# НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ ГОЛОВНА АСТРОНОМІЧНА ОБСЕРВАТОРІЯ

На правах рукопису УДК 523.64-864

Харчук Сергій Валерійович

# Фізичні характеристики пилу вибраних довгоперіодичних комет за результатами динамічного моделювання

Спеціальність: 01.03.03 – Геліофізика і фізика Сонячної системи

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук

> Науковий керівник: Корсун Павло Павлович, кандидат фізико-математичних наук

КИ**ЇВ** – 2015

### **3MICT**

ВСТУП	. 4
РОЗДІЛ 1. Кометний пил	12
1.1. З історії дослідження кометного пилу	12
1.2. Фізичні параметри, хімічний склад і властивості кометного пилу	18
1.3. Смугові структури в пилових хвостах комет	20
1.4. Рух кометного пилу	22
РОЗДІЛ 2. Методика й техніка дослідження кометного пилу за допомогою	
динамічного моделювання	25
РОЗДІЛ 3. Характеристики пилу комети С/1995 О1 (Hale–Bopp) за	
результатами динамічного моделювання	32
3.1. Відомості про комету	32
3.2. Спостережний матеріал	35
3.3. Фрагментація пилу як додаткова умова при моделюванні	36
3.4. Аналіз результатів моделювання	39
3.5. Основні результати	45
РОЗДІЛ 4. Модельні дослідження смугових структур у пилових хвостах	
комет	43
4.1. Особливості пилового хвоста комети С/2006 Р1 (McNaught)	43
4.1.1. Загальна характеристика комети	43
4.1.2. Моделювання та аналіз результатів	45
4.1.3. Основні результати	51
4.2. Концепція подальших модельних досліджень смугових структур	52
4.3. Моделювання пилового хвоста комети C/1910 A1 (Great January	
Comet)	54
4.3.1. Відомості про комету	54
4.3.2. Модельне дослідження комети	55
4.4. Моделювання пилового хвоста комети C/1957 P1 (Mrkos)	56
4.4.1. Відомості про комету	56

4.4.2. Модельне дослідження комети	. 57
4.5. Моделювання пилового хвоста комети C/1962 C1 (Seki-Lines)	. 58
4.5.1. Відомості про комету	. 58
4.5.2. Модельне дослідження комети	. 59
4.6. Моделювання пилового хвоста комети C/1975 V1 (West)	. 61
4.6.1. Відомості про комету	. 61
4.6.2. Модельне дослідження комети	. 63
4.7. Моделювання пилового хвоста комети C/2011 L4 (PanSTARRS)	. 65
4.7.1. Відомості про комету	. 65
4.7.2. Модельне дослідження комети	. 67
4.7.3. Основні результати	. 70
4.8. Обговорення результатів моделювання пилових хвостів зі смуговими	A
структурами	. 70
РОЗДІЛ 5. Особливості пилових хвостів комет C/2012 S1 (ISON) та	
C/2012 K5 (LINEAR)	.75
5.1. Модельні дослідження пилового хвоста комети C/2012 S1 (ISON)	. 75
5.1.1. Відомості про комету	. 75
5.1.2. Фотометричні спостереження комети	. 79
5.1.3. Динамічне моделювання комети та аналіз результатів	. 80
5.2. Моделювання пилового хвоста комети C/2012 K5 (LINEAR)	. 85
5.2.1. Відомості про комету	. 85
5.2.2. Робота із зображеннями комети	0.6
	. 86
5.2.3. Динамічне моделювання комети та аналіз результатів	. 86 . 87
<ul><li>5.2.3. Динамічне моделювання комети та аналіз результатів</li><li>5.3. Основні результати</li></ul>	. 86 . 87 . 90
<ul><li>5.2.3. Динамічне моделювання комети та аналіз результатів</li><li>5.3. Основні результати</li><li>РОЗДІЛ 6. Обговорення результатів</li></ul>	. 86 . 87 . 90 . <b>92</b>
<ul> <li>5.2.3. Динамічне моделювання комети та аналіз результатів</li> <li>5.3. Основні результати</li> <li>РОЗДІЛ 6. Обговорення результатів</li> <li>ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ</li> </ul>	. 86 . 87 . 90 . 92 . 99

3

### ВСТУП

### Актуальність теми

Комети сформувалися на ранніх етапах утворення Сонячної системи й були викинуті на її периферію в результаті гравітаційного впливу планетгігантів. Переважну більшість свого часу комети знаходяться на далеких відстанях від Сонця, де рівень сонячної радіації є досить низьким, щоб модифікувати первинний склад кометної речовини. Наближаючись до Сонця, комети стають активними і доступними для досліджень. Аналізуючи пилові та газові компоненти ком і хвостів комет, можна отримати інформацію про фізичні властивості речовини, притаманної ранній стадії формування Сонячної системи. Нова інформація, отримана в результаті дослідження комет, використовується для уточнення сучасних моделей розвитку Сонячної системи. Крім інтересу для планетної космогонії, комети привертають усе більшу увагу через те, що вони могли б бути джерелом складних органічних молекул, необхідних для виникнення життя.

Про актуальність дослідження комет свідчать різні космічні проекти. Прикладом є дослідження комети 67Р/Churyumov–Gerasimenko. За допомогою космічного апарата Rosetta отримано ряд результатів, що потребують додаткових пояснень. Зокрема, було виявлено значну кількість молекулярного кисню в комі комети. Цей кисень був складовою ядра під час формування комети, чого не передбачають сучасні моделі формування Сонячної системи. Таким чином, є необхідність у створенні моделей еволюції Сонячної системи, які б повністю відповідали всім спостережним даним.

Кометний пил складає половину, а можливо, й більшу частину маси комет. Він має широкий діапазон фізичних і хімічних характеристик, оскільки комети сформувалися в різних місцях Сонячної системи. Важливо вести дослідження якомога більшої кількості комет для отримання інформації про локальні особливості ранньої Сонячної системи. Метод дослідження, використаний у дисертаційній роботі, а саме, аналіз пилових хвостів вибраних комет шляхом динамічного моделювання, дає інформацію про фізичні та динамічні властивості кометного пилу, яку важко або неможливо отримати за допомогою інших методів дослідження.

Під час інтерпретації спостережних даних перед вченими постають нові задачі, розв'язання яких потребує або вдосконалення наявних методів досліджень, або розробки нових. Зокрема, у пилових хвостах ряду комет спостерігалися регулярні смугові структури. Це явище поки що не має беззастережного пояснення, тому його вивчення є актуальним.

### Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Представлені в дисертації дослідження виконувалися згідно з планами таких наукових тем відділу фізики малих небесних тіл Головної астрономічної обсерваторії НАН України:

- «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.
- «Фізичні характеристики комет, астероїдів та супутників планет за дослідженнями в оптичній ділянці спектру», шифр 1.4.9.2/1.5.1-334В, номер держреєстрації: 0113U006608, 2014–2018 рр.
- «Модельний аналіз пилових хвостів вибраних довгоперіодичних комет», шифр 1.4.9.2/5.1-330КТ, номер держреєстрації: 0113U005431, 2013–2014 pp.

В усіх перерахованих наукових програмах і темах здобувач брав участь як виконавець.

### Мета і задачі дослідження

Мета дисертаційної роботи полягає у дослідженні фізичних і динамічних параметрів пилових частинок та поясненні явища утворення смугових структур у пилових хвостах вибраних комет методом динамічного моделювання. Згідно з поставленою метою необхідно було вирішити наступні задачі:

- Освоїти модель, розроблену П.П. Корсуном на основі алгоритму Монте-Карло. Адаптувати модель для дослідження пилових хвостів близьких комет. Врахувати те, що льодяна складова кометних зерен повністю сублімувала і потрібен розгляд пористих тугоплавких пилових частинок. Отримати фізичні та динамічні параметри пилу, який формує хвости досліджуваних комет.
- Провести дослідження пилового хвоста комети C/1995 O1 (Hale–Bopp) методом динамічного моделювання. Визначити фізичні й динамічні параметри пилинок, які формують хвіст, запропонувати модельний алгоритм фрагментації пилових частинок, дослідити вплив фрагментації на результати моделювання хвоста цієї комети.
- Здійснити моделювання пилових хвостів комет С/1910 А1 (Great January Comet), С/1957 Р1 (Mrkos), С/1962 С1 (Seki–Lines), С/1975 V1 (West), С/2006 Р1 (McNaught), С/2011 L4 (PanSTARRS). Дати пояснення спостережному явищу квазіперіодичних смугових структур. Отримати періоди обертання досліджуваних комет.

Об'єкт дослідження: пилові хвости комет.

**Предмет дослідження:** динамічні та фізичні властивості пилу в хвостах вибраних комет.

Методи дослідження: динамічне моделювання на основі алгоритму Монте-Карло.

### Наукова новизна одержаних результатів

Комплексні дослідження, викладені в роботі, дали змогу отримати такі нові результати:

- Запропоновано новий алгоритм моделювання фрагментації пилинок. Підтверджена значна роль фрагментації пилових частинок при формуванні пилового хвоста комети C/1995 O1 (Hale–Bopp).
- 2. Запропоновано новий механізм виникнення квазіперіодичних утворень у пилових хвостах комет, що проявляються у вигляді смуг при фотометричних спостереженнях. Показано, що ключову роль у процесі утворення смугових структур відіграє активність локальних джерел пилоутворення, розміщених на ядрі комети, ЩО обертається. ефективність Підтверджено запропонованого механізму шляхом модельних досліджень смугових структур комет C/1910 A1 (Great January Comet), C/1957 P1 (Mrkos), C/1962 C1 (Seki-Lines), C/1975 V1 (West), C/2006 P1 (McNaught), C/2011 L4 (PanSTARRS). Отримано значення осьових періодів обертання вказаних вище комет.
- У результаті моделювання вперше отримано фізичні й динамічні параметри пилових частинок комет: C/2012 K5 (LINEAR), C/2012 S1 (ISON), C/2006 P1 (McNaught).

### Практичне значення отриманих результатів

Методом динамічного моделювання отримано фізичні та динамічні параметри пилових частинок обраних довгоперіодичних комет: характерні розміри, розподіл за розмірами, швидкості вильоту, час життя. Результати можуть бути використані для перевірки й вдосконалення фізичної моделі кометного ядра. Також ці результати можуть використовуватися для оцінки пилопродуктивності інших комет. У роботі запропоновано та перевірено за допомогою динамічного моделювання новий механізм утворення смугових структур, який може бути використаний при майбутніх дослідженнях смугових структур у пилових хвостах комет. При дослідженнях пилового хвоста комети C/1995 O1 (Hale–Bopp) запропоновано новий модельний алгоритм фрагментації пилових частинок, який може бути використаний під час майбутніх досліджень пилових складових ком комет.

### Достовірність та обґрунтованість отриманих результатів

Результати основі линамічного отримано на моделювання 3 використанням алгоритму Монте-Карло. Використана модель опирається на сучасні знання про кометний пил і процес формування пилових хвостів комет. Частина отриманих результатів, а саме: фрагментація пилу комети С/1995 О1 (Hale–Bopp), що проявляється у формуванні її хвоста переважно з малих пилинок, а також розміри та вік пилинок у хвості комети C/2011 L4 (PanSTARRS), підтверджена результатами інших дослідників цих комет. Значення фізичних і динамічних параметрів пилу комет C/2012 S1 (ISON) та C/2012 K5 (LINEAR) підтверджені результатами інших дослідників, отриманими для подібних об'єктів дослідження. Дієвість запропонованого механізму утворення смугових структур у пилових хвостах комет підтверджена для всіх шести розглянутих комет. Основні наукові результати досліджень апробовані на міжнародних наукових конференціях і семінарах.

### Особистий внесок здобувача

Здобувачем здійснено огляд літературних джерел, необхідних для роботи. У роботі [5] особисто здобувачем запропоновано та реалізовано метод врахування фрагментації пилових частинок; проведено дослідження пилового хвоста комети C/1995 O1 (Hale–Bopp) методом динамічного моделювання для трьох дат; визначено фізичні й динамічні параметри пилинок, з яких був сформований хвіст комети: розміри, розподіли за розмірами, швидкості та час

життя. У роботі [6] здобувачем модельно перевірено запропонований науковим керівником механізм утворення смугових структур у пиловому хвості комети C/2006 P1 (McNaught); отримано значення періоду осьового обертання комети; визначено фізичні й динамічні параметри пилинок. У роботі [7] здобувачем перевірено запропонований у роботі [6] механізм утворення смугових структур у пилових хвостах комет шляхом моделювання смуг комет C/1910 A1 (Great January Comet), C/1957 P1 (Mrkos), C/1962 C1 (Seki–Lines), C/1975 V1 (West); отримано значення періодів осьового обертання ядер цих комет, визначено фізичні й динамічні параметри пилинок. У роботі [11] здобувачем проведено моделювання структури смуг, яка спостерігалася в пиловому хвості комети C/2011 L4 (PanSTARRS); отримано значення періоду осьового обертання комети; отримано значення фізичних і динамічних параметрів пилинок. У роботах [12, 13] здобувачем проведено моделювання розподілів яскравості комет C/2012 S1 (ISON) та C/2012 K5 (LINEAR) й отримано значення фізичних і динамічних параметрів пилових частинок. Основні наукові результати досліджень представлено автором на наукових конференціях і семінарах.

### Апробація результатів дисертації

За основними результатами досліджень, представлених у дисертації, зроблено доповіді на наукових семінарах Головної астрономічної обсерваторії НАН України, а також на міжнародних конференціях:

- 15-та міжнародна астрономічна конференція для молодих вчених (Київ, 2008 р.);
- 16-та міжнародна астрономічна конференція для молодих вчених (Київ, 2009 р.);
- Меморіальна міжнародна конференція «Астрономія і фізика космосу», присвячена 105-річчю С.К. Всехсвятського та 165-літтю Астрономічної

обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка (Київ, 2010 р.);

- Міжнародна наукова конференція «Астрономічна школа молодих вчених» (Кам'янець-Подільський, 2012 р.);
- Міжнародна наукова конференція «Астрономічна школа молодих вчених» (Кіровоград, 2014 р.).

### Публікації

Основні результати дисертаційної роботи опубліковано протягом 2008– 2015 років: п'ять тез – у працях конференцій і шість статей – у рецензованих журналах:

- Харчук С.В., Корсун П.П., Микуш Г. Модельный анализ пылевого хвоста кометы Хейла-Боппа // Кинематика и физика небесных тел. 2009. Т. 25, № 4. С. 268–276.
- Харчук С.В., Корсун П.П. Полосоподобные детали в пылевом хвосте кометы С/ 2006 Р1 (Мак-Нота) // Кинематика и физика небесных тел. – 2010. – Т. 26, № 6. – С. 68–75.
- Харчук С.В., Корсун П.П. Утворення смугових структур у пилових хвостах комет // Вісник Астрономічної школи. – 2012. – Т. 8, № 1. – С. 80–86.
- Харчук С.В., Корсун П.П. Модель пилового хвоста комети С/2011 L4 (PANSTARRS) // Кинематика и физика небесных тел. – 2015. – Т. 31, № 1. – С. 52–57.
- Харчук С.В., Иванова А.В., Корсун П.П., Киселев Н.Н., Москвитин А.С. Моделирование пылевого хвоста кометы C/2012 S1 (ISON) по результатам наблюдений // Астрономический вестник. – 2015. – Т. 49, № 5. – С. 353–358.

— Харчук С.В., Іванова О.В., Корсун П.П., Баранський О.Р. Модельний аналіз пилового хвоста комети С/2012 К5 (LINEAR) // Кинематика и физика небесных тел. – 2015. – Т. 31, № 5. – С. 30–36.

### РОЗДІЛ 1 КОМЕТНИЙ ПИЛ

### 1.1. З історії дослідження кометного пилу

Комети спостерігаються людством протягом багатьох тисяч років, але тільки в останні кілька століть – як астрономічні, позаатмосферні явища. Щоправда, сумніви щодо атмосферної приналежності комет існували дуже давно. Так, Сенека у своїх «Питаннях природознавства» зазначав, що поведінка комет має характеристики, що більше відповідають небесним, ніж атмосферним явищам. Крім того, Сенека у тій же праці зазначив: «Хвости комет утікають від сонячних променів», що можна вважати інтуїтивним передбаченням дії сонячного випромінювання на дрібну кометну речовину [179]. Уже у 18 столітті деякі вчені зробили правильні гіпотези щодо фізичного складу комет. У 1755 році Іммануїл Кант припустив, що комети складаються з деяких летючих речовин, чиї випаровування призводять до їх виблискування поблизу перигелію [94].

Вагомим кроком у дослідженні динаміки кометного пилу була робота Бесселя [17], присвячена дослідженню морфології коми комети 1P/Halley під час її появи 1835 року. Бессель вивів рівняння руху пилових частинок, вивільнених із ядра комети, в ході чого ввів концепцію репульсивної сили, направленої від Сонця. Ця сила, вважав Бессель, змінюється в оберненій пропорції до квадрата геліоцентричної відстані. У кінці 19 сторіччя Бредіхін ввів поняття, які й тепер часто використовуються при дослідженні пилових хвостів: синдини (місце пилових частинок, які піддаються однаковим прискоренням репульсивної сили) і синхрони (місце пилових частинок, вивільнених із комети одночасно). На межі 19 і 20 сторіч репульсивну силу було ідентифіковано й визначено як тиск сонячного випромінювання [16].

У 1950 році Віпл запропонував льодоконгломератну модель будови кометного ядра. Згідно з нею, зокрема, пилові частинки покидають кометне

ядро й прискорюються до своїх усталених швидкостей дією газу, швидкість вивільнення якого значно більша. Усталена швидкість досягається тоді, коли пил і газ стають динамічно відділені [202]. Фінсон і Пробстейн представили теорію пилогазодинаміки, згідно з якою частинки пилу прискорюються через дію газу, що розширюється в голові комети. Ця взаємодія відбувається тільки в невеликий внутрішній області голови, де густини газу високі. Усталена швидкість, В основному, залежить від газопродуктивності, пилопродуктивності й розміру пилових частинок [56]. Перші розробки розв'язання проблем пилогазодинаміки представив Пробстейн [154]. За його розрахунками усталена швидкість досягається на відстані приблизно 20 радіусів ядра комети, а значення швидкості при температурі газу 200 К становить 0.36-0.74 км/с. Результати Пробстейна отримали переконливі підтвердження через дослідження поступового розширення чітко зафіксованих скупчень пилу в головах комет 109P/Swift-Tuttle [169] і 1P/Halley [172, 173] на геліоцентричних відстанях близько 1 а.о., коли було виявлено, що усталені швидкості субмікронних пилових частинок знаходяться в діапазоні від 0.4 до 0.7 км/с.

Розвиток космічної ери дав можливість досліджувати комети за межами земної атмосфери. Першим космічним апаратом, який виконав дослідження комети був International Cometary Explorer. Він пролетів крізь хвіст комети 21P/Giacobini-Zinner 11 вересня 1985 року. Найближча відстань від апарату до ядра становила приблизно 7800 км. Цей апарат виконав дослідження магнітних полів, утворених при взаємодії комети з сонячним вітром [184].

Пізніше цілий ряд космічних апаратів було відправлено до комети 1P/Halley у 1986 році: Вега 1, Вега 2, Giotto, Suisei, Sakigake. Дослідження, виконані ними, дали інформацію про розміри ядра комети й показали, що воно має неправильну форму і вкрите нелетючими чорними пиловими речовинами і тільки незначна частина — льодом. Пилинки виявилися переважно силікатами, хоча також спіймано пилинки, які майже повністю складаються з органічних речовин [95]. Також виявлено велику кількість дрібних, радіусами менше 0.1 мкм, пилинок, які не можна побачити за допомогою наземних спостережень [130]. Загалом, безпосередньо досліджено пилинки розміром від 100 нм до кількох міліметрів. Структура пилової коми виявилася складнішою, ніж вважалося раніше. Вивільнення пилу з ядра було дуже неоднорідним і змінним із часом. Інші ускладнення виникли через складний обертальний рух ядра. Наявність безлічі різних речовин у складі кометного пилу ускладнили його динаміку, а отже й структуру пилової коми комети 1P/Halley. Хоча механізм визначення відношення пилу до газу по масі був значно покращеним, його справжнє значення, рівне одиниці, ще містить значні невизначеності. Усереднений вміст у пилинках породоутворюючих елементів виявися в два рази більшим, ніж у хлористих хондритах і Сонці. Було виявлено, що пилинки збагачені легкими елементами стосовно хлористих хондритів і наближені – стосовно Сонця. Загальний склад комети має також трикратний дефіцит азоту в порівнянні з Сонцем. Спостережувані співвідношення в поширеності основних породоутворюючих елементів (Mg, Si, Fe) доводять, що твердий пил відрізняється від вуглецевих хондритів, але схожий на безводний міжпланетний пил. Багато зерен пилу містять первинні магнієві силікати, які ніколи не піддавалися впливу високих температур, що свідчить про реліктову природу кометного пилу [69]. У лютому 1991 року бельгійські астрономи Олів'є Ено й Ален Смет із Європейської південної обсерваторії виявили гігантський викид речовини з комети 1P/Halley, яка знаходилася на відстані 14 а.о. від Сонця. Викид мав віялоподібну структуру й був напрямлений у бік Сонця. Це спостереження свідчить про можливість активності комет на значних відстанях від Сонця, що було підтверджено подальшими спостереженнями інших комет. Основним прискорювачем визнано монооксид вуглецю, який прискорював найменші частинки, близько 1 мкм діаметром до усталеної швидкості 45 м/с [175].

У ході місії HACA Stardust, космічний апарат пролетів на відстані 236 км від ядра комети Wild 2 у січні 2004 року, збираючи частинки кометного походження і частинки міжзоряного пилу. Аналіз проб Stardust свідчить, що комети можуть бути складнішими, ніж передбачалося. У зразках виявлено мінерали, які могли утворитися лише поблизу Сонця або інших зірок. Це дозволяє припустити, що речовини з внутрішніх областей Сонячної системи переміщалися у зовнішні, де утворилися комети. Дослідження виявили, що комети містять хімічні продукти характерні міжзоряному простору і туманностям. Ще одним важливим відкриттям вчених НАСА у рамках проекту Stardust є виявлення гліцину (одна із двадцяти амінокислот, що входять до складу білків), фундаментального будівельного блоку життя, у зразках комети Wild 2 [51]. Об'ємна густина проаналізованих пилинок мала широкий діапазон значень від 3 г/см<sup>3</sup> для непористих силікатів до 0.3 г/см<sup>3</sup> для сильно пористих агрегатів [81].

У ході місії НАСА Deep Impact була здійснена спроба вивчення внутрішнього складу комети 9Р/Тетреl. 4 липня 2005 року ударний пристрій зіткнувся з ядром комети, утворивши кратер і вивільнивши речовину, сховану під корою комети. Після перших двох секунд вивільнена речовина включала дрібні кристали водяного льоду, велику кількість СО<sub>2</sub> і дуже велику кількість органіки, зростання кількості якої в порівнянні зі станом до зіткнення було особливо разючим. Аналіз викинутої речовини дозволив показати, що поверхневі шари, в масштабах від мікроскопічних до кількох сотень метрів є надзвичайно слабкими, а також, що об'ємна густина ядра є настільки низькою (оцінена в 0.6 г/см<sup>3</sup>), що все ядро має бути дуже пористим. Спостереження показали, що джети на кометах значно більш поширені, ніж вважалося раніше, і що вони пов'язані з певними локальними областями на поверхні ядра. Було також показано, що, хоча існували деякі невеликі плями льоду на поверхні (й це було перше визначене спостереження водяного льоду на поверхні будь-якої води вивільнялася 3 нагрітого Сонцем комети), основна частина підповерхневого льоду. Були визначені розміри комети 7.6 на 4.9 км й період осьового обертання, 1.7 діб [77]. Спектральні спостереження вивільненої зіткненням хмари, яка підіймалася з поверхні комети з середньою швидкістю 110 м/с, за допомогою телескопа Spitzer показали, що ядро складається з первинних речовин, утворених в Сонячній туманності. Були виявлені аморфні силікати, вуглець, кристалічні силікати, карбонати, філосилікати (утворені паралельними листами силікатних тетраедрів з Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), поліароматичні вуглеводні (органічні сполуки, що містять тільки вуглець і водень та складаються з кількох ароматичних кілець), водяний газ/лід і сульфіди. Наявність кристалічних силікатів указує на те, що вони нагрівалися до температури понад 700°C до того, як були переміщені за орбіту Нептуна, в область формування комети [23]. На основі спостережень на телескопі Кеск-2, Гаваї, оцінено вміст летючих органічних молекул, таких як C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, CH<sub>3</sub>OH, CO, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, HCN до, під час і після зіткнення за допомогою високодисперсної спектроскопії в близькій інфрачервоній ділянці спектра. Виявилося, що відносний вміст етану щодо води збільшився після удару в 1.8 рази, а метанолу й ціаністого водню залишився незмінним. Отримані дані свідчать про можливість того, що ядро 9Р/Тетреl неоднорідне за своїм складом [141].

Багато нової інформації для кометної астрономії здобуває місія Rosetta, яка вивчає короткоперіодичну комету 67Р/Churyumov–Gerasimenko, котра перетнула точку перигелію 13 серпня 2015 року на відстані 1.24 а.о. У результаті дослідження комети в ході місії Rosetta було виявлено, що комета має неправильну форму й складається з двох чітко розділених частин, поєднаних короткою перемичкою, потік речовини з якої, принаймні на відстанях 3–4 а.о., був помітно більшим, ніж із решти поверхні. Отриманий період осьового обертання комети становить 12.4 години, що на 0.36 години менше у порівняні з проходженням перигелію 2009 року. Була визначена маса комети,  $1.0 \times 10^{13}$  кг й об'єм,  $21,4 \pm 2,0$  км<sup>3</sup>, а отже об'ємна густина становить 70-80%. Альбедо комети – близько 6%.

Через невелику силу тяжіння, пило-газовий потік вільно поширюється в просторі. Але вчені виявили хмару частинок навколо комети, які є досить великими й важкими щоб подолати силу гравітації комети. Команда вчених

змогла зробити це відкриття завдяки дуже чутливим камерам OSIRIS [181]. Мас-спектрометрія твердих зерен, що вилетіли з ядра комети, показала присутність різних видів органічних речовин, від аліфатичних і ароматичних сполук до карбонових кислот і спиртів, але ці сполуки не були виявлені в поглинанні на кометному ядрі, а значить, на поверхні комети переважають простіші органічні речовини. Сканування за допомогою VIRTIS (Visible, Infrared and Thermal Imaging Spectrometer) не виявило будь-якого льоду на поверхні комети 67P/Churyumov–Gerasimenko, замість виявлено докази присутності багатих вуглецем органічних сполук. Уся поверхня являє собою складну суміш різних типів вуглецево-водневих і/або киснево-водневих хімічних груп, з невеликим внеском азотно-водневої групи. В активних областях зміни в розподілі енергії і ширини ліній поглинання можуть свідчити про невелику кількість водяного льоду [29]. Мас-спектрометр COSAC (Cometary Sampling and Composition), встановлений на спускному апараті Philae, виявив набір із 16 органічних сполук, в тому числі багато азотовмісних, але не сірковмісних і чотири сполуки – метилізоціанат, ацетон, пропаналь і ацетамід, – які раніше не були зареєстровані в кометах [66]. Вимірювання за допомогою інструмента Ptolemy вказують на очевидну відсутність ароматичних сполук, таких як бензол, відсутність сірковмісних сполук і дуже низькі концентрації азотистих речовин [209].

Молекулярний азот (N<sub>2</sub>) був найбільш поширеною формою азоту в протосонячній туманності. Це головна азотовмісна молекула в атмосферах Плутона і Тритона і, ймовірно, є основним резервуаром азоту, з якого сформувалися планети-гіганти. Для комети 67P/Churyumov–Gerasimenko були виконані прямі вимірювання N<sub>2</sub> з борту космічного корабля Rosetta. Рубін та ін. прийшли до висновку, що у співвідношенні N<sub>2</sub>/CO молекулярний азот збіднений у ~ 25.4 ± 8.9 раз у порівнянні з рівнем у первинній Сонячній системі. Це збіднення передбачає, що кометні зерна утворилися при низькотемпературних умовах нижче ~ 30 градусів за Кельвіном [158].

Вважається, що комети знаходяться у двох великих резервуарах: хмарі Оорта та поясі Койпера. Комети, як вважають, викидаються в хмару Оорта шляхом збурень від великих планет. Хмара Оорта (яка розміщена на відстанях від кількох тисяч до кількох десятків чи сотень тисяч астрономічних одиниць), як передбачається, містить порядку 10<sup>12</sup> комет. Загальна маса хмари Оорта складає від 1 до 50 мас Землі. Пояс Койпера, який розташований далеко за межами орбіти Нептуна, містить 5–10×10<sup>9</sup> комет із загальною масою 0.1 маси Землі [189].

### 1.2. Фізичні параметри, хімічний склад і властивості кометного пилу

Як відомо, коли комета знаходиться далеко від Сонця, вона схожа на точкове джерело світла. Це сонячне світло, відбите від ядра комети, розмір якого частіше за все становить від 1 до 10 км. Зі зменшенням геліоцентричної відстані лід, який знаходиться на нагрітому Сонцем ядрі комети, сублімує. Газ і пил розширюються, утворюючи кому, яка є видимою через емісійні лінії молекул і розсіяне випромінювання частинок пилу. Зрештою пил під дією сонячного випромінювання утворює пиловий хвіст. Саме пил, який формує пилові хвости, є об'єктом дослідження цієї роботи.

Треба зазначити, що як показують і теоретичні розрахунки, і експериментальне моделювання, частинки пилу, вивільнені з ядра комети, не обов'язково перебувають у тому ж стані, в якому вони були під час знаходження в ядрі. У деяких випадках остаточна структура пилового конгломерату є результатом агрегації під час або після сублімації [69].

Якщо говорити про склад льодопилового конгломерату на значних відстанях від Сонця, то, на думку вчених, співвідношення по масі силікатної речовини, органіки й льоду становить приблизно 1:1:1. Лі та Грінберг прийшли до цього співвідношення на основі розробленої ними моделі для пилу в диску зорі *β* Живописця, згідно з якою пил постійно поповнюється кометами [122]. Згідно з Секаніною, на геліоцентричних відстанях, що перевищують 3 а.о., збереження пило-льодових зерен у комі є правдоподібним, а на відстанях 4– 6 а.о. багато нових і довгоперіодичних комет мають істотну кому, яка може включати в себе значну частку зерен водяного льоду, які вивільняються з ядра внаслідок сублімації більш летючих речовин, таких як СО [176].

Кометний пил є неоднорідною сумішшю кристалічних і аморфних силікатів (найпоширенішими є форстерит Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>, енстатит MgSiO<sub>3</sub>, олівін  $(Mg, Mn, Fe)_2[SiO_4]$  і піроксен (група мінералів підкласу ланцюгових силікатів)), органічних, стійких до нагрівання речовин (які складаються з хімічних елементів H, C, O, N), незначної кількості оксидів, а також інших складових, таких, як сульфід заліза. Найбільш цікавий результат, отриманий від дослідження комети 81P/Wild, – це виявлення стійких до нагрівання кальцієво-алюмінієвих включень, аналогічних тим, які містяться В примітивних метеоритах [74]. Мас-спектрометр РUMA, який знаходився на борту апарату Вега 1, виявив, що співвідношення органічної та силікатної складових пилу в кометі 1Р/Halley приблизно рівне одиниці, тобто  $M_{or}/M_{si}=1$  [104]. Повідомлялося, що мінеральні пилинки важчі, ніж органічні й вони фіксуються ближче до ядра [34]. Жодна з виявлених під час дослідження комети 1P/Halley пилових частинок не містила одного єдиного мінералу [85].

Особливої важливості вивченню комет надає присутність у них органічних сполук, які транспортуються кометами на інші астрономічні об'єкти, тому комети могли грати ключову роль у виникненні життя на Землі. Так, N-(2-аміноетил) гліцин виявлено у міжзоряному льоду, метеоритах, кометах. Ця речовина легко сполучається з азотистими основами й утворює ПНК (пептидні нуклеїнові кислоти), які є можливою ланкою еволюції до РНК (рибонуклеїнова кислота) і, зрештою, до світу ДНК [133].

Одним із результатів моделювання пилової коми комети 1P/Halley [68] було обчислення фізичної величини, яка називається пористістю, *P*. Ця величина може бути представлена як  $P = 1 - V_{solid} / V_{total}$ , де  $V_{solid} -$ об'єм твердих речовин всередині пористого агрегату, V<sub>total</sub> – загальний об'єм агрегату. Отримане значення пористості становить P = 0.93 - 0.975. Про велику пористість кометного пилу також свідчать обчислені густини ядер різних комет і густини мікрометеорів. Більшість мікрометеорів за своїм складом схожі на вуглисті хондрити, однак лише приблизно 3% метеоритів належать до цього типу. Більшість метеоритів, ймовірно, мають астероїдне походження, натомість альтернативним джерелом утворення мікрометеорів можуть бути комети [202]. Така ідея виникла в 1950 році й укріпилася пізніше. Зокрема, Браунлі зазначає, що у колекціях зібраного міжпланетного пилу є багато пористих, хондритних, оптично чорних пилових частинок субмікронного розміру, які мають кометне походження. Ці частинки схожі за об'ємним складом елементів на багаті вуглецем хондритні метеорити, але відрізняються багатьма важливими характеристиками, у тому числі мінералогією (зневодненість), морфологією (значно більша пористість) і підвищеним відношенням D/H [26]. Зрештою, аналіз частинок комети Wild 2, здобутих космічним апаратом Stardust, показують, що вони мають склад, який узгоджуються з багатьма мікрометеоритами. Крім того, аналіз показав значно більшу, ніж передбачалося, кількість високотемпературних мінералів, які сформувалися у внутрішніх областях Сонячної туманності. Їх присутність у складі комет доводить, що формування Сонячної системи відбувалося зі значним перемішуванням речовини [27].

### 1.3. Смугові структури в пилових хвостах комет

Смугові структури в пилових хвостах комет – безперечно, дуже цікаве, рідкісне і маловивчене явище. За всю історію спостережень це явище було зафіксоване лише для кількох комет: C/1743 X1 (Cheseaux), C/1910 A1 (Great January Comet), C/1957 P1 (Mrkos), C/1962 C1 (Seki–Lines), C/1975 V1 (West), C/2006 P1 (McNaught), C/2011 L4 (PanSTARRS) і C/1858 L1 (Donati).

Професор Покровський [152] вивчав смуги у хвості комети С/1910 А1 і прийшов до думки, що вони є рядом синхрон, які утворилися завдяки сильним виверженням із ядра. Незвичайні структури в хвості цієї комети також привернули увагу Секаніни й Фарела, які у своєму повідомленні пишуть, що смуги складаються з фрагментів, утворених із материнських частинок, що покинули ядро комети під час дискретних епізодів викидів [174]. Кучмі та ін. [113] відзначили, що дуже значне виділення пилу в кометі C/1975 V1 (West) спостерігалося разом із появою великої кількості смуг, чітко помітних із 3 березня до 7 березня 1976 року. Система смуг показувала квазірегулярний характер, а по відносному максимуму спектра потужності, що відповідає довжині хвилі близько 10<sup>6</sup> км, можна припустити зв'язок із сонячною активністю або міжпланетним середовищем. Ламі та Кучмі [115] показали, що синхронно-синдинний аналіз не підходить для опису смуг у хвості комети C/1975 V1 (West). За їх сценарієм, велика кількість пилу виділяється під час проходження перигелію і незабаром після нього, потім організовується в смуги. Ці смуги поширюються в космічному просторі, зберігаючи свою форму кілька днів. Попри те, що Всехсвятський вважав синхронні утворення газовими [2], Ламі та Кучмі поділяють його думку, що смуги мають плазмоподібний аспект поведінки. Це передбачає невідому взаємодію, що відрізняються від тяжіння й тиску випромінювання, а зобов'язана впливу міжпланетного магнітного поля. Якщо силові лінії протилежного напрямку проходять через хвіст, сили Лапласа, можливо, обмежують заряджені пилинки у вузьких витягнутих областях. Секаніна і Фарел [168] відтворили утворення смуг комети C/1975 V1 (West) за допомогою фрагментаційної моделі. Вони додали, що оскільки β (відношення сили тиску випромінювання до гравітації) батьківських частинок лише незначно менше, ніж у середньому для фрагментів, тобто відношення площі до маси батьківських пилинок і фрагментів майже однакове, це вказує на те, що батьківські частинки дуже несферичні. ланцюгоподібні найбільш Автори вважають частинки привабливими кандидатами, оскільки такі агрегати є звичайним явищем у лабораторних експериментах щодо конденсації частинок при різних умовах. Акабане [15] за допомогою ідеї про вторинний хвіст також змоделював смуги комети C/1975 V1 (West). Секаніна і Фарел [168] вказали, що підхід Акабане аналогічний їхньому.

Були запропоновані дві основні відомі моделі для пояснення утворення смуг: модель Нотні [146] і модель Секаніни й Фарела [168]. Нотні припустив, що кометний пил має значне зчеплення з кометною плазмою. Завдяки цьому теплова швидкість пилових частинок може досягати значень у десять і навіть більше кілометрів за секунду поблизу ядра комети при вивільненні вздовж радіус-вектора Сонце – комета. Дана модель була застосована до комети C/1957 P1 (Mrkos), але не виправдала себе при застосуванні до комети C/1975 V1 (West) [147]. Секаніна і Фарел пояснили утворення смуг у кометі C/1975 V1 (West) наступним чином. Батьківські частки одночасно покидають ядро комети під час вибухів на її поверхні. Далі частинки піддаються однаковому прискоренню, значення якого трохи вище, ніж очікувалося б при дії лише тиску сонячного випромінювання. Крім того, дисперсія швидкостей повинна бути малою. Пізніше, всі батьківські пилові частинки фрагментують в один і той же час на відстанях аж до кількох мільйонів кілометрів. Пізніше ця модель була застосована до комет C/1957 P1 (Mrkos) [170], C/1962 C1 (Seki-Lines) [145] та C/1910 A1 (Great January Comet) [174]. Необхідність раптового одночасного розпаду батьківських частинок є головним вразливим місцем даної моделі. Крім того, ще одним недоліком є те, що модель Секаніни–Фарела потребує єдине значення  $\beta$  для батьківських частинок. У свою чергу, в даній роботі описана альтернативна модель, яка пояснює утворення смуг у пилових хвостах комет.

### 1.4. Рух кометного пилу

Після вивільнення з ядра комети, динамічно не розділені нейтральний газ і пил формують кому. Та вже за кілька десятків кометних радіусів від

поверхні пил динамічно відділяється від газу [38] і формує пиловий хвіст. Викривлення пилового хвоста в напрямку, протилежному руху комети, відбувається завдяки збереженню моменту імпульсу [54, 56]. Важкі пилинки через малий тиск сонячного випромінювання залишаються на орбіті комети, а ті, що надто важкі, аби подолати порівняно невелику силу тяжіння від ядра, падають на поверхню, стаючи частиною тугоплавкого покриття. Газ у комі швидко, протягом кількох годин, дисоціює та іонізується; іони під дією сонячного вітру формують іонний хвіст, який займає просторово інше положення, ніж пиловий хвіст, проте, поруч із комою ці хвости перекриваються, утворюючи пилову плазму [134].

Як зазначалося, кометний пил переважно рухається під впливом двох сил: сонячної гравітації й тиску сонячного випромінювання. Прискорення, обумовлене взаємною дією тиску сонячного випромінювання ( $F_R$ ) і сонячної гравітації ( $F_G$ ), прийнято характеризувати величиною  $\beta = F_R/F_G$ , [176]:

$$F_{G} = \frac{GM_{S}}{r^{2}} \left(\frac{4}{3}\pi a^{3}\rho\right)$$
$$F_{R} = \frac{Q_{pr}}{c} \frac{L_{S}}{4\pi r^{2}}\pi a^{2}$$
$$\beta = \frac{0.57Q_{pr}}{\rho a},$$

де c – швидкість світла; G – гравітаційна стала;  $M_s$  – маса Сонця;  $\rho$  – густина пилинки, виражена в грамах на сантиметр кубічний; a – радіус пилинки, виражений у мікрометрах; r – геліоцентрична відстань пилинки;  $L_s$  – загальна енергія, виділена Сонцем за одну секунду  $Q_{pr}$  – ефективність радіаційного тиску, яка залежить від розміру, форми та оптичних характеристик пилинки. У ході описаних тут модельних досліджень, слідом за Фуле, густина пилових частинок була прийнята константою [58] і рівною,  $\rho = 1$  г/см<sup>3</sup> [25].

Якщо побудувати залежність величини  $\beta$  від розмірів пилинок, то максимальне значення  $\beta$  для різних речовин, присутніх у хвості комети,

досягається при значеннях радіусів, що лежать у діапазоні 0.1–0.2 мкм. Отже, для пилинок з  $a \ge 0.2$  мкм,  $Q_{pr}$  є приблизно незмінним, а значення  $\beta$  пропорційне  $a^{-1}$  [54].

#### **РОЗДІЛ 2**

## МЕТОДИКА Й ТЕХНІКА ДОСЛІДЖЕННЯ КОМЕТНОГО ПИЛУ ЗА ДОПОМОГОЮ ДИНАМІЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Ми можемо спостерігати пил через розсіювання ним сонячного світла після його вивільнення в кометну кому. Для того, щоб отримати фізичні властивості пилу в комі комети, ми повинні змоделювати динаміку пилових частинок і розсіювання ними світла. Динаміка залежить від ступеня і розподілу сублімації на ядрі, розміру ядра, форми й стану обертання, а також густини пилинок, форми, складу і розподілу за масою. Інтенсивність і фазова залежність розсіяного світла залежить також від розподілу за розмірами, форми й складу пилинок. Через складну взаємодію між ефектами кожного з цих параметрів, було б неможливо отримати єдине рішення моделювання. Тим не менше, отримані в результаті моделювання дані часто є єдиним джерелом інформації для більшості комет, тому порівняльні модельні дослідження, як правило, здійснюються з використанням спрощених припущень (сферичне ядро, сферичні частинки пилу, степеневий закон розподілу і т.д.). [57]. Формування пилових хвостів комет займає деякий, часто довгий проміжок часу. Як результат, на спостережному зображенні зафіксована певна частина історії вивільнення пилу з комети. Відновлення цієї історії, в тому числі, здійснюється за допомогою модельних досліджень [176].

Історія тривимірних модельних досліджень пилових хвостів має витоки з роботи Фінсона–Пробстейна [56], де розглядається пиловий хвіст як явище безперервного потоку частинок. Робота заснована на концепції синхрон і синдин (рис. 2.1)<sup>1</sup>, приймаючи гідродинамічну модель Пробстейна для взаємодії між газом і пилом поблизу ядра [154]. Модель Фінсона–Пробстейна враховує те, що поблизу ядра динаміка пилу визначається силою тиску потоків газу, а далі від ядра – силою радіаційного тиску. Модель Фінсона–Пробстейна

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> http://www.astrosurf.com/comolli/com38.htm

по суті об'єднує внески оболонок, що рівномірно розширюються, створених твердими частинками, які покинули ядро комети в різний час і піддаються різним величинам прискорення і, врешті обчислює прогнозований просторовий розподіл розсіяного сонячного світла в хвості.



**Рис. 2.1.** Синхронно-синдинний аналіз хвоста комети C/2011 L4 (PanSTARRS) виконаний Фулле на основі зображення, отриманого Лоренцо Комоллі 21 березня 2013 року. Синхрони (пунктири) дають змогу простежити розташування пилових частинок, вивільнених із ядра комети одночасно з нульовою швидкістю. Синдини (суцільні лінії) показують розташування пилових частинок однакового розміру, також вивільнених із нульовою швидкістю.

Надалі модель Фінсона–Пробстейна зазнала модифікацій, виконаних різними авторами, в тому числі Фулле, який також розробив незалежний підхід Монте-Карло, за допомогою якого розглянув роль асиметрії виділення та максвелівського розподілу швидкостей пилинок при формуванні кометних ком [60, 61]. Фулле зі співавторами застосували розроблений підхід для аналізу зображень ряду комет, серед яких комети 1P/Halley, C/1956 R1 (Arend-Roland), 109P/Swift-Tuttle, й отримали вельми задовільні, як зазначає в оглядовій статті Секаніна, результати для пилових хвостів як **i**3 безструктурним розподілом яскравості, так і з певними структурами або антихвостом [176]. Модельні методи дослідження з використанням двох основних класів підходів, пилогазодинамічного та Монте-Карло, останнім часом досить широко використовуються для дослідження пилу в комах комет [194].

Модель Фінсона–Пробстейна має кілька недоліків, по-перше, вона коректно визначає яскравість хвоста лише у зовнішніх його частинах, подруге, ця модель розглядає ізотропний витік пилу з ядра. Нарешті, всі пилові частинки, згідно з моделлю, мають однакову швидкість вильоту рівну нулю [63, 192]. У порівнянні з моделлю Фінсона–Пробстейна метод Монте-Карло має кілька переваг. Так, він може бути застосованим для моделювання як віддаленої від ядра, так і близької частини хвоста. Також він дозволяє враховувати анізотропні викиди пилу. Метод Монте-Карло дає можливість розглядати рух пилу з деякою початковою швидкістю, яка не є фіксованою, а має найбільш ймовірне значення.

У ході модельних досліджень пилових хвостів комет, результати яких покладено в основу даної дисертаційної роботи, була використана модель, розроблена П.П. Корсуном, і використана ним для досліджень пилових хвостів та ком віддалених комет [110, 111]. Оскільки метою представленого тут дослідження було моделювання пилових хвостів близьких комет, дослідження значення процесу фрагментації пилинок при формуванні хвоста комети С/1995 О1 (Hale–Bopp), а також побудови модельного алгоритму для пояснення формування смугових структур у хвостах комет, модель зазнала необхідних для нових умов застосування змін.

Для моделювання пилових ком комет зручно користуватись кометоцентричною системою координат  $x'_1$ ,  $x'_2$ ,  $x'_3$ , а також використовувати відповідні сферичні координати r,  $\varphi$ ,  $\theta$ . Для побудови пилової коми комети простежуються траєкторії кожної окремої пилової частинки від її вильоту з зони зіткнень до моменту спостереження. Для задання початкових геометричних умов, а також радіусів пилових частинок використовується алгоритм Монте-Карло [30]. Головні положення методу Монте-Карло наступні. Якщо p(x)dx – це ймовірність того, що величина X знаходиться в діапазоні між x та x+dx, і якщо відомо, що X завжди знаходиться між значеннями *a* та *b*, тобто:

$$\int_{a}^{b} p(x) dx = 1$$

тоді значення випадково розподіленого параметра х визначається з рівняння:

$$R_i = \int_a^x p(x) dx$$

Випадкове число  $R_i$  рівномірно розподілене на проміжку від 0 до 1. Відповідно до принципу Монте-Карло, моменти вильоту частинок з ядра,  $t_i$ :

$$t_i = R_i \left( T_{st} - T_{ob} \right),$$

де  $T_{st}$  – найбільш ранній момент викиду пилинок з ядра комети, який є модельним параметром.  $T_{ob}$  – момент спостереження. Якщо розглядати ядро як ізотропне джерело пилових частинок, то всі можливі напрямки їх вильоту матимуть однакову ймовірність. Тоді сферичні полярні кути  $\varphi_i$ ,  $\theta_i$  можуть бути обчислені за формулами:

$$\varphi_i = 2\pi R_i, \quad \cos(\theta_i) = 1 - 2R_i.$$

Для розподілу пилових частинок за розмірами, використовується степеневий закон,  $n(a) = a^{\gamma}$  [86, 63], з показником степеня, який є модельним параметром. З урахуванням поданого розподілу за розмірами й модельних параметрів  $a_{min}$  та  $a_{max}$  – найменшого й найбільшого радіусів пилинок, рівняння для визначення радіусів пилових частинок  $a_i$ , що залишають зону зіткнень навколо ядра комети набуває вигляду:

$$a_{i} = (a_{min}^{\gamma+1} + (a_{max}^{\gamma+1} - a_{min}^{\gamma+1})R_{i})^{1/(\gamma+1)}$$

Пилинки залишають зону зіткнень із усталеною швидкістю, обернено пропорційною квадратному кореню розміру пилинки [76]. Враховуючи те, що швидкість пилинки обернено пропорційна квадратному кореню геліоцентричної відстані [46], отримуємо:

$$V = Ar^{-0.5}a^{-0.5}$$

де V – усталена швидкість пилинки, r – геліоцентрична відстань пилинки, A – числовий параметр моделі, який, у цілому, залежать від темпів виділення газу і пилу, швидкості руху газу, що виштовхує пил, природи пилу і радіуса ядра. Крім того, було прийнято, що швидкості характеризуються розподілом Гауса, дисперсія для якого рівна 0.1.

Для визначення положення пилової частинки на момент спостереження розв'язувалася система рівнянь руху у неінерційній кометоцентричній системі координат  $\{x'_1, x'_2, x'_3\}$ . Початком кометоцентричної системи координат є центр кометного ядра. Осі  $x'_1, x'_2$  представляють координати в площині орбіти комети, перша з них вказує радіально від Сонця, а друга направлена в напрямку, протилежному до вектора швидкості комети. Третя вісь спрямована в напрямі, перпендикулярному до площини орбіти комети. Система рівнянь руху має вигляд [31, 32]:

$$\begin{split} \ddot{x}_1' &= -\mu_s (1-\beta) \frac{r+x_1'}{y^3} - \mu_c \frac{x_1'}{x^3} + \ddot{\theta} x_2' + \dot{\theta}^2 x_1' + 2\dot{\theta} \dot{x}_2' + \mu_s \frac{1}{r^2} \\ \ddot{x}_2' &= -\mu_s (1-\beta) \frac{x_2'}{y^3} - \mu_c \frac{x_2'}{x^3} - \ddot{\theta} x_1' + \dot{\theta}^2 x_2' - 2\dot{\theta} \dot{x}_1' \\ \ddot{x}_3' &= -\mu_s (1-\beta) \frac{x_3'}{y^3} - \mu_c \frac{x_3'}{x^3}, \end{split}$$

де  $\mu_s = Gm_s$  – гравітаційний параметр Сонця,  $\mu_c = Gm_c$  – гравітаційний параметр комети; r,  $\dot{\theta}$ ,  $\ddot{\theta}$  –геліоцентрична відстань комети, кутова швидкість та кутове прискорення навколо Сонця відповідно;  $x = \sqrt{x_1'^2 + x_2'^2 + x_3'^2}$  й  $y = \sqrt{(r + x_1')^2 + x_2'^2 + x_3'^2}$ . Перший доданок системи рівнянь руху – гравітаційні сили Сонця, з поправкою на тиск випромінювання ( $\beta$ ). Другий доданок – сила тяжіння кометного ядра, наступні доданки є корекціями на неінерційні ефекти.

У модель закладена можливість розгляду як ізотропного вильоту пилових частинок із зони зіткнень, так і неізотропне виділення пилу.

Яскравість відбивної поверхні (якою є пилинка) пропорційна її освітленості та відбивній здатності. Освітленість від точкового або сферично симетричного джерела (яким є Сонце) змінюється обернено пропорційно квадрату відстані від нього [1]. У припущенні сферичності пилинки, кількість відбитого світла залежить від поперечного перерізу проекції форми пилової частинки, а отже, пропорційна квадрату її радіуса [124]. Ці співвідношення враховуються при знаходженні блиску кожної пилової частинки, щоб зрештою отримати бажаний розподіл яскравості у пиловому хвості комети.

Моделювання здійснювалося за допомогою комп'ютерної програми, написаної на алгоритмічній мові Фортран. Інтерфейс запуску й контролю отриманих обчислень реалізовано через пакет IDL, зорієнтований на аналіз зображень. Значення всіх модельних параметрів для зручності задавалися в окремому файлі. У якості модельних параметрів виступали наступні характеристики пилових частинок: максимально можливий вік, значення швидкостей, мінімальний і максимальний радіуси пилинок, показник степеня розподілу пилинок за розмірами та інші додаткові параметри, пов'язані з фрагментацією пилу й характером його виділення з поверхні комети.

#### РОЗДІЛ З

# ХАРАКТЕРИСТИКИ ПИЛУ КОМЕТИ С/1995 О1 (HALE–BOPP) ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ДИНАМІЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

### 3.1. Відомості про комету

У 1997 році відбулося проходження перигелію яскравою кометою С/1995 О1 (Hale–Bopp). Ця комета визначна тим, що має порівняно велике ядро, з радіусом, порядку, 30±10 кілометрів [55], і за допомогою великих телескопів вона спостерігалася на рекордно великих відстанях у понад 30 а.о. [193]. Активність, а саме виділення монооксиду вуглецю, спостерігалася в кометі на рекордній відстані від Сонця в 14 а.о. [65].

У цьому й наступних розділах інформацію щодо проходження кометами точки перигелію, а також ексцентриситету й великої півосі орбіти взято з Бази даних малих тіл Сонячної системи<sup>2</sup>. Інформацію щодо найбільшого зближення з Землею взято з системи «HORIZONS»<sup>3</sup>, розміщеної на порталі HACA. Інформацію щодо відкриття комети та її зоряної величини взято з кометного каталогу Сеїчі Йошиди<sup>4</sup>, якщо не вказано іншого.

Комету С/1995 О1 (Hale–Bopp) відкрито незалежно Аланом Хейлом і Томасом Боппом 23 липня 1995 року. Значна активність комети сприяла її відкриттю на відстані 7.2 а.о. від Сонця, коли зоряна величина була 10.5<sup>m</sup> за оцінкою Алана Хейла та 10.8<sup>m</sup> за оцінкою Томаса Боппа. Комета тоді вже мала розвинену пилову кому з домішками газів СО та СN. Ця кома, ймовірно, почала утворюватися за 4–5 років до відкриття комети на відстанях 18–20 а.о. (на відстанях Урана) [28]. Ядро комети С/1995 О1 (Hale–Bopp) обертається навколо осі з періодом 11.35±0.02 години [55]. Період обертання комети навколо Сонця становить трохи більше 2500 років. Абсолютна зоряна

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> http://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb.cgi

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> http://ssd.jpl.nasa.gov/horizons.cgi#results

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> http://www.aerith.net/

величина комети, –1, робить її однією з найбільш яскравих комет, що досягли внутрішньої частини Сонячної системи. Найбільше наближення до Землі (на відстань 1.3 а.о.) сталося 22 березня 1997 року. Найближче до Сонця (на відстані 0.9141 а.о.) комета знаходилася 1 квітня 1997 року.

Проводилося багато різнопланових досліджень комети C/1995 O1 (Hale– Ворр). Далі наведено результати частини з них, важливих або в контексті дисертаційної роботи, або в загальнонауковому контексті.

Завдяки вузькосмуговим фотометричним спостереженням виявлено, що 25 липня 1995 року і 15 лютого 1997 року рівень виділення пилу та газу в комети C/1995 O1 (Hale–Bopp) був відповідно у 20 і 100 разів більшим, ніж у комети 1P/Halley 1985 року на тих же відстанях [163]. За результатами поляриметричних і фотометричних спостережень комети виявлено, що C/1995 O1 (Hale–Bopp) була однією з найбільш запилених комет [102], зокрема отримані високі значення ступенів поляризації показують, що навколоядерна область цієї комети дуже запилена, можливо, комета має найбільш запилену навколоядерну область серед інших відомих яскравих комет [33]. Як і ще в кількох яскравих довгоперіодичних кометах, у хвості C/1995 O1 (Hale–Bopp) виявлено нейтральний натрій і показано, що третій тип натрієвий, під дією хвоста. утворюється тиску сонячного випромінювання [41]. Зображення комети показувало дуже слабкий натрієвий хвіст, який накладається на пиловий, що вказує на те, що атоми натрію були виділені з пилових частинок [205]. Внаслідок спектрометрії в інфрачервоній області у перед-, близько- і післяперигелійний період виявлено, що кристалічні силікати (олівін і ортопіроксен) займають близько 30% маси субмікронних пилових частинок у комі С/1995 О1 (Hale-Bopp) протягом кожної епохи [75].

Проведений аналіз спектральних спостережень комети виявив паралелі між кометою та міжзоряними льодами, гарячими ущільненнями молекулярних хмар і біполярними потоками навколо протозірок. Це підтверджує думку, за якою летючі складові комет утворилися в міжзоряному середовищі й зазнали незначної модифікації в межах Сонячної туманності [20]. Отримана спектрофотометрія в інфрачервоній області випромінювання від пилу внутрішньої коми виявила високий вміст багатих магнієм піроксенів, що узгоджується з вимірами мас-спектрометра PUMA-1 комети 1P/Halley і частинок міжпланетного пилу кометного походження. Багаті магнієм піроксени є або незайманими конденсатами Сонячної туманності, або досонячними зернами, такими, як багаті магнієм кристали навколо зірок асимптотичної гілки гігантів [206]. Показано, що для того, щоб відтворити D/H співвідношення, виміряне в кометах, і забезпечити масову частку кристалічних силікатів, яку виміряно в кометі C/1995 O1 (Hale–Bopp), необхідна найтепліша турбулентна модель Сонячної туманності, яка передбачає перенесення утворених у внутрішніх регіонах кристалічних силікатів у зону формування комет [21].

Добре структуровані силікатні утворення на довжинах хвиль близько 10 мкм виявлено в комі С/1995 О1 (Hale-Bopp). Як виявилося, пилові дуги мають постійне значення швидкості розширення, а також немає ніякого збільшення поляризації у видимій області від однієї дуги до іншої, що суперечить наявності значної фрагментації [71]. З іншого боку, спостереження рентгенівського випромінювання від комети дозволили висловити думку, що воно виникає в результаті взаємодії між сонячними рентгенівськими променями й кометним пилом, а спостережувані кількаденні зменшення інтенсивності рентгенівських променів видається найбільш можливим пов'язати з фрагментацією пилу [151]. Аналіз спектрів комети, отриманих під час її перебування на відстанях від 6.9 до 1.4 а.о., виявив малі доплерівські зміщення ліній OH і CH<sub>3</sub>OH, які підтверджують думку про те, що льодяні зерна мають швидкості набагато нижчі, ніж швидкість СО. Низькі швидкості є очікуваними для великих зерен, а для дрібних зерен отримуються як наслідок фрагментації більш великих пилових частинок [19]. Порівняння моделі пилових зерен із інфрачервоною спектрофотометрією комети вказує на те, що поруч із перигелієм ( $R_h < 1.5$  а.о.), високо пористі великі зерна вивільняються з більших глибин ядра і в результаті зіткнень розпадаються на більш дрібні фрагменти [75].

### 3.2. Спостережний матеріал

На першому етапі досліджень, що лягли в основу дисертаційної роботи, метод динамічного моделювання був застосований для дослідження пилового хвоста комети C/1995 O1 (Hale–Bopp). Для модельного відтворення розподілу яскравості в хвості вибрано три зображення комети, отримані на обсерваторії Чрний Врх, Словенія, Германом Мікушем 8 лютого, 18 лютого і 7 березня 1997 року (рис. 3.1). У таблиці 3.1 для трьох моментів спостереження наведено деякі характеристики комети C/1995 O1 (Hale–Bopp), а також розмір пікселя оригінального зображення.

Таблиця 3.1

Дата початку	Видима	Відстань	Відстань	Позиційний	Розмір
спостереження,	зоряна	від	від Землі,	кут хвоста,	пікселя,
UT	величина	Сонця, а.о.	a.o.	градуси	10 <sup>3</sup> км.
1997-02-08.199	1.7	1.28	1.86	326.1	34.0x34.0
1997-02-18.169	1.0	1.16	1.65	325.3	30.2x30.2
1997-03-07.166	0.1	1.02	1.41	335.0	25.8x25.8

Параметри комети на моменти спостережень

Зображення отримано за допомогою камери Бейкера–Шмідта з діаметром об'єктива 180 мм, відносним отвором f/2.8, а також ПЗЗ-матриці та спеціалізованого кометного фільтра, який пропускає тільки випромінювання світла, розсіяного на пилинках. Максимум смуги пропускання фільтра знаходиться на довжині хвилі 647 нм, при півширині 10 нм. Час експозиції для всіх трьох зображень становив п'ять хвилин [5]. На оригінальних fits-файлах виявлено області однакового рівня яскравості у навколоядерній області комети через те, що відбулося розтікання заряду на ПЗЗ приймачі у зв'язку з великим рівнем сигналу.



**Рис. 3.1.** Розміщені поруч зображення комети С/1995 О1 (Hale–Bopp) за 8 лютого, 18 лютого й 7 березня 1997 року відповідно (зліва на право).

### 3.3. Фрагментація пилу як додаткова умова при моделюванні

Згідно з традиційними підходами до пилогазодинаміки, вважається, що у внутрішній комі існує початковий розподіл розмірів пилових частинок, які не подрібнюються і не випаровуються. Однак, отримані наземними спостереженнями подовжені форми ізофот пилових ком на відстанях  $10^4$ – $10^5$  км від ядра означають, що частинки певного розміру повинні мати широкий діапазон швидкостей для пояснення витягнутої форми ізофот. Простий спосіб створити такий розподіл за розмірами пилинок, це припущення, що фрагментація відбувається всередині або навіть дещо за межами регіону пилогазодинамічного прискорення (порядку сотень кілометрів від ядра) [36].

Оскільки пилові агрегати, як відомо, дуже пористі, не дивно, що деяка частина з них розпадається, тобто фрагментує. Раніше докази фрагментації пилових частинок знаходили при дослідженні комети 1P/Halley. Майкл Комбі
здійснив моделювання ізофот ПЗЗ-зображень комети 1P/Halley і зробив висновок, що велику роль у формуванні пилової коми цієї комети відіграє фрагментація [37]. Явище фрагментації пилу також було запропоноване для пояснення швидкого зростання пилових потоків за короткий проміжок часу в комі комети 1P/Halley [182]. У роботі [109] в якості можливих чинників фрагментації пилових агрегатів названо тепловий стрес і процес прискорення пилу. Механізмами відповідальними за фрагментацію також можуть бути: дія електростатичних сил на крихкі пилинки з малою межею міцності на розрив [22] або/і випаровування СНОХ агрегатів [198].

Проведені модельні експерименти показали: для того, щоб пояснити спостережний розподіл яскравості у пиловому хвості комети C/1995 O1 (Hale– Ворр), необхідно враховувати наявність процесу фрагментації пилинок. Результатом врахування фрагментації є збільшення при формуванні пилової кометної коми ролі дрібних пилинок із меншими, ніж для нефрагментованих пилинок швидкостями. Результат модельного врахування фрагментації пилових частинок проілюстровано на рис. 3.2.

Врахування процесу фрагментації під час моделювання було реалізоване наступним чином. Якщо припустити, що фрагментація в основному відбувається в зоні зіткнень комети, то при деякому наближенні можна розглядати одночасний виліт із зони зіткнень фрагментів, на які розпалася батьківська пилова частинка. Як відомо з модельних розрахунків, пилинки різних розмірів, які покинули ядро комети в один і той же момент часу будуть перебувати на одній лінії у хвості комети, формуючи синхрони. Як граничні умови для такої лінії, ми повинні розглянути положення нефрагментованої пилинки й найменшого ймовірного фрагмента.



**Рис. 3.2.** Результати моделювання з урахуванням (праворуч) та без урахування (зліва) фрагментації пилу комети С/1995 О1 (Hale–Bopp) за 7 березня 1997 року. Суцільні лінії – ізофоти модельного, а точкові лінії – спостережного зображень.

Для подальших розрахунків необхідно знати маси пилових частинок граничних розмірів. Відомо, що кометні пилові частинки дуже пористі й існує залежність між радіусом пилинки та її густиною. Така залежність досліджувалася і публікувалася різними вченими. При дослідженні пилового хвоста комети С/1995 О1 (Hale–Bopp) використано емпіричну формулу, подану Комбі [37]:

$$\rho = 2.2 - 1.4a/(a+2),$$

де *ρ* – густина, виражена в г/см<sup>3</sup>, *a* – радіус пилинки, виражений у мікронах (10<sup>-6</sup> м). Далі, за відомою формулою може бути отримана маса:

$$m = 4\pi\rho(a/10000)^3/3.$$

Єдиним обмеженням для кількості утворених фрагментів є закон збереження маси, що контролюється параметром залишкової маси *m<sub>r</sub>*.

Місцеперебування фрагмента з радіусом *a<sub>f</sub>*на лінії синхрон, яка пролягає між положенням мінімально можливого фрагмента та нефрагментованої пилинки, очевидно, пропорційне радіусу, тоді:

$$a_f = (1 - R_i)a_m + R_i a,$$

де  $a_f$  – радіус фрагмента,  $a_m$  – радіус мінімально можливого фрагмента. Якщо маса фрагмента,  $m_f$ , виявиться більшою, ніж залишкова маса, то генерується нове випадкове число  $R_i$  і знаходиться нове значення  $m_f$ . В іншому випадку знаходиться нове значення залишкової маси:  $m_r = m_r - m_f$ . Положення на синхроні даного фрагмента знаходяться за формулою:

$$R_f = (1 - R_i)R_m + R_iR_u,$$

де *R<sub>f</sub>*; *R<sub>m</sub>*; *R<sub>u</sub>* – положення даного фрагмента, мінімально можливого фрагмента і нефрагментованої частинки відповідно. Цикл фрагментації вважається завершеним, якщо залишкова маса менша мінімальної.

#### 3.4. Аналіз результатів моделювання

Проведено модельне дослідження пилового хвоста комети C/1995 O1 (Hale–Bopp) для трьох різних дат із урахуванням фрагментації пилинок і побудовано набори ізофот спостережних та модельних зображень (рис. 3.3, 3.4).



**Рис. 3.3.** Накладення ізофот спостережного (точкові лінії) та модельного (суцільні лінії) зображень комети С/1995 О1 (Hale–Bopp) за 07.03.1997. Північ – угорі, схід – зліва. Вказано масштаб і напрямок на Сонце (стрілкою).

Отримати частину пилової коми в околицях ядра комети (рис. 3.3) не вдалося у зв'язку з розтіканням заряду на ПЗЗ приймачі в навколоядерній області комети через великий рівень сигналу.



**Рис. 3.4.** Ізофоти комети Хейла–Боппа за 8 (зліва) й 18 лютого 1997 року (справа). Суцільні лінії – модельні ізофоти, точкові лінії – спостережні. Північ – угорі, схід – зліва. Вказано масштаб і напрямок на Сонце (стрілкою).

Модельні дослідження пилового хвоста комети C/1995 O1 (Hale–Bopp) здійснено шляхом розгляду ізотропного виділення пилу. У табл. 3.2 подано чисельні значення модельних параметрів, за допомогою яких вдалося досягти найкращих результатів при відтворенні розподілу яскравості у хвості комети. Слід зазначити, що набори параметрів для трьох різних дат відрізняються неістотно. Зображення, отримане 7 березня 1997 року, більше відрізняється від інших двох, поясненням чого може бути той факт, що у цей час комета знаходилася значно ближче до перигелію. Кількість пилинок малих розмірів для цієї дати дещо більша, на що вказує більший по модулю степінь закону розподілу за розмірами і більша частка пилових частинок, які фрагментують.

Таблиця 3.2

Параметри	Зображення 08.02.1997	Зображення 18.02.1997	Зображення 07.03.1997
Максимальний вік пилинок, діб	56	66	59
Діапазон радіусів пилинок, мкм	0.3–8.0	0.3-8.0	0.3–7.0
Степінь розподілу за радіусами	-3.6	-3.6	-3.7
Швидкість пилинок, м/с	168–721	143–640	155–650
Частка пилинок, що фрагментують, %	10	10	20

Отримані в результаті моделювання параметри пилинок

Отримані моделюванням значення усталеної швидкості пилових частинок у цілому подібні на результати, отримані іншими вченими. Наприклад, Жорда та ін. [88] дають оцінку швидкості пилу 0.45–0.60 км/с за вивченням ПЗЗ зображень комети поблизу перигелію. Як результат вивчення поширення пилових арок на початку квітня 1997 року, були визначені швидкості їх поширення – 0.42 км/с [71]. За оцінками Варела та ін. середня швидкість витоку пилу рівна 0.41 км/с [199].

Отримане значення показника степеня (-3.6...-3.7), а також фрагментація, свідчать про присутність у пиловому хвості підвищеної кількості дрібних пилинок, що підтверджено багатьма дослідженнями інших авторів [75, 76]. Отримані значення (наведені в табл. 3.2) дещо більші по модулю від отриманих у роботах Баумана та ін. ( $\gamma = -2.8$ ) [24], Міна та ін. ( $\gamma = -3.48$ ) [136], і відповідають значенню, отриманому Фуле та ін. ( $\gamma = -3.6$ ) [62] і Морено та ін. ( $\gamma = -3.6$ ) [137]. Таким чином, у цілому, наші дані, отримані в результаті динамічного моделювання, узгоджуються з результатами визначення фізичних характеристик пилу, які отримали інші автори за допомогою різних методів дослідження. Крім того, представлене тут дослідження вказує на важливість процесу фрагментації пилу при формуванні хвоста комети C/1995 O1 (Hale–Bopp).

#### 3.5. Основні результати

Здійснено моделювання пилового хвоста комети С/1995 О1 (Hale–Bopp) для трьох дат. Проведені модельні дослідження показали необхідність врахування фрагментації пилових частинок. Запропоновано модельний алгоритм врахування фрагментації пилу. Відтворено розподіл яскравості в пиловому хвості комети С/1995 О1 (Hale–Bopp) шляхом динамічного моделювання з урахуванням фрагментації пилу для трьох різних дат із близькими за значеннями модельними параметрами. Отримано оцінки максимального віку пилових частинок, які формують хвіст (56–66 діб), швидкостей їх вильоту із зони зіткнень (140–720 м/с), їх характерного розміру (0.3–8 мкм) і показника степеня розподілу за розмірами (–3.6...–3.7). Отримані значення показника степеня, а також наявність фрагментації вказують на присутність у пиловому хвості підвищеної кількості дрібних пилинок.

#### РОЗДІЛ 4

## МОДЕЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СМУГОВИХ СТРУКТУР У ПИЛОВИХ ХВОСТАХ КОМЕТ

#### 4.1. Особливості пилового хвоста комети С/2006 Р1 (McNaught)

**4.1.1. Загальна характеристика комети.** Яскрава динамічно нова комета C/2006 P1 (McNaught) відома тим, що її пиловий хвіст у січні 2007 року можна було спостерігати одночасно в обох півкулях Землі<sup>5</sup>. Ще однією примітною особливістю комети були чітко виражені смугові структури в її широкому вигнутому пиловому хвості.

Комета була відкрита 7.5 серпня 2006 року австралійським астрономом Робертом МакНотом, коли її блиск дорівнював 17.3<sup>т</sup>, а діаметр коми становив 20'. Комету відкрито фотографічно на знімках, зроблених у рамках програми Siding Spring Survey – автоматичного моніторингу південного неба в пошуках астероїдів, що зближуються з Землею, на 0.5 метровому телескопі обсерваторії Siding Spring за 400 км від Сіднея. Комета перетнула точку перигелію 12 січня 2007 року на відстані 0.17 а.о. Її блиск досяг максимального значення –5.5<sup>т</sup> 13–14 січня 2007 року. Хвіст комети своєї максимальної видимої довжини у 35° (що становило приблизно 1 а.о.) досяг у перші дні після проходження перигелію [191, 180]. Найближче від Землі, на відстані 0.82 а.о., комета знаходилася 15 січня 2007 року. Ексцентриситет орбіти комети становить приблизно 1.000019.

Протягом 4.5-денного інтервалу, 5–9 лютого 2007 року космічний апарат Ulysses пролітав через хвіст комети C/2006 P1 (McNaught), яка 7 лютого перебувала на геліоцентричній відстані 0.81 а.о. Регіон збурення сонячного вітру в цей час на геліоцентричній відстані космічного апарату, 2.4 а.о. вимірювався в 10 мегакілометрів завширшки. Протягом прольоту через цей

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> http://apod.nasa.gov/cgi-bin/apod/apod\_search?tquery=Comet+McNaught

регіон апарат зафіксував падіння швидкості сонячного вітру з ~ 750 км/с до мінімуму в 360 км/с, щільність протонів при цьому впала більше, ніж на два порядки, а температура протонів зростала від ~ 1.5×10<sup>5</sup> К до ~ 4×10<sup>5</sup> К. У той же час були виявлені дуже значні потоки кометних молекул, а також одно- і заряджених атомарних іонів. Уповільнення, виснаження двократно i нагрівання протонів сонячного вітру є результатом перезарядки 3 нейтральними атомами й молекулами в кометній комі та підхоплення вітром новоявлених кометних іонів. Протягом більшої частини подорожі в хвості комети, напрямок магнітного поля вказував майже радіально всередину, і таким чином, був протилежним до свого нормального напрямку назовні в південній полярній півкулі на цьому етапі сонячного циклу. Були, однак, більш короткі періоди, коли поле вказувало майже радіально назовні, що вказує на волокнисту структуру хвоста комети [67]. 15 грудня 2006 року сильний міжпланетний корональний викид маси перетнув два космічні апарати STEREO в той час як вони перебували в навколоземному просторі. У піку цієї події спостерігався сильний поверхневий струм у вимірах магнітного поля, властивості яких не відповідають нашому нинішньому розумінню магнітної структури міжпланетного коронального викиду маси. Можливою причиною цього струму є розширений слід пилу C/2006 P1 (McNaught). Якщо ця асоціація правильна, то заряджений пил може виробляти вигини в міжпланетному магнітному полі, які можуть простягатися на 1 а.о. або більше. Крім того, в результаті цієї електромагнітної взаємодії, дрібні частинки пилу можуть бути винесені за межі Сонячної системи [159].

Смугові структури у хвості комети C/2006 P1 (McNaught) були вперше помічені на зображенні, отриманому космічним апаратом STEREO B 11 січня 2007 року [43], а на зображеннях, отриманих наземними телескопами, – 17 січня. Аналіз Марка Фуле зображень STEREO вперше виявив у комети хвіст, що складається з нейтральних атомів заліза. Цей хвіст був злегка дугоподібним, слабким і схожим на плазмовий. Припускається, що атоми Fe походять із випаровування троіліта [59]. C/2006 P1 (McNaught) – динамічно нова комета з хмари Оорта, для якої визначене значення ексцентриситету становить більше одиниці, тобто цілком можливо, що це її перше проходження через внутрішню частину Сонячної системи. Разом із тим, вивчення інфрачервоних спектрів, отриманих за допомогою Spitzer Space Telescope, показало нехарактерний для динамічно нових комет брак кристалічних силікатів у пиловій складовій [98]. Післяперигелійні спостереження були отримані на інфрачервоному телескопі 27 і 28 січня 2007 року. Виміряний хімічний склад коми передбачає, що при проходженні перигелію зовнішні поверхневі шари були зруйновані, вивільнивши відносно необроблені первинні речовини [45]. Пилопродуктивність поблизу перигелію, за оцінками, була більшою, ніж у комети С/1995 О1 (Hale-Bopp) [207]. За два дні до перигелію, геліоцентричній відстані 0.2 a.o. на спостерігалося випромінювання натрію від C/2006 P1 (McNaught). Спостережний рівень викиду натрію передбачає, що основним механізмом, який призводить до викиду атомів натрію з пилинок як C/2006 P1 (McNaught), так і C/1995 O1 (Hale-Bopp) приблизно пропорційний сонячному потоку [120]. Ліссе та ін. зазначили, що з грудня 2006 по січень 2007 року комета продемонструвала значний витік речовини, сформованої з 0.1–10-мікронних пилових частинок [44].

4.1.2. Моделювання та аналіз результатів. Для модельного відтворення пилового хвоста комети C/2006 P1 (McNaught) ми вибрали одне з найбільш вдалих зображень, отриманих Девідом Хедлендом 24.00766 січня 2007 року UT у Новій Зеландії за допомогою фотоапарата Canon із діаметром об'єктива 50 мм й відносним отвором f/2.8, експозиція становила 25 секунд<sup>6</sup>. Орієнтація масштаб зображення були визначені та за допомогою астрономічного атласу «Cartes du ciel». комп'ютерного У момент

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> www.cortinastelle.it/comete/2006P1-mcnaught-best.htm

спостереження комета перебувала на відстані 0.44 а.о. від Сонця й 0.96 а.о. від Землі, а в її хвості були чітко помітні смуги.

У випадку комети C/2006 P1 (McNaught) з чітко вираженими смуговими структурами у хвості, необхідно було залучити додаткові можливості тієї моделі, яка використовувалася перед цим для модельного дослідження комети C/1995 O1 (Hale–Bopp). Припустимо, що витікання речовини з поверхні ядра відбувається не рівномірно, а значною мірою з розташованих на поверхні ядра локальних активних джерел газу і пилових частинок. У результаті обертання ядра навколо своєї осі, активні джерела почергово перебувають то на освітленій Сонцем, то на затіненій поверхні ядра. Темпи виділення газу та пилу з активних областей на освітленій Сонцем і затіненій поверхні значно відрізняються, завдяки чому й формуються неоднорідності у хвості, які спостерігаються у вигляді смуг. Була здійснена перевірка висловленого припущення за допомогою динамічного статистичного моделювання. Треба зазначити, що інші дослідники у своїй роботі також припустили зв'язок квазіперіодичності формування смуг із осьовим обертанням ядра комети. Джонс та ін. у своїй публікації висловили припущення: Зокрема, «квазіперіодичність формування смуг, можливо, пов'язана з темпом обертання ядра» [87].

Пило- та газопродуктивність часто пов'язують значною мірою з окремими активними областями на поверхні ядра комети. Наприклад, на зображенні комети C/2006 P1 (McNaught) за 30 січня 2007 року добре видно, як витікання речовини відбувається щонайменше з трьох локальних активних областей (рис. 4.1) [186]. Існує не один приклад присутності активних областей на поверхнях ядер різних комет. Наприклад, походження яскравих дугових структур комети C/1995 O1 (Hale–Bopp) приписують наявності однієї локальної активної області [160]. Також у роботі [204] наводяться докази існування локальних активних областей на поверхнях ядер собластей на поверхнях ядер різних комети на поверхні комети 17P/Holmes. Процес моделювання хвоста C/2006 P1 (McNaught) показав, що для відтворення характерних структур у хвості, зумовлених активністю локальних

областей, необхідно враховувати витікання речовини з них не тільки в період перебування областей на освітленій Сонцем поверхні, але й під час їх перебування на нічному боці комети. Прикладами того, що локальні активні зони можуть зберігати активність, знаходячись на нічному боці, служать спостереження комет 1P/Halley, 81P/Wild [78] і 67P/Churyumov–Gerasimenko<sup>7</sup>. У роботі Іванової та Шульмана [92] показано, що кратерні утворення на ядрі комети, які мають певну морфологію, можуть залишатися досить нагрітими й продовжувати проявляти помітну активність на нічному боці ядра.



**Рис. 4.1.** Виділення речовини з трьох локальних активних областей ядра комети C/2006 P1 (McNaught) [186]

У процесі моделювання зміна активності локальних областей вважалася пропорційною косинусу кута відхилення від напряму на Сонце. Відразу ж після проходження перигелію комета показала різке непередбачуване збільшення блиску; пізніше блиск повернувся до розрахункових значень [180]. Ця обставина в нашій моделі відповідає появі локальних активних зон поблизу точки перигелію та подальше поступове зниження їх активності пропорційно косинусу часової шкали в кубі.

На розглянутому спостережному зображенні ми виділили чотири морфологічно відмінні зони (А–D), як показано на рис. 4.2. Дві локальні

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup> http://www.spacedaily.com/reports/Sunset\_Jets\_on\_Rosettas\_Comet\_999.html

активні області (A1 та A2) відповідальні за формування смуг у зоні А. Ці області є джерелами рівних за розміром пилинок і відрізняються тільки своїм місцем знаходження на поверхні ядра комети. Темп виділення пилу в цих областях на 35% більше на сонячному боці (у зеніті), ніж на нічному. Третя локальна активна область (B) є джерелом більш важких пилових частинок і виробляє на 15% більше пилу на сонячному боці, ніж на нічному. Ця активна область формує систему смуг у зоні В. Зона С модельно відтворена за допомогою відносно важких пилових частинок, рівномірно виділених з усієї поверхні ядра. Зона D є перетином наведених вище сценаріїв формування хвоста.



Рис. 4.2. Морфологічні зони в хвості комети С/2006 Р1 (McNaught)

Для відтворення спостережного розподілу речовини уздовж смуг використовувався закон розподілу пилових частинок за розмірами, запропонований у роботі Марти Ханер [72]:

$$n(a) = (1 - a_0/a)^M (a_0/a)^N$$
,

де a – радіус пилових частинок,  $a_0$  – мінімальний радіус частинок, M, N – модельні параметри, відповідальні за місце максимуму в розподілі за розмірами та його крутизну. Найбільш імовірний радіус пилової частинки можна визначити за формулою  $a_p = a_0(M+N)/N$ . У ході моделювання були використані такі значення параметрів, які входять у закон розподілу за розмірами:  $a_0 = 0.1$ , N = 50, M = 120 для активних областей A1 і A2 та  $a_0 = 0.1$ , N = 50, M = 170 для локальної активної області В. Розподіл за розмірами з такими великими ступенями M, N дає в результаті вузький діапазон розмірів пилових частинок.

Для розрахунку швидкості вильоту пилових частинок із зони зіткнень був використаний вираз [46, 76]:

$$V = A r_d^{-0.5} a^{-0.5},$$

де V – швидкість пилинки,  $r_d$  – геліоцентрична відстань пилинки, a – радіус пилинки, A – числовий параметр.

Найкращого узгодження між модельним і спостережним зображеннями вдалося досягти, коли такий параметр моделювання як період обертання ядра навколо осі, дорівнював 21 годині. Загальна кількість пилових частинок, траєкторії яких були відстежені в процесі моделювання, рівна 5×10<sup>7</sup>. Табл. 4.1 містить модельні параметри, за допомогою яких досягнуто оптимальних результатів моделювання.

Таблиця 4.1

Джерело виділення пилу	Максимальний вік пилинок, діб	а, мкм	γ	<i>V</i> , м/с	<i>а</i> <sub>р</sub> , мкм
Активна область А1	12	0.2–0.48	_	390–604	0.34
Активна область А2	12	0.2–0.48	_	390–604	0.34
Активна область В	12	0.33–0.77	_	317–470	0.49
Вся поверхня ядра	11.2	0.35–65.0	-3.5	33–456	_

Оптимальні параметри моделювання

У табл. 4.1 значення швидкості V пилових частинок приведені до відстані 1 а.о. від Сонця. У таблиці a – радіус пилинки,  $\gamma$  – степінь закону розподілу за розмірами виду  $n(a) = a^{\gamma}$ .

Як видно з таблиці, модельне зображення сформовано з пилових частинок, вік яких не перевищує 12 діб за умови виділення пилу з локальних активних областей і 11.2 діб при виділенні зі всієї поверхні ядра комети. Слід зазначити, що цей параметр має сильний вплив на розташування чіткої нижньої межі модельного зображення хвоста комети (зона С рис. 4.2, рис. 4.3), сформованої виділенням речовини з усієї поверхні ядра.



**Рис. 4.3.** Зображення комети C/2006 P1 (McNaught): а – змодельоване, b – отримане зі спостережень 24 січня 2007 року.

Активні області генерують пилові частинки, які знаходяться у двох дуже вузьких діапазонах радіусів, у той час, як із усієї поверхні комети вилітають пилові частинки широкого діапазону радіусів. Наявність активних областей, які є джерелами різних за розмірами пилинок, може непрямим чином свідчити про неоднорідний склад ядра комети. Така неоднорідність, наприклад, була властива кометі, яка породила комети C/1996 Q1 (Tabur) і C/1988 A1 (Liller) [103]. Виміряне за допомогою мас-спектрометра співвідношення  $CO/CO_2$  близько 0.07±0.04 на поверхні комети 67P/Churyumov–Gerasimenko істотно нижче, ніж виміряне в комі. Таке істотне розходження є потенційним показником неоднорідності ядра цієї комети [139]. Також, у роботі Ледерера та Кампінса [121] на основі модельної інтерпретації морфології ОН, CN та C<sub>2</sub> компонентів комети C/1995 O1 (Hale–Bopp) був отриманий висновок про сильну хімічну неоднорідність ядра цієї комети. Тому припущення щодо неоднорідності ядра комети C/2006 P1 (McNaught) також видається цілком можливим.

За результатами модельних досліджень пилові частинки, джерелом яких слугувала вся поверхня ядра комети C/2006 P1 (McNaught), характеризувалися показником степеня  $\gamma = -3.5$  закону розподілу за радіусами,  $n(a) = a^{\gamma}$ . Це значення є характерним для багатьох комет ( $\gamma = -3...-4$ ) [86]. Модельний параметр швидкості вильоту пилових частинок із зони зіткнень має суттєвий вплив на ширину морфологічної складової хвоста комети, позначеної як зона D (рис. 4.2). Період осьового обертання комети C/2006 P1 (McNaught) раніше не був оціненим. Варто зазначити, що в орієнтації модельних і спостережних смуг є розбіжність у кілька градусів, яка збільшується зі збільшенням відстані від ядра. Цю розбіжність можна пояснити, якщо припустити, що пилинки у хвості мають заряд, на який впливає сонячний вітер, створюючи додаткове прискорення.

4.1.3. Основні результати. Методом динамічного моделювання на Монте-Карло алгоритму основі вдалося виконати моделювання спостережуваних чітко виражених смугових структур у пиловому хвості комети C/2006 P1 (McNaught) (рис. 4.3). Запропоноване пояснення утворення смугових структур полягає в тому, що на поверхні ядра знаходяться локальні активні області, які в результаті осьового обертання комети перебувають то на денному, то на нічному боці. Різний темп виділення кометної речовини при цьому є причиною спостережуваних квазіперіодичних неоднорідностей у хвості комети. У результаті модельних досліджень були отримані фізичні та динамічні характеристики пилинок, які сформували хвіст і зокрема смугові структури (табл. 4.1). Також модельним методом визначено період осьового

обертання комети – 21 година. Моделювання показало, що різні локальні активні області відповідальні за виділення пилових частинок із дещо відмінними розмірами. Це може непрямим чином свідчити про неоднорідність ядра комети.

## 4.2. Концепція подальших модельних досліджень смугових структур

Після модельних досліджень пилового хвоста комети C/2006 P1 (McNaught) була поставлена задача модельно дослідити смугові структури в пилових хвостах інших комет на основі припущення, викладеного вище. Внаслідок аналізу доступного масиву спостережних матеріалів, вибрано зображення хвостів комет, для яких проведення модельного аналізу видавалося можливим, а саме були доступні фотоматеріали. Нижче описано особливості модельних досліджень смугових структур у хвостах комет С/1910 A1 (Great January Comet), C/1957 P1 (Mrkos), C/1962 C1 (Seki–Lines), C/1975 V1 (West), C/2011 L4 (PanSTARRS), використовуючи подібний підхід.

Отже, як було описано на початку Розділу 4, моделювання відбувається на основі припущення, що смугові структури в пилових хвостах комет утворюються завдяки існуванню локальних областей підвищеного виділення пилу та газу. Активні області знаходяться на поверхні ядра, що обертається і виділення речовини з них залежить від висоти Сонця над горизонтом комети. Моделювання смугових структур вказаних вище комет показали, що достатньо діяльності однієї локальної активної області на поверхні ядра кожної з комет для пояснення смугових структур.

Модельні дослідження смугових структур у пилових хвостах комет С/1910 A1 (Great January Comet), C/1957 P1 (Mrkos), C/1962 C1 (Seki–Lines), C/1975 V1 (West) показали, що спостережні смуги займають деяке проміжне положення між положенням синхрон і радіус-вектором спрямованим від Сонця (рис. 4.4). Таку просторову орієнтацію смуг можна отримати в

результаті моделювання, але тільки шляхом введення додаткової сили, яка діє поряд з гравітацією та силою тиску сонячного випромінювання і має спрямованість дії, направлену від Сонця. Під час моделювання пилових хвостів наведених вище комет використано параметр додаткового прискорення, значення якого обернено пропорційне квадрату радіуса пилинки.



**Рис. 4.4.** Зліва оригінальне зображення комети С/1957 Р1 (Mrkos). Праворуч показано розбіжності в моделюванні з застосуванням додаткової сили (безперервні лінії) і без застосування додаткової сили (точкові лінії) на прикладі комети С/1957 Р1 (Mrkos)

Ймовірною інтерпретацією додаткової сили може бути або взаємодія заряджених пилових частинок з локальними збуреннями міжпланетного магнітного поля, або дія сублімаційних процесів на близьких від Сонця відстанях (це питання розглянуто в підрозділі 4.8).

# 4.3. Моделювання пилового хвоста комети C/1910 A1 (Great January Comet)

**4.3.1. Відомості про комету.** Комета С/1910 A1 (Great January Comet) перетнула перигелій 17 січня 1910 року на відстані 0.13 а.о., найближче до Землі перебувала 18 січня 1910 року, на відстані 0.86 а.о. Ексцентриситет орбіти комети становить 0.999995. Після проходження перигелію комета була досить яскравою (яскравість порівнювалась із Венерою і, ймовірно, 18 січня досягла  $-5^{m}$ ), щоб спостерігатися навіть удень за кілька градусів від Сонця. За повідомленнями, хвіст у цей час сягав максимальної довжини в 50° [28]. На початку лютого короткий антихвіст також можна побачити на фотографіях [165]. Це динамічно нова довгоперіодична комета [80].

Датою відкриття комети вважається 12 січня. Комету, вже видиму неозброєним оком на ранковому небі першими відкрили алмазодобувачі в Південній Африці. Вважається, що С/1910 А1 (Great January Comet) це об'єкт із хмари Оорта під час свого першого візиту до внутрішньої частини Сонячної системи. Період обертання С/1910 А1 (Great January Comet) навколо Сонця визначено в приблизно чотири мільйони років. Дуже яскравий пиловий хвіст мав злегка вигнуту форму і жовтуватий або дещо червонуватий відтінок. Примітними були виразні поперечні смуги у хвості. Яскравість комети зменшувалася так само швидко, як вона збільшувалася перед цим і після 5 лютого комету вже не можна було побачити неозброєним оком [191].

С/1910 А1 (Great January Comet) була надзвичайно багатою на пил. Низькодисперсні спектрограми Ф. Балдета показали чистий неперервний спектр відбитого сонячного світла не тільки від фотометричного ядра (де континуум особливо інтенсивний), але також від хвоста на відстані, щонайменше, 8 градусів від ядра. Пізніші спектрограми В.Г. Райта підтвердили дуже запилений характер цієї комети. Жодна зі звичайних кометних емісій не була виявлена, тим не менш, Райт зафіксував сильне випромінювання натрію з області голови. Г.Ф. Ньвол відстежив емісію натрію за межами голови й у самому хвості. Вважається, що це було перше спостереження кометного хвоста з нейтрального натрію. Плазмовий хвіст утворився тільки коли емісійні лінії натрію зникли, і після 26-го січня були визначені звичайні смуги для спектра комети. [165].

**4.3.2.** Модельне дослідження комети. Зображення С/1910 А1 (Great January Comet), яке було використане для зіставлення з модельним зображенням, отримав 27 січня 1910 року в Ташкенті І.І. Сікора [152]. У цей час комета перебувала на відстані 0.4 а.о. від Сонця й 1.13 а.о. від Землі. Орієнтація та масштаб зображення були визначені за допомогою програми «Cartes du ciel».

На спостережному зображенні можна чітко виділити шість смуг (рис. 4.5). Модельні експерименти показали, що утворення п'яти смуг (крім крайньої зліва на зображенні) можна пояснити виділенням пилу з однієї локальної активної області. Крайня зліва смуга може бути результатом спорадичного викиду речовини (її модельне відтворення виконано, хоча на рис. 4.5 не показано). Витік речовини з локальної активної області був модельно представлений у вигляді конуса з кутом розкриття 100°. У результаті моделювання отримано оптимальні значення модельних параметрів – характеристик пилових частинок: діапазон радіусів (0.2–0.6 мікрон), діапазон швидкостей (300-590 м/с, у залежності від розмірів). Максимальний вік пилових частинок, які сформували згадані п'ять смуг становить 9.22 діб, а для всіх смуг – 9.37 діб. У випадку комети С/1910 А1 додаткове прискорення становило 0.34/*a*<sup>2</sup> см/c<sup>2</sup> (*a* – радіус пилинки). Визначений моделюванням період обертання ядра навколо своєї осі виявився рівним 8.5 годин. Модельне зображення утворено з 10 мільйонів пилинок. Зіставлення смуг модельного і спостережного зображень представлено на рис. 4.5.



**Рис. 4.5.** Спостережне (ліворуч) і модельне (праворуч) зображення комети С/1910 А1 (Great January Comet). На спостережне зображення також схематично нанесено крапками змодельовані смуги. Бар у 2° наведено. Північ – вгорі, схід – зліва.

#### 4.4. Моделювання пилового хвоста комети C/1957 P1 (Mrkos)

**4.4.1. Відомості про комету.** Чеський астроном Антонін Мркос виявив комету С/1957 Р1 (Mrkos) 29 липня 1957 року, коли її вже було видно неозброєним оком. Комета перетнула перигелій 1 серпня 1957 року на відстані 0.35 а.о. від Сонця, і була найближче до Землі 14 серпня 1957 року на відстані 1.065 а.о. Ексцентриситет орбіти комети становить 0.999365.

Максимального блиску C/1957 P1 (Mrkos) набула 3 серпня 1957 року, близько 1.5<sup>m</sup>. У комети спостерігалися чітко розділені прямий світлоблакитний іонний хвіст і зігнутий жовтуватий пиловий хвіст [18]. Максимальна візуальна довжина хвоста вимірювалась у близько 2–5°, в той час як на фотографіях хвіст був, принаймні, 16° завдовжки. Як і комета 1910 A1 (Great January Comet), C/1957 P1 (Mrkos) мала натрієвий хвіст, який було чітко зафіксовано на геліоцентричних відстанях 0.57–0.82 а.о. Автор спостерігав довгий натрієвий хвіст на пластинці, помістивши призму перед невеликим телескопом [143]. На прикладі комети C/1957 P1 (Mrkos) було показано, що рентгенівське випромінювання багатих пилом комет на малих геліоцентричних відстанях (не більше 1 а.о.) може бути (у певному діапазоні енергій в умовах спокійного Сонця) показником генерації гарячої плазми завдяки зіткненням пилових частинок [90]. Прямі смуги з'являються у хвості комети C/1957 P1 (Mrkos) на фотографіях, отриманих А. МакКлюром 10 серпня 1957 року. Ці утворення досягають максимальної інтенсивності в ніч на 13 серпня і після цього зникають досить швидко. Смуги були ледь помітними ще 17 серпня на зображеннях, отриманих Джоном Фаррелом у Форт-Уорт, штат Техас [128].

**4.4.2.** Модельне дослідження комети. Зображення комети C/1957 P1 (Mrkos), з яким зіставлялось модельне зображення, отримано 14 серпня 1957 року о 14.45 UT Аланом МакКлюром [150], коли комета знаходилася на геліоцентричній відстані 0.51 а.о. Орієнтація та масштаб зображення визначено за допомогою програми «Cartes du ciel».

На зображенні можна розрізнити сім смуг, одна з яких роздвоєна (рис. 4.6). Модельне зображення утворено зі ста мільйонів пилинок. При моделюванні розглянуто як виділення речовини з активної області, так і з усієї поверхні ядра комети. Модельні експерименти показали, що утворення всіх смуг можна відтворити, змоделювавши активність однієї локальної області. Витік речовини з активної області був модельно представлений у вигляді конуса з кутом розкриття 100°. За результатами моделювання, час викиду пилинок, з яких сформувалася найбільш рання смуга, припадає на 31.1 липня 1957 року. Загалом пилинки, які сформували смуги, мали радіуси 1.45–1.8 мікрон, їх швидкості – 300–400 м/с, максимальний вік пилинок, з яких були утворені смуги – 15.5 доби. Щоб сумістити просторові орієнтації смуг модельного та спостережного зображень було використане додаткове прискорення рівне  $0.20/a^2$  см/с<sup>2</sup>, де a – радіус пилинки. Визначений моделюванням період обертання ядра навколо осі становив 15.4 години.

Для пояснення безструктурної складової пилового хвоста розглянуто витік речовини з усієї поверхні ядра. Показник степеня  $\gamma$  закону розподілу пилинок за розмірами,  $n(a) = a^{\gamma}$  рівний –3. Діапазон радіусів пилинок, використаних у моделюванні цієї складової хвоста становив 1.5–20 мікронів, швидкості пилинок становили 90–400 м/с, максимальний вік пилинок, з яких був утворений хвіст, становить 35.6 доби. Зіставлення модельного і спостережного зображень представлено на рис. 4.6. Секаніна і Фарел [170] також провели дослідження смуг у хвості комети С/1957 Р1 (Mrkos) за допомогою їхньої фрагментаційної моделі. За частотою виділення батьківських частинок із ядра вони отримали значення для періоду осьового обертання рівне 19.7 годин.



**Рис. 4.6.** Спостережне (ліворуч) і модельне (праворуч) зображення комети С/1957 Р1 (Mrkos). Бар у 1° наведено. Північ – вгорі, схід – зліва.

#### 4.5. Моделювання пилового хвоста комети С/1962 С1 (Seki-Lines)

**4.5.1. Відомості про комету.** Комета С/1962 С1 (Seki–Lines) була відкрита 4 лютого 1962 року Лайнсом із США і Секі з Японії. Комета пройшла точку перигелію 1 квітня 1962 року на відстані 0.03 а.о. від Сонця і була найближче до Землі 27 лютого 1962 року на відстані 0.62 а.о. Комета прилетіла з Хмари Оорта, минула точку перигелію на відстані 6.75 радіусів Сонця (0.03 а.о.) і вижила, на відміну від комети С/2012 S1 (ISON). Яскравість

С/1962 С1 (Seki–Lines) продовжувала безперервно підніматися з її підходом до Сонця, на відміну від комети С/2012 S1 (ISON), для якої спостерігалося сповільнення і спад активності під час підльоту до Сонця [177].

Виділення пилу в кометі C/1962 C1 (Seki–Lines) призупинилося під час проходження перигелію на кілька годин, принаймні настільки, що стало непомітним. Одним із пояснень цьому може бути те, що частинки пилу випаровувалися відразу після їх виділення з ядра під час проходження перигелію. Але тоді залишається питання, чому це не трапилося, наприклад, з пилом комети C/1965 S1 (Ikeya–Seki). Спектральний аналіз показав, що в будьякому випадку C/1962 C1 (Seki–Lines) була майже без пилу після перигелію. Комета спостерігалася неозброєним оком із кінця лютого до кінця квітня. Коли комету спостерігали після проходження точки перигелію 3 квітня 1962, її яскравість становила приблизно –2.5<sup>m</sup>. У наступні дні комета розвинула яскравий, злегка вигнутий, до 15 градусів довжиною пиловий хвіст. Яскравість комети падала швидко, так 7 квітня вона дорівнювала 1<sup>m</sup>, 13 квітня – 3<sup>m</sup>, а до кінця місяця перестала бути видимою неозброєним оком. Телескопічно комета ще спостерігалася в кінці січня 1963 року [84, 200].

**4.5.2.** Модельне дослідження комети. Зображення комети C/1962 C1 (Seki–Lines), з яким зіставлялося модельне зображення, отримано Аланом МакКлюром 9 квітня 1962 року [156], коли комета перебувала на відстані 0.4 а.о. від Сонця. Орієнтація та масштаб зображення визначено за допомогою програми «Cartes du ciel». На спостережному зображенні можна чітко виділити лише дві смуги (рис. 4.7), тому неможливо сказати напевно, чи утворилися вони завдяки одній локальній активній області, чи завдяки двом окремим викидами речовини.



**Рис. 4.7.** Спостережне (ліворуч) і змодельоване (праворуч) зображення комети С/1962 С1 (Seki–Lines). Бар у 2° наведено. Північ – вгорі, схід – зліва.

При моделюванні розглянуто як виділення речовини з активної області, так і з усієї поверхні ядра комети. Модельне зображення утворено з десяти мільйонів пилинок. Модельне дослідження двох смуг виконано, припустивши, що вони завдячують діяльності однієї активної локальної області на ядрі комети.

Витік речовини з активної області був модельно представлений у вигляді конуса з кутом розкриття 10°. У результаті моделювання отримано фізичні та динамічні параметри пилинок, які сформували смуги: діапазон радіусів (0.32–0.4 мкм) і швидкості (750–850 м/с). Щоб сумістити просторову орієнтацію смуг модельного та спостережного зображень використано додаткове прискорення, рівне  $1.20/a^2$  см/с<sup>2</sup>, де a – радіус пилинки. У результаті моделювання визначено період обертання ядра навколо осі за умови дії однієї локальної активної області. Він становить 3.42 години, і це трохи менше, ніж найменший зафіксований досі період осьового обертання (для комети 133P/Elst–Pizarro, 3.471 години). Модельне та спостережне зображення представлено на рис. 4.7. За результатами динамічного моделювання також визначено фізичні й динамічні характеристики пилових частинок, виділених із усієї поверхні ядра та які сформували безструктурну складову хвоста комети. Значення показника степеня  $\gamma$  закону розподілу пилинок за розмірами,  $n(a) = a^{\gamma}$  становить –3. Діапазон радіусів пилинок рівний 0.3–10.4 мікрон, діапазон швидкостей пилинок – від 100 до 880 м/с, час життя пилових частинок – 7.11 доби. Дата початку моделювання, 02.25 квітня, разом зі значенням максимального віку пилинок визначає чітку праву межу хвоста (на рис. 4.7).

#### 4.6. Моделювання пилового хвоста комети C/1975 V1 (West)

**4.6.1. Відомості про комету.** Комета була виявлена фотографічно Річардом Вестом із Європейської південної обсерваторії 10 серпня 1975 року. С/1975 V1 (West) пройшла точку перигелію 25 лютого 1976 року на відстані 0.2 а.о. від Сонця, а найближче до Землі була 29 лютого 1976 року на відстані 0.79 а.о. Ексцентриситет орбіти комети – трохи менший одиниці. Комета спостерігалася неозброєним оком із кінця лютого до середини квітня. С/1975 V1 (West) досягла найбільшого блиску, –1.5 зоряної величини, 24 лютого 1976 року, а хвіст досяг найбільшої кутової довжини, близько 30°, 8 березня 1976 року. Окрім яскравого широкого пилового хвоста, комета також мала вузький слабкий плазмовий хвіст [50].

У результаті ультрафіолетових спектральних спостережень комети C/1975 V1 (West) в діапазоні довжин хвиль 1620–3960 Å виявлено випромінювання атомів сірки, молекул CS, а також лінії або смуги атомів вуглецю, крім того, CO<sup>+</sup>, CO<sub>2</sub><sup>+</sup> і молекул OH [183]. Спостереження післяперигелійної фази C/1975 V1 (West) показали, що до геліоцентричної відстані 1.25 а.о., C<sub>2</sub> і CN змінювалися залежно від відстані за степеневим законом із показником степеня –2.8, в той час як C<sub>3</sub> та OH (на основі опублікованих вимірювань) змінювалися з показником степеня –2.1. Виявлено, що виділення C<sub>3</sub> чітко паралельне утворенню пилу. З цього можна

зробити висновок, що батьківські молекули ОН і  $C_3$  вилетіли з ядра, в той час як батьківські молекули CN і  $C_2$  вилетіли з гала льодяних зерен. Була оцінена середня швидкість сонячного вітру (365±37 км/с) за вимірами абераційного кута осі хвоста I типу протягом березня 1976 року [3].

Виявлено, що комета C/1975 V1 (West) є значно запиленою і продуктивною [14]. Зокрема, виконано оцінку пилопродуктивності комети під час спалаху (розпаду ядра) в перигелії. Отримано, що нормована на геліоцентричну відстань "спалахова" пилопродуктивність перевищує пилопродуктивність комети в спокійному стані в п'ять раз (відповідно,  $2.2 \times 10^7$  та  $4 \times 10^6$  г/с) [15]. З інтерпретації даних фотоелектричних спостережень поляризації голови комети C/1975 V1 (West) можна зробити висновок, що пилинки коми є силікатними частинками з невеликою долею поглинальних домішок (залізо, графіт) [135].

Серед визначних властивостей комети, система яскравих смуг у її пиловому хвості, що не збігається з синхронами, безумовно привернула увагу дослідників. У результаті вивчення багатьох фотозображень було зроблено висновок, що смугові структури відносно добре зберігаються в процесі еволюції в пиловому хвості протягом періоду в понад чотири доби. Це явище не є незвичайним у плазмі, такій, як газові хвости комет або утворення в сонячній К-короні, однак це дуже незвично для пилу [112]. З березня Гросман отримав перший післяперигелійний кольоровий фотознімок, на якому зафіксовано пиловий хвіст довжиною близько 23° зі смуговими структурами [138]. Надалі, з 4 по 8 березня, отримано багато фотографій із зображеннями пилового хвоста, посіченого тонкими яскравими смугами, продовження яких у бік ядра комети не проходить через нього. Найбільшого розвитку структури у вигляді смуг досягли 5.5 березня, а на знімку від 7.5 березня структури у вигляді смуг виглядають більш дифузними. Секаніна і Фарел [167] проекзаменували ряд фотографій, отриманих у період із 4 по 7 березня 1976 року, й виділили на них шістнадцять смуг. Смуги помітно не сходяться в ядрі комети [15].

Комета C/1975 V1 (West), відома також у зв'язку з розпадом її ядра на чотири частини. Вперше явище розпаду ядра помітив 8 березня О'Нера в Гарвардській обсерваторії за допомогою візуального рефрактора. Відстань між двома фрагментами ядра складала близько 4" [138]. За розрахунками Секаніни [170] фрагмент D відокремився від основного ядра 19.02.1976, спостерігався він до 26.08.1976; фрагмент В відокремився 27.02.1976 й спостерігався до 26.08.1976; швидко згаслий фрагмент С відокремився 06.03.1976 й спостерігався 25.03.1976. Останнє фотографічне ДО спостереження комети (фрагмента А) відбулося 25 вересня 1976 року [126]. Проведені післяперигелійні дослідження (у тому числі й наші) дозволили зробити висновок, що пиловий хвіст складався з пилових частинок викинутих, в основному, після перигелію, оскільки ведений край хвоста обмежений перигелійною синхроною. Найбільш ймовірне пояснення цьому – різке збільшення пилопродуктивності, помічене за результатами болометричних спостережень [142].

**4.6.2.** Модельне дослідження комети. Зображення комети C/1975 V1 (West), з яким зіставлялося модельне зображення, отримано 4 березня 1976 року (рис. 4.8, ліворуч) спостерігачем із Японії Куніхіро Шимою за допомогою фотоапарата Minolta SRT101 із лінзою 55 мм, відносним отвором f/1.7 при експозиції в 3 хвилини. Комета в цей час перебувала на відстані 0.35 а.о. від Сонця<sup>8</sup> і 0.36 а.о. від Землі. Орієнтація та масштаб зображення визначено за допомогою програми «Cartes du ciel».

На досліджуваному зображенні (рис. 4.8) можна виділити близько дев'яти смуг, які зрештою були відтворені шляхом динамічного моделювання. Модельне зображення утворено з десяти мільйонів пилинок. Витік речовини з активної області модельно представлений у вигляді конуса із кутом розкриття 50°. За результатами моделювання оптимальні модельні параметри виявилися

<sup>&</sup>lt;sup>8</sup> http://www.perihelio.org/brill2007.htm#C1975V1

наступними. Радіуси пилинок знаходилися в діапазоні 0.2–10.8 мікрон, швидкості пилинок мали значення від 50 до 500 м/с, максимальний вік пилових частинок, які брали участь у моделюванні становив 7.46 доби, дата початку моделювання – 25.75 лютого; тобто дане дослідження не дозволяє пов'язати утворення смуг із поділом ядра комети на фрагменти (табл. 4.2).

#### Таблиця 4.2

Хронологія подій моделювання, фрагментації ядра за розрахунками Секаніни й проходження перигелію для комети C/1975 V1 (West)

Дата	19.02.1976	25.02.1976	25.02.1976	27.02.1976	04.03.1976	06.03.1976
Подія	від'єднання фрагмента D	Перигелій	Початок моделю- вання	від'єднання фрагмента В	Кінець моделю- вання	від'єднання фрагмента С

Для того, щоб просторова орієнтація смуг спостережного та модельного зображень співпадала, при моделюванні було використане додаткове прискорення, значення якого становило  $0.34/a^2$  см/с<sup>2</sup>, де a – радіус пилинки. Період обертання ядра комети навколо осі, за результатами моделювання виявився рівним 7.35 години. Утворення всіх смуг можна пояснити за допомогою моделювання діяльності однієї локальної активної області. Параметри пилинок, виділених із активної області й рівномірно з усієї поверхні ядра, однакові. Значення показника степеня  $\gamma$  закону розподілу пилинок за розмірами,  $n(a) = a^{\gamma}$  виявилося рівним –2.5. Таке значення показника степеня вказує на зростання вкладу більших за розмірами пилинок у світність пилового хвоста<sup>9</sup>. Стосовно комети C/1975 V1 (West) це може бути наслідком того, що до часу початку моделювання від ядра комети відділився фрагмент, що могло збільшити частку великих пилових частинок. Зіставлення модельного та спостережного зображень представлено на рис. 4.8.

<sup>&</sup>lt;sup>9</sup> https://www2.mps.mpg.de/solar-system-school/lectures/jockers/comets3.pdf



**Рис. 4.8.** Отримані моделюванням смуги (білим) накладені на спостережний (чорним) хвіст комети C/1975 V1 (West) – слабкі смуги оригінального зображення схематично підсилені для наочності. Північ – угорі, схід – зліва.

#### 4.7. Моделювання пилового хвоста комети C/2011 L4 (PanSTARRS)

**4.7.1. Відомості про комету.** Комета C/2011 L4 (PanSTARRS) була виявлена 6 червня 2011 року в рамках програми пошуків потенційно небезпечних астероїдів за допомогою 1.8-метрового телескопа Pan-STARRS 1 (Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System), розміщеного на острові Мауї, Гаваї, США<sup>10</sup>. Мінімальної відстані від Землі (1.1 а.о.) комета досягла 5 березня 2013 року, а точку перигелію перетнула 10 березня 2013 року на відстані 0.3 а.о. Ексцентриситет трохи перевищує одиницю. Максимального блиску в 1<sup>m</sup> (згідно з каталогом Сеїчі Йошиди та 1.8<sup>m</sup> – згідно з системою «HORIZONS») за результатами спостережень комета досягла 10 березня 2013 року. Натомість, абсолютна зоряна величина комети (видима

<sup>&</sup>lt;sup>10</sup> https://www.fcaglp.unlp.edu.ar/pipermail/iauc/2011-September/002093.html

зоряна величина, яку б об'єкт мав, якби перебував на відстані в одну астрономічну одиницю як від Сонця, так і від спостерігача) була визначена Феріном і виявилася рівною  $m_v = +5.6 \pm 0.1$  [53].

Передбачається, що комета незвично багата на пил, з відношенням пилу до газу більшим, ніж чотири по масі [210]. Висновок про надзвичайну запиленість комети зроблений і на основі доперигелійних спостережень [149], і післяперигелійних [144]. При аналізі зображення, отриманого 21 червня 2011 року в широкому R-фільтрі на 2-му телескопі Південної обсерваторії (Австралія), коли комета була на відстані 4.22 а.о. від Сонця, був зафіксований високий рівень виділення пилу й визначено верхню межу оцінки радіуса ядра,  $R_N < 50.7$  км [93].

Орбітальні параметри дають підстави вважати, що це динамічно нова комета, що прибула з хмари Оорта. Ще в часи свого відкриття, знаходячись на відстані 7.9 а.о. від Сонця, комета вже мала істотну кому. Оскільки на відстанях 5–6 а.о. сублімації водяного льоду не досить, щоб вивільнити навіть найдрібніші субмікронні пилинки, тут діяв інший механізм: сублімація не водяних льодів (наприклад, CO<sub>2</sub>, CO), фрагментація ядра, перехід водяного льоду з аморфного стану в кристалічний [210]. Для динамічно нових комет спостерігається різке уповільнення темпу збільшення яскравості на деякій, *R*, відстані від Сонця. Таке явище для C/2011 L4 (PanSTARRS) відбулося 11 квітня 2012 року на відстані 4.97 а.о., воно відповідає події, коли головною речовиною, що сублімує замість льодів СО й CO<sub>2</sub> став водяний лід. До цього моменту степеневий закон збільшення яскравості мав вигляд  $R^{+8.67}$ , після –  $R^{+2.24}$  [53].

Шляхом вимірів темпів виділення молекул води з комети протягом 2012–2013 років із борту Сонячної та геліосферної обсерваторії (SOHO), було встановлено, що активність комети є асиметричною щодо перигелію, а саме, C/2011 L4 (PanSTARRS) була більш активною до перигелію, ніж після [39]. 21 березня 2013 року комета C/2011 L4 (PanSTARRS) спостерігалася за допомогою щілинного спектрографа з високою роздільною здатністю, на

геліоцентричній відстані 0.46 а.о., в Астрономічній Обсерваторії ім. Скіапареллі, Італія. Емісійні лінії натрію були найсильнішими у спектрі, як це часто буває у комет, але також були виявлені лінії калію [64]. Нарешті, комета C/2011 L4 (PanSTARRS) є унікальною ще й тим, що це перша від 1996 року (тоді це була C/1996 B2 (Hyakutake)) комета, для якої була зафіксована емісія в рентгенівській частині спектра [125].

Високоякісні зображення у білому світлі з SECCHI/HI-1 телескопа на борту STEREO В виявили високошвидкісні затухаючі згустки (смуги), які поширювалися в комі C/2011 L4 (PanSTARRS). Серія зображень свідчить, що викиди рухаються майже радіально в антисонячному напрямку. Зображення з HI-1В не дають прямої інформації про походження речовини згустків. Нейтральні атоми Na, Li, K або Ca з  $\beta > 50$  можуть відповідати спостереженням. Так само, ймовірно, взаємодія з сонячним вітром і геліосферним магнітним полем може викликати спостережувану динамічну еволюцію, швидко прискорюючи заряджені пилинки до швидкостей сонячного вітру [155].

**4.7.2. Модельне** дослідження комети. Зображення, отримане в результаті моделювання, порівнювалось із зображенням, отриманим Лоренцо Комоллі 21 березня 2013 року, 18.56 UT в Традате, Італія, за допомогою телескопа ТЕС 140 з фокусною відстанню 1011 мм, відносним отвором f/7.2, за допомогою ПЗЗ-матриці SBIG STL-11000 з використанням L фільтра (зі смугою пропускання 380–680 нм) (рис. 2.1, рис. 4.9)<sup>11</sup>. Час експозиції становив сім кадрів по 120 секунд й було виконано обробку за допомогою цифрового фільтра Ларсона–Секаніни [119]. На час спостереження комета знаходилася на відстані 0.46 а.о. від Сонця й 1.19 а.о. від Землі. Саме в цей час у пиловому хвості комети були присутні слабкі синхронні смуги. Для модельного

<sup>&</sup>lt;sup>11</sup> http://www.astrosurf.com/comolli/com38.htm

відтворення пилового хвоста комети використано модель, розроблену П.П. Корсуном, суть якої описано вище.

Під час модельних досліджень розглядалися виділення пилу двох видів: з локальної активної області, розташованої на ядрі комети, що обертається, й однорідне виділення пилу з усієї поверхні ядра комети. Для модельної побудови пилового хвоста простежено траєкторії ста мільйонів пилових частинок. Фізичні й динамічні характеристики пилу, виділеного з активної області, при моделюванні були такими ж, як і характеристики пилу, виділеного з усієї поверхні ядра. Моделювання показало, що наявність смугових структур у хвості комети можна пояснити активністю однієї локальної області. Витік речовини з активної області був модельно представлений у вигляді конуса з кутом розкриття 100°. У процесі моделювання було прийнято зміну активності локальної області пропорційною квадрату косинуса кута відхилення від напрямку на Сонце. Шляхом моделювання визначено період осьового обертання комети, який становить 17.2 години.

У результаті моделювання отримано оптимальні модельні параметри, які є характеристиками пилу коми комети: діапазон радіусів і швидкостей, максимальний вік пилових частинок, а також показник степеня,  $\gamma$  розподілу за розмірами пилинок  $n(a) = a^{\gamma}$ . Значення фізичних та динамічних параметрів пилинок наведено у табл. 4.3.

Таблиця 4.3

Параметр	Значення параметра
максимальний вік пилинок	47 діб
радіуси пилинок	0.22-82 мкм
степінь закону розподілу за розмірами	-3.1
швидкості пилинок	12–460 м/с

Параметри пилу в хвості комети C/2011 L4 (PanSTARRS)

Результати моделювання також представлені на рис. 4.9. Зокрема рисунок ілюструє, що просторова орієнтація змодельованих смуг приблизно збігається з орієнтацією смуг спостережного зображення, тому немає потреби введення додаткового прискорення.



**Рис. 4.9.** Зліва направо розміщено спостережне зображення комети C/2011 L4 (PanSTARRS), модельне зображення й накладений на спостережне зображення стилізований результат моделювання смугової складової хвоста комети. Розмір зображення – 1.7°×2.65°.

Отриманий у результаті моделювання степінь закону розподілу за розмірами,  $\gamma = -3.1$  знаходиться в діапазоні, який повідомлявся для багатьох комет,  $\gamma = -3...-4$  [86]. Отримані в результаті моделювання швидкості, 12– 460 м/с, узгоджуються з оцінкою швидкостей пилу комети 9P/Tempel, виділеної зі штучно утвореного кратера під час місії Deep Impact. Комета тоді перебувала на відстані близько 1.5 а.о. від Сонця, швидкості, досягнуті пилом після пилогазової взаємодії знаходилися в діапазоні від 10 до 600 м/с [89]. Марко Фуле здійснив синхронно-синдинний аналіз хвоста комети C/2011 L4 (PanSTARRS) на основі зображення, розглянутого в цій роботі (рис. 2.1, рис 4.9). Наскільки засвідчити, розбіжності можна враховуючи y

представленні матеріалів дослідження, діапазони радіусів пилових частинок в обох працях приблизно збігаються.

4.7.3. Здійснено Основні результати. розподілу моделювання яскравості в пиловому хвості комети C/2011 L4 (PanSTARRS) за допомогою динамічного моделювання на основі алгоритму Монте-Карло в результаті чого отримано характеристики пилу. Максимальний вік пилинок, які формують хвіст, становить 47 діб, діапазон швидкостей пилинок становить 12...460 м/с, характерний розмір пилових частинок рівний 0.22...82 мкм, степінь розподілу за розмірами становить –3.1 Також здійснено моделювання смугових структур у пиловому хвості шляхом розгляду активності локальної області на поверхні ядра комети, що обертається. Визначений при цьому період обертання ядра комети навколо осі рівний 17.2 години. Просторова орієнтація змодельованих смугових регіонів підвищеної яскравості в хвості приблизно збігається з орієнтацією цих же регіонів спостережного зображення.

### 4.8. Обговорення результатів моделювання пилових хвостів зі смуговими структурами

Для пояснення присутності смугових структур у пилових хвостах комет був запропонований механізм активності локальних областей, які знаходяться на поверхні ядра, що обертається. Необхідним для утворення смуг є виконання умови, при якій витік речовини з локальної активної області є рівним або більшим від витоку речовини з усієї поверхні ядра. Крім того, кількість потужних активних областей повинна бути невеликою, інакше їх спільна дія заважатиме структуризації хвоста комети. Таким чином модельно відтворено пилові коми й смугові структури в хвостах комет C/2006 P1 (McNaught), C/1910 A1 (Great January Comet), C/1957 P1 (Mrkos), C/1962 C1 (Seki–Lines), C/1975 V1 (West), C/2011 L4 (PanSTARRS). У ході моделювання отримано такі фізичні та динамічні характеристики пилинок: діапазон радіусів і швидкостей, розподіл за розмірами, максимальний вік пилинок, які утворили хвіст, період обертання ядра навколо осі.

Велике значення активності локальних областей у ході виділення кометної речовини з поверхні ядер комет було засвідчене декількома дослідженнями. Зокрема, космічні місії до комети 1P/Halley показали, що її активність переважно проявляється на нагрітій Сонцем частині ядра й активність комети в значній мірі пов'язана з активністю обмежених областей, які нагадують вулканічні отвори й займають близько 10% загальної площі поверхні комети [96]. Зображення комети 103P/Hartley 2 (місія EPOXI) показали яскраві пилові джети, які виділялися з активних областей поверхні ядра [201]. Значне виділення пилу з активних областей, які займали приблизно 8% поверхні комети 19P/Borrelly, було зафіксоване місією Deep Space 1 [97].

У своїх модельних дослідженнях ми намагалися спочатку розглядати простіший варіант, а саме утворення смуг у результаті діяльності однієї локальної активної області на поверхні ядра. Якщо ж моделювання із зазначеним припущенням не давало потрібних результатів, припускалася дія кількох активних областей, як у випадку комети C/2006 P1 (McNaught), або дія однієї активної області поруч із дією спорадичного викиду речовини, як у випадку комети C/1910 A1 (Great January Comet). Оскільки, як показали модельні експерименти, розміщення активних областей на поверхні ядра та орієнтація осі обертання комети мало впливає на просторову орієнтацію смуг, то при моделюванні всіх комет приймалося, що активна область розміщена на екваторі ядра комети, а вісь обертання перпендикулярна до площини орбіти технічним, комети. Додатковим але важливим параметром, який використовувався під час моделювання, був кут між орієнтацією активної області та напрямком на Сонце на момент спостереження. Застосована модель дає можливість обирати співвідношення виділення пилу з активної області з денного й нічного боку ядра комети, а також кут розкриття конуса, в межах якого відбувається виділення речовини – обидва ці параметри впливають на видиму розмитість або чіткість смуг.

Можливим варіантом фізичної інтерпретації додаткової сили, введеної в процес моделювання, є взаємодія заряджених пилових частинок із локальними збуреннями міжпланетного магнітного поля. Процес електростатичного заряджання кометних пилових частинок розглянуто в наукових статтях. Загалом, кометний пил отримує або втрачає заряд під дією наступних основних ефектів: приєднання електронів та іонів плазми, що найбільш ефективно при низьких температурах плазми; вторинна електронна емісія, яка ефективна при більш високих температурах плазми (> 10<sup>5</sup> K); втрата електричного заряду через фотоелектричний ефект, який відіграє важливу роль при малих густинах плазми (< 10<sup>3</sup> см<sup>-3</sup>) [195].

Деякі дослідники [197, 79] приділяли увагу питанню впливу наелектризованості пилинок на їх рух завдяки взаємодії з міжпланетним магнітним полем і дійшли до висновку, що прискорення, спричинене силою Лоренца для пилових частинок з a = 0.3 мкм незначне, для пилинок із a = 0.1 мкм порівняне з силою тиску сонячного випромінювання, а для пилинок з  $a \le 0.03$  мкм переважаюче. Автори [176] зазначають, що значення електростатичних потенціалів пилинок зазвичай складають лише кілька вольт на потрібних нам відстанях, а саме, більше 2·10<sup>5</sup> від ядра комети. Однак, Ламі та Кучмі [112] зазначають, що хоча консервативні оцінки потенціалу пилових частинок у площині екліптики < 10 В, вказують на те, що електромагнітні сили приблизно в 10 раз слабші від гравітаційних, цілком можливо, що ці сили значно занижені, оскільки відбувається взаємодія при високих екліптичних широтах (~45°), де швидкість сонячного вітру, наприклад, може бути набагато більшою, ніж у площині екліптики. Місцеві умови (наприклад, шторми) і високошвидкісні потоки вітру можуть також збільшити силу взаємодії.

У ході цього дослідження підраховано значення потенціалів, необхідних для виникнення додаткових прискорень, які були використані при моделюванні кометних ком. Для визначення величини взаємодії зарядженої сферичної пилової частинки з незбуреним міжпланетним магнітним полем була використана формула [176]:
$$\gamma = 0.447 \Phi k B_{rad} / \rho a^2,$$

де  $\gamma$  – відношення прискорення, викликаного силою Лоренца до прискорення, викликаного сонячним тяжінням;  $\Phi$  – рівноважний електростатичний потенціал пилинки; k – коефіцієнт, який при виконанні умови, що вектор сонячного вітру набагато більший від вектора швидкості пилової частинки відносно Сонця (що виконується майже завжди), дорівнює  $k \sim \Omega rcos(b)$ , де  $\Omega$  =  $2.87 \cdot 10^{-6} c^{-1} [190]$  – кутова швидкість обертання Сонця; r – відстань комети від Сонця в кілометрах; b – геліографічна широта;  $B_{rad}$  – радіальна складова магнітного поля на геліоцентричної відстані в 1 а.о. у гаусах (для розрахунків прийнято значення  $2.5 \cdot 10^{-5} [192]$ ;  $\rho$  – густина частинки в г/см<sup>3</sup> (для розрахунків прийнято значення 2 г/см<sup>3</sup>); a – радіус пилинки в мікронах.

Використане під час моделювання додаткове прискорення обернено пропорційне радіусу пилинки у квадраті. Наприклад, для C/1910 A1 (Great January Comet) відношення ( $\gamma_{model}$ ) додаткового прискорення до гравітаційного становить: при *a*=0.2,  $\gamma_{model}$  =2.3, при *a*=0.6,  $\gamma_{model}$  =0.26.

За формулою Секаніни [176] отримано наступні значення потенціалів за умови незбуреного міжпланетного середовища. Комета C/1910 A1 (Great January Comet) - 122.35 B, C/1957 P1 (Mrkos) - 235.37 B, C/1962 C1 (Seki-Lines) – 355.74 В, С/1975 V1 (West) – 80.75 В, що значно перевищує очікувані значення. Таким чином, умови незбуреного міжпланетного середовища не в змозі забезпечити фізичне пояснення додатковому прискоренню, використаному при моделюванні, але ми можемо припустити взаємодію пилових кометних частинок із локальними збуреннями міжпланетного магнітного поля, такими, як корональні викиди мас із Сонця, сила магнітних полів, у яких може сягати порядку одного мілігауса [153]. Зустрічі комет із збуреннями міжпланетного середовища локальними € відомим. спостережуваним явищем. Для прикладу, можна привести події зіткнення комет C/2010 X1 (Elenin)<sup>12</sup> та 2P/Encke [114] із неоднорідностями в міжпланетному середовищі.

Ще одним кандидатом для інтерпретації додаткового прискорення у досліджуваних областях поблизу перигелію є сублімаційні процеси. Сублімаційні гази надають антисонячного прискорення багатим летючими складовими кометним зернам. Поруч із Сонцем величина сублімаційного прискорення поводиться аналогічно світловому тиску, приблизно за тим же законом обернених квадратів. Тим не менше, поруч із Сонцем, тиск сублімації для льоду H<sub>2</sub>O до чотирьох–п'яти порядків сильніший, ніж тиск випромінювання [188, 202].

 $<sup>^{12}\</sup> http://spaceobs.org/en/2011/08/24/interaction-between-comet-elenin-and-coronal-mass-ejection-from-the-sun$ 

#### **РОЗДІЛ 5**

# ОСОБЛИВОСТІ МОДЕЛЮВАННЯ ПИЛОВИХ ХВОСТІВ КОМЕТ C/2012 S1 (ISON) ТА C/2012 K5 (LINEAR)

# 5.1. Модельні дослідження пилового хвоста комети C/2012 S1 (ISON)

**5.1.1. Відомості про комету.** Комета C/2012 S1 (ISON) відкрита Невським і Новічонком 21 вересня 2012 року за допомогою 0.4-метрового рефлектора, який є частиною міжнародної наукової оптичної мережі (International Scientific Optical Network, ISON). Першу активність комета проявила вже на геліоцентричній відстані 10 а.о. [35]. C/2012 S1 (ISON) відносять до динамічно нових об'єктів з хмари Оорта [164]. Ексцентриситет орбіти комети становить ~ 1.0002, а нахил орбіти – 62.4 градуса. Комета мала пройти перигелій 28 листопада 2013 року на відстані 0.0125 а.о., але не пережила наближення до Сонця. Розпад комети завершився приблизно за 3.5 години до перигелію, на геліоцентричній відстані 5.2 радіуса Сонця, коли C/2012 S1 (ISON) перестала існувати як активна комета [178].

Спостереження за кометою велося до моменту приблизно в сім годин до перигелію. Модельний аналіз хвоста комети поблизу перигелію, а також питання фрагментації та розпаду ядра представлено в статті Секаніни й Крахта [178]. Перший потужний викид речовини з комети стався 13 листопада, що призвело до 8-кратного збільшення її яскравості [164]. Цю подію було інтерпретовано як повний розпад ядра на рій із домінуванням великих фрагментів радіусами близько 100 метрів. Рій (або конкретні великі уламки всередині нього) надалі пройшли ще дві значні події руйнування 21 і 26 листопада, коли спостерігалися наступні викиди речовини [187]. Жодної центральної конденсації після перигелію не було помічено. Післяперигелійна крива яскравості була майже ідентичною на всіх телескопах з задіянням різних фільтрів, знижуючись трохи крутіше, ніж  $R_h^{-2}$ . Це означає, що складовою

яскравості переважно був континуум відбитого сонячного світла від залишків пилу в комі/хвості й активного ядра з радіусом більше, ніж 10 метрів вже не залишилося [107].

Оскільки комета спостерігалася як у зоні, де сублімація водяного льоду незначна, так і в зоні, де ця сублімація визначальна, це дало можливість провести ряд досліджень у різних діапазонах довжин хвиль, а також дослідити еволюцію, як активності комети, так і зміни властивостей пилу й хімічного складу, аж до сублімації силікатів поблизу перигелію [123]. Узагальнюючи представлені в літературі дані, можна виділити кілька важливих результатів. Дослідження кривої блиску C/2012 S1 (ISON) за весь період спостережень показало, що активність комети носила непередбачуваний, спалаховий характер, а отже, розпад найімовірніше почався до перигелію [178]. Хід кривої блиску C/2012 S1 (ISON) типовий для комет сімейства Крейца, які спостерігаються телескопами SOHO і STEREO [42, 107]. За результатами аналізу спостережень комети на геліоцентричних відстанях від 9.4 а.о. (кінець вересня 2011 року) до 3.35 а.о. (середина червня 2013 року) виявлено, що зростання активності почалося в кінці 2011 року з досягненням максимуму в середині січня 2013 року (на ~ 5 а.о.), після цього активність знову знизилася до червня 2013 року. Зростання активності, швидше за все, було викликане тим, що газ СО виніс із поверхні ядра в кому великі зерна водяного льоду [132]. Найбільш імовірно, що вісь обертання ядра була приблизно спрямована на Сонце. Це означало, що більша частина ядра перебувала в постійній темряві, у той час як інша – постійно нагрівалася. Це дає змогу зрозуміти, чому значна активність комети, віддаленої від Сонця, вичерпалася так швидко [83].

За результатами спостереження комети в інфрачервоному діапазоні на геліоцентричній відстані 1.15 а.о. в рамках проекту SOFIA отримано, що пил у комі має субмікронні та мікронні розміри з переважанням пилинок від 0.7 до 1 мкм. Теплові моделі показали, що пил C/2012 S1 (ISON) був багатий вуглецем, з приблизним відношенням силікатів до аморфного вуглецю – 1:9. Також було зазначено, що комета має від помірного до низького

співвідношення пилу до газу [208]. Ферін за побудованим ходом кривої блиску передбачив розпад комети [105], а за показниками виділення пилу, води та CO визначив діаметр ядра,  $D = 1030 \pm 70$  м. Автор також визначив абсолютну зоряну величину комети,  $m_v = +12.7 \pm 0.1$ , а також, що середнє співвідношення пилу до газу для C/2012 S1 (ISON) становить 6.0, що свідчить про значну запиленість її коми [53]. Верхня межа радіуса ядра комети була оцінена в 2 км [99]. Мінімальні оцінки радіуса ядра 0.1–0.3 км, а також максимальна – 1 км, на основі факту розпаду, виконані іншими авторами [106]. Аналіз кількох послідовних широкосмугових зображень комети, отриманих на телескопі Hubble, дозволив стверджувати, що радіус ядра лежав у діапазоні 0.6–0.9 км, а також припустити, що період обертання ядра міг бути близьким до 10.4 години [116].

Перші кольорові й поляризаційні зображення C/2012 S1 (ISON) були отримані в ході двох кампаній вимірювань на космічному телескопі Hubble 10 квітня та 8 травня 2013 року, коли фазові кути комети становили  $\alpha \sim 13.7^{\circ}$  і 12.2° відповідно. Частинки в комі були змодельовані за допомогою високо нерегулярних агломератів. Різні синхронні фотополяриметричні дослідження свідчать про просторову хімічну неоднорідність коми комети C/2012 S1 (ISON). При малих прогнозованих відстанях від ядра (< 500 км), моделювання показало, що кометні частинки складаються переважно з дрібних, високо абсорбційних частинок, таких, як аморфний вуглець і/або органічні речовини, у великій мірі опромінені УФ-випромінюванням; у той час, як на прогнозованих відстанях понад 1000 км, показник заломлення частинок органічною узгоджується 3 речовиною, злегка обробленою УФ-випромінюванням, толінами (клас гетерополімерних молекул), Mg-Fe силікатів, та/або багатими магнієм силікатами, забрудненими ~ 10% за об'ємом аморфним вуглецем. У той же час моделювання передбачає низький вміст багатих магнієм силікатів, які формують вогнетривкий поверхневий шар на поверхні кометних ядер, що може свідчити про відсутність такого шару на ядрі C/2012 S1 (ISON). У результаті моделювання для частинок з a = 0.5-

1 мкм, була оцінена швидкість викиду ~ 35 м/с [211]. До свого розпаду поблизу перигелію в кометі спостерігалися емісійні D лінії нейтрального натрію, які також спостерігалися в комет C/1995 O1 (Hale–Bopp) і C/2006 P1 (McNaught). За результатами точного відтворення випромінювання в натрієвому хвості, що змінюється з часом через спалах, виявлено, що для майже половини від загального обсягу натрію, джерелом служать пилові зерна, а джерела парів натрію в комі комети чутливі до співвідношення пилу до газу [164]. Внаслідок спектральних спостережень отримано, що вміст деяких сполук (СО, С<sub>2</sub>Н<sub>6</sub>,  $CH_3OH, CH_4$ ) залишався відносно постійним зі зміною відстані від Сонця,  $R_h$ , тоді як інші (наприклад, H<sub>2</sub>CO і HCN) збільшувалися зі зменшенням R<sub>h</sub>. Причиною цьому могла бути або неоднорідність ядра, або/і вивільнення сполук від все більш розігрітих зерен в комі [47]. За даними спостережень на радіотелескопі ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array) був виміряний детальний розподіл HCN, HNC, H<sub>2</sub>CO і пилу всередині коми C/2012 S1 (ISON), коли комета знаходилася на геліоцентричній відстані 0.54 а.о. Нагрівання та фотоліз вогнетривких пилових частинок, полімерів та інших макромолекул і їх подальша фрагментація на відстанях 100–10000 км від ядра найбільш переконливою гіпотезою € про походження спостережуваних H<sub>2</sub>CO i HNC, джерела яких знаходяться в комі. Для комети зареєстровано слабку структурну деталь, направлену протилежно до напрямку руху комети («пиловий слід»). Кометна субміліметрова емісія завдячує найімовірніше великим,  $\geq 1$  мм пиловим частинкам [40].

**5.1.2.** Фотометричні спостереження комети. Доперигелійні фотометричні спостереження комети C/2012 S1 (ISON) (рис 5.1) були виконані на метровому телескопі Zeiss-1000 в Спеціальній астрофізичній обсерваторії (САО РАН) 11 жовтня 2013 року, спостерігач М.М. Кисельов. У цей період комета перебувала на відстані 1.45 а.о. від Сонця й 1.85 а.о. від Землі. В якості приймача випромінювання використовувалася ПЗЗ матриця ЕЕV 42–40 розміром 1044×1046 пікселів. Розмір отриманих зображень

становить 8×8 кутових хвилини, а масштаб зображень дорівнює 0.476"/пікс. Для зменшення надмірності інформації та підвищення відношення сигнал / шум зображення зберігалися з бініруванням рівним 2. Було зареєстровано вісім кадрів із експозиціями від 30 до 60 секунд у широкосмуговому R-фільтрі. В якості плоских полів використовувалося зображення сутінкового ранкового неба. Для абсолютизації фотометричних вимірювань були отримані зображення зоряного поля PG1657 + 078 [117]. Спектральна залежність коефіцієнта пропускання земної атмосфери описана в роботі [4].

Для стандартної редукції ПЗЗ-кадрів були створені майстер-кадри електронного зсуву і плоского поля. Усі кадри із зображенням комети та стандартних зірок були виправлені за 0-пункт і нерівномірність чутливості пікселів за допомогою майстер-кадрів. Фон неба був визначений за допомогою підпрограми «sky» бібліотеки IDL [118]. Усі кадри були приведені до єдиного центру, який відповідає координатам центру зображення комети на одному з кадрів і потім були підсумовані. Отриманий набір кадрів використовувався для модельного аналізу пилового хвоста, оцінки блиску і виділення структур у комі комети.

**5.1.3.** Динамічне моделювання комети та аналіз результатів. За допомогою динамічного моделювання на основі алгоритму Монте-Карло був відтворений розподіл яскравості у пиловому хвості комети C/2012 S1 (ISON). Для цього була використана модель, розроблена П.П. Корсуном. Модель базується на статистичному алгоритмі Монте-Карло. При модельному аналізі пилового хвоста комети, яка перебувала на близькій до Сонця відстані ми враховували, що льодяний компонент частинок повністю сублімував, і потрібно аналізувати рух сильно пористих тугоплавких пилинок, тому передбачений моделлю рух частинки зі змінною масою не використовувався. Для побудови пилової коми комети в цій моделі простежується траєкторія кожної окремої пилинки від зони зіткнень навколо ядра до моменту спостереження. Траєкторії пилових частинок, які покинули зону зіткнень,

контролюються сонячною гравітацією і тиском сонячного випромінювання. Кінцеве (на момент спостереження) положення пилинок знаходиться шляхом розв'язання системи рівнянь руху. Модельні параметри підбираються так, щоб досягти найкращої узгодженості модельного та спостережного зображень, критерієм чого слугувала мінімізація площі між відповідними модельними і спостережними ізофотами.

По алгоритму Монте-Карло задаються час і напрямок вильоту кожної пилинки. Степінь  $\gamma$  розподілу за радіусами,  $n(a) = a^{\gamma}$ , а також максимальний вік пилинок є модельними параметрами. Радіус пилинки задається, керуючись алгоритмом Монте-Карло і законом розподілу за розмірами, швидкість вильоту пилинки із зони зіткнень є модельним параметром, залежним від радіуса та геліоцентричної відстані пилинки [46, 76]:

$$V = Ar_d^{-0.5}a^{-0.5}$$
,

де V – швидкість пилинки,  $r_d$  – геліоцентрична відстань пилинки, a – радіус пилинки, A – числовий параметр.

Результатом розв'язання системи рівнянь є координати однієї пилинки на момент спостереження, а їх сукупність дає модельний пиловий хвіст. Отримані кометоцентричні координати пилинок проектуються на небесну сферу, розраховується вклад кожної пилинки у яскравість змодельованого хвоста, знаходиться розподіл яскравості в нім і порівнюється з розподілом яскравості в спостережному хвості комети. Модельне зображення комети C/2012 S1 (ISON) порівнювалося зі спостережним, отриманим 11 жовтня 2013 року (рис. 5.1).



**Рис. 5.1.** Результати моделювання комети C/2012 S1 (ISON). Модельне зображення комети (б) знаходиться праворуч від спостережного (а).

Модельне зображення комети C/2012 S1 (ISON) було утворене з 50 мільйонів пилинок. Пилоутворення було модельно представлене у вигляді конуса з кутом розкриття 100°, спрямованим на Сонце; тобто у формуванні хвоста брала участь значна частина підставленої Сонцю поверхні ядра комети. У результаті моделювання отримано фізичні й динамічні характеристики пилу кометної коми (табл. 5.1).

Таблиця 5.1

Модельний параметр	Значення параметра			
максимальний вік пилинок	25 діб			
радіуси пилинок	0.5–16.6 мкм			
степінь закону розподілу за розмірами	-2.5			
швидкості пилинок	17–130 м/с			

Модельні параметри пилу в хвості комети C/2012 S1 (ISON)

Наочними результатами моделювання є пара з модельного та спостережного зображень, розміщених поруч (рис. 5.1), хоча головним критерієм оцінювання результатів моделювання слугувала мінімізація площі між відповідними модельними та спостережними ізофотами (рис. 5.2).

Додатково виконано порівняння профілів яскравості периферійної частини хвоста модельного та спостережного зображень комети (рис. 5.3).



**Рис. 5.2.** Результати моделювання комети C/2012 S1 (ISON). Порівняння наборів ізофот: точкові – модельні, суцільною лінією – спостережні.

У результаті модельних досліджень пилового хвоста C/2012 S1 (ISON) було отримано показник степеня закону розподілу за розмірами пилинок рівний –2.5. Такий показник степеня означає збільшений внесок у світіння хвоста комети пилинок з більшими розмірами<sup>13</sup>. Отриманий нами показник степеня для комети C/2012 S1 (ISON) корелює з оцінками степеня, отриманими раніше для комети D/1993 F2 Shoemaker–Levy-9 [70] і комети 1P/Halley [127]. Також, згідно з оцінками, наведеними у статті [196], показник степеня може знаходитися в діапазоні від –2.5 до –3.0 для пилових зерен із розмірами від мікрометра до міліметра. Вимірювання потоків пилу при проходженні космічних апаратів поблизу ядер комет 1P/Halley (Giotto) і 81P/Wild (Stardust) показали наявність частинок, які поширюються в дуже широкому діапазоні розмірів, які мають еквівалентні радіуси від нанометрів до міліметрів, і поширюється приблизно за степеневим законом із індексом від

<sup>&</sup>lt;sup>13</sup> http://www.solar-system-school.de/lectures/jockers/comets3.pdf

-2 до -4, залежно від розмірів частинок пилу та його місцеперебування в комі комети [108].



**Рис. 5.3.** Порівняння профілів яскравості периферійної частини хвоста комети C/2012 S1 (ISON): точками – модельні, суцільною лінією – спостережні дані. Вісь х – відстань у секундах дуги від центру ядра, по осі у – рівень яскравості.

Оцінені радіуси пилинок, з яких був утворений пиловий хвіст комети, лежать у діапазоні від 0.5 до 16.6 мкм, що не суперечить оцінкам розмірів пилинок, які були отримані для цієї ж комети іншими авторами [208].

Отримані в результаті моделювання швидкості, 17–130 м/с, узгоджуються з оцінкою швидкостей пилу комети 9Р/Тетреl, виділеної зі штучно утвореного кратера під час місії Deep Impact. Комета тоді перебувала на відстані близько 1.5 а.о., і швидкості, досягнуті пилом після пилогазової взаємодії знаходилися в діапазоні від 10 до 600 м/с з гаусівським максимумом близько 190 м/с [89].

Морфологію комети C/2012 S1 (ISON) також було вивчено за допомогою цифрових фільтрів і методу компенсації низькочастотних трендів (рис. 5.4).



**Рис. 5.4.** Зображення комети C/2012 S1 (ISON), отримане у результаті обробки за допомогою цифрових фільтрів і методу компенсації низькочастотних трендів.

На розглянутому зображенні, отриманому 11 жовтня 2013 року з використанням R-фільтра, виділено джет направлений на Сонце, що узгоджується з результатами, представленими в літературі й підтверджує значну спалахову активність комети як на значних геліоцентричних відстанях у понад 4 а.о. [123], так і поблизу перигелію [107].

Оскільки зображення комети було отримано в широкосмугових BVR фільтрах, це не дало змоги зробити реалістичної оцінки кольору й пилопродуктивності. Натомість, на основі отриманих даних оцінено абсолютну зоряну величину комети на момент спостереження, вона становила  $9.2^{m} \pm 0.01$ .

## 5.2. Моделювання пилового хвоста комети C/2012 K5 (LINEAR)

**5.2.1.** Відомості про комету. Динамічно нова комета C/2012 К5 (LINEAR) була відкрита 25 травня 2012 року на ПЗЗ зображеннях, отриманих на метровому рефлекторі з відносним отвором f/2.15, розташованому в Нью-Мексико. Комету відкрито у рамках програми пошуку навколоземних астероїдів (Lincoln Near-Earth Asteroid Research, LINEAR), коли яскравість комети була 18.5<sup>m14</sup>. Ексцентриситет орбіти комети становить ~ 0.9985, вона пройшла перигелій 28 листопада 2011 року на відстані 1.14 а.о., знаходилася найближче до Землі, 31 грудня 2012 року, на відстані 0.294 а.о., найбільший блиск (приблизно 8<sup>m</sup>) мала на початку січня 2013 року.

У єдиному опублікованому, крім нашого, дослідженні комети повідомляється, що були отримані зображення в близькому інфрачервоному діапазоні за допомогою інструмента IRAC (Infrared Array Camera) на Spitzer Space Telescope, які дозволили розрахувати відношення CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O. Відношення отримано в припущенні, що забруднення від викидів CO є незначнм. Відносний вміст CO<sub>2</sub> виявився значно більшим, ніж середнє значення, виміряне в кометах на аналогічних геліоцентричних відстанях. Комета спостерігалася після проходження перигелію на геліоцентричній відстані ~1.6 а.0. [129].

**5.2.2.** Робота із зображеннями комети. Для дослідження було використано ряд фотометричних зображень C/2012 K5 (LINEAR) (рис. 5.5), отриманих 27 вересня 2012 року, коли комета знаходилася на відстані 1.5 а.о. від Сонця та 1.8 а.о. від Землі.

Спостереження комети проводились О.Р. Баранським на 0.7-метровому телескопі АЗТ-8 (Астрономічна обсерваторія КНУ, с. Лісники). Фотометричні дані отримано через широкосмуговий R-фільтр. В якості приймача

<sup>&</sup>lt;sup>14</sup> http://www.minorplanetcenter.net/mpec/K12/K12K69.html

випромінювання використовувалася ПЗЗ матриця PL47-10 FLI розміром 1024×1024 пікселів. Розмір отриманих зображень і масштаб у режимі апаратного бінінга 2×2 складає 16×16 кутових хвилин та 0.99"/пікс., відповідно.

Після цього була проведена редукція отриманих даних за допомогою кодів пакета IDL. Ця попередня обробка спостережених даних дозволяє врахувати особливості матриці, очистити зображення від слідів космічних частинок та врахувати плоске поле.

Після редукції даних, оскільки зображення комети зміщується щодо зірок поля, всі кадри зміщувалися таким чином, щоб зображення комети залишалося "нерухомим". З цією метою, були виміряні положення центрів обраних зірок поля та центру комети. Потім усі зображення зміщувалися таким чином, щоб на виході отримати набір кадрів, приведених до єдиного центру, який відповідає координатам центру зображення комети на одному з кадрів. Після вирахування фону неба, медіанна фільтрація застосовувалася до набору кадрів зі зміщеними зображеннями, що дозволило збільшити відношення сигнал/шум, а також частково позбутися зірок поля. Цей набір кадрів після медіанної фільтрації зображення. сумарних дав яке використовувалося для подальшого динамічного моделювання пилового хвоста комети. Нарешті, були визначені орієнтація та масштаб отриманого сумарного зображення, що є необхідним для правильного моделювання пилового хвоста комети.



**Рис. 5.5.** Модельне зображення комети C/2012 K5 (LINEAR) поміщене на кадр праворуч від спостережного. Розмір зображення 4.7'×4.7', що приблизно становить 375 тис. км. Приведено напрямки на північ, схід і Сонце.

**5.2.3.** Динамічне моделювання комети та аналіз результатів. Модельне відтворення пилових хвостів комет здійснювалося за допомогою моделі, розробленої П.П. Корсуном, яка описана раніше. При моделюванні враховувалося, що льодяний компонент конгломерату повністю сублімував і йде аналіз руху сильно пористих тугоплавких пилових частинок. Для розрахунку швидкості вильоту пилових частинок із зони зіткнень використано вираз [46, 76]:

$$V = Ar_d^{-0.5}a^{-0.5}$$

де V – швидкість пилинки,  $r_d$  – геліоцентрична відстань пилинки, a – радіус пилинки, A – числовий параметр. Додатково було прийнято, що

усталені швидкості характеризуються розподілом Гауса. Середнє значення розподілу становить найбільш ймовірне значення *V*, а відносна стандартна дисперсія рівна 0.1.

Як відомо, після вивільнення з ядра комети, динамічно не відділені нейтральний газ і пил формують кому. Та вже за кілька десятків кометних радіусів від поверхні пил динамічно відділяється від газу й формує пиловий хвіст [38].

Моделювання здійснювалося за допомогою комп'ютерної програми, написаної на алгоритмічній мові Фортран. Інтерфейс запуску і контролю отриманих обчислень був реалізований через пакет IDL, зорієнтований на аналіз зображень. Критерієм досягнення оптимальних результатів моделювання слугувала мінімізація площі між відповідними модельними та спостережними ізофотами. Значення всіх модельних параметрів для зручності задавалися в окремому файлі.

У результаті моделювання отримано модельне зображення комети C/2012 K5 (LINEAR), утворене з 200 мільйонів пилових частинок. Пилоутворення було модельно представлено у вигляді конуса з кутом розкриття 100°, направленим на Сонце; тобто активність проявляла значна частина освітленої сонцем поверхні комети. У результаті модельних досліджень отримано оптимальні модельні параметри (радіуси, швидкості, максимальний вік і показник степеня  $\gamma$  розподілу за розмірами пилинок), які є характеристиками пилу, що формує пилову складову коми комети (табл. 5.2).

Таблиця 5.2

# Модельні параметри пилу в кометі С/2012 К5 (LINEAR)

Модельний параметр	Значення параметра
максимальний вік пилинок	88 діб
радіуси пилинок	0.7–100 мкм
степінь закону розподілу за розмірами	-2.4
швидкості пилинок	6–135 м/с

Наочними результатами моделювання є пара з модельного та спостережного зображення, розміщених поруч (рис. 5.5), однак критерієм для оцінювання результатів моделювання слугувала мінімізація площі між відповідними модельними та спостережними ізофотами (рис. 5.6). Додатково виконано порівняння профілів яскравості периферійної частини хвоста модельного та спостережного зображень комети (рис. 5.7).



**Рис. 5.6.** Зображені суцільними лініями три ізофоти модельного пилового хвоста комети C/2012 K5 (LINEAR) накладаються на аналогічний набір із трьох ізофот (зображених крапками) спостережного хвоста комети.

Отриманий у результаті моделювання степінь закону розподілу за розмірами,  $\gamma = -2.4$  відрізняється від тих, що повідомлялися для багатьох комет,  $\gamma = -3...-4$ , хоча він, наприклад, відповідає степеню, отриманому для комети Shoemaker–Levy 9 (-2.3) [70] і комети 1P/Halley (-2.5...-3.0 для пилинок масою  $10^{-12}...10^{-9}$  грам) [127]. Також, виміри потоків пилу під час проходження космічних апаратів поблизу ядер комет 1P/Halley (Giotto) та 81P/Wild 2 (Stardust) показали наявність частинок, які поширюються в дуже широкому діапазоні розмірів, які мають еквівалентні радіуси від нанометрів

до міліметрів, і поширюється приблизно за степеневим законом із індексом – 2…–4, залежно від розмірів пилинок та їх розташування в комі комети [108].



**Рис. 5.7.** Порівняння модельних (точками) і спостережних (суцільною лінією) профілів яскравості периферійної частини хвоста C/2012 K5 (LINEAR). Вісь *х* – відстань у секундах дуги від центру ядра, вісь *у* – рівень яскравості.

Отримані в результаті моделювання швидкості, 6–135 м/с, узгоджуються з оцінкою швидкостей пилу комети 9Р/Тетреl, виділеного зі штучно утвореного кратера під час місії Deep Impact. Комета тоді перебувала на відстані близько 1.5 а.о., і швидкості, досягнуті пилом після пилогазової взаємодії знаходилися в діапазоні від 10 до 600 м/с для частинок від 0.1 до 100 мкм [89].

### 5.3. Основні результати

Методом динамічного моделювання відтворено розподіл яскравості в пиловому хвості комети C/2012 S1 (ISON). Згідно з результатами модельних досліджень, спостережений хвіст сформовано пиловими частинками

розмірами від 0.5 до 16.5 мкм, швидкості яких становили від 17 до 130 м/с, показник степеня закону їх розподілу за радіусами дорівнює –2.5, максимальний вік пилинок становить 25 діб.

Також за допомогою динамічного моделювання на основі алгоритму Монте-Карло здійснено моделювання розподілу яскравості в пиловому хвості комети C/2012 K5 (LINEAR). Як результат моделювання визначено оптимальні модельні параметри – характеристики пилинок, що формують хвіст комети: максимальний вік (88 діб), швидкості (6–135 м/с), радіуси (0.7– 100 мкм) і степінь закону розподілу за розмірами (–2.4).

# РОЗДІЛ 6 ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

Розглянуті в дисертаційній роботі комети є довгоперіодичними і/або динамічно новими. Довгоперіодичні комети характеризуються періодами обертання більшими, ніж 200 років, різноманітністю нахилів площини орбіти, і більшим, у порівнянні з короткоперіодичними кометами, вмістом летючих речовин. Оорт і Шмідт виявили, що для довгоперіодичних комет характерна тенденція мати сильний неперервний спектр, особливо на значних відстанях від Сонця. Це зумовлено наявністю пилу, витісненого газами з льодяного компонента, яким вкриті зовнішні шари ядер довгоперіодичних комет [148]. Кілька довгоперіодичних комет проявляли сильно структуровану силікатну емісію. Відсутність сильного силікатного випромінювання В короткоперіодичних комет можна пояснити або різницею в складі комет хмари Оорта і пояса Койпера або, більш ймовірно, малою кількістю пилинок субмікронних розмірів [73]. Більшість розглянутих у дисертаційній роботі комет є «запиленими». Так, різними авторами повідомлялося про значне відношення пилу до газу в комах комет C/1995 O1 (Hale-Bopp), C/2006 P1 (McNaught), C/1910 A1 (Great January Comet), C/1957 P1 (Mrkos), C/1975 V1 (West), C/2011 L4 (PanSTARRS), дані по кометі C/2012 S1 (ISON) непевні, а по кометах C/1962 C1 (Seki–Lines), C/2012 K5 (LINEAR) – відсутні.

У таблиці 6.1 зібрано отримані моделюванням параметри пилинок, викинутих із усієї поверхні ядра всіх представлених у дисертаційній роботі комет (крім C/1910 A1 (Great January Comet), для якої наведено характеристики пилу, виділеного з активної області). Також подано значення ексцентриситетів, геліоцентричних відстаней комет на момент спостереження і параметр 1/a, за яким визначають належність комети до класу динамічно нових, де позначка в.в. означає, що відношення 1/a є від'ємною величиною. Для комети C/1995 O1 (Hale–Bopp) дані приведені за 7 березня 1997 року. Зірочками позначено комети зі смуговими структурами в хвості. Як видно з таблиці, кореляція між модельними параметрами та геліоцентричною відстанню відсутня, що, як уже зазначалося, ще раз свідчить про велику різноманітність та унікальність фізичних властивостей речовини, з якої утворена кожна комета.

Таблиця.6.1

	1/a, $10^{-4}$ a.o. <sup>-1</sup>	e	r <sub>obs</sub> .	Результати моделювання				
Комета			a.o.	∆t	а, мкм	γ	<i>V</i> , м/с	
1910 A1*	0.388	0.999995	0.4	9.37	0.2–0.6	-	300–590	
1962 C1*	B.B.	1.000003	0.4	7.11	0.3–10.4	-3	100-880	
2006 P1*	B.B.	1.000019	0.44	11.2	0.35-65.0	-3.5	33–456	
2011 L4*	B.B.	1.000033	0.46	47	0.22-82	-3.1	12–460	
2012 S1	B.B.	1.000201	1.45	25	0.5–16.6	-2.5	17–130	
1957 P1*	17.89	0.999365	0.51	35.6	1.5–20	-3	90–400	
1975 V1*	1.47	0.999971	0.35	7.46	0.2–10.845	-2.5	50-500	
1995 O1	53.8	0.995082	1.02	59	0.3–7.0	-3.7	155–650	
2012 K5	12.9	0.998526	1.5	88	0.7–100	-2.4	6–135	

Параметри розглянутих комет

Позначення: V – швидкості пилинок,  $\gamma$  – степінь закону розподілу за розмірами пилинок, a – радіуси пилинок,  $\Delta t$  – максимальний вік пилинок, e – ексцентриситет,  $r_{obs}$  – відстань від Сонця на момент отримання зображення.

Класичним визначенням «динамічно нової комети», тобто комети, яка вперше з'являється у внутрішніх областях нашої планетної системи, є умова, що вона повинна мати відношення  $1/a < 1 \times 10^{-4}$  а.о.<sup>-1</sup>, де *a* – велика піввісь [148]. Як видно з таблиці, з дев'яти розглянутих у рамках дисертаційної роботи комет, п'ять – динамічно нові, з них чотири мали смугові структури в хвостах, а одна, C/2012 S1 (ISON), припинила існування як активна комета. З іншого боку, з чотирьох розглянутих комет, які не належать до динамічно нових, дві – мали смугові структури, з них одна, С/1975 V1 (West), зазнала фрагментації ядра.

Треба зазначити, що класичне визначення «динамічно нової комети» грунтується на оцінці півосі комети в час спостереження, але воно не бере до уваги динамічну історію комети. Так, комети, які мають піввісь більшу, ніж 10 000 а.о. під час подорожі через простір, залежать від гравітаційного тяжіння від всієї видимої й невидимої речовини в Галактиці. Постійні галактичні збурення, а також стохастичний вплив окремих зірок, що проходять поблизу Сонця, можуть змінити орбіту комети. Щоб виявити справді «динамічно нові комети», потрібно, по-перше, розрахувати орбіту, яку комета мала до її входження у внутрішні області планетної системи, беручи до уваги гравітаційний вплив всіх планет і Місяця, а також релятивістські ефекти. Потім потрібно простежили еволюцію всіх комет із еліптичними орбітами, взявши до уваги гравітаційне тяжіння Галактики [49]. Отже, терміни динамічно "нові" й "старі" комети слід використовувати з обережністю, беручи до уваги минуле цих комет. Не варто називати "новою" комету, щодо якої ми не можемо бути впевнені, що вона не проникала в околиці Сонця, принаймні один раз у минулому.

Діапазон швидкостей вильоту пилинок розглянутих у роботі комет (табл. 6.1) набуває значень від кількох до кількох сотень метрів за секунду, радіуси пилинок – від 0.2 до 100 мкм. Визначені в результаті моделювання значення  $\gamma$  для розглянутих у роботі дев'ятьох комет теж мають досить широкий діапазон, –3.7...–2.4. Порівняємо отримані результати з наявними в літературі.

Степінь закону розподілу пилинок за розмірами,  $n(a)=a^{\gamma}$ , є характеристикою пилинок, яка часто використовується в наукових працях. Як повідомлялося, для багатьох комет  $\gamma = -3...-4$  [86], проте для комети Shoemaker–Levy 9 визначене за допомогою модельних досліджень значення цієї величини рівне –2.3 [70]. Згідно з теорією Мі розсіяння світла пиловими частинками, якщо припустити, що  $\gamma = -3$ , то найбільший вклад у розсіяння

світла роблять частинки радіусом 0.2 мікрометра<sup>15</sup>. Виміри потоків пилу під час проходження космічних апаратів поблизу ядер комет 1P/Halley (Giotto) та 81P/Wild (Stardust) показали наявність частинок, які мають дуже широкий діапазон розмірів з еквівалентними радіусами від нанометрів до міліметрів, і харктеризуюється приблизно степеневим законом із індексом від –2 до –4, залежно від розмірів пилинок і їх розташування в комі комети [108].

Пилинки з радіусами від 0.5 до 100 мкм, ймовірно, переважають [131], їх маса, як правило,  $10^{-14}...10^{-7}$  г [82]. Діапазон розмірів зерен кометного пилу, охоплює багато порядків; невелика частина з них може становити 0.1 міліметра і досягати навіть значень у кілька сантиметрів (прикладом є комета 67P/Churyumov–Gerasimenko [91]). Одним із основних результатів прольоту космічного апарату Giotto біля ядра комети 1P/Halley було виявлення великої кількості пилових частинок з розмірами у сотні нанометрів із дійсним розподілом за розмірами близьким до  $a^{-2}$  – до найдрібніших частинок, можливо, 0.05 мкм ( $10^{-17}$  грам) [68].

Як було зазначено раніше, за розрахунками Пробстейна усталена швидкість пилу має становити 0.36–0.74 км/с [154]. Класичною є робота Келлера і Томаса, які досліджували струмені, що виходили з ядра комети 1P/Halley, коли та знаходилася на геліоцентричній відстані 0.9 а.о. Було зроблено висновок, що пилові зерна приблизно мікронного розміру рухалися зі швидкостями у понад 0.4 км/с [96]. Як згадувалося раніше, швидкості пилу комети 9P/Tempel, виділеного зі штучно утвореного кратера під час місії Deep Impact знаходилися в діапазоні від 10 до 600 м/с з гаусівським максимумом близько 190 м/с [89]. Загалом же, субмікронних розмірів пилові частинки майже досягають швидкості вильоту газів (~ 1 км/с), в той час як сантиметрові – ледве досягають швидкості подолання гравітації ядра (~ 1 м/с) [69].

Отже, порівняння фізичних параметрів пилинок, отриманих у результаті описаних у дисертаційній роботі досліджень свідчить, що вони загалом

<sup>&</sup>lt;sup>15</sup> http://www.solar-system-school.de/lectures/jockers/comets3.pdf

знаходяться у встановлених іншими дослідженнями межах відповідних значень, що підтверджує достовірність отриманих результатів. Водночас, отримані фізичні параметри пилинок є цінним результатом у зв'язку з індивідуальною унікальністю кожної комети.

Розглянуті в рамках дисертаційної роботи комети зі смуговими структурами у хвостах мають досить широкий діапазон значень модельних і орбітальних параметрів (таблиця 6.2). Оскільки ймовірною інтерпретацією додаткової сили є взаємодія з локальними збуреннями міжпланетного магнітного поля здійснено порівняння таких параметрів, як одинадцятирічний цикл активності Сонця і геліоцентричної екліптичної широти комети на момент спостереження. Показано, що утворення смуг у хвостах комет не залежить від одинадцятирічного циклу активності Сонця і від геліоцентричної екліптичної широти комети. Натомість виявлено, що спільною рисою цих комет є досить вузький за значеннями діапазон відстаней від Сонця на момент спостереження, який становить 0.35–0.51 а.о., а також, згідно з дослідженнями інших авторів, їх відносно багата на пил кома.

Таблиця 6.2

	t <sub>obs</sub>	r <sub>obs</sub>	Pr	i	tq	q	L	S <sub>c</sub>
C/1910 A1	27.01.1910	0.4	8.5	139	17.01.1910	0.129	38.8	max–min
C/1957 P1	14.08.1957	0.51	15.4	94	01.08.1957	0.355	72.3	max
C/1962 C1	09.04.1962	0.4	3.42?	65	01.04.1962	0.031	19	max–min
C/1975 V1	04.03.1976	0.35	7.35	43	25.02.1976	0.197	42.6	min
C/2006 P1	24.01.2007	0.44	21	78	12.01.2007	0.171	-73.8	min
C/2011 L4	21.03.2013	0.46	17.2	84	10.03.2013	0.302	45.2	max

Параметри досліджених комет зі смугастими структурами

Позначення: t<sub>obs</sub> – дата отримання зображення, P<sub>r</sub> – період осьового обертання (години), і – нахил орбіти до площини екліптики (градуси), L – геометрична геліоцентрична екліптична широта комети (градуси), r<sub>obs</sub> – відстань від Сонця на момент отримання зображення (а.о.), t<sub>q</sub> – дата

проходження перигелію, q – перигелійна відстань (а.о.), S<sub>c</sub> – момент спостереження щодо 11-річного сонячного циклу.

У статті [161] наведено значення періодів обертання навколо своєї осі 24 комет, визначені різними методами з різним ступенем достовірності. Ці періоди обертання знаходяться в діапазоні від кількох годин (найменший у комети 133P/Elst–Pizarro, 3.471 години) до кількох діб. Пізніше були визначені періоди обертання комет 7P/Pons–Winnecke, 14P/Wolf, 92P/Sanguin [185], C/2001 K5 (LINEAR) [48], C/2004 Q2 (Machholz) [52], 67P/Churyumov–Gerasimenko [140], 103P/Hartley 2 [162], кентаврів (60558) 2000 EC<sub>98</sub> та (55637) 2002 UX<sub>25</sub> [157]. Визначені методом динамічного моделювання періоди осьового обертання комет (значення яких менші ніж одна доба) також знаходяться у зазначеному вище діапазоні, що схематично зображено на гістограмі (рис. 6.1).



**Рис. 6.1.** По осі х – осьові періоди обертання комет у добах, по осі у – кількість комет, які потрапляють у даний 6-годинний проміжок часу. Сірим позначено періоди комет, вказані у зазначених вище сімох наукових джерелах, білим кольором позначено періоди комет, визначені у цій дисертаційній роботі.

Отже, у результаті модельних досліджень комет зі смуговими структурами в їх хвостах зроблено наступні висновки: а) смуги утворюються

з пилових частинок, які мають більш малі радіуси з тих, які загалом формують хвіст цієї комети; б) смугові структури є короткочасним явищем, тривалість якого становить кілька діб; в) процес формування смуг починається близько до моменту проходження кометами перигелію, на відстанях від Сонця менше 0.355 а.о.; г) процесу утворення смуг має сприяти значна запиленість коми комети.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі наведено результати модельних досліджень пилових хвостів ряду комет, зокрема особливих морфологічних утворень – смугових структур. Нижче наведено основні висновки, зроблені в результаті досліджень.

- У результаті досліджень методом динамічного моделювання пилових хвостів вибраних довгоперіодичних комет отримано фізичні та динамічні характеристики пилових частинок: характерні розміри, розподіл за розмірами, швидкості, час життя. Визначені модельним шляхом характеристики пилу складно або неможливо отримати за допомогою інших методів досліджень, що підвищує цінність роботи.
- 2. Серед масиву спостережуваних комет вибрано ті, які в своїх пилових хвостах мали квазіперіодичні смугові структури. Була поставлена мета запропонувати механізм їх утворення, використовуючи однаковий підхід. Залежна від освітленості активність локальних областей, розміщених на поверхні ядра, яке обертається, розглянута в якості такого механізму. Дієвість механізму підтверджена у результаті модельних досліджень. Методом динамічного моделювання вдалося відтворити як загальну морфологію пилових хвостів, так і спостережувані чітко виражені смугові структури у пилових хвостах.
- 3. Через те, що кількість визначених (різними методами і з різним ступенем певності) періодів осьового обертання кометних ядер невелика, наведені в дисертаційній роботі (визначені методом динамічного моделювання) значення періодів осьового обертання ядер комет зі смуговими структурами є суттєвим доповненням до наявних даних.
- 4. Проведені модельні дослідження хвоста комети С/1995 О1 (Hale–Bopp) показали необхідність врахування процесу фрагментації пилових частинок. Запропоновано модельний алгоритм врахування фрагментації пилу. Методом динамічного моделювання з урахуванням фрагментації

# СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Астрономія. 11 клас: Книга для вчителя / Ю.В. Александров, А.М. Грецький, М.П. Пришляк. – Х.: Веста: Видавництво «Ранок», 2005. – С. 256.
- Всехсвятский С.К. О природе синхронных образований в хвостах комет / С.К. Всехсвятский // Астрономический журнал. – 1959. – 36, № 3. – С. 503–511.
- Голубев В.А. Колебания оси плазменного хвоста кометы Уэст и скорости солнечного ветра / В.А. Голубев // Кометный циркуляр. – 1977. – № 215. – С. 3.
- Карташева Т.А. Спектральная прозрачность атмосферы в САО АН СССР в 1974–1976 гг. / Т.А. Карташева, Н.М. Чунакова // Астрофиз. Исслед. Известия САО. 1978. Т. 10. С. 44–51.
- Харчук С.В., Корсун П.П., Микуш Г. Модельный анализ пылевого хвоста кометы Хейла-Боппа / С.В. Харчук, П.П. Корсун, Г. Микуш // Кинематика и физика небесных тел. – 2009. – Т. 25, № 4. – С. 268–276.
- Харчук С.В. Полосоподобные детали в пылевом хвосте кометы C/2006 P1 (Мак-Нота) / С.В. Харчук, П.П. Корсун // Кинематика и физика небесных тел. – 2010. – Т. 26, № 6. – С. 68–75.
- Харчук С.В. Смугоподібні структури в пилових хвостах комет / С.В. Харчук, П.П. Корсун // Abstracts of Astronomy and Space Physics in Taras Shevchenko National University of Kyiv: Int. Conf. dedicated to 165-th Anniversary of Astron. Observatory of T. Shevchenko National University of Kyiv and 105-th Anniversary of S.K. Vsekhsvyatsky. – 2010. – P. 69.
- Харчук С.В. Утворення смугових структур у пилових хвостах комет / С.В. Харчук, П.П. Корсун // Вісник Астрономічної школи. – 2012. – Т. 8, № 1. – С. 80–86.
- Харчук С.В. Утворення смугоподібних структур в пилових хвостах комет
   / С.В. Харчук // Тези доповідей міжнародної наукової конференції

«Астрономічна школа молодих вчених», Кам'янець-Подільський. – 2012. – С. 63.

- Харчук С.В. Модельний аналіз пилового хвоста комети C/2011 L4 (PANSTARRS) / С.В. Харчук, П.П. Корсун // Тези доповідей міжнародної наукової конференції «Астрономічна школа молодих вчених», Кіровоград. – 2014. – С. 68.
- Харчук С.В. Модель пилового хвоста комети C/2011 L4 (PANSTARRS) / С.В. Харчук, П.П. Корсун // Кинематика и физика небесных тел. – 2015. – Т. 31, № 1. – С. 52–57.
- Харчук С.В. Моделирование пылевого хвоста кометы C/2012 S1 (ISON) по результатам наблюдений / С.В. Харчук, А.В. Иванова, П.П. Корсун, Н.Н. Киселев, А.С. Москвитин // Астрономический вестник. – 2015. – Т. 49, № 5. – С. 353–358.
- Харчук С.В. Модельний аналіз пилового хвоста комети C/2012 K5 (LINEAR) / С.В. Харчук, О.В. Іванова, П.П. Корсун, О.Р. Баранський // Кинематика и физика небесных тел. – 2015. – Т. 31, № 5. – С. 30–36.
- Ahearn M.F. Evaporation of ices from Comet West / M.F. Ahearn, C.H. Thurber, R.L. Millis // Astron. J. – 1977. – Vol. 82. – P. 518–524.
- 15. Akabane T. The secondary tail of Comet 1976 VI West / T. Akabane // Astronomical Society of Japan. 1983. Vol. 35, No. 4. P. 565–578.
- Arrhenius S. Über die Ursache der Nordlichter / S. Arrhenius // Physikalische Zeitschrift. – 1901. – Vol. 2. – P. 81–87.
- Bessel F.W. Beobachtungen ueber die physische Beschaffenheit des Halley's Kometen und dadurch veranlasste Bemerkungen / F.W. Bessel // Astronomische Nachrichten. – 1836. – Vol. 13, Iss. 13–15. – P. 185–232.
- Beyer M. Physische Beobachtungen von Kometen. XI / M. Beyer // Astronomische Nachrichten. – 1957. – Vol. 284, Iss. 5. – P. 241–262.
- Biver N. Evolution of the outgassing of Comet Hale-Bopp (C/1995 O1) from radio observations / [N. Biver, D. Bockelee-Morvan, P. Colom, et al.] // Science. – 1997. – Vol. 275, No. 5308. – P. 1915–1918.

- 20. Bockelée-Morvan D. New molecules found in comet C/1995 O1 (Hale-Bopp). Investigating the link between cometary and interstellar material / [D. Bockelée-Morvan, D.C. Lis, J.E. Wink, et al.] // Astron. Astrophys. – 2000. – Vol. 353. – P. 1101–1114.
- 21. Bockelée-Morvan D. Turbulent radial mixing in the solar nebula as the source of crystalline silicates in comets / [D. Bockelée-Morvan, D. Gautier, F. Hersant, et al.] // Astron. Astrophys. 2002. Vol. 384, No. 3. P. 1107–1118.
- Boehnhardt H. Electrostatic charging and fragmentation of dust near P/Giacobini-Zinner and P/Halley / H. Boehnhardt, Fechtig H. // Astron. Astrophys. – 1987. – Vol. 187, No. 1–2. – P. 824–828.
- Bond P. Exploring the Solar System / P. Bond // Chichester: John Wiley & Sons, 2012. – P. 456.
- 24. Bouwman J. The origin of crystalline silicates in the Herbig Be star HD100546 and in comet Hale-Bopp / J. Bouwman, A. de Koter, C. Dominik, L.B.F.M. Waters // Astron. Astrophys. 2003. Vol. 401, No. 2. P. 577–592.
- Brownlee D.E. Interplanetary dust-Possible implications for comets and presolar interstellar grains / D.E. Brownlee // IAU Colloq. 52: Protostars and Planets. – 1978. – Vol. 1. – P. 134–150.
- Brownlee D.E. Cosmic dust Collection and research / D.E. Brownlee // Annual review of earth and planetary sciences. – 1985. – Vol. 13. – P. 147– 173.
- 27. Brownlee D. Comet 81P/Wild 2 Under a Microscope / [D. Brownlee, P. Tsou, J. Aléon, et al.] // Science. 2006. Vol. 314, Iss. 5806. P. 1711–1716.
- Burnham R. Great Comets / R. Burnham // Cambridge: Cambridge University Press, 2000. – P. 228.
- 29. Capaccioni F. The organic-rich surface of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko as seen by VIRTIS/Rosetta / [F. Capaccioni, A. Coradini,

G. Filacchione, et al.] // Science. – 2015. – Vol. 347, Iss. 6220. – 4 pp. – (article id. aaa0628).

- Cashwell E.D. A practical manual on the Monte Carlo method for random walk problems / E.D. Cashwell, C.J. Everett. – London: Pergamon, 1959. – P. 164.
- Chörny G.F. Estimations of the energy quasi-integral of the restricted threebody problem / G.F. Chörny // Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy. - 2005. – Vol. 21, Iss. 5. – P. 500–503.
- Chörny G.F. Quasiintegrals of the photogravitational eccentric restricted threebody problem with Poynting Robertson drag / G.F. Chörny // Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy. – 2007. – Vol. 97, Iss. 4. – P. 229–248.
- Churyumov K.I. Polarimetry of the near nuclear region of comet Hale-Bopp (C/1995 O1) / K.I. Churyumov, S.A. Borysenko, O.M. Evtushevsky, F.I. Kravtsov // Abstracts JENAM-98, 7th European & Annual Czech Astronomical Society Conference, Praha. – 1998.
- 34. Clark B.C. Systematics of the CHON and other light-element particle populations in Comet P/Halley / B.C. Clark, L.W. Mason, J. Kissel // Astron. Astrophys. – 1987. – Vol. 187, No. 1–2. – P. 779.
- Cochran A. Review of the advances in comet studies / A. Cochran // Proc. Asteroids, Comets, Meteors. – 2014. – Vol. 1. – P. 107.
- Combi M.R. The Fragmentation of Dust in the Inner Comae of Comets / M.R. Combi // Bulletin of the American Astronomical Society. – 1993. – Vol. 25. – P. 1066–1067.
- Combi M.R. The fragmentation of dust in the innermost comae of comets: Possible evidence from ground-based images / M.R. Combi // Astron. J. – 1994. – Vol. 108, No. 1. – P. 304–312.
- Combi M.R. Dust-Gas Interrelations In Comets: Observations And Theory / [M.R. Combi, K. Kabin, D.L. Dezeeuw, et al.] // Earth, Moon, and Planets. – 1997. – Vol. 79, Iss. 1. – P. 275–306.
- 39. Combi M.R. Water Production in Comets C/2011 L4 (PanSTARRS) and C/2012 F6 (Lemmon) from observations with SOHO/SWAN / [M.R. Combi,

J.-L. Bertaux, E. Quémerais, et al.] // Astron. J. – 2014. – Vol. 147, Iss. 6. – 7 pp. – (article id. 126).

- 40. Cordiner M.A. Mapping the Release of Volatiles in the Inner Comae of Comets C/2012 F6 (Lemmon) and C/2012 S1 (ISON) Using the Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array / [M.A. Cordiner, A.J. Remijan, J. Boissier, et al.] // The Astrophysical Journal Letters. 2014. Vol. 792. Iss. 1. 6 pp. (article id. L2).
- 41. Cremonese G. Neutral Sodium from Comet Hale-Bopp: A Third Type of Tail
  / [G. Cremonese, H. Boehnhardt, J. Crovisier, et al.] // Astrophys. J. 1997. –
  Vol. 490, Iss. 2. 2 pp. (L199–L202).
- 42. Curdt W. Scattered Lyman-α radiation of comet 2012/S1 (ISON) observed by SUMER/SOHO / [W. Curdt, H. Boehnhardt, J.B. Vincent, et al.] // Astron. Astrophys. 2014. Vol. 567. 4 pp. (id.L1).
- Dahlburg J.P. SECCHI HI-1B First Light / [J.P. Dahlburg, G.A. Doschek, J.D. Kurfess, et al.] // Naval Research Laboratory Space Science Division Newsletter: 01/2007. – P. 8.
- 44. Dello Russo N. Comet C/2006 P1 (McNaught) / N. Dello Russo,
  R.J. Vervack Jr., H.A. Weaver, C.M. Lisse // IAU Circ. 2007. No. 8816.
- 45. Dello Russo N. Infrared measurements of the chemical composition of C/2006 P1 McNaught // N. Dello Russo, R.J. Vervack, H.A. Weaver, C.M. Lisse / Icarus. – 2009. – Vol. 200, Iss. 1. – P. 271–279.
- 46. Delsemme A.H. Chemical composition of cometary nuclei / A.H. Delsemme // Comets / ed. Wilkening L.L. – Tucson: University of Arizona Press, 1982. – Vol. 1. – P. 85–130.
- 47. DiSanti M. The chemical composition of comet C/2012 S1 (ISON) between 1.2 au and 0.35 au from the Sun / [M. DiSanti, B. Bonev, E. Gibb, et al.] // Proc. Asteroids, Comets, Meteors, Helsinki. 2014. P. 157.
- 48. Drahus M. Non-constant rotation period of Comet C/2001 K5 (LINEAR) / M. Drahus, W. Waniak // Icarus. 2006. Vol. 185, No. 2. P. 544–557.

- 49. Dybczynski P.A. Dynamically New Comets in the Solar System / P.A. Dybczynski, H. Pretka-Ziomek // Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy. 2001. Vol. 81, No. 1–2. P. 305–306.
- Eicher D.J. COMETS!: Visitors from Deep Space / D.J. Eicher // Cambridge: Cambridge University Press, 2013. – P. 76
- Elsila J.E. Cometary glycine detected in samples returned by Stardust / J.E. Elsila, D.P. Glavin, J.P. Dworkin // Meteoritics & Planetary Science. – 2009. – Vol. 44, No. 9. – P. 1323–1330.
- 52. Farnham T.L. Cyanogen Jets and the Rotation State of Comet Machholz (C/2004 Q2) / T.L. Farnham, N.H. Samarasinha, B.E.A. Mueller, M.M. Knight // The Astron. J. – 2007. – Vol. 133, No. 5. – P. 2001–2007.
- 53. Ferrín I. The location of Oort Cloud comets C/2011 L4 Panstarrs and C/2012 S1 ISON on a comet evolutionary diagram / I. Ferrín // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2014. – Vol. 442, Iss. 2. – P. 1731–1754.
- 54. Fernandez J.A. Nature and origin of comets / J.A. Fernandez, K. Jockers // Report on progress in physics. – 1983. – Vol. 46. – P. 665–772.
- 55. Fernández Y.R. The Nucleus of Comet Hale-Bopp (C/1995 O1): Size and Activity / Y.R. Fernández // Earth Moon and Planets. 2000. Vol. 89, No. 1. P. 3–25.
- Finson M.L. A theory of dust comets I Model and equations / M.L. Finson, R.F. Probstein // Astrophys. J. – 1968. – Vol. 154. – P. 327–380.
- 57. Foster M.J. Three-dimensional cometary dust coma modelling in the collisionless regime: strengths and weaknesses / M.J. Foster, S.F. Green // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2007. Vol. 377, Iss. 3. P. 1064–1084.
- Fulle M. A new approach to the Finson-Probatein method of interpreting cometary dust tails / M. Fulle // Astron. Astrophys. 1987. Vol. 171, No. 1–2. P. 327–335.

- Fulle M. Discovery of the atomic iron tail of comet McNaught using the heliospheric imager on STEREO / [M. Fulle, F. Leblanc, R.A. Harrison, et al.]
   // The Astrophysical Journal. – 2007. – Vol. 661, No. 1. – P. L93–L96.
- 60. Fulle M. Evaluation of cometary dust parameters from numerical simulations

  Comparison with an analytical approach and the role of anisotropic emissions
  M. Fulle // Astron. Astrophys. 1989. Vol. 217, No. 1–2. P. 283–297.
- Fulle M. A dust-tail model based on Maxwellian velocity distribution / M. Fulle // Astron. Astrophys. – 1992. – Vol. 265, No. 2. – P. 817–824.
- 62. Fulle M. The Preperihelion Dust Environment of C/1995 O1 Hale-Bopp from 13 to 4 AU / M. Fulle, G. Cremonese, C. Böhm // The Astron. J. 1998. Vol. 116, No. 3. P. 1470–1477.
- Fulle M. Motion of cometary dust / M. Fulle // Comets II / eds. M. Festou, H.U. Keller, H. A. Weaver. – Tucson: University of Arizona Press, 2004. – P. 565–575.
- 64. Fulle M. Potassium Detection and Lithium Depletion in Comets C/2011 L4 (Panstarrs) and C/1965 S1 (Ikeya-Seki) / M. Fulle, P. Molaro, L. Buzzi, P. Valisa // The Astrophysical Journal Letters. 2013. Vol. 771, No. 2. 4 pp. (id: L21).
- Gargaud M. Encyclopedia of Astrobiology/ M. Gargaud // Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2011. – P. 333.
- Goesmann F. Organic compounds on comet 67P/Churyumov-Gerasimenko revealed by COSAC mass spectrometry / [F. Goesmann, H. Rosenbauer, J.H. Bredehöft, et al.] // Science. – 2015. – Vol. 349, No. 6247. – 3 pp. – (id: aab0689).
- Gosling J.T. Encounter of Ulysses with Comet McNaught / [J.T. Gosling, M. Neugebauer, D.J. McComas, et al.] // American Geophysical Union, Spring Meeting. – 2007. – (abstract #SH23C-05).
- Greenberg J.M. From interstellar dust to comets A unification of observational constraints / J.M. Greenberg, J.I. Hage // Astrophys. J. 1990. Vol. 361, No. 1. P. 260–274.

- Grün E. Dust / E. Grün, E.K. Jessberger // Physics and Chemistry of Comets / ed. Huebner W.F. – Berlin & New York: Springer-Verlag, 1990. – P. 113–176.
- 70. Hahna J.M. Comet Shoemaker-Levy 9 Dust Size and Velocity Distributions / J.M. Hahna, T.W. Rettig // Astron. Astrophys. 2000. Vol. 146, No. 2. P. 501–513.
- Hadamcik E. Dust evolution of comet C/1995 O1 (Hale-Bopp) by imaging polarimetric observations / E. Hadamcik, A.C. Levasseur-Regourd // Astron. Astrophys. – 2003. – Vol. 403, No. 2. – P. 757–768.
- Hanner M.S. The nature of cometary dust from remote sensing / M.S. Hanner
   // Proc. Cometary exploration, Budapest. 1982. Vol. 2. P. 1–22.
- Hanner M.S. Composition and Mineralogy of Cometary Dust / M.S. Hanner, J.P. Bradley // Comets II / eds. Festou M.C., Keller H.U., Weaver H.A. – Tucson: University of Arizona Press, 2004. – P. 555–564.
- 74. Hanner M.S. The Mineralogy of Cometary Dust / M.S. Hanner, M.E. Zolensky
   // Astromineralogy / ed. T. Henning. Berlin: Springer, 2010. P. 203–232.
- Harker D.E. Grain Properties of Comet C/1995 O1 (Hale-Bopp) / D.E. Harker,
   D.H. Wooden, C.E. Woodward, C.M. Lisse // Astrophys. J. 2002. Vol. 580,
   No. 1. P. 579–597.
- 76. Hayward T.L. Thermal infrared imaging and spectroscopy of comet Hale-Bopp (C/1995 O1) / T.L. Hayward, M.S. Hanner, Z. Sekanina // Astrophys. J. 2000. Vol. 538, No. 1. P. 428–455.
- 77. A'Hearn M.F. Deep Impact: Excavating Comet Tempel 1 / [M.F. A'Hearn, M.J.S. Belton, W.A. Delamere, et al.] // Science. 2005. Vol. 310, Iss. 5746. P. 258–264.
- Hoover R.B. Astrobiology of Comets / [R.B. Hoover, E.V. Pikuta, N.C. Wickramasinghe, et al.] // Proc. Instruments, Methods, and Missions for Astrobiology VIII, Denver. – 2004. – Vol. 555. – P. 93–106.
- Horanyi M. Trajectories of charged dust grains in the cometary environment / M. Horanyi, D. A. Mendis // Astrophys. J. – 1985. – Vol. 294, No. 1. – P. 357– 368.
- Horner J. The populations of comet-like bodies in the Solar system / J. Horner, N.W. Evans, M.E. Bailey, D.J. Asher // Monthly Notice of the Royal Astronomical Society. – 2003. – Vol. 343, Iss. 4. – P. 1057–1066.
- 81. Hörz F. Impact Features on Stardust: Implications for Comet 81P/Wild 2 Dust / [F. Hörz, R. Bastien, J. Borg, et al.] // Science. 2006. Vol. 314, Iss. 5806. P. 1716–1719.
- 82. Hughes D.W. On the velocity of large cometary dust particles / D.W. Hughes
  // Planetary and Space Science. 2000. Vol. 48, No. 1. P. 1-7.
- Jakub C. Pre-perihelion photometric behavior of comet C/2012 S1 (ISON) and its future prospect / C. Jakub // arXiv. – 2013. – 14 pp. – (arXiv:1311.2653).
- 84. Jambor B.J. The Split Tail of Comet Seki–Lines / B.J. Jambor // Astrophys. J. 1973. Vol. 185. P. 727–736.
- 85. Jessberger E.K. Aspects of the major element composition of Halley's dust / E.K. Jessberger, A. Christoforidis, J. Kissel // Nature. 1988. Vol. 332. P. 691–695.
- Jockers K. Observations of scattered light from cometary dust and their interpretation / K. Jockers // Earth, Moon and Planets. 1997. Vol. 79, Iss. 1. P. 221–245.
- 87. Jones G.H. Comet C/2006 P1 (McNaught): observations of dust and neutral species by the STEREO and SOHO spacecraft / [G.H. Jones, J.S. Morrill, K. Battams, et al.] // Asteroids, Comets, Meteors. 2008. 1 pp. (id: 8327).
- Jorda L. The Rotational Parameters of Hale-Bopp (C/1995O1) from Observations of the Dust Jets at Pic Du Midi Observatory / [L. Jorda, K. Rembor, J. Lecacheux, et al.] // Earth, Moon and Planets. – 1997. – Vol. 77, No. 3. – P. 167–180.
- 89. Jorda L. Properties of the dust cloud caused by the Deep Impact experiment / [L. Jorda, P. Lamy, G. Faury, et al.] // Icarus. 2007. Vol. 187, Iss. 1. P. 208–219.

- 90. Ibadov S. X-ray emission from dusty comets as an index of hot-plasma generation / S. Ibadov // Akademiia Nauk Tadzhikskoi SSR, Doklady. 1984.
   Vol. 27, No. 9. P. 500–502.
- 91. Ishiguro M. Cometary dust trail associated with Rosetta mission target: 67P/Churyumov Gerasimenko / M. Ishiguro // Icarus. – 2008. – Vol. 193, Iss. 1. – P. 96–104.
- Ivanova A.V. Modeling of heating and intensification of sublimation from a cometary active regions / A.V. Ivanova, L.M. Shulman // Proc. of Asteroids, Comets, Meteors. 2002. P. 55–58.
- 93. Ivanova O. Photometry of Comet C/2011 L4 (PANSTARRS) at 4.4–4.2 AU heliocentric distances / O. Ivanova, S. Borysenko, A. Golovin // Icarus. 2014. Vol. 227. P. 202–205.
- 94. Kant I. Allgemeine Naturgeschichte und Theorie des Himmels / I. Kant // Königsberg und Leipzig: Fischer, 1755. – P. 200.
- 95. Keller H.U. Comet P/Halley's nucleus and its activity / [H.U. Keller, W.A. Delamere, W.F. Huebner, et al.] // Astron. Astrophys. 1987. Vol. 187, No. 1–2. P. 807–823.
- 96. Keller H.U. On the rotation axis of Comet Halley / H.U. Keller, N. Thomas // Nature. – 1988. – Vol. 333. – P. 146–148.
- 97. Keller H.U. In situ observations of cometary nuclei / H.U. Keller, D. Britt,
  B.J. Buratti, N. Thomas // Comets II / eds. Festou M.C., Keller H.U.,
  Weaver H.A. Tucson: University of Arizona Press, 2004. P. 211–222.
- 98. Kelley M.S. Crystalline silicates and the spectacular comet C/2006 P1 (McNaught) / M.S. Kelley, D.E. Harker, D.H. Wooden, C.E. Woodward // Bull. Amer. Astron. Soc. – 2007. – Vol. 39. – P. 827.
- Kelley M.S. The Pre-Perihelion Size of the Nucleus of Comet C/2012 S1 (ISON) / [M.S. Kelley, J. Li, M.J. Mutchler, et al.] // American Astronomical Society Meeting. – 2014. – Vol. 223. – (abstract #247.15).

- 100. Kharchuk S.V. Dust Tail Modelling for Comet Hale-Bopp / S.V. Kharchuk // Abstracts of 15th Young Scientists Conference on Astronomy and Space Physics, Kyiv. – 2008. – P. 14–19.
- 101. Kharchuk S.V. Striated Features in the Dust Tail of Comet C/2006 P1 (McNaught) / S.V. Kharchuk // Abstracts of 16th Young Scientists Conference on Astronomy and Space Physics, Kyiv. – 2009. – P. 73–74.
- 102. Kiselev N.N. Aperture polarimetry and photometry of comet Hale-Bopp / N.N. Kiselev, F.P. Velichko // Earth Moon and Planets. 1997. Vol. 78, Iss. 1. P. 347–352.
- 103. Kiselev K. Comparative study of the dust polarimetric properties in split and normal comets / K. Kiselev, K. Jockers, V. Rosenbush // Earth, Moon and Planets. – 2002. – Vol. 60, No. 1. – P. 167–176.
- 104. Kissel J. The organic component in dust from comet Halley as measured by the PUMA mass spectrometer on board Vega 1 / J. Kissel, F.R. Kruger // Nature. 1987. Vol. 326, Iss. 6115. P. 755–760.
- 105. Knight M. COMET C/2012 S1 (ISON) / [M. Knight, K. Battams, S. Nakano, et al.] // Central Bureau Electronic Telegrams. – 2013. – 3731, 1.
- 106. Knight M.M. Will Comet ISON (C/2012 S1) Survive Perihelion? / M.M. Knight, K.J. Walsh // The Astrophysical Journal Letters. 2013. Vol. 776, Iss. 1. 5 pp. (article id. L5).
- 107. Knight M.M. Preliminary Analysis of SOHO/STEREO Observations of Sungrazing Comet ISON (C/2012 S1) around Perihelion / M.M. Knight, K. Battams // The Astrophysical Journal Letters. –2014. – Vol. 782, No. 2. – 5 pp. – (article id. L37).
- 108. Kolokolova L. Comet dust as a mixture of aggregates and solid particles: model consistent with ground-based and space-mission results / L. Kolokolova, H. Kimura // Earth, Planets and Space. 2010. Vol. 62, No. 1. P. 17–21.
- 109. Konno I. A Model of Dust Fragmentation in Near-Nucleus Jet-like Features in Comet P/Halley / I. Konno, W.F. Huebner, D.C. Boice // Icarus. – 1993. – Vol. 101, No. 1. – P. 84–94.

- 110. Korsun P.P. Distant activity of comet C/2001 K5 (Linear) / P.P. Korsun // Kinematics and Physics of Celestial Bodies. Suppl. Ser. – 2005. – Vol. 5. – P. 465–471.
- 111. Korsun P.P. Dust tail of the active distant Comet C/2003 WT42 (LINEAR) studied with photometric and spectroscopic observations / [P.P. Korsun, I.V. Kulyk, O.V. Ivanova, et al.] // Icarus. 2010. Vol. 210, Iss. 2. P. 916–929.
- 112. Koutchmy S. Propagating inhomogeneities in the dust tail of comet West 1975
  / S. Koutchmy, P. Lamy // Nature. 1978. Vol. 273. P. 522–524.
- 113. Koutchmy S. Comet West 1975n. I Observations near and after perihelion passage / [S. Koutchmy, P. Coupiac, D. Elmore, et al.] // Astron. Astrophys. – 1979. – Vol. 72, No. 1–2. – P. 45–49.
- 114. Kuchar T.A. Observations of a comet tail disruption induced by the passage of a CME / [T.A. Kuchar, A. Buffington, C.N. Arge, et al.] // Journal of Geophysical Research. – 2008. – Vol. 113, Iss. A4. – P. 1–11.
- 115. Lamy P.L. Comet West 1975n. II Study of the striated tail / P.L. Lamy,
  S. Koutchmy // Astron. Astrophys. 1979. Vol. 72, No. 1–2. P. 50–54.
- 116. Lamy P.L. Hubble Space Telescope Observations of the Nucleus of Comet C/2012 S1 (ISON) / P.L. Lamy, I. Toth, H.A. Weaver // The Astrophysical Journal Letters. – 2014. –Vol. 794, Iss. 1. – article id. L9. – 6 pp.
- 117. Landolt A.U. UBVRI photometric standard stars in the magnitude range 11.5– 16.0 around the celestial equator / A.U. Landolt // Astron. J. – 1992. – Vol. 104, No. 1. – P. 340–371, 436–491.
- 118. Landsman W.B. The IDL Astronomy User's Library Astronomical / W.B. Landsman // Data Analysis Software and Systems II. – 1993. – Vol. 52. – P. 246–248.
- 119. Larson S.M. Coma morphology and dust-emission pattern of periodic Comet Halley. I - High-resolution images taken at Mount Wilson in 1910 / S.M. Larson, Z. Sekanina // Astron. J. – 1984. – Vol. 89. – P. 571–578.

- 120. Leblanc F. Comet McNaught C/2006 P1: observation of the sodium emission by the solar telescope THEMIS // [F. Leblanc, M. Fulle, A.A. López et al.] / Astronomy and Astrophysics. – 2008. – Vol. 482, Iss. 1. – P.293–298.
- 121. Lederer S.M. Evidence for chemical heterogeneity in the nucleus of C/1995 O1 (Hale-Bopp) / S.M. Lederer, H. Campins // Earth, Moon and Planets. – 2002. – Vol. 90, No. 1. – P. 381–389.
- 122. Li A. A comet dust model for the beta Pictoris disk / A. Li, J.M. Greenberg // Astron. Astrophys. – 1998. – Vol. 331, No. 1. – P. 291–313.
- 123. Li J.-Y. Characterizing the Dust Coma of Comet C/2012 S1 (ISON) at 4.15 AU from the Sun / [J.-Y. Li, M.S.P. Kelley, M.M. Knight, et al.] // The Astrophysical Journal Letters. 2013. Vol. 779, No. 1. 5 pp. (id. L3).
- 124. Lien D.J. Optical properties of cometary dust / D.J. Lien // Comets in the post-Halley era. –1991. – Vol. 2. – P. 1005–1041.
- 125. Lisse C. High Latitude Charge Exchange X-rays from Comet PANSTARRS in the Cold Polar Solar Wind / C. Lisse // Chandra proposal. – 2012. – 1 p. – (ID #14108442).
- 126. Marsden B.G. Comets in 1975 / B.G. Marsden, E. Roemer // Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society. – 1978. – Vol. 19. – P. 59–89.
- 127. Mazets E.P. Comet Halley dust environment from SP-2 detector measurements
  / [E.P. Mazets, R.L. Aptekar, S.V. Golenetskii, et al.] // Nature. 1986. –
  Vol. 321. P. 276–278.
- McClure A. Rayed Structure in the Tail of Comet Mrkos, 1957 D / A. McClure,
  W. Liller // Proceedings of the Astronomical Society of the Pacific. 1958. –
  Vol. 70. No. 415. P. 404–406.
- McKay A.J. The CO2 Abundance in Comets C/2012 K1 (PanSTARRS), C/2012 K5 (LINEAR), and 290P/Jager as Measured with Spitzer / A.J. McKay, M.S.P. Kelley, A.L. Cochran, et al. // arXiv. – 2015. – C. 1–54. – (arXiv:1510.02165).
- 130. McDonnell J.A.M. The dust distribution within the inner coma of Comet P/Halley 1982i: Encounter by Giotto's impact detectors / [J.A.M. McDonnell,

W.M. Alexander, W.M. Burton, et al.] // Astron. Astrophys. – 1987. – Vol. 187, No. 1–2. – P. 719–741.

- 131. McDonnell J.A.M. Physical properties of cometary dust / J.A.M. McDonnell,
  P. L. Lamy, G.S. Pankiewicz // IAU Colloq. 116: Comets in the post-Halley
  era. 1991. Vol. 2. P. 1043–1073.
- 132. Meech K.J. Outgassing Behavior of C/2012 S1 (ISON) from 2011 September to 2013 June / [K.J. Meech, B. Yang, J. Kleyna, et al.] // The Astrophysical Journal Letters. – 2013. – Vol. 776, No. 2. – 6 pp. – (article id. L20).
- 133. Meinert C. N-(2-Aminoethyl)glycine and Amino Acids from Interstellar Ice Analogues / [C. Meinert, J.J. Filippi, P. de Marcellus, et al.] // ChemPlusChem. – 2012. – Vol. 77, No. 3. – P. 186–191.
- 134. Merlino R.L. Dusty plasmas and applications in space and industry /
   R.L. Merlino // Plasma Physics Applied. 2006. Vol. 81. P. 73–110.
- 135. Michalsky J.J. Optical polarimetry of Comet West 1976 VI / J.J. Michalsky // Icarus. – 1981. – Vol. 47. – P. 388–396.
- 136. Min M. The composition and size distribution of the dust in the coma of comet Hale-Bopp / [M. Min, J.W. Hovenier, A. de Koter, et al.] // Icarus. 2005. Vol. 179, No. 1. P. 158–173.
- 137. Moreno F. Irregular particles in comet C/1995 O1 Hale-Bopp inferred from its mid-infrared spectrum / F. Moreno, O. Munoz, R. Vilaplana, A. Molina // Astrophys. J. – 2003. – Vol. 595, No. 1. – P. 522–530.
- 138. Morris Ch. Comet West's Fine Performance / Ch. Morris // Sky and Telescope.
   1976. Vol. 51, No. 5. P. 312–321.
- 139. Morse A. Low CO/CO<sub>2</sub> ratios of comet 67P measured at the Abydos landing site by the Ptolemy mass spectrometer / [A. Morse, O. Mousis, S. Sheridan, et al.] // Astronomy & Astrophysics. 2015. 4 pp. (manuscript no. aa26624-15).
- 140. Mottola S. The rotation state of 67P/Churyumov-Gerasimenko from approach observations with the OSIRIS cameras on Rosetta / [S. Mottola, S. Lowry, C. Snodgrass, et al.] // Astron. Astrophys. 2014. Vol. 569. 5 pp. (id.L2).

- 141. Mumma M.J. Parent Volatiles in Comet 9P/Tempel 1: Before and After Impact
  / [M.J. Mumma, M.A. DiSanti, K. Magee-Sauer, et al.] // Science. 2005. –
  Vol. 310, No. 5746. P. 270–274.
- 142. Ney E.P. Comet West and the scattering function of cometary dust / E.P. Ney,K.M. Merrill // Science. 1976. Vol. 194, No. 4269. P. 1051–1053.
- 143. Nguyen-Huu-Doan Le spectre de la Comès 1957 d / Nguyen-Huu-Doan //
   Journal des Observateurs. 1960. Vol. 43. P. 61–68.
- 144. Nikolov P. Post-perihelion narrowband imaging of comet C/2011 L4 (PanSTARRS) / P. Nikolov, G. Borisov, T. Bonev // Proc. Asteroids, Comets, Meteors, Helsinki. – 2014. –Vol. 1. – P. 386.
- 145. Nishioka K. I Finite lifetime fragment model for synchronic band formation in dust tails of comets / K. Nishioka, J. Watanabe // Icarus. 1990. Vol. 87, No. 2. P. 403–411.
- 146. Notni P. Eigenschaften und Bewegung der Staubteilchen in Koma und Schweif von Kometen / P. Notni // Veröffentlichungen der Sternwarte Babelsberg. 1964. Vol. 15, No. 1. P. 1–51.
- 147. Notni P. The striae in the dust tails of great comets A comparison to various theories / P. Notni, W. Thaenert // Astronomische Nachrichten. 1988. Vol. 309, No. 2. P. 133–146.
- 148. Oort J.H. Differences between new and old comets / J.H. Oort, M. Schmidt // Bulletin of the Astronomical Institutes of the Netherlands. – 1951. – Vol. 11, No. 419. – P. 259–270.
- 149. Opitom C. Comets C/2012 F6 (Lemmon) and C/2011 L4 (Panstarrs) / C. Opitom, E. Jehin, J. Manfroid, M.Gillon // Central Bureau Electronic Telegrams. 2013. No. 3433.
- 150. Orchiston W. Exploring the History of New Zealand Astronomy: Trials, Tribulations, Telescopes and Transits / W. Orchiston // Springer International Publish, 2015. – P. 3.

- 151. Owens A. Evidence for Dust-related X-Ray Emission from Comet C/1995 O1 (Hale-Bopp) / [A. Owens, A.N. Parmar, T. Oosterbroek, et al.] // Astrophys. J. – 1998. – Vol. 493, No. 1. – P. L47–L51.
- 152. Pokrowski K. Synchronen im Schweife des Kometen 1910a / K. Pokrowski // Publikationen der Kaiserlichen Universitäts-Sternwarte zu Jurjew (Dorpat). – Vol. 21. – 1911. P. 29–37.
- 153. Poomvises W. Determination of the heliospheric radial magnetic field from the Standoff Distance of a CME-driven shock Observed by the STEREO spacecraft
  / [W. Poomvises, N. Gopalswamy, S. Yashiro, et al.] // Astron. J. 2012. Vol. 758, Iss. 2. 6 pp. (article id. 118).
- 154. Probstein R.F. The dusty gasdynamics of comet heads / R.F. Probstein // Problems of Hydrodynamics and Continuum Mechanics / ed. M.A. Lavrentiev.
  – Philadelphia: Soc.Ind.Appl.Math. – 1969. – P. 568–583.
- 155. Raouafi N.-E. Dynamics of High-Velocity Evanescent Clumps [HVECs] Emitted from Comet C/2011 L4 as Observed by STEREO / [N.-E. Raouafi, C.M. Lisse, G. Stenborg, et al.] // arXiv. – 2015. – 10 pp. – (preprint / arXiv:1507.02579).
- 156. Righini G. The abundance of isotopes in the solar atmosphere / G. Righini // The Observatory. – Vol. 82. – 1962. – P. 106–107.
- 157. Rousselot P. Photometric study of Centaur (60558) 2000 EC 98 and transneptunian object (55637) 2002 UX 25 at different phase angles / P. Rousselot, J.-M. Petit, F. Poulet, A. Sergeev // Icarus. 2005. Vol. 176, No. 2. P. 478–491.
- 158. Rubin M. Molecular nitrogen in comet 67P/Churyumov-Gerasimenko indicates a low formation temperature / M. Rubin // Science. – 2015. – Vol. 348, No. 6231. – P. 232–235.
- 159. Russell C.T. An unusual current sheet in an ICME: Possible association with C/2006 P1 (McNaught) // C.T. Russell, L.K. Jian, J.G. Luhmann / Geophysical Research Letters. – 2009. – Vol. 36, Iss. 7. – CiteID L07105.

- 160. Samarasinha N.H. Coma Morphology and Constraints on the Rotation of Comet Hale-Bopp (C/1995 O1) / N.H. Samarasinha, B.E.A. Mueller, M.J.S. Belton // Earth, Moon, and Planets. – 1997. – Vol. 77, Iss. 3. – P. 189– 198.
- 161. Samarasinha N.H. Rotation of cometary nuclei / N.H. Samarasinha,
  B.E.A. Mueller, M.J.S. Belton, L. Jorda // Comets II / eds. M.C. Festou,
  H.U. Keller, H.A. Weaver. Tucson: University of Arizona Press, 2004. –
  P. 281–299.
- 162. Samarasinha N.H. Rotation of Comet 103P/Hartley 2 from structures in the coma / [N.H. Samarasinha, B.E. Mueller, M.F. A'Hearn, et al.] // The Astrophysical Journal Letters. 2011. Vol. 734, Iss. 1. 6 pp. (article id. L3).
- 163. Schleicher D.G. Photometric behavior of Comet Hale-Bopp (C/1995 O1) before perihelion / D.G. Schleicher, S.M. Lederer, R.L. Millis, T.L. Farnham // Science. – 1997. – Vol. 275, No. 5308. – P. 1913–1915.
- 164. Schmidt C.A. Observations of sodium in the coma of Comet C/2012 S1 (ISON) during outburst / C.A. Schmidt, R.E. Johnson, J. Baumgardner, M. Mendillo // Icarus. – 2015. – Vol. 247. – P. 313–318.
- 165. Seargent D.A.J. The Greatest Comets in History: Broom Stars and Celestial Scimitars / D.A.J. Seargent // Springer Science & Business Media, 2008. – P. 260.
- 166. Sekanina Z. Comet West 1976 VI: discrete bursts of dust, split nucleous, flareups, and particle evaporation / Z. Sekanina, J.A. Farell // Astron. J. – 1978. – Vol. 83. – No. 12. – P. 1675–1680.
- 167. Sekanina Z. The striated tail of comet West (1976 V1) / Z. Sekanina, J.A. Farell
  // Bulletin of the American Astronomical Society. 1979. Vol. 11. P. 455.
- 168. Sekanina Z. The striated dust tail of Comet West 1976 VI as a particle fragmentation phenomenon / Z. Sekanina, J.A. Farell // Astron. J. – 1980. – Vol. 85. – No. 11. – P. 1538–1554.

- 169. Sekanina Z. Distribution and activity of discrete emission areas on the nucleus of periodic comet Swift-Tuttle / Z. Sekanina // Astron. J. 1981. Vol. 86. No. 11. P. 1741–1773.
- 170. Sekanina Z. Two dust populations of particle fragments in the striated tail of Comet Mrkos 1957 V / Z. Sekanina, J.A. Farell // Astrophys. J. – 1982. – Vol. 87. – No. 12. – P. 1836–1853.
- 171. Sekanina Z. The problem of split comets in review / Z. Sekanina // Comets / eds. L.L. Wilkening. University of Arizona Press, 1982. P. 251–287.
- 172. Sekanina Z. Coma morphology and dust-emission pattern of periodic Comet Halley. II – Nucleus spin vector and modeling of major dust features in 1910 / Z. Sekanina, S.M. Larson // Astron. J. – 1984. – Vol. 89. – No. 9. – P. 1408– 1425.
- 173. Sekanina Z. Coma morphology and dust-emission pattern of periodic Comet Halley. IV – Spin vector refinement and map of discrete dust sources for 1910 / Z. Sekanina, S.M. Larson // Astron. J. – 1986. – Vol. 92. – No. 2. – P. 462– 482.
- 174. Sekanina Z. The Striated Dust Tail of Comet 1910 I / Z. Sekanina, J.A. Farrell
  // Bulletin of the American Astronomical Society. 1986. Vol. 18. P. 818.
- 175. Sekanina Z. Major outburst of periodic Comet Halley at a heliocentric distance of 14 AU / [Z. Sekanina, S.M. Larson, O. Hainaut, et al.] // Astron. Astrophys. 1992. Vol. 263, No. 1–2. P. 367–386.
- 176. Sekanina Z. Cometary dust / Z. Sekanina, M.S. Hanner, E.K. Jessberger, M. Fomenkova // Interplanetary Dust / eds. E. Gruen, B.A.S. Gustafson, S.F. Dermott, H. Fechtig. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2001. P. 95–161.
- 177. Sekanina Z. Brightness and Orbital Motion Peculiarities of Comet C/2012 S1 (ISON): Comparison with Two Very Different Comets / Z. Sekanina // arXiv. 2013. 5 pp. (preprint / arXiv:1310.1980).

- 178. Sekanina Z. Disintegration of Comet C/2012 S1 (ISON) Shortly Before Perihelion: Evidence from Independent Data Sets / Z. Sekanina, R. Kracht // arXiv. – 2014. – 49 pp. – (preprint / arXiv:1404.5968).
- 179. Seneca in Ten Volumes: Naturales quaestiones II / L.A. Seneca [пер. T.H. Corcoran]. Harvard University Press. 1972. Vol. 10. Р. 312.
- 180. Shanklin J.D. 2006 P1 (McNaught) a Great Comet! / J.D. Shanklin // Journal of the British Astronomical Association. 2007. Vol. 117, No. 2. P. 57–61.
- 181. Sierks H. On the nucleus structure and activity of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko / [H. Sierks, C. Barbieri, P.L. Lamy, et al.] // Science. – 2015. – Vol. 347, Iss. 6220. – 5 pp. – (preprint / article id: aaa1044).
- 182. Simpson J.A. Confirmation of dust clusters in the coma of Comet Halley / [J.A. Simpson, A.J. Tuzzolino, L.V. Ksanfomality, et al.] // Adv. Space Res. – 1989. – Vol. 9, No. 3. – P. 259–262.
- 183. Smith A.M. Production of carbon, sulfur, and CS in Comet West / A.M. Smith, T.P. Stecher, L. Casswell // Astrophys. J. – 1980. – Vol. 242. – P. 402–410.
- 184. Smith E.J. International cometary explorer encounter with giacobini-zinner: magnetic field observations / [E.J. Smith, B.T. Tsurutani, J.A. Slvain, et al.] // Science. – 1986. – Vol. 18, No. 4748. – P. 382–385.
- 185. Snodgrass C. The nuclei of comets 7P/Pons-Winnecke, 14P/Wolf and 92P/Sanguin / [C. Snodgrass, A. Fitzsimmons, S.C. Lowry] // Astron. Astrophys. – 2005. – Vol. 444, Iss. 1. – P. 287–295.
- 186. Snodgrass C. Optical observations of comet McNaught from La Silla / [C. Snodgrass, A. Fitzsimmons, E. Jehin, et al.] // Asteroids, Comets, Meteors, LPI Contributions. – 2008. – No. 1405. – 1 pp. – (paper id. 8328.)
- 187. Steckloff J.K. Dynamic sublimation pressure and the catastrophic breakup of Comet ISON / [J.K. Steckloff, B.C. Johnson, T. Bowling, et al.] // Icarus. – 2015. – Vol. 258. – P. 430–437.
- 188. Steckloff J.K. The formation of striae within cometary dust tails by a sublimation-driven YORP-like effect / J.K. Steckloff, S.A. Jacobson // Icarus. - 2016. - Vol. 264. - P. 160-171.

- 189. Stern S.A. The evolution of comets in the Oort cloud and Kuiper belt / S.A. Stern // Nature. – 2003. – Vol. 424, Iss. 6949. – P. 639–642.
- 190. Stix M. The Sun: an introduction / M. Stix // New York: Springer Science & Business Media, 2004. – P. 280.
- 191. Stoyan R. Great January Comet of 1910 / R. Stoyan // Atlas of Great Comets.
   Cambridge: Cambridge University Press, 2015. P. 142–143.
- 192. Swamy K.S.K. Physics of Comets / K.S.K. Swamy // Singapore: World Scientific, 2010. – P. 220.
- 193. Szabó G.M. Evidence for Fresh Frost Layer on the Bare Nucleus of Comet Hale-Bopp at 32 AU Distance / [G.M. Szabó, L.L. Kiss, A. Pál, et al.] // Astrophys. J. – 2012. – Vol. 761, No. 1. – 7 pp. – (article id. 8.).
- 194. Tenishev V. Numerical Simulation of Dust in a Cometary Coma: Application to Comet 67P/Churyumov-Gerasimenko / V. Tenishev, M.R. Combi, M. Rubin // Astrophys. J. 2011. Vol. 732, No. 2. 17 pp. (article id. 104.).
- 195. Tiersch H. The electric potential on dust particles in comets and in interplanetary space / H. Tiersch, P. Notni // Astronomische Nachrichten. – 1982. – Vol. 310, No. 1. – P. 67–78.
- 196. Vincent J.-B. A numerical model of cometary dust coma structures Application to comet 9P/Tempel 1 / J.-B. Vincent, H. Böhnhardt, L.M. Lara // Astron. Astrophys. – 2010. – Vol. 512. – P. 1–8.
- 197. Wallis M.K. Electrodynamics of submicron dust in the cometary coma / M.K. Wallis, M.H.A. Hassan // Astron. Astrophys. 1983. Vol. 121, No. 1. P. 10–14.
- 198. Wallis M.K. Gas coma of Comet Giacobini-Zinner Emission from grains / M.K. Wallis, N.P. Meredith, D. Rees // Adv. Space Res. 1989. Vol. 9, No. 3. P. 213–216.
- 199. Warell J. Dust continuum imaging of C/1995 O1 (Hale-Bopp): Rotation period and dust outflow velocity / J. Warell, C.-I. Lagerkvist, J.S.V. Lagerros // Astron. Astrophys. – 1999. – Vol. 136, No. 2. – P. 245–256.

- 200. Warner B. High resolution spectra of Comet Seki–Lines (1962c) / B. Warner // The Observatory. – 1963. – Vol. 83. – P. 223–225.
- 201. Weissman P.R. The Solar System and Its Place in the Galaxy / P.R. Weissman
  // Encyclopedia of the Solar System / eds. T. Spohn, D. Breuer, T. Johnson –
  Elsevier. 2014. P. 3–28.
- 202. Whipple F.L. A comet model. I. The acceleration of Comet Encke / F.L. Whipple // Astrophys. J. 1950. Vol. 111. P. 375–394.
- 203. Whipple F.L. The Theory of Micro-Meteorites. Part I. In an Isothermal Atmosphere / F.L. Whipple // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. – 1950. – Vol. 36, No. 12. – P. 687– 695.
- 204. Whipple F.L. Comet P/Holmes, 1892III A case of duplicity? / F.L. Whipple // Icarus. 1984. Vol. 60. P. 522–531.
- 205. Wilson J.K. Three tails of comet Hale-Bopp / [J.K. Wilson, J. Baumgardner, M. Mendillo] // Geophysical Research Letters. 1998. Vol. 25, Iss. 3. P. 225–228.
- 206. Wooden D.H. Silicate Mineralogy of the Dust in the Inner Coma of Comet C/1995 O1 (Hale-Bopp) Pre- and Postperihelion / [D.H. Wooden, D.E. Harker, C.E. Woodward, et al.] // Astrophys. J. 1999. Vol. 517, No. 2. P. 1034–1058.
- 207. Wooden D. Dust in the Coma and Trail of Spectacular Comet C/2006 P1 (McNaught) / D. Wooden, D. Harker, M. Kelley, C. Woodward. // Spitzer Proposal. – 2007. – 1 pp. – (ID #40812).
- 208. Wooden D.H. Comet C/2012 S1 (ISON)'s carbon-rich and micron-sizedominated coma dust / [D.H. Wooden, J.M. De Buizer, M.S. Kelley, et al.] // Asteroids, Comets, Meteors. Proceedings of the conference. – 2014. – P. 590.
- 209. Wright I.P. CHO-bearing organic compounds at the surface of 67P/Churyumov-Gerasimenko revealed by Ptolemy / [I.P. Wright, S. Sheridan, S.J. Barber, et al.] // Science. 2015. Vol. 349, No. 6247. 5 pp. (preprint / id: aab0673-3).

- 210. Yang B. Multi-wavelength Observations of Comet C/2011 L4 (Pan-STARRS)
  / [B. Yang, J. Keane, K. Meech, et al.] // The Astrophysical Journal Letters. –
  2014. Vol. 784, No. 2. 5 pp. (preprint / id: L23).
- 211. Zubko E. Comet C/2012 S1 (ISON) coma composition at ~ 4au from HST observations / [E. Zubko, G. Videen, D. Hines, et al.] // Planetary and Space Science. 2015. 26 pp. (preprint / doi:10.1016/j.pss.2015.08.002).