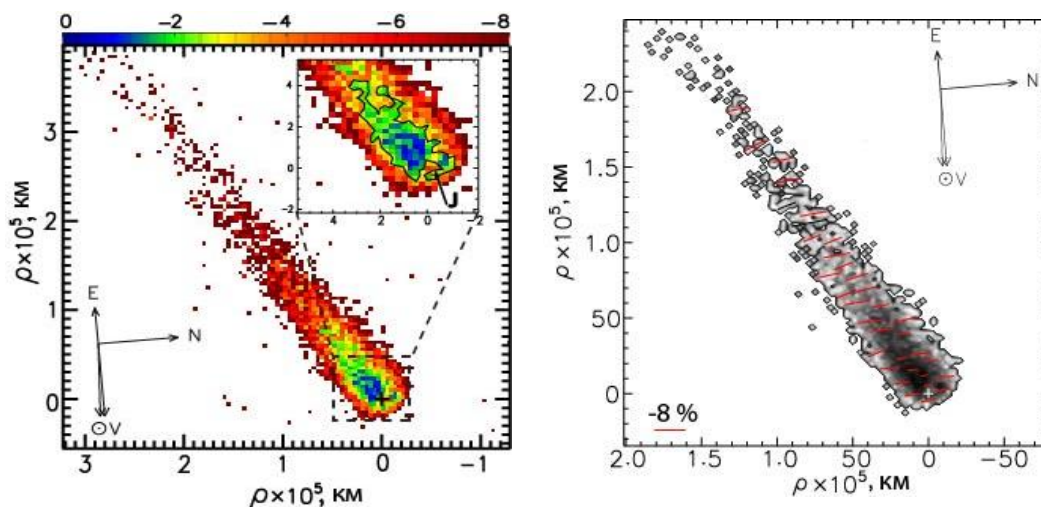


Рис. 11. Просторовий розподіл ступеня лінійної поляризації (ліворуч) та векторів поляризації (праворуч) по комі комети C/2014 A4 (SONEAR). Оптичний центр позначено хрестом. Орієнтація векторів дає напрям локальної площини поляризації, а довжина векторів – ступінь поляризації.

Спільний аналіз поляризації і кольору та їхні зміни з відстанню від ядра комети 2014A4 за допомогою чисельного моделювання показав: (i) пилові частинки у віддалених кометах невеликі (<1 мкм), і це не дивно, оскільки в комі занадто мало газу, який може винести великі частинки; (ii) пил містить крижані частинки та частинки, утворені (або вкриті) толіном чи схожою органікою; (iii) крижані частинки фрагментують (сублімують), коли вони виносяться із ядра. Отримані фотометричні характеристики відповідають субмікронним/мікронним частинкам і їхній фрагментації в комі. За допомогою моделювання вдалося відтворити спостережені значення поляризації та кольору, а також їхні зміни з відстанню від ядра. Поляризація в хвості, $\sim 8\%$, пояснена сумішшю частинок толіну радіусом > 3 мкм і пористих крижаних частинок радіусом > 0.75 мкм (пористість $30 - 50\%$), в якій крижаних частинок $> 98\%$ у суміші. Для пояснення поляризації в хвості, далеко від ядра $P \approx -5\%$, потрібна суміш частинок толіну радіусом > 3 мкм і пористих крижаних частинок радіусом > 1.0 мкм (пористість 30%), в якій вміст крижаних частинок повинен бути $85 - 90\%$. Поляризація біля ядра, -2.5% , може бути відтворена частинками толіну радіусом > 3 мкм, змішаними з пористими крижаними частинками радіусами < 1.3 мкм (пористість $30 - 50\%$). Показано, що додавання невеликої кількості силікатів (наприклад, як матеріалу, що лежить під шаром толіну) може трохи зменшити колір, зробивши його ближчим до спостережених значень, не впливаючи на величину поляризації. Оскільки результати отримано за досить простою моделлю шорстких сфероїдів, то деякі незначні відхилення від спостережених значень закономірні.

У розділі 2 «Комета-кентавр: особливості активного стану» представлено результати довготривалих комплексних спостережень комети-кентавра 29P/Schwassmann–Wachmann 1 (далі 29P). Комета-кентавр 29P, відкрита в 1927 р., є унікальним об'єктом. Вона стала відомою через численні й непередбачувані сплески активності. Як правило, після одного-двох місяців спокійного стану комета несподівано спалахує.

Спектроскопічні спостереження комет свідчать про те, що вода є найпоширенішою летючою речовиною в їхньому ядрі, а лабораторні дані вказують на те, що вода не повинна сублімувати на відстанях від Сонця $> 4 - 5$ а.о. Тому важливо з'ясувати, якою є природа агента, який контролює активність далеких комет, і яким чином цей агент випаровується з ядра. Як правило, вважається, що пиловий шар та/або льоди блокують дифузію газу до поверхні. Як і всі об'єкти, які ніколи не наближаються до Сонця (29P має $q = 5.72$ а.о.), ядро комети 29P лише слабо нагрівається, а температура її поверхні ніколи не виходить за межі порога сублімації води. Комета 29P є постійно активною і завжди має пилову кому, навіть за мінімальної активності.

Важливі результати, отримані автором протягом 14 років моніторингу комети-кентавра 29P, наведено в [1–3, 11, 18, 22, 26, 28, 30, 33].

У спектрі комети 29P ототожнено численні коливальні переходи CO^+ ($A^2\Pi - X^2\Sigma$), а також смугу N_2^+ ($0, 0$) електронної системи ($B^2\Sigma - X^2\Sigma$) (рис. 12). Вперше виявлено коливальні переходи $(6, 0)$ і $(5, 0)$ системи CO^+ ($A^2\Pi - X^2\Sigma$), які

раніше не спостерігалися в спектрі цієї комети [11, 22]. Визначено співвідношення $[N_2^+]/[CO^+] = 0.01$, що свідчить про низькі температури (< 30 K) в області формування ядра цієї комети. Середнє значення нормалізованого спектрального градієнта відбивної здатності пилу становить 5.90 ± 0.03 %/100 нм.

Наявність добре розвиненої системи смуг CO^+ у спектрах комети 29P може свідчити про наявність значної кількості льодів CO або CO_2 в її ядрі, а сублимація цих льодів може бути відповідальною за формування коми і хвоста. Одночасна присутність газів N_2 та CO можлива в разі формування ядра цієї комети при температурах зовнішнього середовища, нижчих за 30 K, що свідчить про формування ядра комети з речовини протосонячної туманності.

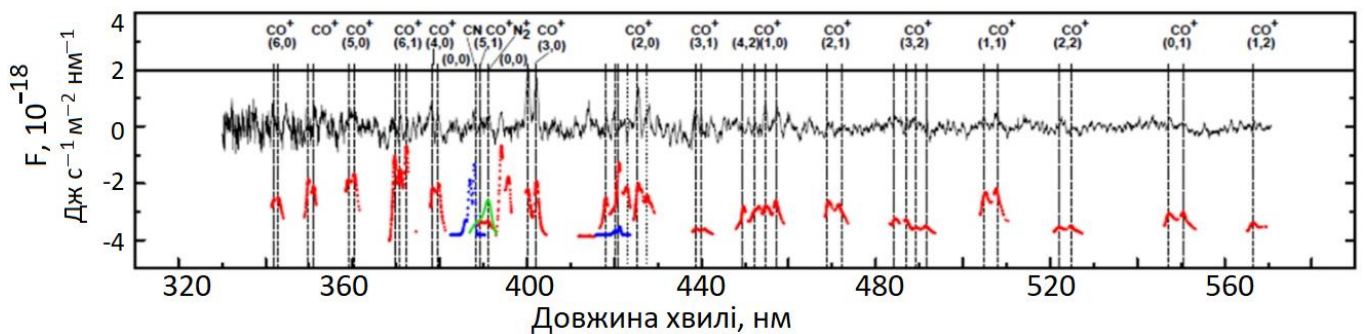


Рис. 12. Молекулярні емісії CO^+ і $N_2^+(0,0)$, виявлені в спектрі комети-кентавра 29P. Розраховані спектри ототожнених емісій показано кольором внизу спектру.

Водночас, моделюючи еволюцію орбіти комети-кентавра 29P [18], показано, що ця комета через кілька сотень тисяч років, найімовірніше, буде викинута в міжзоряний простір, а поверхня її ядра настільки змінилася, що вже не може розглядатися як первісна [18].

Оскільки спектри комети-кентавра 29P показали присутність іонів CO^+ і N_2^+ , то це спонукало нас дослідити більш детально плазмову кому комети і визначити механізми іонізації нейтрального газу на великих геліоцентричних відстанях. У цій кометі регулярно спостерігаються спалахи, а іони CO^+ виявлено як при спалахах, так і в майже неактивному стані комети.

Для дослідження механізму іонізації на великих геліоцентричних відстанях побудовано й проаналізовано карти просторового розподілу іонів CO^+ у комі комети 29P за спостереженнями, отриманими в період з 2007 по 2011 рік [26]. На верхній панелі рис. 13 представлено карти розподілу CO^+ після вирахування континууму, а на нижній панелі показано зображення пилової коми комети 29P.

Іонна CO^+ кома спостерігалася для всіх дат спостережень. У більшості випадків вона була компактна, іноді асиметрична відносно оптичного центра й витягнута в напрямку до Сонця. На противагу іонній комі, пилова кома більш протяжна. Як видно на рис. 13, кометна кома трансформувалася до кінця 2009 р.: активність комети знизилася, а пилова кома стала більш компактною. Кома CO^+ майже не змінювалася протягом періоду спостережень. На основі аналізу наших спостережних даних було запропоновано фізичний механізм [26], який пояснює іонізацію CO в комі комети 29P. Оскільки передбачається, що ефекти іонізації з поверхні шляхом розпилення

зарядженими частинками сонячного вітру важливі (або навіть домінують) на геліоцентричній відстані близько 6 а.о., то було проаналізовано параметри сонячного вітру в околі комети і порівняно потік частинок сонячного вітру зі спостереженою щільністю коми CO^+ , беручи до уваги, що винос матеріалу з поверхні при розпиленні практично пропорційний потоку сонячного вітру. Прямі вимірювання параметрів сонячного вітру в околі кометного ядра недоступні, тому було використано чисельну тривимірну магнітогідродинамічну модель (МГД) плазми сонячного вітру, надану NASA. Ця модель ґрунтується на чисельному рішенні рівнянь для густини плазми, імпульсу і густини енергії, а також магнітного поля в МГД-наближенні.

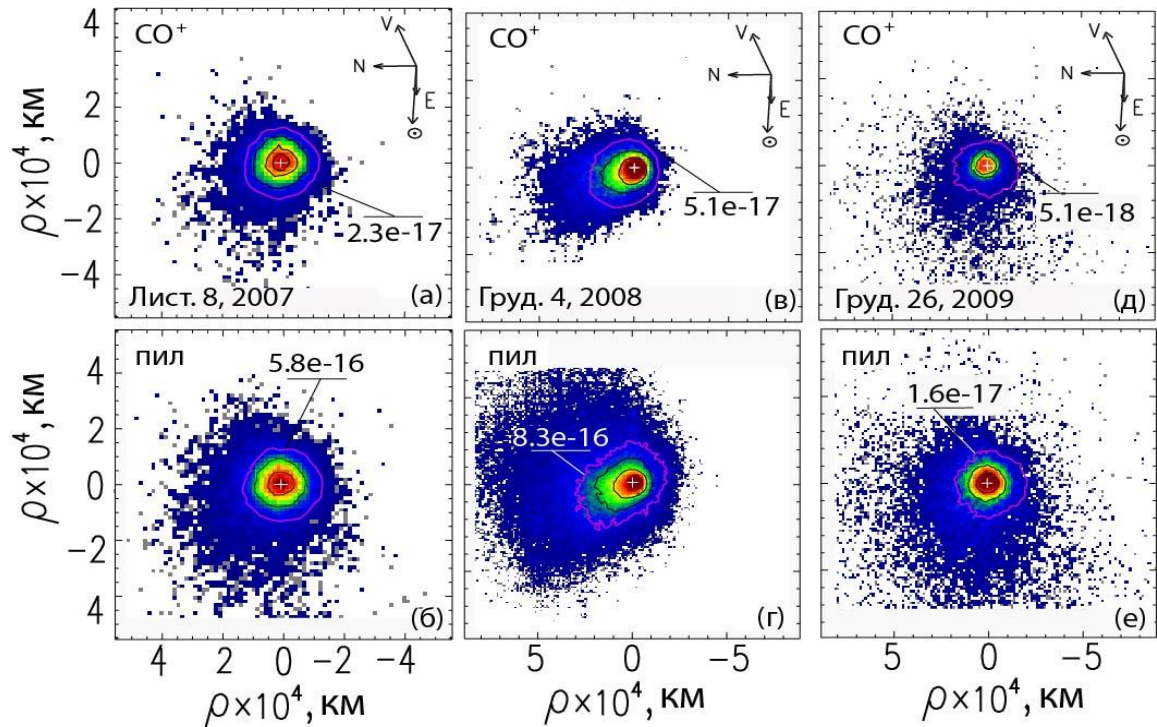


Рис. 13. Ізольовані CO^+ (а, в, д) і пилова (б, г, е) коми комети-кентавра 29P, отримані зі спостережень 2007, 2008 та 2009 років.

Для наших цілей важливо було, щоб модель покривала область $\pm 60^\circ$ за широтою, оскільки комета знаходилася поза площиною екліптики. Порівняння моделі з результатами прямих вимірювань на відстані 1 а.о. космічними апаратами *STEREO-A*, *-B* і *Wind* продемонструвало гарну узгодженість з усередненими параметрами сонячного вітру для області збільшення густини (виявленого всіма трьома космічними апаратами), через яку проходила Земля 23 – 25 жовтня 2007 р., що забезпечує локальну перевірку результатів моделі. Ця область підвищеної густини потім поширювалася із середньою швидкістю сонячного вітру (близько 380 – 430 км/с). Таким чином, показано, що іонізація розпиленням, яка, як передбачається, пропорційна потоку частинок сонячного вітру, є найбільш ефективним механізмом іонізації на великих геліоцентричних відстанях.

Фотометричні спостереження з широкосмуговими фільтрами показали, що комета 29P проявляла активність під час усіх наших спостережень протягом 2006–2020 років [28]. На всіх оброблених зображеннях виявлено чотири морфологічні структури, які виглядають як радіальні витоки пилу з ядра (рис. 14).

Використовуючи метод крос-кореляції, отримано період обертання кометного ядра: 12.1 ± 1.2 і 11.7 ± 1.5 днів за даними спостережень, проведених у грудні 2008 р. і лютому 2009 р. відповідно [3].

Для аналізу активності комети обчислено швидкість продукування пилу $Af\rho$ [1–3, 11, 28, 33] для інтервалу кометоцентричних відстаней від 1200 до 7200 км. Знайдено, що величина $Af\rho$ знаходилася в межах декількох тисяч см, що відповідає високій активності комети. Окрім того, $Af\rho$ змінювалася з відстанню від ядра. Максимальні значення $Af\rho$ ($\sim 56\,000$ см) у фільтрі R були зареєстровані в кометі під час спалаху в 2010 р.

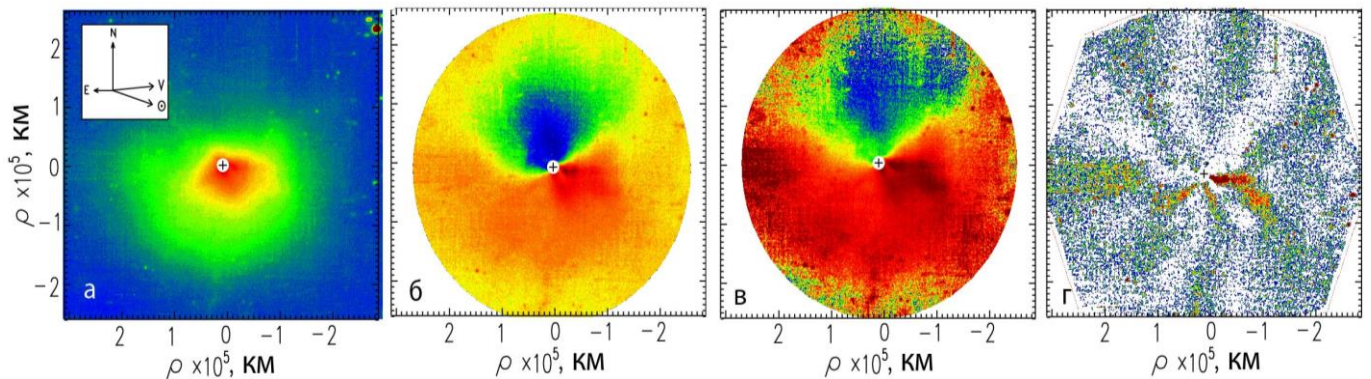


Рис. 14. Зображення комети-кентавра 29P, отримане 12 серпня 2017 р. на 4.1-м телескопі SOAR з фільтром V і оброблене цифровими фільтрами: (а) – пряме зображення; (б) – застосовано фільтр азимутального усереднення; (в) – застосовано фільтр азимутальне перенормування; (г) – застосовано фільтр Larson–Sekanina.

Для аналізу варіацій кольору глобально по комі та в локальних структурах розраховано колор-індекси і побудовано карти [28]. Область поблизу ядра та джедова структура коми показують дуже червоний колір, в середньому 0.75 зор.вел. Колір коми стає червонішим зі збільшенням відстані від ядра, що, ймовірно, відповідає еволюції фізичних характеристик частинок пилу. Варіації кольору кометної коми відповідають зміні характеристик пилу під час спалаху.

Використовуючи модель агломерованих частинок пилу для одночасного аналізу спектрального градієнта відбивної здатності, в парах фільтрів $B-R$ і $R-I$, показано, що хімічний склад частинок пилу в кометі 29P відповідає силікатам Fe-Mg і підпорядковується розподілу частинок за розмірами з показником степеня $n \approx 2.53$. Спектральний градієнт також може відповідати переважно органічному складу пилу з показником степеня $n \approx 1.82$, хоча в цьому випадку важко підібрати певний склад органічної речовини.

За результатами спостережень комети-кентавра 29P на 6-м телескопі уперше побудовано детальні карти просторового розподілу лінійної та кругової поляризації по комі далекого кентавра. В результаті виміряно лінійну поляризацію в джегоподібній структурі, яка становить $P = -(6 \pm 0.1) \%$, тоді як у комі $P = -(2 \pm 0.1) \%$ на фазовому куті 6.3° . Уперше виміряно лівосторонню кругову поляризацію розсіяного випромінювання пилу (рис. 15) в кометі-кентаврі 29P, в середньому $P_c = -(0.05 \pm 0.01) \%$ [45].

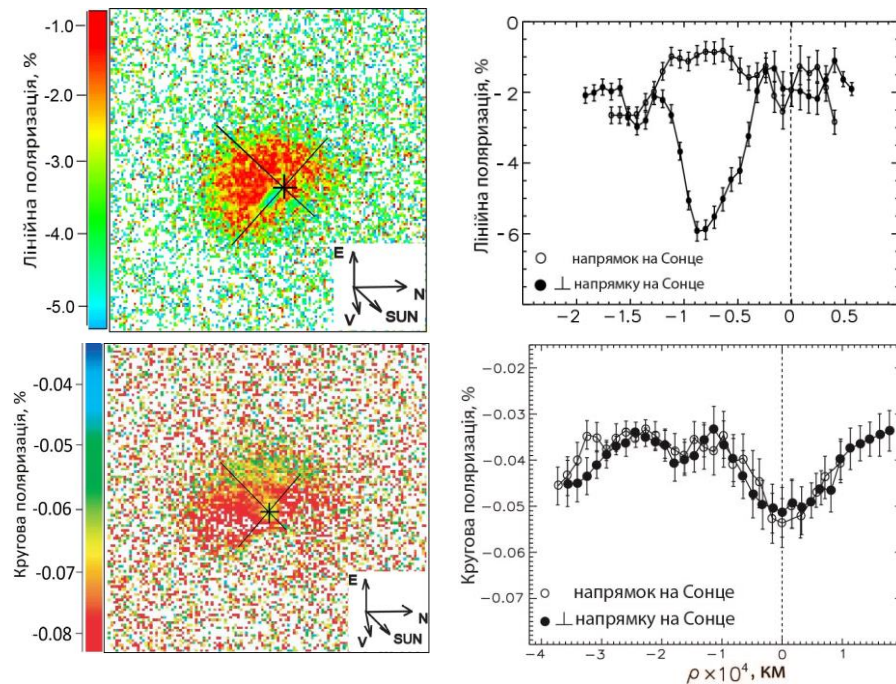


Рис. 15. Розподіл лінійної і кругової поляризації в комі комети-кентавра 29P/Schwassmann–Wachmann 1 (ліворуч) і їх варіації з відстанню від ядра вздовж і перпендикулярно до напрямку на Сонце (праворуч).

У розділі 3 «Результати досліджень активних астероїдів» наводяться основні результати дослідження 2 активних астероїдів (з 20 відомих) – (596) Scheila [14, 24], (6478) Gault [31], та 1 астероїда (3200) Phaeton [25], який зближується з Землею і проявляє активність поблизу перигелію. Дослідження активних астероїдів мають специфічні особливості, зокрема спостереження вкрай рідкісні, оскільки їхня активність неочікувана і не може бути прогнозованою, як у комет. На відміну від регулярних спостережень комет, які проявляють довгострокову і зазвичай повільно змінюють газо/пилову активність, спостереження активних астероїдів часто проводяться протягом обмеженого інтервалу часу через умови спостереження та відносно коротку тривалість явища.

Для вивчення оптичних і фізичних властивостей поверхонь (в неактивному стані) і атмосфер (в активному стані) активних астероїдів, необхідні не тільки моніторингові спостереження, але і комплексні дослідження різними методами в широкому діапазоні довжин хвиль та фазових кутів. Тому автором разом з колегами з різних міжнародних інститутів в 2010 р. була ініційована комплексна програма спостережень обраних потенційно активних астероїдів. Дослідження були спрямовані на вивчення оптичних властивостей пилу в комах астероїдів, встановлення причин їхньої активності, особливості їхнього формування та еволюції в СС. Ці дослідження включали аналіз просторового і часового розподілу параметрів лінійної поляризації, кольору і продукування пилу вибраних активних астероїдів як в період їх активної фази, так і після.

Фотометричні спостереження астероїда (596) Scheila проводилися під час та після його спалаху в 2010 р. Ґрунтуючись на цих спостереженнях, визначено розмір астероїда ($\sim 51 \pm 3.0$ км), розраховано загальну масу викинутої речовини під час активної фази ($\sim 2.5 \times 10^7 - 3.4 \times 10^7$ кг), знайдено період обертання астероїда (16.1 ± 0.2 год) [24]. Використовуючи динамічне моделювання показано, що

найбільш ймовірною причиною спалаху могло бути зіткнення астероїда з великим метеороїдом, що належить метеороїдним роєм, які пов'язані з двома періодичними кометами – 127P/Holt–Olmstead і P/2005 K3 (McNaught), поблизу орбіт яких астероїд пройшов незадовго до спалаху. Аналіз отриманих даних показав, що астероїд продовжує зберігати абсолютне значення блиску і інші характеристики, незважаючи на можливе зіткнення з малим тілом у грудні 2010 р. [24].

Фотометричні та поляриметричні дослідження астероїда (3200) Phaeton [25] на великих фазових кутах дозволили обмежити значення максимуму його поляризації P_{\max} та розрахувати геометричне альbedo ($A_R = 0.075 \pm 0.007$) на основі власних і наявних у літературі даних. Згідно отриманого альbedo, астероїд відноситься до групи темних астероїдів F-типу.

Спостереження астероїда (6478) Gault (далі Gault) проводилися за допомогою різних телескопів [31]. Зображення астероїда Gault у фільтрі R показано на рис. 16. Кома астероїда компактна і яскрава. 15 січня 2019 р. астероїд мав лише один хвіст T1. На зображеннях, отриманих під час спостережень 6 лютого 2019 р. і 28 березня 2019 р., у астероїда з'явився другий слабкий хвіст (T2). 28 березня 2019 р. (панель в) обидва хвости (T1 і T2) різко змінили орієнтацію відносно напрямку на Сонце.

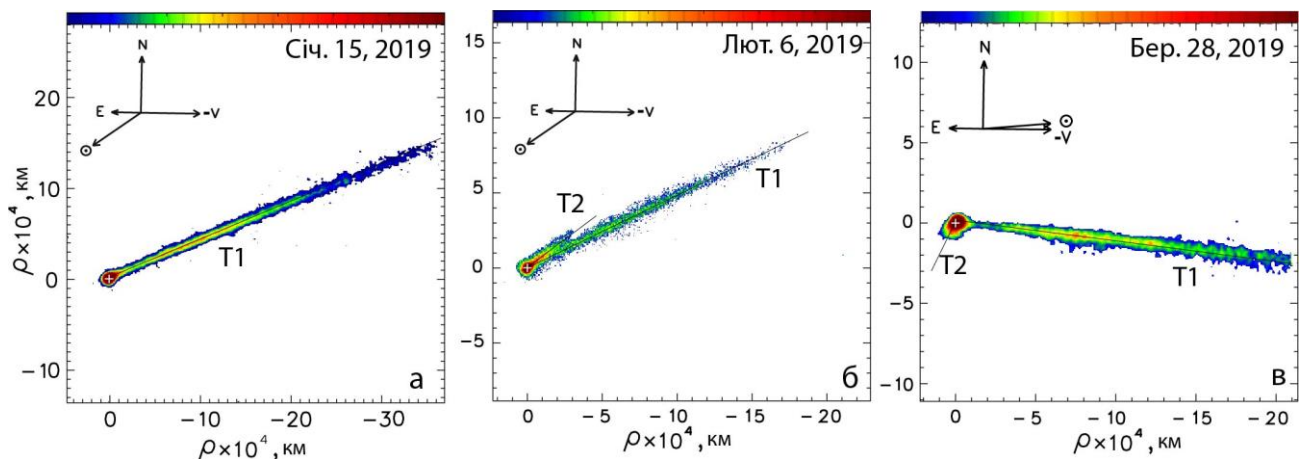


Рис. 16. Сумарні зображення астероїда (6478) Gault, отримані в R-фільтрі. На панелі (а) показано зображення, зроблене на 2.5-м телескопі КГО МГУ 15 січня 2019 р.; панелі (б) та (в) демонструють зображення, отримані на 1.3-м телескопі Скалнате Плесо 6 лютого та 28 березня 2019 р. відповідно. Оптоцентр астероїда позначено білим хрестом. Чорні лінії показують напрямки хвостів (T1 і T2). Зверху приведено шкалу відносної інтенсивності.

За нашими розрахунками, викиди пилу з утворенням хвостів розпочалися за 102 дні до спостереження 6 лютого 2019 р. для хвоста T1 та за 38 днів – для хвоста T2 відповідно. Хвіст T1 довший за хвіст T2 і складається з частинок розмірами від 20 до 200 мкм. Побудовано колір–колір діаграму $BV-VR$. Спочатку астероїд (6478) Gault віднесли до сімейства Фокей і вважали кам'янистим астероїдом S-типу. Цей астероїд демонструє значну спектральну змінність у діапазоні довжин хвиль 0.75 – 2.45 мкм: від незвичного синього ($S' = -13.5 \pm 1.1$ %/мкм) до типового червоного ($S' = +9.1 \pm 1.2$ %/мкм). Ці варіації кольору не корелюють з активністю. Автором показано [31], що колір астероїда синіший, ніж у астероїдів S-типу, і червоніший, ніж у астероїдів C-типу. Тому для достовірного встановлення типу цього активного астероїда необхідно отримати додаткові спектральні та поляриметричні дані.

Спостереження 6 лютого та 28 березня 2019 р., проведені в обсерваторії Скалнате Плесо, були використані для аналізу поведінки кривої блиску та визначення періоду обертання. Для визначення періоду використано дві методики (FALC та ANOVA), які дали значення періоду обертання 1.790 ± 0.001 год. З аналізу кривої блиску, зроблено висновок про те, що Gault може бути бінарним астероїдом. Якщо це підтвердиться, то (6478) Gault буде першим активним астероїдом із власним супутником.

Щоб пояснити еволюцію астероїда Gault в межах головного поясу астероїдів, було протестовано кілька можливих еволюційних сценаріїв, які можна було б реалізувати з різним ступенем вірогідності. Додатково до номінальної орбіти розглянуто еволюцію 100 клонів. Орбітальна еволюція всіх клонів демонструє таку ж поведінку, як і еволюція номінальної орбіти астероїда. Не було виявлено видимих відхилень орбітальних елементів клонів від елементів номінальної орбіти. Зважаючи на це, вважаємо, що орбіта астероїда Gault не зазнала значних змін щонайменше упродовж останніх 100 тисяч років. Проведений аналіз показує, що кометне походження цього об'єкта малоїмовірно [31].

Для пояснення появи активності астероїда Gault розглянуто три різні механізми: зіткнення з метеороїдами, швидке обертання, сублімація летких компонентів. У результаті було доведено, що останні два механізми є малоїмовірними. Проте ми виявили 41 періодичну комету, що наближалася до орбіти астероїда Gault принаймні один раз. Серед цих комет-кандидатів за всі проміжки часу знайдено 36 комет, орбіти яких наближаються до 0.15 а.о. Для цих комет мінімальна відстань зближення коливається від 0.07635 а.о. (73P/Schwassmann–Wachmann 3-Y) до 0.14933 а.о. (13P/Olbers). Наше дослідження показує також, що орбіта астероїда 311P/PANSTARRS дуже близька до орбіти Gault. Оскільки активність 311P спостерігалася протягом приблизно 250 днів у 2013 р., то не можна виключати можливість зіткнень метеороїдів, викинутих з ядра 311P, з астероїдом Gault.

Оцінка загальної втрати речовини астероїдом Gault під час спостережуваного викиду була отримана на основі аналізу морфології хвостів: загальна маса викинутої речовини становить близько 10^7 кг. Ця величина дає змогу оцінити загальний розмір ударника (або ударників, оскільки в нульовому наближенні ми можемо припустити, що маса викидів сумується). Відтак, ґрунтуючись на якісних оцінках швидкісного удару в пористу ціль, загальний об'єм ударника становить близько декількох кубічних метрів.

У додатку А «Інструменти та спостережений матеріал» наведено загальну таблицю з переліком телескопів, на яких проводилися спостереження. В таблицях 2, 3 та 4 наведено опис МТСС, спостереження яких було виконано у межах роботи (назва об'єкта, дата спостереження, геліо- та геоцентричні відстані, фазовий кут, назва телескопа, використані фільтри або решітки та посилання на статтю, де опубліковано результати).

У додатку Б «Список опублікованих праць за темою дисертації» наведено перелік статей автора у фахових виданнях, віднесених до першого, другого і третього квантилів (Q1, Q2 і Q3) відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank або Journal Citation Reports, та тез конференцій, а також відомості про апробацію результатів дисертаційного дослідження.

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота представляє результати комплексного дослідження комет різних динамічних класів, активних астероїдів і комети-кентавра за даними фотометрії, поляриметрії та спектроскопії. Проведено діагностику властивостей пилової, газової та плазмової атмосфер досліджуваних активних об'єктів шляхом чисельного моделювання, пошук зв'язку між фізичними і динамічними характеристиками МТСС різних популяцій для виявлення особливостей, пов'язаних з різними областями їхнього утворення чи еволюції.

Серед найбільш важливих результатів проведеного дослідження є наступні:

1. Ґрунтуючись на результатах ініційованої автором програми комплексних досліджень далеких комет (у яких перигелійна відстань $q > 4$ а.о.), виявлено та вивчено невідомі раніше закономірності та особливості, зокрема:
 - окрім комети C/2011 KP36 (Spacewatch), у спектрах досліджених далеких комет емісії були відсутні;
 - пилопродуктивність далеких комет значно вища до перигелію, ніж у короткоперіодичних комет;
 - ступінь лінійної поляризації випромінювання далеких комет систематично вищий порівняно з поляризацією короткоперіодичних комет;
 - речовинний склад пилових частинок у комах далеких комет значно відрізняється від складу пилу короткоперіодичних комет;
 - у комі комети C/2014 A4 (SONEAR) домінують субмікронні частинки, що складаються з великої кількості льоду та толіно-подібних органічних речовин, а кома комети C/2011 KP36 (Spacewatch) формується частинками різних розмірів, що складаються з льодів H_2O і CO_2 та тугоплавкого матеріалу;
 - активність далеких комет пояснено немонотонною кристалізацією аморфного льоду в кометах, включаючи не лише лід H_2O , а й більш летючі льоди CO і CO_2 , та еволюцію ерозії поверхні. Хоча спалахова активність комет, в тому числі і далеких, може бути спричинена впливом метеороїдів на поверхню їхніх ядер.
2. Вперше проведено детальні дослідження комети-кентавра 29P/Schwassmann–Wachmann 1 на основі комплексних спостережень упродовж 2007 – 2009 рр. на геліоцентричних відстанях 5.7 – 6.0 а.о. і отримано наступні результати:
 - у спектрі комети-кентавра ототожнено численні коливальні переходи іона CO^+ ($A^2\Pi - X^2\Sigma$) і слабку емісійну смугу іона N_2^+ ($0, 0$) електронної системи ($B^2\Sigma - X^2\Sigma$). Співвідношення $[N_2^+]/[CO^+] = 0.01$ свідчить про низькі температури (< 30 К) в області формування цього об'єкта;
 - побудовано карти просторового розподілу пилу та іона CO^+ і показано, що ударна іонізація частинками сонячного вітру найбільш ймовірна для іонізації CO в кометі 29P/Schwassmann–Wachmann 1 і є основним механізмом іонізації в кометах на великих відстанях від Сонця;
 - визначено швидкості продукування іонів CO^+ і пилових частинок, які значно змінювалися протягом періоду спостережень;

- вперше в далекій кометі виміряно кругову поляризацію розсіяного випромінювання пилу та лінійну поляризацію в джетоподібній структурі, яка виявилася значно вищою, ніж в комі;
 - за результатами моделювання та аналізу динамічної історії комети-кентавра показано, що поверхня її ядра зазнала суттєвих змін і не може більше розглядатися як первісна.
3. Вперше отримано з великою роздільною здатністю просторові розподіли яскравості, кольору та поляризації по комах низки комет, на основі яких отримано такі нові результати:
- виявлено взаємопов'язані варіації поляризації й кольору по комі в кометах 67P/Churyumov–Gerasimenko і 2P/Encke, які свідчать про еволюцію фізичних властивостей частинок з віддаленням від ядра комети і можуть бути діагностикою для таких характеристик пилу, як швидкість фрагментації пилинок, їхній початковий розмір та склад;
 - вперше в кометах 2P/Encke і C/2011 KP36 (Spacewatch) визначено поляризацію відбитого ядром світла і її внесок в поляризацію навколоядерної пилової коми, а також внесок молекулярних емісій в континуумні кометні фільтри. Варіації поляризації і кольору пилу, з урахуванням деполаризуючих факторів молекулярних емісій і ядра, пояснено зміною фізичних властивостей пилових частинок з відстанню від ядра;
 - вперше отримано просторовий розподіл лівосторонньої кругової поляризації в комі комети C/2009 P1 (Garradd) і виявлено її змінність з часом;
 - морфологічні структури (джети, фени, оболонки, арки та ін.) у внутрішніх комах спостережених комет, спричинені потоками пилу і газу з активних ділянок на ядрі, мають різні радіальні профілі поляризації і кольору, що свідчить про неоднорідність ядра;
 - на основі модельних розрахунків результатів спостережень комети сімейства Крейца C/2012 S1 (ISON) обґрунтовано недоцільність використання параметра $Af\rho$, який характеризує темп виносу пилу з поверхні ядра, для абсолютної оцінки маси викинутого пилу.
4. Вперше виявлено зміну протягом тижня кольору пилу в комі довгоперіодичної комети C/2013 UQ4 (Catalina). За допомогою моделі пилових частинок у вигляді агломератів показано, що її причиною є поповнення коми пилом різного хімічного складу з різних активних ділянок на поверхні ядра внаслідок обертання ядра комети.
5. На прикладі комети C/2011 J2 (LINEAR), ядро якої розпалося, показано, що нестаціонарні процеси і фрагментація ядер комет є індикатором неоднорідності їх композиційного складу і структури. Виявлені зміни кольору пилу зв'язані з асиметричним вкладом пилу з різних фрагментів в загальний потік випромінювання. Під час покриття кометою зорі визначено оптичну товщину її пилової атмосфери та отримано відносну швидкість руху фрагмента В.
6. Проведено спостереження трьох таких рідкісних об'єктів, як активні астероїди (відкрито 20). Уперше побудовано карти кольору астероїда (6478) Gault і встановлено, що зміна кольору уздовж хвоста викликана еволюцією пилових частинок з віддаленням від ядра. Виявлено залежність морфологічних структур і

варіацій кольору в комах активних астероїдів (596) Scheila і (6478) Gault від ступеня їхньої спалахової активності. Шляхом динамічного моделювання вперше визначено метеорні потоки, відповідальні за кометоподібну активність цих астероїдів, що підтвердило обґрунтованість використання ударного механізму для пояснення короткочасної активності астероїдів.

7. У рамках запропонованої автором довгострокової програми квазіодносимультанних фотометричних, поляриметричних та спектральних спостережень малих тіл Сонячної системи, досліджено 24 комети різних популяцій (4 короткоперіодичних комети, 4 довгоперіодичних комети на геліоцентричній відстані $r < 3$ а.о., 16 далеких комет на $r > 4$ а.о.), 3 активних астероїда і 1 кентавр. Отримані спостережні дані інтерпретовано в рамках наявних теорій розсіяння світла пиловими частинками і моделей речовинного складу пилової і газової складових атмосфер активних малих тіл, в результаті чого визначено оптичні, фізичні й хімічні властивості досліджуваних об'єктів і особливості їх поведінки з часом, довжиною хвилі, відстанню від Сонця і фазовим кутом.

Отримані результати мають вихід на вирішення космогонічної проблеми походження та еволюції як МТСС, так і Сонячної системи. Отримані фізичні характеристики комет різних динамічних груп вказують, що незважаючи на видиму глобальну однорідність комет, існують значні відхилення в індивідуальних властивостях досліджених об'єктів, які обумовлені відмінностями, пов'язаними з місцями їхнього утворення. У той же час деякі характеристики обумовлені лише еволюцією певної комети. Порівняння фізичних характеристик та характеру активності досліджених МТСС вказує на тісний зв'язок між кометами, астероїдами та кентаврами.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у фахових виданнях, віднесені до першого, другого та третього квартилів (Q1, Q2 та Q3) відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank або Journal Citation Reports:

1. **Ivanova A. V.**, Korsun P. P., Afanasiev V. L. (2009). Photometric investigations of distant comets C/2002 VQ94 (LINEAR) and 29P/Schwassmann-Wachmann-1. *Solar Sys. Res.*, vol. 43, Issue 5, p. 470-480. <https://arxiv.org/abs/2012.09008>
2. **Ivanova O. V.**, Skorov Y. V., Korsun P. P., Afanasiev V. L., Blum Ju. (2011). Observations of the long-lasting activity of the distant Comets 29P/Schwassmann-Wachmann 1, C/2003 WT42 (LINEAR) and C/2002 VQ94 (LINEAR). *Icarus*, vol. 211, Issue 1, p. 559-567. <https://arxiv.org/abs/2102.04829>
3. **Ivanova A. V.**, Afanasiev V. L., Korsun P. P., Baranskii A. R., Andreev M. V., Ponomarenko V. A. (2012). The rotation period of comet 29P/Schwassmann-Wachmann 1 determined from the dust structures (Jets) in the coma. *Solar Sys. Res.*, vol. 46, Issue 4, p. 313-319. <https://arxiv.org/abs/2012.09007>
4. **Ivanova A. V.**, Borisenko S. A., Andreev M. V. (2014). Photometric studies of comet C/2009 P1 (Garradd) before the perihelion. *Solar Sys. Res.*, vol. 48, Issue 5, p. 375-381. <https://arxiv.org/abs/2101.05277>

5. **Ivanova O.**, Borysenko S., Golovin A. (2014). Photometry of Comet C/2011 L4 (PANSTARRS) at 4.4-4.2 AU heliocentric distances. *Icarus*, vol. 227, p. 202-205. <https://arxiv.org/abs/1510.05458>
6. **Ivanova O. V.**, Dlugach J. M., Afanasiev V. L., Reshetnyk V. M., Korsun P. P. (2015). CCD polarimetry of distant comets C/2010 S1 (LINEAR) and C/2010 R1 (LINEAR) at the 6-m telescope of the SAO RAS. *Planet. Space Sci.*, vol. 118, p. 199-210. <https://arxiv.org/abs/1506.07986>
7. **Ivanova O.**, Neslusan L., Seman-Krisandova Z., Svoren J., Korsun P., Afanasiev V., Reshetnyk V., Andreev M. (2015). Observations of comets C/2007 D1 (LINEAR), C/2007 D3 (LINEAR), C/2010 G3 (WISE), C/2010 S1 (LINEAR), and C/2012 K6 (McNaught) at large heliocentric distances. *Icarus*, vol. 258, p. 28-36. <https://arxiv.org/abs/1508.05207>
8. **Ivanova O.**, Shubina O., Moiseev A., Afanasiev V. (2015). Polarimetric and spectroscopic observations of a dynamically new comet C/2012 J1 (Catalina). *Astrophys. Bull.*, vol 70, Issue 3, p. 349-354. <https://arxiv.org/abs/1508.04926>
9. Andrienko Y. S, Golovin A. V., **Ivanova A. V.**, Reshetnik V. N., Kolesnik S. N., Borisenko S. A. (2016). A photometric and dynamic study of comet C/2013 A1 (Siding Spring) from observations at a heliocentric distance of ~ 4.1 AU. *Solar Syst. Res.*, vol. 50, No. 2, p. 102-112. <https://arxiv.org/abs/2012.12172>
10. **Ivanova O.**, Borysenko S., Zubko E., Seman-Krisandova Z., Svoren J., Baransky A., Gabdeev M. (2016). Comet C/2011 J2 (LINEAR): Photometry and stellar transit. *Planet. Space Sci.*, vol. 122, p. 26-37. <https://arxiv.org/abs/2101.05837>
11. **Ivanova O. V.**, Luk'yanyk I. V, Kiselev N. N, Afanasiev V. L, Picazzio E., Cavichia O., Amaury de Almeida A., Andrievsky S. M. (2016). Photometric and spectroscopic analysis of Comet 29P/Schwassmann-Wachmann 1 activity. *Planet. Space Sci.*, vol. 121, p.10-17. <https://arxiv.org/abs/2012.10705>
12. Korsun P. P., **Ivanova O. V.**, Afanasiev V. L., Kulyk I. V. (2016). Distant Jupiter family Comet P/2011 P1 (McNaught). *Icarus*, vol. 266, p. 88-95. <https://arxiv.org/abs/2101.04190>
13. Korsun P. P., Kulyk I. V, **Ivanova O. V.**, Zakhzhay O. V., Afanasiev V. L., Sergeev A. V., Velichko S. F. (2016). Optical spectrophotometric monitoring of comet C/2006 W3 (Christensen) before perihelion. *Astron. Astrophys.*, vol. 596, A48, p. 1-10. <https://www.aanda.org/articles/aa/pdf/2016/12/aa29046-16.pdf>
14. Neslusan L., **Ivanova O.**, Husarik M., Svoren J., Seman-Krisandova Z. (2016). Dust productivity and impact collision of the asteroid (596) Scheila. *Planet. Space Sci.*, vol. 125, p. 37-42. <https://arxiv.org/abs/2012.08434>
15. **Ivanova O.**, Rosenbush V., Afanasiev V., Kiselev N. (2017). Polarimetry, photometry, and spectroscopy of comet C/2009 P1 (Garradd). *Icarus*, vol. 284, p. 167-182. <https://arxiv.org/abs/2101.05110>
16. **Ivanova O. V.**, Rosenbush V. K., Kiselev N. N., Afanasiev V. L., Korsun P. P. (2017). Post-perihelion observations of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko at the 6 m BTA telescope: optical spectroscopy. *MNRAS*, vol. 469, p. S386-S395. https://academic.oup.com/mnras/article/469/Suppl_2/S386/4093931
17. **Ivanova O.**, Zubko E., Videen G., Mommert M., Hora J., Seman-Krisandova Z., Svoren J., Novichonok A., Borysenko S., Shubina O. Colour variations of comet C/2013 UQ4 (Catalina). (2017). *MNRAS*, vol. 469, Issue 3, p. 2695-2703.

<https://academic.oup.com/mnras/article/469/3/2695/3778000>

18. Neslusan L., Tomko D., **Ivanova O.** (2017). On the chaotic orbit of comet 29P/Schwassmann-Wachmann 1. *Contribut. Astron. Observ. Skal. Pleso*, vol. 47, No. 1, p. 7-18. <https://www.astro.sk/caosp/Edition/FullTexts/vol47no1/pp7-18.pdf>
19. Rosenbush V. K., **Ivanova O. V.**, Kiselev N. N., Kolokolova L. O., Afanasiev V. L. (2017). Spatial variations of brightness, colour and polarization of dust in comet 67P/Churyumov-Gerasimenko. *MNRAS*, vol. 469, p. S475-S491. https://academic.oup.com/mnras/article/469/Suppl_2/S475/4067799
20. Snodgrass C., A'Hearn M. F., Aceituno F., Afanasiev V., Bagnulo S., Bauer J., Bergond G., Besse S., Biver N., Bodewits D., Boehnhardt H., Bonev B. P., Borisov G., Carry B., Casanova V., Cochran A., Conn B. C., Davidsson D., Davies J. K., de León J., de Mooij E., de Val-Borro M., Delacruz M., DiSanti M. A., Drew D.E., Duffard R., Edberg N.J.T, Faggi S., Feaga L., Fitzsimmons A., Fujiwara H., Gibb E. L., Gillon M., Green S. F., Gujarro A., Guilbert-Lepoutre A., Gutiérrez P. J., Hadamcik E., Hainaut O., Haque S., Hedrosa R., Hines D., Hopp U., Hoyo F., Hutsemékers D., Hyland M., **Ivanova O.**, Jehin E., Jones G. H., Keane J. V., Kelley M. S. P., Kiselev N., Kleyna J., Kluge M., Knight M. M., Kokotanekova R., Koschny D., Kramer E. A., López-Moreno J. J., Lacerda P., Lara L. M., Lasue J., Lehto H. J., Lvasseur-Regourd A. C., Licandro J., Lin Z. Y., Lister T., Lowry S. C., Mainzer A., Manfroid J., Marchant J., McKay A. J., McNeill A., Meech K. J., Micheli M., Mohammed I., Monguió M., Moreno F., Muñoz O., Mumma M. J., Nikolov P., Opitom C., Ortiz J. L., Paganini L., Pajuelo M., Pozuelos F. J., Protopapa S., Pursimo T., Rajkumar B., Ramanjooloo Y., Ramos E., Ries C., Riffeser A., Rosenbush V., Rousselot P., Ryan E. L., Santos-Sanz P., Schleicher D. G., Schmidt M., Schulz R., Sen A. K., Somero A., Sota A., Stinson A., Sunshine J. M., Thompson A., Tozzi G. P., Tubiana C., Villanueva G. L., Wang X., Wooden D. H., Yagi M., Yang B., Zaprudin B., Zegmott T. J. (2017). The 67P/Churyumov-Gerasimenko observation campaign in support of the Rosetta mission. *Philosoph. Transact. Royal Soc.: Mathem., Phys. Engineer. Sci.*, vol. 375, p. 2-22. <https://arxiv.org/abs/1705.10539>
21. Dlugach J. M., **Ivanova O. V.**, Mishchenko M. I., Afanasiev V. L. (2018). Retrieval of microphysical characteristics of particles in atmospheres of distant comets from ground-based polarimetry. *JQSRT*, vol. 205, p. 80-90. https://www.giss.nasa.gov/staff/mmishchenko/publications/2018_JQSRT_205_80.pdf
22. **Ivanova O. V.**, Picazzio E., Luk'yanyk I. V., Cavichia O., Andrievsky S. M. (2018). Spectroscopic observations of the comet 29P/Schwassmann-Wachmann 1 at the SOAR telescope. *Planet. Space Sci.*, vol. 157, p. 34-38. <https://arxiv.org/abs/1805.06715>
23. **Ivanova O.**, Reshetnyk V., Skorov Y., Blum Ju., Seman-Krisandova Z., Svoren J., Korsun P., Afanasiev V., Luk'yanyk I., Andreev M. (2018). The optical characteristics of the dust of sungrazing comet C/2012 S1 (ISON) observed at large heliocentric distances. *Icarus*, vol. 313, p. 1-14. <https://arxiv.org/abs/1805.06710>
24. Kokhirova G. I., **Ivanova O. V.**, Rakhmatullaeva F. D., Khamroev U. K., Buriev A. M., Abdulloev S. K. (2018). Results of complex observations of asteroid (596) Scheila at the Sanglokh International Astronomical Observatory. *Solar Syst. Res.*, vol. 52, Issue 6, p. 495-504. <https://arxiv.org/abs/2012.08430>

25. Zheltobryukhov M., Chornaya E., Kochergin A., Kornienko G., Matkin A., **Ivanova O.**, Luk'yanyk I., Zubko E. (2018). Umov effect in asteroid (3200) Phaethon. *Astron. Astrophys.*, vol. 620, A179, p. 1-6.
https://www.aanda.org/articles/aa/full_html/2018/12/aa33408-18/aa33408-18.html
26. **Ivanova O.**, Agapitov O., Odstrcil D., Korsun P., Afanasiev V., Rosenbush V. (2019). Dynamics of the CO⁺ coma of comet 29P/Schwassmann-Wachmann 1. *MNRAS*, vol. 486, Issue 4, p. 5614-5620. <https://arxiv.org/abs/2012.08497>
27. **Ivanova O.**, Luk'yanyk I., Kolokolova L., Das H. S., Husarik M., Rosenbush V., Afanasiev V., Svoren J., Kiselev N., Krushinsky V. (2019). Photometry, spectroscopy, and polarimetry of distant comet C/2014 A4 (SONEAR). *Astron. Astrophys.*, vol. 626, A26, p. 1-12.
<https://www.aanda.org/articles/aa/abs/2019/06/aa35077-19/aa35077-19.html>
28. Picazzio E., Luk'yanyk I. V., **Ivanova O. V.**, Zubko E., Cavichia O., Videen G., Andrievsky S. M. (2019). Comet 29P/Schwassmann-Wachmann 1 dust environment from photometric observation at the SOAR Telescope. *Icarus*, vol. 319, p. 58-67. <https://arxiv.org/abs/2012.10718>
29. Chornay E., Zubko E., Luk'yanyk I., Kochergin A., Zheltobryukhov M., **Ivanova O.**, Kornienko G., Matkin A., Baransky A., Molotov I. (2020). Imaging polarimetry and photometry of comet 21P/Giacobini-Zinner. *Icarus*, vol. 337, id. 113471, p. 1-20. <https://arxiv.org/abs/2012.13208>
30. **Ivanova A. V.** (2020). Small Bodies of the Solar System Active at Large Heliocentric Distances: Studies with the 6-Meter Telescope of Sao Ras. *Astrophys. Bull.*, vol. 75, No. 1, p. 31-49. <https://arxiv.org/abs/2101.07738>
31. **Ivanova O.**, Skorov Y., Luk'yanyk I., Tomko D., Husarik M., Blum Ju., Egorov O., Voziakova O. (2020). Activity of (6478) Gault during January 13-28 March, 2019. *MNRAS*, vol. 496, Issue 3, p. 2636-2647. <https://arxiv.org/abs/2005.12030>
32. Kiselev N., Rosenbush V., **Ivanova O.**, Kolokolova L., Petrov D., Kleshchonok V., Afanasiev V., Shubina O. (2020). Comet 2P/Encke in apparition of 2017: II. Polarization and color. *Icarus*, vol. 348, Issue 113768, p. 1-12. <https://arxiv.org/abs/2101.04193>
33. Kokhirova G. I., **Ivanova O. V.**, Rakhmatullaeva F. Dzh., Buriev A. M., Khamroev U. Kh. (2020). Astrometric and photometric observations of comet 29P/Schwassmann-Wachmann 1 at the Sanglokh international astronomical observatory. *Planet. Space Sci.*, vol. 181, No. 104794, p. 1-7. <https://arxiv.org/abs/2012.06833>
34. Rosenbush V., **Ivanova O.**, Kleshchonok V., Kiselev N., Afanasiev V., Shubina O., Petrov D. (2020). Comet 2P/Encke in apparitions of 2013 and 2017: I. Imaging photometry and long-slit spectroscopy. *Icarus*, vol. 348, id 113767, p. 1-20. <https://arxiv.org/abs/2101.04172>
35. Zheltobryukhov M., Zubko E., Chornaya E., Luk'yanyk I., **Ivanova O.**, Kochergin A., Kornienko G., Mkrtichian D., Poshyachinda S., Molotov I. (2020). Monitoring polarization in comet 46P/Wirtanen. *MNRAS*, vol. 498, Issue 2, p. 1814-1825. <https://arxiv.org/abs/2012.12781>
36. Zubko E., Chornaya E., Zheltobryukhov M., Matkin A., **Ivanova O.**, Bodewits D., Kochergin A., Kornienko G., Luk'yanyk I., Hines D. (2020). Extremely low linear

polarization of comet C/2018 V1 (Machholz-Fujikawa-Iwamoto). *Icarus*, vol. 336, p. 113453. <https://arxiv.org/abs/2012.10724>

Тези доповідей на конференціях (вибраних 24 із загальної кількості 58)

37. **Ivanova O. V.**, Korsun P. P., Afanasiev V. L. Photometric study of distant comets: C/2002 VQ94 (LINEAR) and 29P/Schwassmann-Wachmann 1. Abstract Book, Jenam 2009, Велика Британія 20–23 квітня, 2009.
38. **Ivanova A. V.**, Skorov Yu., Korsun P. P., Afanasiev V. L., Blum Ju. Observations of the long time activity of the distant comets 29P Schwassmann -Wachmann 1, C/2003 WT42 (LINEAR) and C/2002 VQ94 (LINEAR), European Planetary Science Congress 2010, 20–24 вересень 2010, Рим, Італія. p.136.
39. **Ivanova O. V.**, Afanasiev V. L., Korsun P. P. Determination of the rotational period of the comet 29P/Schwassmann-Wachmann-1 using dynamics of the dust structures (jets) in the coma. Theses of conference XXVIII General Assambly, 20-31 серпня 2012, Пекін, Китай.
40. **Ivanova O. V.**, Korsun P. P., Afanasiev V. L. C/2002 VQ94 (LINEAR) and 29P/Schwassmann-Wachmann 1 are CO⁺ and N₂⁺ rich comets. Theses of conference-XXVIII General Assambly, 20–31 серпня 2012, Пекін, Китай.
41. Krišandová Z., **Ivanova O.**, Svoreň J., Borysenko S., Andreev M. Photometry of Comet C/2012 S1 (ISON) at 6.2 – 4.6 AU heliocentric distances. Proceedings of workshop “Observing techniques, instrumentation and science for metre-class telescopes”, 23–26 вересня 2013, Татранська Ломниця, Словаччина.
42. **Ivanova O.**, Borysenko S., Andreev M. Photometric investigation of comet C/2009 P1 (Garradd) at pre-perihelion. Proceedings of international conference “Asteroid, Comets, Meteors (АСМ–2014)”, 30 червня – 4 липня 2014, Гельсінкі, Фінляндія.
43. Rosenbush V. K., **Ivanova A. V.**, Kiselev N. N., Afanasiev V. L., Kolesnikov S. V., Shakhovskoy D. N. Linear and circular polarimetry of recent comets: observational results for eight comets. Proceedings of international conference “Asteroid, Comets, Meteors (АСМ–2014)”, 30 червня – 4 липня 2014, Гельсінкі, Фінляндія.
44. **Іванова О. В.**, Кисельов М. М., Афанасьєв В. Л. Поляриметрія комети 29P/Schwassmann-Wachmann 1. Program and Abstracts of VII International issues of Astronomy and Astrophysics” in Honor of Bogdan Babiy (1936-1993), 7–10 жовтня 2014, Львів, Україна, p. 41.
45. **Ivanova O.**, Zubko E., Afanasiev V., Videen G., Moiseev A. Constraints on dust in Comet C/2012 J1 (Catalina) inferred from its color and polarimetric response. The 15th Electromagnetic and Light Scattering Conference, 21–26 червня 2015, Лейпциг, Німеччина.
46. Rosenbush V., **Ivanova O.**, Afanasiev V., Kiselev N. Optical properties of distant and close to the Sun comets from linear and circular polarimetry. The 15th Electromagnetic and Light Scattering Conference, 21–26 червня 2015, Лейпциг, Німеччина.
47. **Ivanova O.**, Afanasiev V., Rosenbush V., Kiselev N. 2016. Imaging polarimetry of distant comets at the 6-m ВТА telescope. COSPAR Scientific Assembly, 30 липня – 7 серпня 2016, Стамбул, Туреччина.
48. Rosenbush V., **Ivanova O.**, Kolokolova L., Kiselev N., Afanasiev V. 2016. Photometry and polarimetry of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko at the 6-m

telescope of the SAO RAS. AGU Fall Meeting, 12–16 грудня 2016, Сан-Франциско, США.

49. **Ivanova O.**, Rosenbush V., Kiselev N., Afanasiev V., Korsun P. Spectroscopy of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko at the 6-m telescope of the SAO RAS. XIII. Europlanet NA1 Workshop on ground-based observations of 67P/Churyumov-Gerasimenko, 20–23 червня 2016, Грац, Австрія.
50. **Ivanova O.**, Rosenbush V., Kiselev N., Afanasiev V., Korsun P. Spectroscopy of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko at the 6-m telescope of the SAO RAS. A new vision after Rosetta/Philae, 14–18 листопада 2016, Тулуза, Франція.
51. **Ivanova O.**, Dlugach J., Afanasiev V. The scattering properties of dust in distant comets. The 16th Electromagnetic and Light Scattering Conference (University of Maryland, College Park), 19–25 березня 2017, Мериленд, США.
52. **Ivanova O.** Analysis of photometric, spectroscopic, and polarimetric observations of comet 67P/Churyumov–Gerasimenko. Annual International Conference dedicated to Prof Klim Churyumov 80th anniversary “Astronomy and Space Physics in Kyiv University”, 23–25 травня 2017, Київ, Україна.
53. **Ivanova O. V.**, Picazzio E., Lukyanyk I. V., Cavichia O., Andrievsky S. Photometric and spectroscopic observations of the comet 29P/Schwassmann-Wachmann 1 at the SOAR telescope. Asteroids, Comets, Meteors 2017 (ACM-2017), 10–14 квітня 2017, Монтевідео, Уругвай.
54. **Ivanova O.**, Afanasiev V. Analysis of photometric, spectroscopic, and polarimetric observations of five distant comets. European Planetary Science Congress 2017, 17–22 вересня 2017, Рига, Латвія.
55. Kolokolova L., Das H., **Ivanova O.**, Rosenbush V., Kiselev N. Spatial variations of polarization and color in comets 67P/Churyumov-Gerasimenko and 2P/Encke and their interpretation with a model of rough spheroids. AS/Division for Planetary Sciences Meeting, 15–20 жовтня 2017, Прово, Юта, США.
56. **Ivanova O.**, Kolokolova L., Das S. H., Luk'yanyk I., Afanasiev V. Dust environment of distant comet C/2014 A4 (SONEAR). European Planetary Science Congress 2019, 16–21 вересня 2018, Берлін, Німеччина.
57. **Ivanova O.**, Kiselev N., Luk'yanyk I., Husarik M., Kulyk I., Mkrtychian D., Chornaya E., Kokhirova G. Photometry, spectroscopy and polarimetry observations of the comet 46P/Wirtanen with small size telescopes. New Cometary Insights from the Close Approach of 46P/Wirtanen: A Symposium in Celebration of Mike A'Hearn, 6–8 серпня 2019, Мериленд, США, р. 3.
58. **Ivanova O.**, Kolokolova L., Luk'yanyk I., Kreshenok V., Rosenbush V., Kiselev N., Afanasiev V., Kirk Z.: Scattering properties of dust in C/2011 KP36 (Spacewatch), Europlanet Science Congress 2020, online, 21 September – 9 Oct 2020, EPSC2020-346.
59. **Ivanova O.**, Skorov Yu., Luk'yanyk I., Tomko D., Husarik M., Blum Jü., Egorov O., Voziakova O. Activity of (6478) Gault during January 13 – March 28. Astronomy and Space Physics, 2019, 26–29 травня 2020, online.
60. Kleshchonok V., Rosenbush V., **Ivanova O.**, Lukyanyk I. Morphology of the coma of comet C/2011KP36 (Spacewatch) on November 25, 2016. Astronomy and Space Physics, 2019, 26–29 травня 2020, online.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

61. Afanasiev V. L., Moiseev A. V. (2005). The SCORPIO universal focal reducer of the 6-m telescope. *Astron. Let.*, vol. 31, Issue 3. p. 194-204.
62. Afanasiev V. L., Moiseev A. V. (2011). Scorpio on the 6 m telescope: current state and perspectives for spectroscopy of galactic and extragalactic objects. *Baltic Astron.*, vol. 20. p. 363–370.
63. Afanasiev V. L., Amirkhanyan V. R. (2012). Technique of polarimetric observations of faint objects at the 6-m BTA telescope. *Astrophys. Bull.*, vol. 67, p. 438-452.
64. Altwegg K., Balsiger H., Bar-Nun A., et al. (2015). 67P/Churyumov-Gerasimenko, a Jupiter family comet with a high D/H ratio. *Science*, vol. 347., No. 6220, p. 1-4.
65. Busarev V. V., Shcherbina M. P., Barabanov S. I., et al. (2019). Confirmation of the sublimation activity of the primitive Main-Belt asteroids 779 Nina, 704 Interamnia, and 145 Adeona, as well as its probable spectral signs on 51 Nemausa and 65. *Sol. Sys. Res.*, vol. 53, Issue 4, p. 261-277.
66. Fujisawa H. (2013). Normalized estimating equation for robust parameter estimation. *Electron. J. Stat.*, vol. 7, p. 587-1606.
67. Hamuy M. Walker A. R., Suntzeff N. B., et al. (1992). Southern spectrophotometric standards. *Publ. Astron. Soc. Pac.*, vol. 4, p. 533.
68. Heiles C. (2000). 9286 stars: an agglomeration of stellar polarization catalogs. *Astron. J.*, vol. 119, Issue 2, p. 923.
69. Horner J. Evans N. W., Bailey M. E. (2004). Simulations of the population of Centaurs–I. The bulk statistics. *MNRAS*, vol. 354, Issue 3, p. 798-810.
70. Jewitt D. (2009). The active centaurs. *Astrophys. J.*, vol. 137, p. 296-4312.
71. Jewitt D. (2012). The active asteroids. *Astron. J.*, vol. 143, Issue 3, p. 66.
72. Kolokolova L., Das H. S., Dubovik O., et al. (2015). Polarization of cosmic dust simulated with the rough spheroid model. *Planet. Space Sci.*, vol. 116, p. 30-38.
73. Landolt A. U. (1992). UBVRI photometric standard stars in the magnitude range 11.5-16.0 around the celestial equator. *Astron. J.*, vol. 104, p. 340-371.
74. Mackowski D. W. (2006). Monte Carlo simulation of hydrodynamic drag and thermophoresis of fractal aggregates of spheres in the free-molecule flow regime. *J. Aer. Sci.*, vol. 37, Issue 3, p. 242-259.
75. Maronna R. A. (2011). Robust ridge regression for high-dimensional data. *Technometrics*, vol. 53, Issue 1, p. 44-53.
76. Mishchenko M. I., Travis L. D., Mackowsk, D. W. (1996). T-matrix computations of light scattering by nonspherical particles: a review. *JQSRT*, vol. 55, Issue 5, p. 535-575.
77. Neckel H., Labs D. (1984). The solar radiation between 3300 and 12500 Å. *Solar Phys.*, vol. 90, No. 2, p. 205-258.
78. Oke J. B. (1990). Faint spectrophotometric standard stars. *Astron. J.*, vol. 99, p. 1621-1631.
79. Petrov D., Shkuratov Yu., Videen G. (2011). Electromagnetic wave scattering from particles of arbitrary shapes. *JQSRT*, vol. 112, p. 1636–1645.
80. Petrov D., Shkuratov Yu., Videen G. (2012). Light scattering by arbitrary shaped particles with rough surfaces: Sh-matrices approach. *JQSRT*, vol. 113, p. 2406-2418.
81. Rousseeuw P. J., Bassett Jr G. W. (1990). The remedian: A robust averaging method for large data sets. *J. Amer. Stat. Assoc.*, vol. 85, No. 409, p. 97-104.

82. Zubko E., Muinonen K., Videen G., Kiselev N. Dust in comet C/1975 V1 (West). (2014). MNRAS, vol. 440, Issue 4, p. 2928-2943.
83. Zubko E., Videen G., Hines D. C., et al. (2015). Comet C/2012 S1 (ISON) coma composition at ~ 4 au from HST observations. Planet. Spac. Sci., vol. 118, p. 138-163.
84. Zubko E., Videen G., Hines D. C., Shkuratov Yu. (2016). The positive-polarization of cometary comae. Planet. Spac. Sci., vol. 123, p. 63-76.

АНОТАЦІЯ

Іванова О. В. Фізичні та динамічні властивості активних малих тіл Сонячної системи. – Кваліфікаційна наукова праця у формі наукової доповіді.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.03.03 – Геліофізика і фізика Сонячної системи (104 – Фізика та астрономія). – Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України, Київ; Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України, Київ, 2021.

Робота присвячена комплексним дослідженням фізичних, хімічних і динамічних властивостей комет різних динамічних класів, активних астероїдів та кентаврів за даними фотометричних, поляриметричних і спектральних спостережень та чисельного моделювання.

На основі отриманого великого обсягу спостережних даних визначено фізичні властивості і хімічний склад активних об'єктів різних популяцій і досліджено особливості їхньої поведінки під час проявів нестационарних процесів. Вперше з великою просторовою роздільною здатністю отримано розподіли яскравості, кольору та поляризації в комах комет різних динамічних груп. Показано, що взаємопов'язані варіації поляризації і кольору по комі, з урахуванням деполаризуючих факторів молекулярних емісій і ядра, свідчать про еволюцію властивостей частинок з віддаленням від ядра і можуть бути діагностикою швидкості фрагментації частинок, їхнього початкового розміру та складу. Встановлено, що виявлені за допомогою методів цифрової фільтрації морфологічні структури в комах спостережених малих тіл Сонячної системи пов'язані з певними активними областями на їхніх ядрах і мають специфічний розподіл поляризації і кольору. Вперше показано, що ступінь лінійної поляризації далеких комет систематично вищий в порівнянні з поляризацією близьких до Сонця комет. Шляхом моделювання результатів фотометричних, спектральних і поляриметричних спостережень з використанням різних моделей частинок, визначено речовинний склад пилових частинок у комах далеких комет та встановлено його відмінність від складу пилу в короткоперіодичних кометах. Запропоновано механізми іонізації та спалахової активності комет на великих відстанях від Сонця. Для пояснення активності далеких комет висунуто ідею, що кристалізація аморфного льоду в кометах може мати немонотонний характер, враховуючи не лише лід H_2O , але й більш летючі льоди CO та CO_2 , а також еволюцію ерозії поверхні. За результатами динамічного моделювання показано, що спалахова активність комет, включаючи і деякі далекі комети, може бути спричинена зіткненням метеороїдів з їхньою поверхнею.

Ключові слова: комети, астероїди, кентаври, пил, газ, поляризація, фотометрія, спектроскопія, морфологія, активність.

ANNOTATION

Ivanova O. V. Physical and dynamical properties of active small bodies of the Solar System. – Qualification scientific work on the form of a scientific report.

Thesis for a Doctor of Sciences degree in Physics and Mathematics, speciality 01.03.03 – Heliophysics and physics of Solar System (10 – Natural Sciences; 104 – Physics and Astronomy). – Main Astronomical Observatory of the NAS of Ukraine, Kyiv; Main Astronomical Observatory of the NAS of Ukraine, Kyiv, 2021.

The present work is devoted to a comprehensive study of the physical, chemical, and dynamical properties of comets of different dynamic classes, active asteroids and centaurs, using the results of photometric, polarimetric, and spectral observations and numerical modeling to reveal features related to different regions of their formation in the Solar system or different evolution.

To obtain the observational material, a complex approach was used. It consists, in particular, in a combination of the observational methods (quasi-simultaneous photometric, polarimetric, spectropolarimetric, and spectral observations), the use of large telescopes, and monitoring observations to obtain long series of data. Observations were carried out at 18 telescopes of various sizes, both foreign (including from the Southern Hemisphere) and domestic. To obtain high-quality observational material in a wide range of heliocentric distances, phase angles, and wavelengths, with high temporal, spatial, and spectral resolutions, modern devices based on CCD arrays were used. The modern programs and digital robust methods adapted to the features of observations of active SSSBs were used for reducing the obtained original images, providing a high-quality material for further analysis. For the first time, quasi-simultaneous photometric, polarimetric, and spectroscopic data were obtained for 24 comets from different dynamical groups, 3 active asteroids, and 1 centaur. Polarimetric observations of distant comets were conducted for the first time in cometary researches.

For the first time a program of complex studies of distant (in which the perihelion distance $q > 4$ au) comets was proposed and performed. The main results of this program are the following: (i) detailed maps of spatial distribution of the polarization parameters of distant comets were constructed and revealed that the degree of linear polarization is higher than that for comets close to the Sun at the same phase angles; (ii) according to the results of computer modeling the photometric, polarimetric, and spectral data, the composition of particles in distant comets is different from the composition of dust in short-period comets (iii) crystallization of amorphous ice in comets, taking into account not only water ice but also more volatile CO and CO₂ ices and the evolution of surface erosion, may be non-monotonic; (iv) dynamic simulation showed that the outburst activity in comets may be caused by meteoroids bombarding the surfaces of their nuclei.

On the basis of complex observations of comet-centaur 29P/Schwassmann–Wachmann 1 at heliocentric distances of 5.7 – 6.0 au during 2007 – 2009, for the first time: (i) the production rates of CO⁺ ions and dust were determined during the observational period; (ii) maps of the spatial distribution of dust and CO⁺ ions were constructed which showed that impact ionization by solar wind particles is most likely for CO ionization in comet 29P/Schwassmann–Wachmann 1 and is the main mechanism of ionization in comets at large distances from the Sun; (iii) circular polarization of the scattered light from the dust particles and linear polarization in a jet-like structure were measured in comet-centaur; (iv) modeling and analysis of the dynamic history of the comet-centaur showed that the surface

of its nucleus has undergone significant changes and can no longer be considered as the original.

Comprehensive researches of distant comets have revealed a number of important results for physics of comets, the most important of which are: (i) there are no emissions in the spectra of most studied comets, except for comet C/2011 KP36 (Spacewatch); (ii) dust production in distant comets is significantly higher before perihelion than that in short-period comets; (iii) the coma of comet C/2014 A4 (SONEAR) is dominated by submicron particles consisting of large amounts of ice and tolin-like organic matter; (iv) the coma of comet C/2011 KP36 (Spacewatch) is formed by particles of different sizes consisting of water ice, CO₂ ice, and refractory material.

For the first time, distributions of brightness, color, and polarization over the comas of comets from different dynamic groups were obtained with high spatial resolution. It is shown that the interrelated variations of polarization and color in the comas of comets 67P/Churyumov-Gerasimenko and 2P/Encke, taking into account the depolarizing factors of molecular emissions and the nucleus, indicate the evolution of particle properties away from the nucleus and can diagnose the fragmentation rate of particles, their original sizes and composition. It has been established that the morphological structures detected by digital filtering methods in the comas of active small bodies are associated with certain active areas on their nuclei and have a specific distribution of polarization and color. Short-term changes in the dust color in the coma of long-period comet C/2013 UQ4 (Catalina) were detected. Using a model of dust particles in the form of agglomerates, it is shown that the reason for the color changes is the replenishment of the coma by the dust of different chemical composition ejected from different active areas due to the rotation of the cometary nucleus. The spatial distribution of circular polarization over the coma of long-period comet C/2009 P1 (Garradd) was obtained and its variability with distance from the nucleus and time was revealed. On the basis of complex observations of comet C/2011 J2 (LINEAR), the nucleus of which disintegrated, it is shown that nonstationary processes and fragmentation of the cometary nuclei are an indicator of the heterogeneity of their composition and structure. The detected changes in the dust color are related to the inhomogeneous contribution of the dust fluxes of different fragments in the total radiation flux.

The results of observations of active asteroids and their numerical simulations allowed: (i) to determine the meteor shower responsible for the comet-like activity of asteroids (596) Scheila and (6478) Gault that confirms the validity of the impact mechanism to explain short-term asteroid activity; (ii) to create detailed color maps and investigate the color variations along the tail of asteroid (6478) Gault; (iii) to investigate morphology of active formations and the color variations over the coma of asteroids (596) Scheila and (6478) Gault during and after their outbursts; (iv) to determine the geometric albedo of the potentially Earth-hazardous active asteroid (3200) Phaeton at large phase angles which corresponds to the typical values for dark F-type asteroids.

The results of the present work are already used and can be used in the future in scientific institutions of Ukraine – MAO NAS of Ukraine, AO KNU, Institute of Astronomy KhNU, AO ONU; in astronomical institutions and observatories of the near and far abroad, as well as in the educational process.

Key words: comets, asteroids, centaurs, dust, gas, polarization, photometry, spectroscopy, morphology, activity.