

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ГОЛОВНА АСТРОНОМІЧНА ОБСЕРВАТОРІЯ

Пономаренко Василь Олександрович

УДК 523.64 + 523.61

**СПЕКТРАЛЬНІ ОСОБЛИВОСТІ ВИБРАНИХ КОМЕТ СІМЕЙСТВА
ЮПТЕРА ТА ДОВГОПЕРІОДИЧНИХ КОМЕТ ЗІ ЗВОРОТНИМ РУХОМ**

01.03.03 – Геліофізика і фізика Сонячної системи

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Київ – 2015

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Астрономічній обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук, професор,
член-кореспондент НАН України
Чурюмов Клим Іванович,
Астрономічна обсерваторія
Київського національного університету
імені Тараса Шевченка,
головний науковий співробітник.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник
Кисельов Микола Миколайович,
Головна астрономічна обсерваторія
НАН України,
завідувач відділу фізики малих небесних тіл;

кандидат фізико-математичних наук
Горбаньов Юрій Михайлович,
НДІ «Астрономічна обсерваторія»
при Одеському національному університеті
імені І. І. Мечникова МОН України,
старший науковий співробітник.

Захист відбудеться «17» квітня 2015 р. на засіданні Спеціалізованої вченої ради Д 26.208.01 при Головній астрономічній обсерваторії НАН України за адресою: ГАО НАН України, вул. Академіка Заболотного, 27, 03680 МСП, м. Київ.

Початок засідань о 10 годині.

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

Автореферат розісланий «14» березня 2015 р.

Вчений секретар
Спеціалізованої вченої ради
кандидат фізико-математичних наук

І. Е. Васильєва

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Поява кожної нової комети надає рідкісну можливість її дослідити. Активні і нестационарні процеси в кометах зумовлюють швидку зміну блиску, зовнішнього вигляду, що робить кожне спостереження неповторним та унікальним. Індивідуальністю характеризується і кожна окремо взята комета. Тому, незважаючи на довготривалу історію спостережень та досліджень комет, багато запитань залишаються без чітких відповідей. Починаючи з робіт Ф. Уіпла [30], визначальне місце посіла «льодяна» теорія ядра, що в загальних рисах пояснила спостережувані ефекти. Космічні місії «ICE», «Вега 1», «Вега 2», «Giotto», «Pioneer», «Deep Space 1», «Stardust», «Deep Impact» підтвердили та розширили погляди Уіпла.

Зараз увага наукової громадськості прикута до місії «Rosetta». Від місії небезпідставно очікують революційних результатів. Деякі напрями досліджень комет стануть неактуальними, для інших відкриваються нові горизонти. Відомо, що ціллю місії є комета 67P/Чурюмова–Герасименко, яка представляє сімейство Юпітера. Автор, звісно, згоден з надважливістю результатів місії, але ж існують вагомні відмінності між довгоперіодичними кометами (ДПК) та кометами сімейства Юпітера (КСЮ). Деяким з цих відмінностей і присвячена більша частина даної роботи. Адже не можна відповісти на всі запитання, всебічно дослідивши лише один об'єкт, який до того ж зазнав значної вікової дезінтеграції.

В теперішній час у фізиці комет починають переважати модельні розрахунки. Їх основні завдання: уточнити перелік материнських молекул, молекул речовин-люмінофорів, пояснити активні процеси в кометах (спалахову активність, розвали ядер, підсилення газо- та пиловиділення на значних геліоцентричних відстанях), порівняти між собою різні типи комет (за орбітальними характеристиками), а отже, вдосконалити універсальну модель кометного ядра. Такі розрахунки значною мірою залежать від якості та кількості спектрального та фотометричного матеріалу. Вони можуть допомогти знайти відповідь на фундаментальні запитання ближнього космосу, його історії, а можливо, і появи життя на нашій планеті.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалась в Астрономічній обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка (в межах комплексної наукової програми «Астрономія та фізика космосу») за темами: № 06БФ051-14 «Спостереження та моделювання космічних джерел нетеплового випромінювання і комплексу малих тіл Сонячної системи, вдосконалення міжнародної небесної системи відліку» (01.2006–12.2010 рр., номер держреєстрації 0106U006357); № 11БФ023-03 «Фізичні та кінематичні характеристики малих тіл Сонячної системи» (01.2011–12.2015 рр., номер держреєстрації 0111U006168).

Частина роботи була виконана за грантами Державного фонду фундаментальних досліджень МОН України згідно тем: № Ф25/551-2007 «Хімічний склад, морфологія і активність комет: телескопічні спостереження та моделювання» (01.2007–12.2008 рр., 01.2010–12.2010 р., номер держреєстрації

0107U011024); № Ф40/90-2011 «Фотохімічні та газодинамічні процеси при зіткненнях метеороїдів з Місяцем та в кометних комах» (01.2011–12.2012 рр., номер держреєстрації 0112U005321).

Також частина роботи виконувалась за грантом Державної організації «Відділення цільової підготовки Київського національного університету імені Тараса Шевченка при Національній академії наук України» за темою: № 23 «Фізичні та динамічні властивості ансамблю малих тіл Сонячної системи» (06.2014–12.2014 р., номер держреєстрації 0114U003875).

В усіх перерахованих наукових програмах та темах здобувач приймав участь як виконавець.

Мета і задачі дослідження. Основна мета даної роботи – порівняти два типи комет на основі дослідження оптичних спектрів із середньою роздільною здатністю. Отримати та проаналізувати активність комет, їх хімічний склад, фізичні характеристики газових та пилових атмосфер, особливості кометного люмінесцентного континууму. Для цього були поставлені наступні задачі:

- провести спостереження вибраних комет і отримати спектральний матеріал;
- ототожнити емісійні лінії у спектрах комет з метою визначення хімічного складу коми і пошуку нових емісій;
- здійснити пошук люмінесцентного кометного континууму та визначити його параметри за спектрами комет, а також ідентифікувати можливі джерела континууму (речовини-люмінофори);
- знайти спектрофотометричний градієнт, відносну пилопродуктивність (A_{fp}) та інші фізичні параметри пилових атмосфер комет;
- визначити фізичні параметри нейтральних газових кометних атмосфер за їх спектрами на основі моделі Хазера (поток енергії, кількість молекул, газопродуктивність, характерні масштаби для дочірніх та батьківських молекул).

Об'єкт дослідження: яскраві комети 2009–2012 рр., що представляють сімейство Юпітера, і комети зі зворотним рухом та ексцентриситетом ≈ 1 .

Предмет дослідження: хімічний склад та фізичні параметри, активні процеси, властивості пилових і нейтральних газових атмосфер вибраних КСЮ та хмари Оорта.

Методи дослідження – спектрофотометрія та моделювання, а саме:

- телескопічні спектральні спостереження яскравих комет, обробка спектрів та інтерпретація отриманих результатів;
- визначення хімічного складу та фотометричних параметрів нейтральних газових кометних атмосфер за оптичними спектрами з середньою роздільною здатністю;
- моделювання та пошук люмінесцентного кометного континууму, його параметрів, вірогідного механізму і можливих джерел утворення;
- аналіз отриманих фізичних параметрів пилових кометних атмосфер.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Вперше знайдено люмінесцентний континуум у навколоядерній області комет 81P/Wild 2, 103P/Hartley 2, C/2007 N3 (Lulin), C/2009 K5 (McNaught) та проведено дослідження його параметрів. Запропоновано механізм утворення континууму і його джерела. Вдосконалено метод визначення рівня люмінесцентного кометного континууму.

2. Доведено існування відмінностей у спектрофотометричних характеристиках пилу та хімічному складі між розглянутими КСЮ і ДПК зі зворотним рухом. Виявлено, що для однакових геліоцентричних відстаней газо-, пилопродуктивність та кількість емісійних ліній у ДПК вища.

3. Створено список емісій за спектрами комет 103P/Hartley 2, C/2007 N3 (Lulin), C/2009 K5 (McNaught).

4. Для комет 81P/Wild 2, 103P/Hartley 2, C/2007 N3 (Lulin), C/2009 K5 (McNaught), C/2009 P1 (Garradd) отримано значення фізичних параметрів нейтральних газових атмосфер: потоки, кількість молекул, газопродуктивність. Для комети C/2009 K5 це було зроблено вперше.

5. Знайдено спектрофотометричний градієнт та відносну пилопродуктивність (Afp) для всіх досліджуваних комет. Модернізовано фотометричний метод оцінки властивостей пилових атмосфер комет, що дозволило адаптувати його для здійснення порівняльного спектрофотометричного аналізу на основі отриманих спостережень.

Практичне значення одержаних результатів.

В роботі виконано модельні розрахунки спектрофотометричних параметрів комет та притаманних їм активних процесів. Результати можуть застосовуватися для перевірки і вдосконалення фізичної моделі кометного ядра, уточнення емісійних ліній молекул у кометних комах. Методика отримання фотометричних параметрів пилових атмосфер комет на основі оптичних спектрів може використовуватися як самостійний метод. Вдосконалений алгоритм отримання інформації про наявність, параметри та джерела люмінесцентного кометного континууму використовується для подальших досліджень у Астрономічній обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

Достовірність і обґрунтованість результатів досліджень впливає з логічності і послідовності всіх етапів роботи, ретельного аналізу похибок вимірювань та обчислень. Порівняння результатів із даними інших науковців свідчать про якісну та кількісну відповідність. Результати досліджень були апробовані на міжнародних конференціях в Україні та за її межами.

Особистий внесок здобувача:

- автор роботи прийняв безпосередню участь в отриманні всього спостережного матеріалу, виконав його обробку та здійснив написання наукових публікацій [1–4, 6, 8, 17, 19–23, 25, 27–29] за результатами обробки;

- в роботах [16, 26] здобувач приймав участь у спостереженнях, постановці задачі, обробці спостережного матеріалу за допомогою адаптованого та вдосконаленого, а також особисто розробленого програмного забезпечення для опрацювання спектрів;

- в роботах [12, 18] дисертант приймав участь у спостереженнях, написанні тексту публікацій, аналізі отриманих результатів;
- в роботах [10, 13] автор приймав участь у написанні тексту публікацій та інтерпретації отриманих наукових результатів;
- в роботах [5, 7, 9, 11, 14, 15, 24] здобувач приймав участь в отриманні спостережного матеріалу та порівнянні отриманих результатів із результатами інших авторів.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертаційної роботи доповідались на багатьох міжнародних конференціях:

- International Astronomical Union XXVIIth General Assembly (03–14 серпня 2009 р., Ріо-де-Жанейро, Бразилія);
- International conference 38th COSPAR Scientific Assembly 2010 (Бремен, Німеччина), 39th COSPAR 2012 (Майсур, Індія), 40th COSPAR 2014 (Москва, РФ);
- NATO Advanced Study Institute on Special Detection Technique (Polarimetry) and Remote Sensing (12–25 вересня 2010 р., Київ);
- Міжнародна конференція. Astronomical Research: from Near-Earth Space to the Galaxy (Миколаїв – 2011);
- САММАС (Вінниця – 2011, 2014);
- Астрономічна школа молодих вчених (Херсон – 2009, Чернігів – 2011, Кам'янець-Подільський – 2012, Біла Церква – 2010, 2013);
- Open Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics (17th, 2010, 18th, 2011; 19th, 2012; 20th, 2013 – Київ);
- Астрономія та фізика космосу в Київському університеті (пам'яті С.К. Всехсвятського – 2010; пам'яті П.Р. Романчука – 2011; пам'яті А.В. Манджоса – 2012; в межах VII Всеукраїнського фестивалю науки – 2013, в межах VIII Всеукраїнського фестивалю науки – 2014 – Київ);
- Міжнародна конференція «Moon» (Берлін – 2012, Німеччина);
- Workshop on «Ice and Planet Formation» (15–17 травня 2013 р., Лундська обсерваторія, Лунд, Швеція);
- Comet ISON Observing Campaign Team (Балтимор – 2013, США);
- XIII Гамовська конференція «Астрономія на стыке наук: астрофізика, космомікрофізика, космологія и гравітація, радіоастрономія и астробіологія» (Одеса – 2013);
- АСМ (30 червня – 4 липня 2014 р., Гельсінкі, Фінляндія);
- наукові семінари відділу астрометрії та малих тіл Сонячної системи Астрономічної обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка;
- науковий семінар у НДІ астрономії Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна;
- об'єднаний астрофізичний семінар у ГАО НАН України.

Публікації. За матеріалами дисертації протягом 2009–2014 рр. опубліковано 15 статей у фахових виданнях [1–15]; 3 статті в працях міжнародних конференцій [16–18]; а також роботи у збірниках тез міжнародних конференцій [19–29].

Структура роботи. Дисертаційна робота складається з переліку умовних позначень та скорочень, вступу, 4 розділів, висновків до розділів, загальних висновків, списку використаних джерел. Повний обсяг дисертації становить 128 сторінок, з них 16 сторінок – список використаних джерел. Текст роботи містить 39 рисунків, 20 таблиць, 177 найменувань у списку використаних джерел.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Вступ. Обґрунтовано актуальність дослідження спектрофотометричних особливостей двох типів комет та зв'язок роботи з науковими програмами і темами. Сформульовано мету, основні задачі та методи їх вирішення. Відображено наукову новизну і практичне значення отриманих результатів. Описано особистий внесок автора, вказано відомості про апробацію та публікації результатів роботи за темою дисертації.

Розділ 1. Сучасний стан досліджень у спектроскопії комет. Містить огляд публікацій за тематикою роботи. В розділі описано основні фундаментальні праці, сучасний стан і перспективи розвитку спектрофотометрії комет в оптичному діапазоні довжин хвиль, найпоширеніші смуги молекул у кометних спектрах та їх особливості, деякі властивості кометного пилу і розширення відомостей про малі тіла Сонячної системи на основі даних космічних апаратів. Також висвітлено відомості про дослідження люмінесцентного континууму в спектрах комет, природу його походження, можливі джерела утворення. Детально розглянуто модель Хазера для кометної атмосфери, її основні переваги, недоліки, можливості отримання достовірних фізичних параметрів при обробці спектрального матеріалу.

Розділ 2. Особливості спостережень та молекулярного складу обраних комет у видимому діапазоні. У цій частині дисертації подано інформацію про об'єкти дослідження та їх спектри, висвітлено особливості спостережень і базову методику обробки матеріалу. Також у цьому розділі приведені результати ідентифікації емісійних ліній кометних атмосфер за отриманими спектрами з середньою роздільною здатністю у видимому діапазоні.

Спостереження комет, які були об'єктами дослідження, проводились за безпосередньою участю автора у 2009–2012 рр. на високогірній обсерваторії «Терскол» Міжнародного центру астрономічних та медико-екологічних досліджень (МЦ АМЕД) НАН України (РФ, Північний Кавказ, $43^{\circ}16'29''$ п. ш., $42^{\circ}30'03''$ с. д., висота над рівнем моря 3127 м) при всебічній допомозі співробітників спостережної станції. Код обсерваторії в Центрі малих планет (MPC) – В18. Приладом для спостережень був 2-м телескоп-рефлектор Zeiss-2000 ($F_1 = 6.3$ м; $F_2 = 16$ м) з підвісним спектрометр-фотометром фокуса Касегрена (щілина спектрографа мала висоту $\approx 11''$ та ширину $\approx 3''$). На спектрографі була встановлена ПЗЗ-камера FLI PL4301E (з чіпом 50×50 мм, полем $11' \times 11'$, 1247×1151 піксель). У спектрографі почергово встановлювались

різні моди: призмове ($R \approx 1500$), ешелет ($R \approx 4500$), ешеле ($R \approx 14000$). Всі спектри були отримані в оптичному діапазоні ($350 \text{ нм} \leq \lambda \leq 850 \text{ нм}$). Параметри та обсяг спостережного матеріалу представлені у табл. 1.

Таблиця 1

Кометні спектри та їх параметри

Комета	Призмові $R \approx 1500$	Ешелет $R \approx 4500$	Ешеле $R \approx 14000$	Експозиція кадру Δt , с	Дата
22P	–	–	5	3600	08.2009 р.
81P	6	–	2	3600	03/04.2010 р.
103P	8	–	9	1800	10.2010 р.
C/2006 W3	–	–	16	3600	08.2009 р.
C/2007 N3	–	8	–	3600	02.2009 р.
C/2009 K5	4	–	2	2700; 3600	03/04.2010 р.
C/2009 P1	2	–	6	3600	06.2011 р. 04.2012 р.

Всі досліджені у роботі комети можна розділити на дві динамічні групи: комети сімейства Юпітера та довгоперіодичні комети зі зворотним рухом. Елементи орбіт, деякі фізичні параметри та особливості спостережень для розглянутих КСЮ приведені у табл. 2, для ДПК у табл. 3. У таблицях чітко видно відмінності між типами комет, які полягають у величині кута нахилу до площини екліптики, ексцентриситеті та періоді обертання, геоцентричній відстані.

Таблиця 2

Параметри спостережень та елементи орбіт КСЮ

Параметр		22P	81P	103P
Геліоцентрична відстань	r	1.77 а.о.	1.63 а.о.	1.06 а.о.
Геоцентрична відстань	Δ	0.78 а.о.	0.68 а.о.	0.13 а.о.
Інтегральна зоряна величина	T	$\approx 12^m$	9.8^m	9.1^m
Фазовий кут	S-T-O	10°	13°	56°
Кут елонгації	S-O-T	160°	157°	116°
Позиційний кут	PA	259°	274°	271°
Діаметр ядра комети	D	3 км	≈ 5 км	≈ 0.6 км
Геометричне альbedo поверхні	A	0.05	0.059	0.028
Ексцентриситет орбіти	e	0.54	0.538	0.694
Нахил орбіти до екліптики	i	4.7°	3.24°	13.6°
Період обертання	P	6.43 р.	6.42 р.	6.46 р.

Параметри спостережень та елементи орбіт ДПК

Параметр		C/2006W3	C/2007N3	C/2009K5	C/2009P1
Геліоцентрична відстань	r	3.13 а.о.	1.38 а.о.	1.50 а.о.	2.09 а.о.
Геоцентрична відстань	Δ	2.33 а.о.	0.41 а.о.	1.43 а.о.	1.61 а.о.
Інтегральна зоряна величина	T	$\approx 12^m$	$\approx 6^m$	$\approx 11^m$	10.7^m
Фазовий кут	S-T-O	13°	13°	40°	27°
Кут елонгації	S-O-T	137°	165°	75°	104°
Позиційний кут	PA	160°	292°	272°	122°
Ексцентриситет орбіти	e	1.00005	0.99998	1.001	1.001
Нахил орбіти до екліптики	i	127.1°	178.4°	103.9°	106.2°

Була проведена детальна ідентифікація емісійних спектральних ліній у комах комет 81P/Wild 2, 103P/Hartley 2, C/2007 N3 (Lulin), C/2009 K5 (McNaught). Для ідентифікації використовувались каталоги Кокрен (2001 р.) та Брауна (1996 р.) [31, 32]. Найбільш показовим є ототожнення, яке було проведене для комет Hartley 2 та McNaught, оскільки в них лінії ідентифікувались у спектрах з однаковою роздільною здатністю ($R \approx 14000$) та в однакових діапазонах довжин хвиль ($\lambda\lambda = 469\text{--}700$ нм). На момент спостережень комета 103P мала більшу інтегральну зоряну величину і знаходилася на меншій геліоцентричній відстані. Незважаючи на це, кількість емісійних ліній, які вдалося ототожнити в цій КСЮ, значно менша їх кількості у C/2009 K5 (McNaught). Можна зробити припущення, що цей факт характерний для переважної більшості КСЮ у порівнянні з ДПК зі зворотним рухом і може бути пояснений віковою дезінтеграцією або відмінностями у походженні між двома типами комет. Результати ототожнення представлено в табл. 4.

Таблиця 4

Емісійні лінії в спектрах комет 103P/Hartley 2 та C/2009 K5 (McNaught)

Комета	C ₂	NH ₂	не ідент.	H ₂ O ⁺	[OI]	Na	CN	Всього
103P	928	162	651	25	3	2	24	1795
C/2009 K5	1248	189	675	31	3	2	36	2184

Окремо варто відмітити ототожнення дублета Na ($D_1 = 588.9$ нм, $D_2 = 589.6$ нм) у спектрах комет 22P/Kopff ($r = 1.8$ а.о.), 103P/Hartley 2 ($r = 1.06$ а.о.), C/2009 K5 (McNaught) ($r = 1.5$ а.о.). Як відомо, ідентифікація Na на геліоцентричній відстані > 1 а.о. є рідкісним явищем.

Для обробки спектрів комет, отриманих з ПЗЗ, було використано спеціалізовані програми DECH95, DECH20T та інше програмне забезпечення, розроблене або адаптоване для задач опрацювання кометних спектрів автором роботи. В частині розробок за основу було взято середовище MATLAB. На

етапах створення графіків і для окремих робіт з великими масивами даних використовувався Microsoft Office Excel.

Відповідно до методики обробки та особливостей спостережного матеріалу був проведений аналіз можливих похибок. Похибка результатів вимірювань мала в основному випадковий характер, оскільки систематична складова була вилучена методом поправок. Випадкова складова похибки вимірювання, що визначалася як співвідношення сигнал/шум, для одного знімка складала 10/1. Проте, завдяки тому, що протягом ночі знімок об'єкта був отриманий декілька разів (проводилися багаторазові вимірювання), випадкову складову похибки вимірювання для кожного з об'єктів дослідження вдалося зменшити до рівня, який не перевищує 5%. Окрім цього, в кінцеві результати була внесена похибка обробки вимірювань. Теоретично встановлено, що похибка обробки результатів вимірювань не перевищує 6%. Тож сумарна, максимально можлива похибка (найгірший випадок) не перевищує 11%.

Також похибка була оцінена методом порівняння зі зразковою мірою, якою була зоря-стандарт. Методика оцінювання полягала у тому, що кожної спостережної ночі був одержаний знімок не однієї, а двох зір-стандартів (сонячного типу та зоря зі значно вищою температурою – «дівайзер»). За допомогою однієї зорі-стандарту отримувались потоки від іншої зорі в абсолютних одиницях. Шляхом порівняння зі спектрофотометричним каталогом Бурнашова [33] була визначена похибка вимірювань та обчислень. Для різних зір та ночей максимальна похибка складала 6–10%. На рис. 1 представлено приклад порівняння проведених вимірювань та обчислень для зорі HD 214923 (спектральний клас B8V) із даними спектрофотометричного каталогу Бурнашова. Роздільна здатність представлених у роботі спостережень багатократно перевищує роздільну здатність каталогу, тому отриману інтенсивність було апроксимовано поліномом.

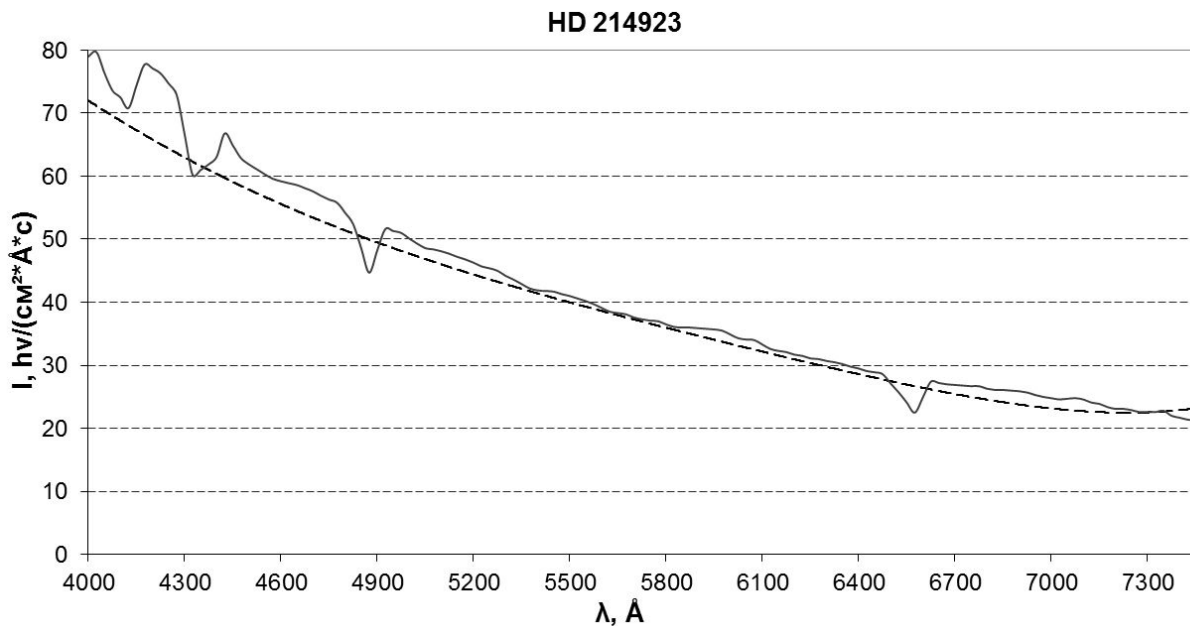


Рис. 1. Інтенсивність зорі-стандарту HD 214923: неперервна лінія відображає дані спектрофотометричного каталогу; пунктирна лінія демонструє результати вимірювань та обчислень ($1 \text{ \AA} = 0.1 \text{ нм}$).

Розділ 3. Дослідження люмінесцентного континууму та його параметрів. Люмінесцентний кометний континуум є перевипромінюванням складними органічними молекулами високоенергетичних фотонів з ультрафіолетової області у видимому діапазоні. З врахуванням люмінесценції, якісно оброблений спостережуваний кометний спектр в окремих ділянках утворюється не з двох, а трьох основних складових, які можна розділити:

$$I_C(\lambda) = I_S(\lambda) + I_E(\lambda) + I_{LC}(\lambda),$$

де $I_C(\lambda)$ – спостережуваний кометний спектр, $I_S(\lambda)$ – сонячний континуум, $I_E(\lambda)$ – інтенсивність стандартних емісій, $I_{LC}(\lambda)$ – рівень люмінесцентного континууму.

До найбільш вірогідних джерел перевипромінювання варто віднести люмінесценцію різновиду кометної органіки, яка входить до складу кометних пилових CHON-частинок. Першими, хто вказав на явище, були Г.К. Назарчук та Л.М. Шульман [34]. Відкриття було здійснено у 1987 р. і стосувалося атмосфери комети 1P/Halley.

В розділі представлено результати спектрофотометричних досліджень комет, які дали можливість виявити люмінесцентний континуум. Континуум було знайдено в навколядерній області комет 81P/Wild 2, 103P/Hartley 2, C/2007 N3 (Lulin), C/2009 K5 (McNaught). Проведено дослідження його параметрів та запропоновано флуоресценцію як найбільш вірогідний механізм утворення люмінесцентного кометного континууму. Розглянуто джерела континууму – складні органічні речовини-люмінофори. Загалом люмінесценцію було виявлено у трьох різних ділянках спектра з максимумами $\lambda_{1\max} \approx 400$ нм, $\lambda_{2\max} \approx 585$ нм, $\lambda_{3\max} \approx 650$ нм.

В кометі 81P/Wild 2 досліджувалася область призмового спектра $\lambda\lambda = 385\text{--}495$ нм. На рис. 2 видно, що максимальний вклад люмінесцентного континууму в спектр комети 81P припадає на $\lambda \approx 400$ нм. На цій довжині хвилі випромінювання, зумовлене континуумом несонячного походження, досягає 25% від загального світлового потоку без вкладу стандартних емісій. Найбільш вірогідним органічним люмінофором у навколядерній області комети для цієї довжини хвилі є речовина антрацен $C_{14}H_{10}$.

Люмінесцентний континуум також був виявлений у спектрах комети 103P/Hartley 2. Пошук здійснювався у всіх діапазонах отриманих спектрів, а саме: в призмових спектрах ($R \approx 1500$; $\lambda\lambda = 398\text{--}520$ нм) та в ешелє-спектрах ($R \approx 14000$; $\lambda\lambda = 394\text{--}820$ нм). Континуум несонячного походження був ідентифікований у діапазоні довжин хвиль $\lambda\lambda_{LC} \approx 380\text{--}440$ нм. Завдяки тому, що спектральні діапазони призмових та ешелє-спектрів перетиналися, вдалося отримати незалежне підтвердження наявності люмінесцентного континууму в двох типах спектрів. Результати для $R \approx 1500$ представлено на рис. 3. Максимум люмінесцентного континууму в кометі 103P/Hartley 2 припадає на $\lambda \approx 400$ нм. На цій довжині хвилі вклад континууму несонячного походження досягає 40% від загального світлового потоку (без врахування внеску стандартних емісій). Вірогідним претендентом на роль кометного люмінофора в даному

спектральному діапазоні також є речовина антрацен. Пірен $C_{16}H_{10}$ та антрацен $C_{14}H_{10}$ вже пропонувалися іншими авторами як люмінофори для комети 1P/Halley [34, 35].

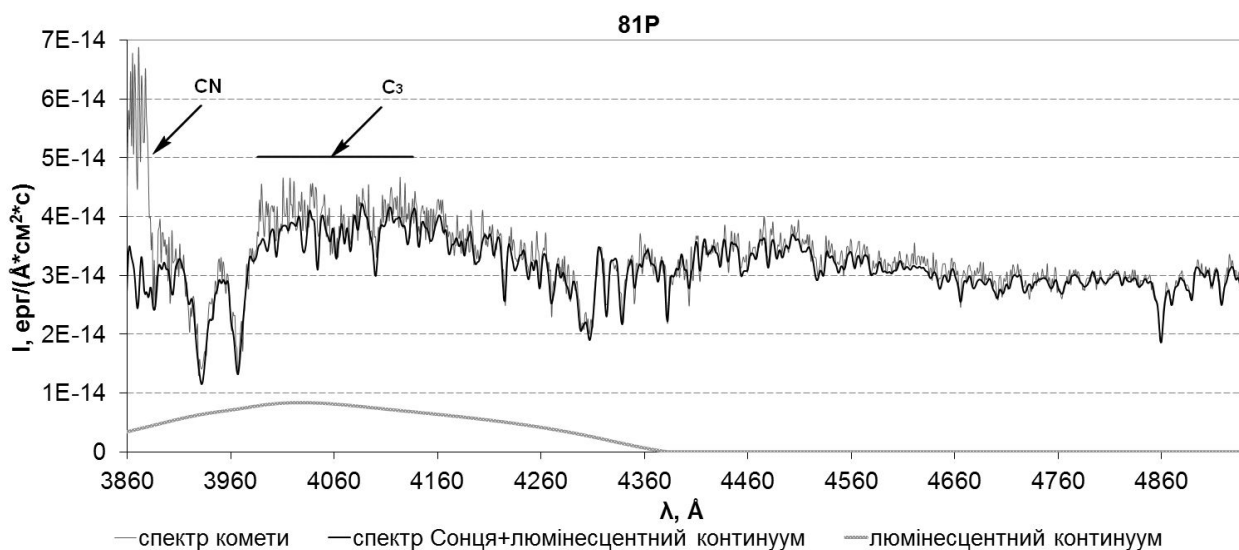


Рис. 2. Люмінесцентний континуум у спектрі комети 81P/Wild 2 (28/29.03.2010 р.).

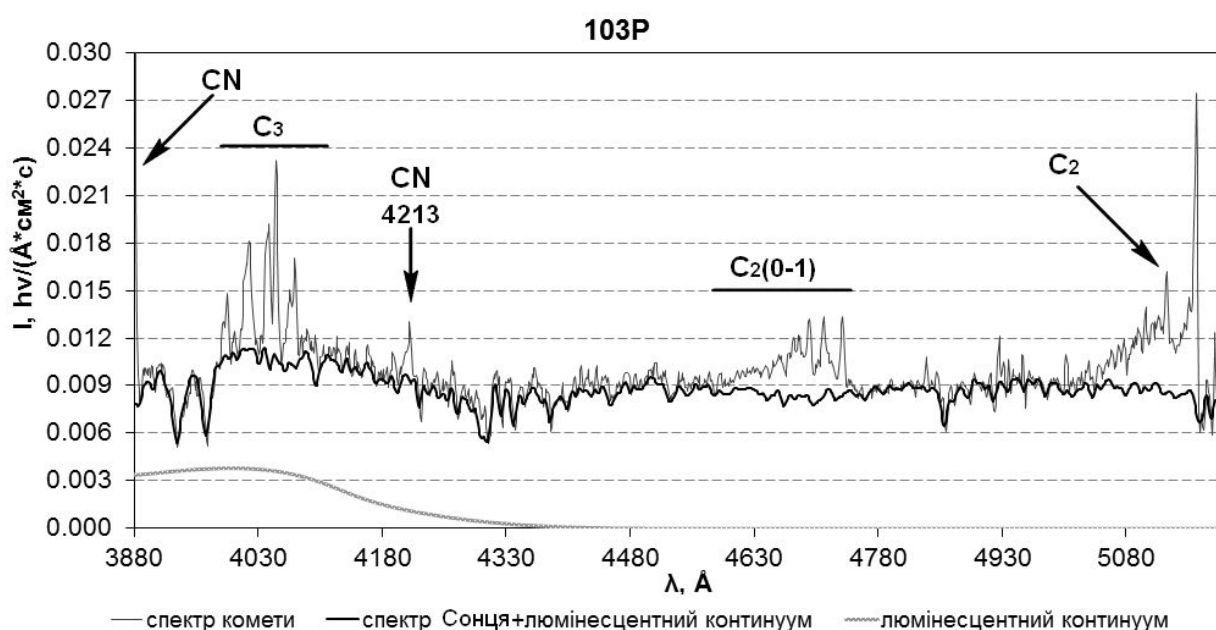


Рис. 3. Люмінесцентний континуум у призмовому спектрі комети 103P/Hartley 2 (26/27.10.2010 р.).

Дослідження спектрів з ешелет ($R \approx 4500$) комети C/2007 N3 (Lulin) у діапазоні довжин хвиль $\lambda = 385\text{--}800$ нм показало наявність люмінесцентного континууму несонячного походження. Для цієї комети були виявлені максимуми, що зумовлені люмінесценцією у трьох ділянках спектра: $\lambda_{1\max} \approx 405$ нм, $\lambda_{2\max} \approx 585$ нм, $\lambda_{3\max} \approx 650$ нм (рис. 4).

На $\lambda_{1\max} \approx 405$ нм максимальний вклад люмінесценції в кометний континуум $\approx 45\%$. У цьому діапазоні найбільш вірогідними кандидатами на

роль органічних люмінофорів є: пірен ($C_{16}H_{10}$, $\lambda_{max} \approx 440$ нм) та антрацен ($C_{14}H_{10}$, $\lambda_{max} \approx 400$ нм).

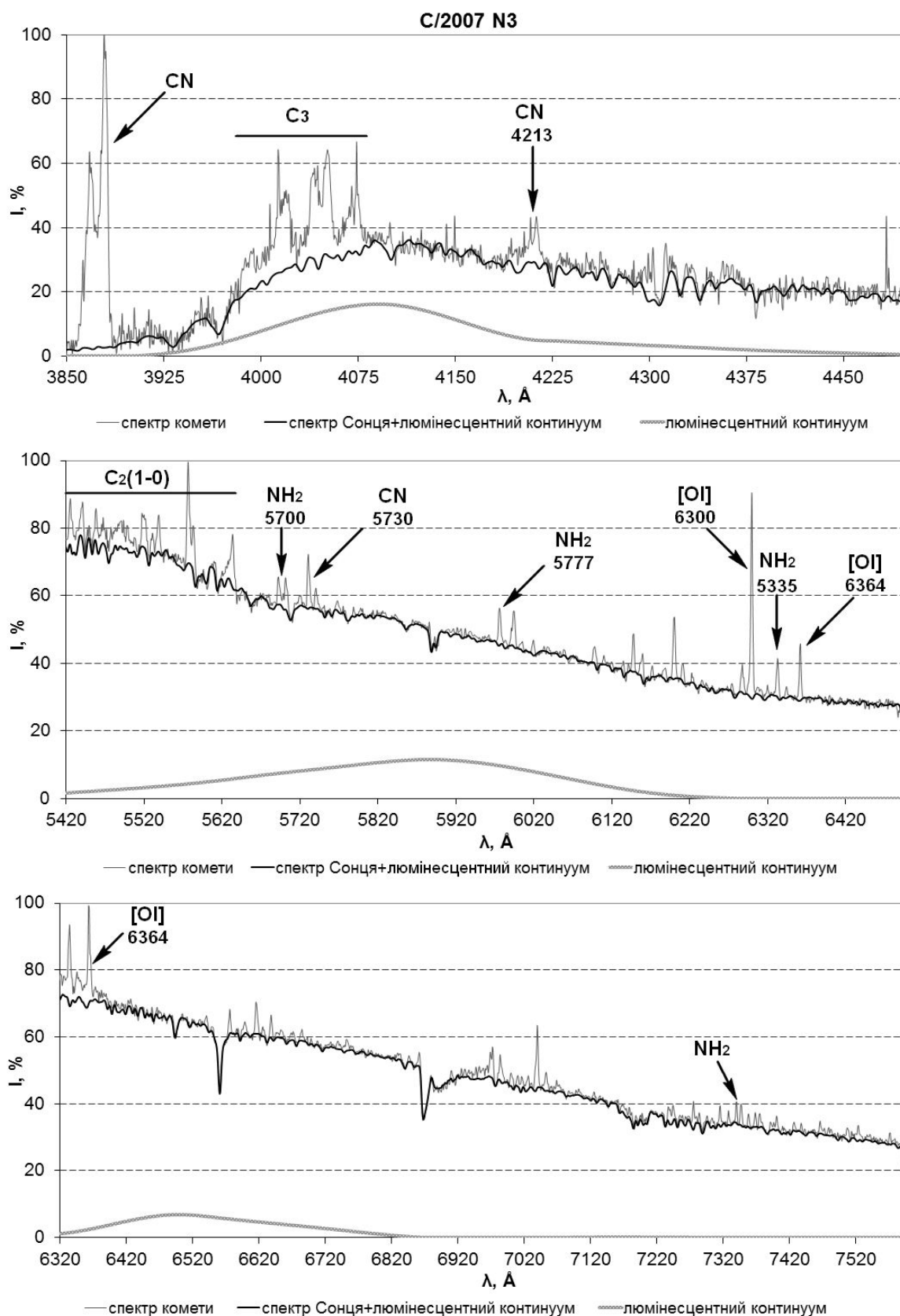


Рис. 4. Люмінесцентний континуум у спектрі комети C/2007 N3 (Lulin) 23/24.02.2009 р.

На $\lambda_{2\max} \approx 585$ нм максимальний вклад люмінесценції в потік від комети без стандартних емісій $\approx 22\%$. Вірогідними джерелами люмінесцентного континууму в цьому діапазоні довжин хвиль є: анкирин оранж ($C_{17}H_{19}N_3$, $\lambda_{\max} \approx 540$ нм), бор саб фталоціанін хлорид ($C_{24}H_{12}BClN_6$, $\lambda_{\max} \approx 580$ нм).

В області $\lambda_{3\max} \approx 650$ нм максимальний вклад люмінесцентного континууму в потік від комети без стандартних емісій $\approx 11\%$. Вірогідними джерелами континууму в цьому діапазоні довжин хвиль є: порфін ($C_{20}H_{14}N_4$, $\lambda_{1\max} \approx 620$ нм, $\lambda_{2\max} \approx 680$ нм) та хлорин ($C_{20}H_{16}N_4$, $\lambda_{\max} \approx 670$ нм).

При дослідженні призмових ($\lambda\lambda = 384\text{--}494$ нм) та ешеле ($\lambda\lambda = 468\text{--}800$ нм) спектрів комети C/2009 K5 (McNaught) було виявлено континуум несонячного походження в спектральній області $\lambda\lambda_{LC} \approx 384\text{--}438$ нм.

На рис. 5 видно, що максимум люмінесцентного континууму в кометі C/2009 K5 (McNaught) припадає на $\lambda_{\max} \approx 397$ нм. На цій довжині хвилі вклад континууму несонячного походження досягає 36% від кометного континууму. Вірогідним джерелом флуоресцентного випромінювання в цьому діапазоні є антрацен.

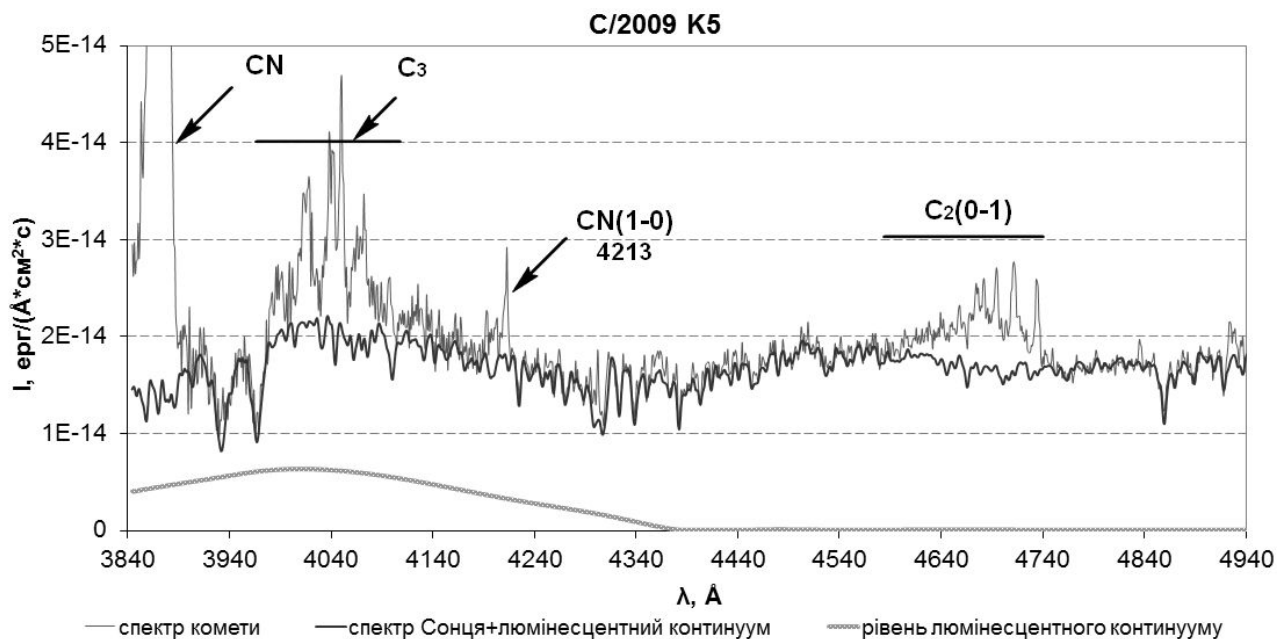


Рис. 5. Люмінесцентний континуум у спектрі комети C/2009 K5 (McNaught) 28/29.03.2010 р.

При дослідженні спектрів комет 22P/Korff, C/2006 W3 (Christensen), C/2009 P1 (Garradd) люмінесцентний континуум не вдалося достовірно виявити у жодній ділянці спектра. Це може бути пов'язано з віковою дезінтеграцією, слабкістю комети (у випадку 22P/Korff) або великою геліоцентричною відстанню (C/2006 W3 (Christensen), C/2009 P1 (Garradd)), яка не відповідає умовам масштабної флуоресценції.

Підсумовуючи представлену у розділі інформацію, варто відмітити, що досліджені комети хмари Оорта проявляють люмінесцентний континуум у декількох ділянках видимого спектрального діапазону. Це може бути пояснено іншою природою ДПК або віковою дезінтеграцією КСЮ.

Розділ 4. Фізичні параметри нейтральних атмосфер та властивості пилу вибраних комет. У цьому розділі, на основі спектрального матеріалу, було отримано фізичні параметри газових та пилових кометних атмосфер, а саме: потоки енергії (I), кількість молекул ($M(\rho)$), газопродуктивність (Q), відносну пилопродуктивність ($Af\rho$). Знайдено розподіл енергії вздовж щілини спектрографа для основних емісійних смуг та беземісійних ділянок спектра. Це дало можливість використати модель Хазера і обчислити характерні масштаби для батьківських і дочірніх молекул. Також під час роботи над цією частиною дисертації було побудовано відношення кометного континууму до спектра Сонця для всіх досліджуваних комет.

Важливим параметром пилової коми комети є $Af\rho$ (відносна пилопродуктивність). Пилопродуктивність розраховувалася для діапазонів довжин хвиль вузькосмугових кометних фільтрів НВ (виготовлених для програми дослідження комет у зв'язку з проходженням перигелію кометою C/1995 O1 (Hale–Bopp) у 1997 р.). Оскільки даний метод був розроблений Фархамом та ін. [36] для вузькосмугових кометних фільтрів (UC, $\lambda\lambda = 340\text{--}350$ нм; BC, $\lambda\lambda = 442\text{--}450$ нм; GC, $\lambda\lambda = 522\text{--}530$ нм; RC, $\lambda\lambda = 708\text{--}718$ нм), його використання зі щілиною спектрографа вимагало адаптації. Для обчислення $Af\rho$ у фільтрах використовувалися наступні параметри і формули:

$$Af\rho = \frac{q_f r^2 \Delta \cdot F_f}{\theta},$$

де r та Δ – відповідно геліо- та геоцентрична відстань до комети (в а.о.); θ – апертура в кутових секундах (діаметр діафрагми); q_f – коефіцієнт перетворення для фільтра, що використовується; F_f – спектральна густина (потік енергії, отриманий за допомогою вузькосмугового кометного фільтра в ерг/(нм \times см 2 \times с)). Відмінність в обчисленнях із різними фільтрами пов'язана лише з q_f .

Для того, щоб отримати рівномірний спад інтенсивності за висотою та шириною щілини, потрібно розглядати її вписаною у діафрагму. Адаптоване для щілини спектрографа рівняння матиме вигляд:

$$\theta = \sqrt{n^2 + m^2}; F_f = \frac{F'_f \pi \theta^2}{4mn} = \frac{F'_f \cdot \pi (n^2 + m^2)}{4mn};$$

звідки

$$Af\rho_f = \frac{q_f r^2 \Delta \cdot F'_f \pi (n^2 + m^2)}{4mn \cdot \sqrt{n^2 + m^2}} = \frac{q_f r^2 \Delta \cdot F'_f \pi \sqrt{(n^2 + m^2)}}{4mn};$$

де F_f – спектральна густина, яка відповідає конкретному фільтру (з діаметром, рівним діагоналі щілини); F'_f – спектральна густина для щілини спектрографа в діапазоні довжин хвиль кометного фільтра; m – ширина щілини у кутових секундах (\square), n – протяжність області знімка вздовж щілини, з якої зчитується спектр кометної коми в (\square); θ – діаметр діафрагми в (\square).

Було обчислено потоки (I) та газопродуктивності (Q) для основних емісійних смуг. Розрахунок здійснювався шляхом виокремлення і складання інтенсивностей емісійних ліній для: CN ($\lambda\lambda = 384\text{--}390$ нм), C₃ ($\lambda\lambda = 402\text{--}410$ нм), C₂ ($\lambda\lambda = 506\text{--}520$ нм), NH₂ ($\lambda\lambda = 655\text{--}670$ нм). Діапазони довжин хвиль вибрано у відповідності до смуг пропускання кометних фільтрів НВ. Для отримання результату використовувалися приведені нижче параметри і формули:

$$M(\rho) = \frac{4\pi \cdot I}{g \cdot \Omega},$$

де $M(\rho)$ – кількість молекул у зоні видимості діафрагми або щілини спектрографа, I – потік енергії від смуги на одиницю площі (см²) дзеркала телескопа, g – фактор флуоресценції ($g/4\pi$ – енергія, що перевипромінюється однією молекулою за секунду в межах тілесного кута 1 стерadian), Ω – тілесний кут, який визначається проекцією одиниці площі приймача випромінювання на небесну сферу.

Оскільки спостережний матеріал був отриманий зі щілиною спектрографа, а не діафрагмою, $M(\rho)$ зазнало перетворень:

$$M'(\rho) = \frac{M(\rho) \cdot \pi\rho^2}{ab},$$

де a та b – висота та ширина щілини спектрографа, ρ – відстань від центра до краю діафрагми. Тепер нам потрібно знайти співвідношення між величинами a , b та ρ . Враховуючи той факт, що характерні масштаби для досліджуваних молекул в декілька разів перевищували розміри щілини за висотою ($\approx 11 \square$) та шириною ($\approx 3 \square$), зв'язок можна знайти з рівності площ щілини спектрографа та діафрагми:

$$\pi\rho^2 = ab \rightarrow \rho = \sqrt{\frac{ab}{\pi}};$$

звідки випливає:

$$\frac{Q}{v} = \frac{M(\rho)}{\rho \cdot F(\mu, x)} = \frac{M(\rho)}{F(\mu, x)} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{ab}};$$

$$\mu = \frac{\beta_1}{\beta_2}; x = \rho\beta_2; \beta_1 = \frac{1}{L_1}; \beta_2 = \frac{1}{L_2};$$

де

$$F(\mu, x) = \int_x^{\mu x} K_0(y) dy + x^{-1} (1 - \mu^{-1}) + K_1(\mu x) - K_1(x);$$

K_0 та K_1 – циліндричні функції Макдональда 0 і 1 порядків; L_1 та L_2 – характерні масштаби (пробіги) для батьківських та дочірніх молекул відповідно; $F(\mu, x)$ – функція Хазера; v – швидкість молекул.

У табл. 5 подано константи, які використовувалися в розрахунках для всіх розглянутих комет і їх залежність від геліоцентричної відстані [37].

Таблиця 5

Характерні масштаби та фактори флуоресценції для основних емісійних смуг

	CN (385–390 нм)	C ₃ (402–410 нм)	C ₂ (506–520 нм)	NH ₂ (655–670 нм)
L_1 , км	1.3×10^4	6.0×10^3	2.2×10^4	7.0×10^3
L_2 , км	2.1×10^5	8.9×10^4	6.6×10^4	6.1×10^4
$L(r)$	$L_1 \times r^{1.3};$ $L_2 \times r^{0.6}$	$L_1 \times r^{0.8};$ $L_2 \times r^{2.8}$	$L_1 \times r^{1.4};$ $L_2 \times r^{2.0}$	$L_1 \times r^{2.0};$ $L_2 \times r^{2.0}$
g , ерг \times с ⁻¹ \times мол ⁻¹	3.8×10^{-13}	1×10^{-12}	4.5×10^{-13}	3×10^{-14}
$g(r)$	$g \times r^{-2}$			

Наочною та інформативною є порівняльна характеристика газопродуктивностей для різних комет, які представлені у табл. 6. З таблиці чітко видно, що газопродуктивність розглянутих КСЮ значно нижча продуктивності ДПК зі зворотним рухом. Найпереконливішим є порівняння комети 103P/Hartley 2 з C/2009 K5 (McNaught), яка вперше наближалася до Сонця. Незважаючи на більшу відстань ДПК C/2009 K5 від Сонця, газопродуктивність всіх розглянутих емісійних смуг McNaught на порядок вища продуктивності Hartley 2.

Таблиця 6

Порівняння газопродуктивності основних емісійних смуг у розглянутих КСЮ та ДПК зі зворотним рухом

Комета	r , а.о.	Q_{CN} , мол/с	Q_{C_3} , мол/с	Q_{C_2} , мол/с	Q_{NH_2} , мол/с
81P	1.63	2.09×10^{25}	2.1×10^{24}	–	–
103P	1.06	9.44×10^{24}	9.86×10^{23}	2.12×10^{25}	1.75×10^{25}
C/2009 K5	1.50	6.99×10^{25}	5.35×10^{24}	3.65×10^{26}	4.64×10^{26}
C/2009 P1	2.09	–	–	3.62×10^{26}	–
	2.88	–	–	2.23×10^{26}	–

В табл. 7 представлені відносні пилопродуктивності для трьох КСЮ та трьох ДПК, які розглянуті у роботі. З таблиці однозначно видно, що найвищою пилопродуктивністю характеризуються ДПК, а саме: C/2006 W3 (Christensen) та C/2009 P1 (Garradd). Також можна побачити, що A_{fp} в кометі C/2009 P1 до проходження перигелію значно вище. Найнижчою пилопродуктивністю відзначилися короткоперіодичні комети 103P/Hartley 2 та 22P/Корфф (незважаючи на порівняно невеликі геліоцентричні відстані).

Варто звернути увагу і на значення A_{fp} у різних вузькосмугових фільтрах для однієї й тієї ж комети. Різниця значень вказує на колір кометного континууму. Для комет 22P та 103P ($A_{fp_{RC}} - A_{fp_{GC}} > 0$), отже відбиваючі властивості пилу зростають з довжиною хвилі і це забезпечує деяке «почервоніння» комет. Для всіх ДПК у табл. 7 ($A_{fp_{RC}} - A_{fp_{GC}} \leq 0$). Колір цих комет є близьким до нейтрального або характеризується деяким «посинінням». Схожі висновки були отримані і при порівнянні спектрофотометричних градієнтів. Пояснити отриманий результат можна різним середнім розміром

пилових частинок у ДПК зі зворотним рухом та КСЮ. Гіпотетично, середній розмір пилинок у комах ДПК менший, оскільки дрібнодисперсний пил вивітряється газом у першу чергу і залишає ядро комети назавжди. Для пилинок < 0.5 мкм визначальним процесом є не геометричне відбивання сонячного світла, а його розсіювання.

Таблиця 7

Порівняння Afp у розглянутих КСЮ та ДПК зі зворотним рухом

Комета	r , а.о.	Δ , а.о.	$\lg Af\rho_{BC}$	$\lg Af\rho_{GC}$	$\lg Af\rho_{RC}$
22P	1.77	0.78	—	3.019	3.274
81P	1.63	0.68	—	3.815	3.733
103P	1.06	0.13	—	1.794	1.899
C/2006 W3	3.13	2.33	4.693	4.731	4.724
C/2009 K5	1.50	1.43	—	3.901	3.811
C/2009 P1	2.88	2.5	4.673	—	—
	2.09	1.61	—	3.712	3.685

Отримані потоки, газопродуктивність, а також відносна пилопродуктивність (Afp) для вибраних КСЮ мають вагомо менші значення, ніж для ДПК зі зворотним рухом (з урахуванням геліоцентричної відстані). Проте, це можна легко пояснити віковою дезінтеграцією.

Також було побудовано відношення відбитого кометою сонячного континууму в абсолютних одиницях (без врахування стандартних емісій та люмінесцентного континууму) до оригінального спектра Сонця для всіх досліджуваних комет. Отримані таким чином спектрофотометричні градієнти вказують на відмінність у відбиваючих характеристиках пилу між розглянутими КСЮ та ДПК зі зворотним рухом (рис. 6).

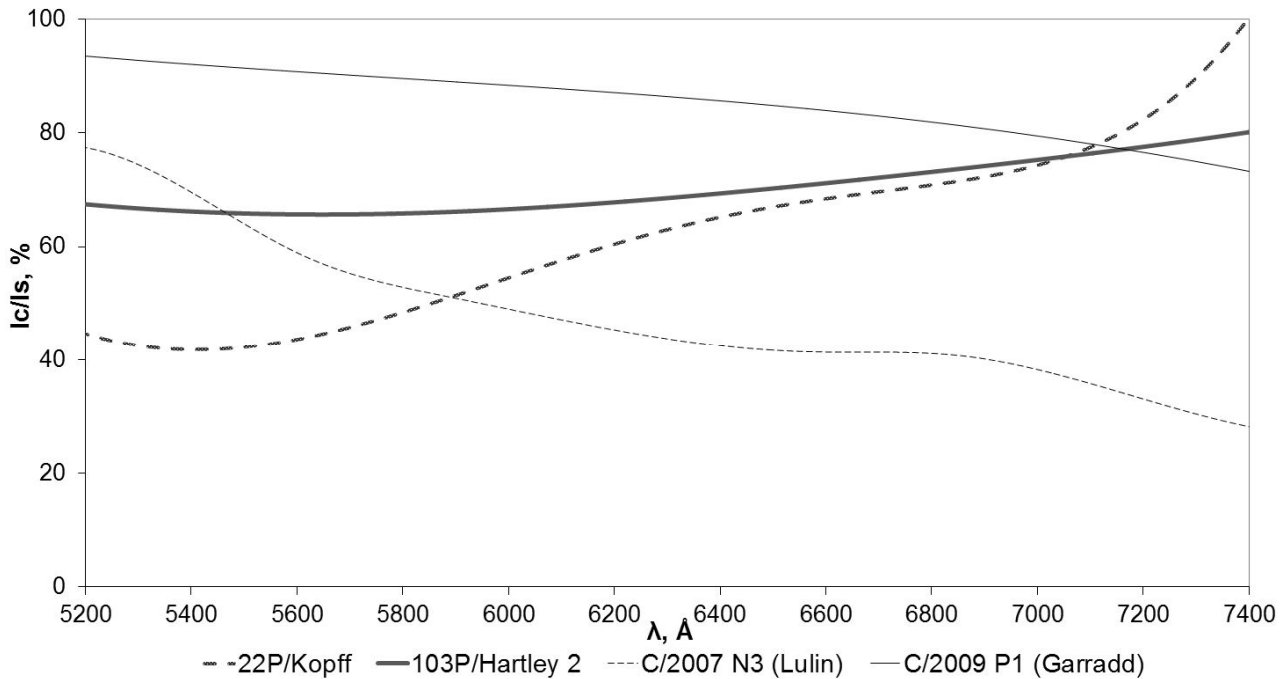


Рис. 6. Спектрофотометричні градієнти для КСЮ (22P, 103P) та ДПК зі зворотним рухом (C/2007 N3, C/2009 P1).

З рисунка видно, що розглянуті комети хмари Оорта краще відбивають короткохвильове випромінювання видимого спектрального діапазону. Це може бути пов'язано з надлишком в їх атмосферах дрібнодисперсних пилових частинок < 0.5 мкм. Ці частинки мають нижчу температуру і краще розсіюють короткохвильове випромінювання (механізми Мі та Релея). Розсіяне світло може вносити вагомий вклад у спадання відбиваючих властивостей кометного пилу з довжиною хвилі у ДПК, які розглянуті в роботі. Спектрофотометричні градієнти досліджуваних КСЮ зростають з довжиною хвилі у видимому спектральному діапазоні. Пояснити явище можна втратою КСЮ значної кількості легких пилових частинок < 0.5 мкм внаслідок активного газовиділення та багаторазового наближення до Сонця. Важкий, інертний, крупнодисперсний пил (> 0.5 мкм), який домінує в атмосферах цих комет, відбиватиме випромінювання Сонця майже рівномірно (з невеликою прямо пропорційною залежністю від довжини хвилі).

ВИСНОВКИ

1. Отримані дисертантом спектрофотометричні градієнти вказують на відмінність у відбиваючих характеристиках пилу між дослідженими КСЮ та кометами зі зворотним рухом і ексцентриситетом ≈ 1 . Розглянуті ДПК краще відбивають та розсіюють короткохвильове випромінювання видимого спектрального діапазону, що може бути пов'язано з надлишком в їх атмосферах дрібнодисперсних пилових частинок < 0.5 мкм.

2. Доведено існування відмінностей у хімічному складі між дослідженими КСЮ і ДПК зі зворотним рухом. Розглянуті спектри КСЮ мають значно меншу кількість молекулярних емісій, що можна пояснити віковою дезінтеграцією короткоперіодичних комет. На значній геліоцентричній відстані було ототожнено дублет Na ($D_1 = 588.9$ нм, $D_2 = 589.6$ нм) у спектрах комет 22P/Корфф ($r = 1.8$ а.о.), 103P/Hartley 2 ($r = 1.06$ а.о.), C/2009 K5 (McNaught) ($r = 1.5$ а.о.).

3. Знайдено люмінесцентний континуум у навколоядерній області комет 81P/Wild 2, 103P/Hartley 2, C/2007 N3 (Lulin), C/2009 K5 (McNaught) та проведено дослідження його параметрів. Стверджується, що флуоресценція є найбільш вірогідним механізмом утворення люмінесцентного кометного континууму. Розглянуто джерела континууму – складні органічні речовини-люмінофори. Виявлено, що досліджені комети з ексцентриситетом ≈ 1 проявляють люмінесцентний континуум у різних ділянках видимого спектрального діапазону.

4. Отримані автором фізичні параметри нейтральних газових та пилових атмосфер комет вказують, що на однакових геліоцентричних відстанях газо- та пилопродуктивність розглянутих ДПК вища продуктивності КСЮ. Пилопродуктивність комет хмари Оорта зі зворотним рухом до проходження перигелію вища (з врахуванням геліоцентричної відстані). Це може бути пояснено віковою дезінтеграцією або відмінностями у походженні різних типів комет.

ПУБЛІКАЦІЇ ОСНОВНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ

Публікації в спеціалізованих наукових фахових виданнях:

1. Чурюмов К.І. Оптична спектроскопія комети 103P/Hartley 2 в жовтні 2010 року / К.І. Чурюмов, В.О. Пономаренко, В.В. Клещенок, А.М. Мозгова, М.А. Кузнецов // Вісник астрономічної школи. – 2012. – Т. 8, № 1–2 – С. 91–95.
2. Пономаренко В. Параметри пилу та газу у комі комети C/2009 P1 (Garradd) / В. Пономаренко, К. Чурюмов, В. Клещенок, Н. Коваленко // Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Астрономія. – 2013. – № 50. – С. 52–55.
3. Чурюмов К.И. Люминесцентный континуум в спектрах кометы C/2007 N3 (Lulin) / Чурюмов К.И., Пономаренко В.А., Клещенок В.В., Баранский А.Р. // *Astronomicheskiy Tsirkulyar*. – ISSN 0236-2457. – ЕААО Shternberg Astronomical Institute. – Moscow. – 2013 – № 1603. – Р. 1–4.
4. Чурюмов К.І. Люмінесцентний континуум та інші спектральні особливості комети C/2007 N3 (Lulin) / Чурюмов К.І., Пономаренко В.О., Клещенок В.В., Баранський О.Р., Коваленко Н.С. // Вісник астрономічної школи. – 2013. – Т. 9, № 1.– С. 10–14.
5. Berezhnoy A.A. Properties of the lunar exosphere during the Perseid 2009 meteor shower / A.A. Berezhnoy, K.I. Churyumov, V.V. Kleshchenok, E.A. Kozlova, V. Mangano, Yu.V. Pakhomov, V.O. Ponomarenko, V.V. Shevchenko, Yu.I. Velikodsky // *Planetary and Space Science*. – 2014. – V. 96. – P. 90–98.
6. Чурюмов К.І. Люмінесцентний континуум та пробіги батьківських та дочірніх молекул в комі комети C/2009 K5 (McNaught) за спектральними спостереженнями в березні–квітні 2010 року / К.І. Чурюмов, В.О. Пономаренко, В.В. Клещенок, О.Р. Баранський, І.В. Лук'яник // Вісник астрономічної школи. – 2012. – Т. 8, № 1–2. – С. 195–199.
7. Иванова А.В. Определение периода вращения кометы 29P/Швассмана-Вахмана 1 по пылевым структурам (джетам) в коме / Иванова А.В., Афанасьев В.Л., Корсун П.П., Баранский А.Р., Андреев М.В., Пономаренко В.А. // *Астрономический вестник*. – Июль–Август 2012. – Т. 46, № 4. – С. 333–339.
8. Чурюмов К.І. Дослідження спектрів комети 81P/Wild 2, отриманих в березні–квітні 2010 року / К.І. Чурюмов, В.О. Пономаренко, В.В. Клещенок, О.Р. Баранський, Н.С. Коваленко // Вісник астрономічної школи. – 2012. – Т. 8, № 1–2. – С. 75–79.
9. Чурюмов К. Фізичні параметри газових та пилових атмосфер трьох комет 9P/Tempel 1, 37P/Forbesi, C/2004 Q1 (Machholz) / К. Чурюмов, В. Афанас'єв, Е. Пікацціо, В. Клещенок, І. Лук'яник, В. Пономаренко, О. Баранський, А. Альмейда, Р. Коста, Л. Чубко // Вісник астрономічної школи – 2009. – Т. 6, № 1–2. – С. 141–150.
10. Чурюмов К.І. Дослідження комет у Київському національному університеті імені Тараса Шевченка / Чурюмов К., Кручиненко В.,

Клещонок В., Лук'яник І., Кравцов Ф., Чубко Л., Баранський О., Пономаренко В. // Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Астрономія. – 2010. – № 46. – С. 47–51.

11. Бережний А.А. Поведінка атомів Na у місячній екзосфері під час дії метеорних потоків / Бережний А.А., Чурюмов К.І., Баранський О.Р., Шевченко В.В., Бучаченко А.А., Чурюмова Т.К., Клещонок В.В., Козлова Е.А., Пономаренко В.О., Столяров А.В., Творун О.В. // Вісник астрономічної школи. – 2011. – Т. 7, № 1–2. – С. 185–189.

12. Чурюмов К. Спостереження пилових джетів в кометі 81P/Вільд / Чурюмов К., Клещонок В., Баранський О., Пономаренко В. // Вісник КНУ імені Тараса Шевченка. Астрономія. – 2012. – № 48. – С. 59–62.

13. Чурюмов К.І. Оптичні спектри комет / Чурюмов К.І., Чубко Л.С., Пономаренко В.О. // Вісник астрономічної школи. – 2011. – Т. 7, № 1–2. – С. 208–220.

14. Чурюмов К.І. Морфологічні особливості пилових джетів в комі комети 81P/Вілда 2 / Чурюмов К.І., Клещонок В.В., Баранський О.Р., Пономаренко В.О. // Вісник астрономічної школи. – 2011. – Т. 7, № 1–2 – С. 221–224.

15. Чурюмов К.І. Спостереження нестационарної атмосфери Місяця та деякі її параметри / Чурюмов К.І., Бережний О.О., Пономаренко В.О., Баранський О.Р., Чурюмова Т.К., Клещонок В.В., Мозгова А.М., Коваленко Н.С., Шевченко В.В., Козлова Е.А., Пахомов Ю.В., Великодський Ю.І. // Вісник астрономічної школи. – 2012. – Т. 8, № 1–2. – С. 175–181.

Опубліковано в тезах і матеріалах конференцій:

16. Baransky A.R. Proceedings of the International Astronomical Union / A.R. Baransky, K.I. Churyumov, V.A. Ponomarenko // Cambridge Journals. Proceedings of the International Astronomical Union. – Symposium S263. – 2009. – Vol. 5. – P. 298–302.

17. Ponomarenko V.O. Some physical parameters and luminescent cometary continuum in spectra of comets 81P/Wild 2, 103P/Hartley 2, C/2009 K5 (McNaught) [Електронний ресурс] / V.O. Ponomarenko, K.I. Churyumov, V.V. Kleshchonok, O.R. Baransky // Режим доступу до ресурсу: <http://www.astro.lu.se/~anders/IPF2013/PDF/IPF2013-Ponomarenko.pdf>.

18. Ponomarenko V.O. Observation and study of spectra of comet 81P/Wild – the main target of the space mission “Stardust” / V.O. Ponomarenko, K.I. Churyumov, O.R. Baransky, I.V. Lukyanyk, V.V. Kleshchonok, L.S. Chubko // Materials of conference NATO Advanced Study Institute on Special Detection Technique (Polarimetry) and Remote Sensing. – 12–25.09.2010. – P. 1–5.

19. Чурюмов К.І. Дослідження спектрів комет C/2006 W3 (Крістенсена) та 22P/Копфа за спостереженнями в серпні 2009 року на піку Терскол / К.І. Чурюмов, В.О. Пономаренко, О.Р. Баранський, В.В. Клещонок, І.В. Лук'яник, Л.С. Чубко // Міжнародна конференція «Актуальні проблеми астрономії і космонавтики», Київ–Біла Церква. – Тези. – 2010. – С. 33.

20. Churyumov K. Study of optical spectra of four bright comets observed in 2009–2011 / Churyumov K., Ponomarenko V., Kleshchonok V., Luk'yanyk I. // International Conference Asteroids, Comets, Meteors 2014. Helsinki, Finland. – Book of Abstracts. – 30.06–4.07.2014. – № 06D0.

21. Churyumov K. Some physical parameters in spectra of comets 103P/Hartley 2, C/2009 K5 (McNaught), C/2009 P1 (Garradd) and C/2007 N3 (Lulin) / Churyumov K., Ponomarenko V., Kleshchonok V., Lukyanyk I. // COSPAR 2014. – Moscow, Russia. – Book of Abstracts. – 2014. – B0.4-92-14.

22. Чурюмов К.І. Порівняльний аналіз спектрів комет 22P/Kopff, 81P/Wild 2, 103P/Hartley 2, C/2006 W3(Christensen), C/2009 K5 (Mcnaught) / Чурюмов К.І., Пономаренко В.О., Баранський О.Р., Клещонок В.В., Лук'яник І.В., Чубко Л.С. // Міжнародна меморіальна конференція САММАС–2011. Вінниця. – Тези. – 18–23.09.2011. – С. 45.

23. Churyumov K.I. Comparative spectrophotometry of comets 22P/Kopff, 81P/Wild, C/2009 K5 (McNaught) and 103P/Hartley 2 / K.I. Churyumov, V.O. Ponomarenko, O.R. Baransky, V.V. Kleshchonok, L.S. Chubko // International Conference. Astronomical Research: from Near-Earth Space to the Galaxy. Mykolaiv, Ukraine. – Book of Abstracts. – 26–29.09.2011. – P. 17–18.

24. Berezhnoy A.A. The Na exosphere of the Moon during Perseid 2009 meteor shower / Berezhnoy A.A., Baransky O.R., Churyumov K.I., Churyumova T.K., Kleshchenok V.V., Ponomarenko V.O., Kozlova E.A., Shevchenko V.V., Pakhomov Yu.V., Velikodsky Yu.I. // Conference “Moon”. Berlin, Germany. – Book of Abstracts. – 2012. – P. 76.

25. Чурюмов К.І. Параметри люмінесцентного континууму короткоперіодичної комети 103P/Hartley 2 / Чурюмов К.І., Пономаренко В.О., Клещонок В.В., Баранський О.Р. // Міжнародна конференція «Актуальні проблеми астрономії і космонавтики». Київ–Кам'янець-Подільський. – Тези. – 2012. – С. 51–52.

26. Чурюмов К.І. Спектральні дослідження комети C/2009 K5 (Макнот) / К.І. Чурюмов, В.О. Пономаренко, О.Р. Баранський, В.В. Клещонок, І.В. Лук'яник // Астрономія та фізика космосу в Київському університеті. Київ. – Тези. – 22–25.09.2012. – С. 90.

27. Churyumov K.I. Exploration of spectra of comet 81P/Wild 2 observed on 28/29 March and 2/3 April 2010 / K.I. Churyumov, V.O. Ponomarenko, O.R. Baransky, V.V. Kleshchonok // International conference “Asteroids, Comets, Meteors 2012”. – Book of abstracts. – 13–25.09.2012 – Niigata, Japan. – 6395.

28. Churyumov K.I. Exploration of the spectra of two comets 81P/Wild and 103P/Hartley 2 the targets of space mission / K.I. Churyumov, V.O. Ponomarenko, O.R. Baransky, V.V. Kleshchonok // International conference 39th COSPAR 2012. – Mysore, India. – Book of Abstracts. – 2012. – B0.4-0053-12.

29. Churyumov K.I. Some physical parameters and luminescent cometary continuum in spectra of comets 81P/Wild 2, 103P/Hartley 2, C/2009 K5 (McNaught) / K.I. Churyumov, V.O. Ponomarenko, V.V. Kleshchonok, O.R. Baransky // Workshop on "Ice and Planet Formation". Lund Observatory, Lund, Sweden. – Book of Abstracts. – 15–17.05.2013. – P. 31.

СПИСОК ЦИТОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

30. Whipple F.L. A comet model. I. The acceleration of Comet Encke / F.L. Whipple // *Astrophysical Journal*. – 1950. – V. 111. – P. 375–394.
31. Cochran A. A high spectral resolution Atlas of comet 122P/de Vico [Електронний ресурс] / A. Cochran // – 2001. Режим доступу до ресурсу: anita@barolo.as.utexas.edu.
32. Brown M.E. High-resolution spectra catalogue of cometary emissions lines / M.E. Brown, A.H. Bouchez, H. Spinrad, C.M. Jons-Krull // *Astronomical Journal*. – 1996. – 112 (3) – P. 1197–1202.
33. Бурнашев В.И. Standard Star Optical Photometry Data [Електронний ресурс] / В.И. Бурнашев, Б. А. Бурнашева // Режим доступу до ресурсу: <http://sirius.bu.edu/planetary/obstools/starflux/>.
34. Назарчук Г.К. Проверка гипотезы о люминесцирующих пылинках в атмосфере кометы Галлея / Г.К. Назарчук // *Кометный циркуляр*. – 1987. – № 377. – С. 2.
35. Clairemidi J. Identification of anthracene in Comet 1P/Halley / J. Clairemidi, G. Moreels, O. Mousis, P. Bréchnac // *Astronomy & Astrophysics*. – 2008. – Vol. 492. – P. 245–250.
36. Farnham T.L. The HB Narrowband Comet Filters: Standard Stars and Calibrations / T.L. Farnham, D.G. Schleicher, M.F. A'Hearn // *Icarus*. – 2000. – Vol. 147. – P. 180–204.
37. Langland-Shula L.E. Comet classification with new methods for gas and dust spectroscopy / L.E. Langland-Shula, G.H. Smith // *Icarus* – 2011. – Vol. 213. – P. 280–322.

АНОТАЦІЯ

Пономаренко В.О. Спектральні особливості вибраних комет сімейства Юпітера та довгоперіодичних комет зі зворотним рухом. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.03.03 – Геліофізика і фізика Сонячної системи. – Головна астрономічна обсерваторія НАН України, Київ, 2015.

Досліджено фізичні характеристики вибраних комет, що належать до двох динамічних груп: комети сімейства Юпітера (КСЮ) та довгоперіодичні комети (ДПК) зі зворотним рухом. Дослідження виконувалось на основі оптичних спектрів з середньою роздільною здатністю.

Створено список емісійних ліній за спектрами комет 81P/Wild 2, 103P/Hartley 2, C/2007 N3 (Lulin), C/2009 K5 (McNaught). На значній відстані від Сонця ($r > 1.5$ а.о.) ототожнено дублет Na ($D_1 = 588.9$ нм, $D_2 = 589.6$ нм). Виявлено, що для однакових геліоцентричних відстаней кількість емісійних ліній у досліджених ДПК більша їх кількості в КСЮ.

Вперше знайдено люмінесцентний континуум у навколоядерній області комет 81P/Wild 2, 103P/Hartley 2, C/2007 N3 (Lulin), C/2009 K5 (McNaught). Проведено дослідження параметрів континууму. Запропоновано

флуоресценцію як найбільш вірогідний механізм його утворення. Розглянуто джерела континууму – складні органічні речовини-люмінофори. В спектрах ДПК C/2007 N3 (Lulin) люмінесценцію було виявлено не в одному, а у трьох різних ділянках видимого спектрального діапазону з максимумами $\lambda_{1\max} \approx 400$ нм, $\lambda_{2\max} \approx 585$ нм, $\lambda_{3\max} \approx 650$ нм.

Знайдено спектрофотометричний градієнт та відносну пилопродуктивність (Afp) для всіх розглянутих у роботі об'єктів. Отримано значення фізичних параметрів нейтральних газових атмосфер комет 81P/Wild 2, 103P/Hartley 2, C/2007 N3 (Lulin), C/2009 K5 (McNaught), C/2009 P1 (Garradd): потоки, кількість молекул, газопроодуктивність. Відмічено, що газо- і пилопродуктивність досліджених ДПК вища продуктивності КСЮ (з врахуванням геліоцентричних відстаней).

Ключові слова: комети, оптичні спектри, спектрофотометрія, емісії, люмінесцентний континуум, флуоресценція, пило- та газопроодуктивність, спектрофотометричний градієнт.

АННОТАЦІЯ

Пономаренко В.О. Спектральные особенности выбранных комет семейства Юпитера и долгопериодических комет с обратным движением. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.03 – Гелиофизика и физика Солнечной системы. – Главная астрономическая обсерватория НАН Украины, Киев, 2015.

Исследованы физические характеристики выбранных комет, которые принадлежат к двум динамическим группам: кометы семейства Юпитера (КСЮ) и долгопериодические кометы (ДПК) с обратным движением. Исследование выполнялось на основе оптических спектров со средней разрешающей способностью.

Создан список эмиссионных линий по спектрам комет 81P/Wild 2, 103P/Hartley 2, C/2007 N3 (Lulin), C/2009 K5 (McNaught). На значительном расстоянии от Солнца ($r > 1.5$ а.е.) отождествлен дублет Na ($D_1=588.9$ нм, $D_2=589.6$ нм). Обнаружено, что для равных гелиоцентрических расстояний количество эмиссионных линий в исследованных ДПК больше их количества в КСЮ.

Впервые обнаружен люминесцентный континуум в околоядерной области комет 81P/Wild 2, 103P/Hartley 2, C/2007 N3 (Lulin), C/2009 K5 (McNaught). Проведено исследование параметров континуума. Предложена флуоресценция в качестве наиболее вероятного механизма его образования. Рассмотрены источники континуума – сложные органические вещества-люминофору. В спектрах ДПК C/2007 N3 (Lulin) люминесценция была обнаружена не в одном, а трёх различных участках видимого спектрального диапазона с максимумами $\lambda_{1\max} \approx 400$ нм, $\lambda_{2\max} \approx 585$ нм, $\lambda_{3\max} \approx 650$ нм.

Найден спектрофотометрический градиент и относительная пылепродуктивность ($Af\rho$) для всех рассмотренных в работе объектов. Получены значения физических параметров нейтральных газовых атмосфер комет 81P/Wild 2, 103P/Hartley 2, C/2007 N3 (Lulin), C/2009 K5 (McNaught), C/2009 P1 (Garradd): потоки, число молекул, газопродуктивность. Отмечено, что газо- и пылепродуктивность исследованных ДПК выше продуктивности КСЮ (с учетом гелиоцентрических расстояний).

Ключевые слова: кометы, оптические спектры, спектрофотометрия, эмиссии, люминесцентный континуум, флуоресценция, пыле- и газопродуктивность, спектрофотометрический градиент.

ANNOTATION

Ponomarenko V.O. Spectral peculiarities selected Jupiter-family comets and long-period comets with retrograde motion. – Manuscript.

Thesis for PhD degree in Physical and Mathematical Sciences by specialty 01.03.03 – Heliophysics and Physics of Solar System. – Main Astronomical Observatory of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2015.

The dissertation is devoted to research of the physical characteristics of selected comets that belong to two dynamic groups: Jupiter-family comets (JFCs) and long-period comets (LPC) with retrograde motion. The investigation was carried out on the basis of the optical spectra with an average resolution, namely prism ($R \approx 1500$), echelette ($R \approx 4500$) and echelle ($R \approx 14000$) spectra. The methods of investigation were the spectrophotometry and simulation. The work of this type is actual for understanding of the relationship of the physical characteristics of comets with the places of their formation and evolution. This problem is one of the main objectives of the Cosmogony of the Solar System.

As the result of the work a list of emission lines was created from the spectra of comets 81P/Wild 2, 103P/Hartley 2, C/2007 N3 (Lulin), C/2009 K5 (McNaught). At a considerable distance from the Sun doublet Na ($D_1 = 588.9$ nm, $D_2 = 589.6$ nm) was identified in the spectra of comets 22P/Kopff ($r = 1.8$ AU), 103P/Hartley 2 ($r = 1.06$ AU), C/2009 K5 (McNaught) ($r = 1.5$ AU). It was found that for equal heliocentric distances a quantity emission lines in the investigated LPC above their quantity in JFCs.

For the first time the luminescent continuum in the perinuclear region was detected in comets 81P/Wild 2, 103P/Hartley 2, C/2007 N3 (Lulin), C/2009 K5 (McNaught). The parameters of the continuum were researched. The fluorescence is proposed as the most probable mechanism for the formation of the continuum. Complex organic substances-luminophors which are the sources of the continuum were considered. The luminescence was detected in three segments of the visible spectral range with the maxima $\lambda_{1\max} \approx 400.0$ nm, $\lambda_{2\max} \approx 585.0$ nm, $\lambda_{3\max} \approx 650.0$ nm. It was noticed that the investigated comets with eccentricity ≈ 1 reveal the luminescent continuum in the various regions of the visible wavelength range.

The spectrophotometric gradient (change in reflectivity) and the relative productivity of dust ($Af\rho$) were found for all investigated comets. For this the

photometric method for estimating the quantitative characteristics of dust in the atmosphere of comets has been adapted to the method of the spectrophotometry. The spectrophotometric gradients of studied JFCs increase with a wavelength in the visible spectral range, and the gradients of discussed LPC change slightly or subside with the wavelength. The values of the physical parameters of the neutral gas atmospheres were obtained for comets 81P/Wild 2, 103P/Hartley 2, C/2007 N3 (Lulin), C/2009 K5 (McNaught), C/2009 P1 (Garradd): fluxes, the quantity of molecules, the gas productivity and characteristic scales for main parent and daughter molecules. For the comet C/2009 K5 (McNaught) parameters were obtained for the first time. It is noted that the gas and dust productivity of discussed LPC is higher their productivity in JFCs (taking into account the heliocentric distance). It was also noticed that on the equal heliocentric distances the productivity of the investigated comets of the Oort cloud is bigger before perihelion passage.

Key words: comets, optical spectra, spectrophotometry, emission, luminescence continuum, fluorescence, dust and gas productivity, spectrophotometric gradient.