

УДК 524.6-325.2+521.96+524.3(083.5)

№ держреєстрації 0113U000698

Інв. №

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
РАДІОАСТРОНОМІЧНИЙ ІНСТИТУТ
(РІ НАНУ)

61002, м. Харків - 2, вул. Червонопрапорна, 4

тел. (057) 706-14-15

E-mail: rai@ri.kharkov.ua

ЗАТВЕРДЖУЮ
Директор РІ НАНУ,
академік НАН України

_____ Л.М. Литвиненко

м.п.

«_____» _____ 2016 р.

ЗВІТ

ПРО НАУКОВО-ДОСЛІДНУ РОБОТУ

“ДОСЛІДЖЕННЯ КІНЕМАТИКИ ГАЛАКТИКИ З ВИКОРИСТАННЯМ
ВЛАСНИХ РУХІВ ЗІР. ВИЯВЛЕННЯ АНОМАЛІЙ СТРУКТУРИ ПОВЕРХНІ
МІСЯЦЯ З ВИКОРИСТАННЯМ КОСМІЧНОЇ ФОТОМЕТРІЇ ВИСОКОЇ
РОЗДІЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ (ЗА ДАНИМИ GAIA ТА LR0)”

(ШИФР «ШЛЕЙФ»)

(заключний)

Керівник НДР

ст. наук. співробіт.

д-р фіз.-мат.наук

В.М. Шульга

2016

Рукопис закінчено 22 листопада 2016 р. Результати роботи розглянуто Вченою
Радою РІ НАН України, протокол від 2016.11.23 № 11

СПИСОК АВТОРІВ

Керівник НДР

гол. наук. співроб.

доктор фіз.-мат. наук

В. Шульга

(реферат, вступ, розд. 1, 2, 3 висновки)

Відповідальний виконавець

ст. наук. співроб.

доктор фіз.-мат. наук

П. Федоров

(реферат, вступ, розд. 1 - 11, висновки)

Відповідальний виконавець

ст. наук. співроб.

канд. фіз.-мат. наук

В. Цвєткова

(розд. 3-5, висновки)

Відповідальний виконавець

мол. наук. співроб.

канд. фіз.-мат. наук

В. Ахметов

(розд. 1 - 11, висновки)

Мол. наук співроб.

А. Мизніков

(розд.1)

Інженер 3 кат.

А. Велічко

(розд. 9 - 11)

Технік.

Н. Курбатова

(розд. 1, 2, 3)

Ст. наук. співроб.,

д-р фіз.-мат.наук

Ю. Шкуратов

(реферат, розд.12-15, висновки)

Ст. наук. співроб.,

канд. фіз.-мат. наук

В. Кайдаш

(реферат, розд. 12,13,14, висновки)

Мол. наук. співр.

Л. Рогачова

(розд. 14,15)

РЕФЕРАТ

Звіт про НДР: 143с., 52 рис., 9 таблиць, 98 джерел.

Об'єкт дослідження – зірки, галактики, позагалактичні об'єкти. Поверхня Місяця і місячний реголіт.

Метою роботи в 2013 році було створення першої версії нового високощільного каталогу положень і власних рухів зір на основі всіх Шмідтівських оглядів північного і південного неба та порівняння його з даними каталогу ХРМ. Результати роботи викладено в 3 роботах (2 тези, 1 стаття), а також в 2 усних доповідях на 2 конференціях.

На протязі 2013 року отримано такі результати:

1. Створено базу даних на основі PostgreSQL, що містить кілька десятків каталогів та оглядів з астрометричними та фотометричними параметрами, а також необхідну висхідну інформацію. Загальний обсяг бази даних становить понад 1 ТБ.

2. Створено опорний каталог позагалактичних джерел. Виведений каталог містить сферичні координати приблизно 70 мільйонів галактик до 20 зоряної величини, що покривають майже все небо.

3. Виведено першу версію каталогу ХРМ2. На даний час цей каталог містить близько 1 мільярда об'єктів, що покривають все небо. Їх положення отримано на епоху спостережень конкретної платівки у фільтрах J, R і I в системі відліку, що задається положеннями галактик із створеного нами опорного каталогу.

Метою роботи в 2014 році було створення нового високощільного каталогу положень і власних рухів зір - ХРМ2U на основі Шмідтівських оглядів північного і південного неба. Результати роботи викладено в 3 роботах (2 тези, 1 стаття), а також в 2 усних доповідях на 2 конференціях.

На протязі 2014 року отримано такі результати:

1. Виведено фінальну версію каталогу ХРМ2U, який містить положення, власні рухи та зоряні величини близько 1 мільярда об'єктів, що покривають все небо. В якості опорного каталогу було використано дані каталогу UCAC4.

2. Положення зір каталогу отримано на епоху спостережень конкретної

платівки у фільтрах J, R і I. Середньоквадратична помилка положень зір після редукції в систему UCAC4 на епоху спостережень становить від 70 до 250 міліарксекунд (мас) в залежності від конкретної пластинки та зоряної величини.

3. Власні рухи зір каталогу було виведено для кожної зорі із її положень в кожному епоху спостережень. Для південної півкулі зазвичай використовувались 3 часові точки, з середньою часовою протяжністю приблизно 23 роки. Для північної півкулі — 4 точки, з середньою часовою протяжністю близько 50 років. Середньоквадратична помилка власних рухів також помітно залежить від зоряної величини і становить від 2-5 мас/рік для яскравих зір до 5-15 мас/рік для слабких зір.

4. Створено спеціальні вибірки зір різних підсистем для подальшого визначення їх кінематичних параметрів за власними рухами зір XPM2U. Метою роботи в 2015 році було отримання кінематичних параметрів Галактики, зокрема кутової швидкості обертання на основі власних рухів зір з нового високощільного каталогу XPM2, що покриває всю небесну сферу. Результати викладено в 5 роботах (2 тези, 3 статті), а також в 3 усних доповідях на 2 конференціях.

На протязі 2015 року отримано такі результати:

1. Створено базу даних на основі PostgreSQL, що містить кілька десятків каталогів та оглядів з астрометричними та астрофізичними параметрами, а також необхідну висхідну інформацію. Загальний обсяг бази даних становить понад 3 ТБ.

2. Для вирішення систем лінійних рівнянь методом найменших квадратів (зокрема - рівнянь Огороднікова-Мілна і т. п.) створено програму `ogm_solve` для обробки великих обсягів даних.

3. Виконано кінематичний аналіз власних рухів зірок каталогів XPM2, RRMXL і UCAC4 на основі лінійної моделі Огороднікова - Мілна. Показано, що кінематичні параметри Галактики узгоджуються в яскравій області із значеннями прийнятими МАС.

4. Проведені дослідження довели можливість використання для кінематичного аналізу не тільки власних рухів яскравих зірок, що знаходяться

порівняно близько до Сонця, а й зірок, розташованих порівняно далеко. У результаті виконаної роботи отримано кінематичні параметри Галактики за даними 3 найбільш високощільних каталогів. Ці результати добре узгоджуються в яскравій області з результатами інших досліджень. Однак у слабкому діапазоні зоряних величин отримані результати порівнювати ні з чим, оскільки вони отримані фактично вперше. Наведене порівняння кінематичних параметрів за даними 3 каталогів свідчить про хорошу якість власних рухів в каталозі XPM2, особливо в його слабкому діапазоні зоряних величин.

Метою роботи в 2016 році було отримання кінематичних параметрів Галактики, зокрема кутової швидкості обертання на основі власних рухів зір з нового високощільного каталогу XPM2, що покриває всю небесну сферу. Результати викладено в 5 роботах (2 тези, 3 статті), а також в 3 усних доповідях на 2 конференціях.

На протязі 2016 року отримано такі результати:

1. На мові програмування Cі створена програма «VSH» для знаходження коефіцієнтів розкладання поля швидкостей зірок по векторних сферичним функціям в тангенціальній площині. Також створено супутній комплекс програм на мові Cі, який включає переклад координат з екваторіальній площині в галактичну («C-TRANSFORM»), розбиття даних по банкам зоряних величин, а в кожній банці - розбиття сфери на майданчики з допомогою бібліотеки Healpix («HEAL_BIN_MAG»). Також написані скрипти з використанням засобів командного рядка Linux, необхідні для запуску створених програм, а також для обробки+ як для користувачів Windows так і UNIX ОС.

Створено комплекс програм «PLOTING» для автоматичної побудови графіків за даними з декількох файлів одночасно. Дані при необхідності аппроксимируються прямими лініями або середніми значеннями в банках розглянутих величин. Цей комплекс програм незамінний, наприклад, при глобальному аналізі поведень власних рухів по всій небесній сфері в залежності від екваторіальних α , δ або галактичних l , b координат або від зоряної величини. Програма «PLOTING» неодноразово використовувалася для аналізу різних робочих версій каталогів XPM2 і XPMА.

Написана програма обчислення наведених власних рухів «RPM». Через відсутність паралаксів для більшості об'єктів в сучасних каталогах наведені власні рухи є статистичним засобом оцінки відстаней до об'єктів. При порівнянні графіків наведене власний рух $M^{\circ}V$ - показник кольору (JK) з графіком абсолютна зоряна величина MV - показник кольору (JK), була проведена калібрування $M^{\circ}V$, що дозволило визначити кордон між червоними карликами і рештою населення діаграми $M^{\circ}V$ - (JK). Отриманий результат використовувався надалі при створенні каталогу XРМА (?).

2. За допомогою програми «VSH» були побудовані математичні моделі полів швидкостей зірок таких каталогів як XPM, XPM2, UCAC4, XРМА, TGAS. Проаналізовано залежність параметрів моделей від зоряної величини, а також від відстані для зірок, паралакси яких відомі. Для даних із TGAS (Tycho-Gaia Astrometric Solution) за допомогою програми розкладання за ВСФ були обраховані кінематичні параметри Галактики як функції відстані в діапазоні від 0 до 1200 пк, а також від зоряної величини G .

Метод дослідження – Обробка спостережних даних, узагальнення і порівняльний аналіз даних, методи фотографічної і ПЗЗ-астрометрії, математичний апарат методу найменших квадратів, фільтрації даних, теорії ймовірностей і математичної статистики.

Результати НДР частково опубліковані, частково підготовлені до публікації, а частково знаходяться в стадії аналізу. Вони можуть бути надані для використання всім зацікавленим організаціям та фахівцям в області астрометрії, небесної механіки та зоряної астрономії як в Україні, так і за її межами.

Прогнозні припущення: – ймовірно уточнення зв'язку між координатною системою Hipparcos і системою ICRF2 та уточнення кінематичних параметрів Галактики.

Метою дослідження, пов'язаного з виявленням аномалій структури поверхні Місяця із використанням космічної фотометрії високої роздільної здатності, є створення нових методів для дистанційної ідентифікації штучних та природних зрушень реголітового слою Місяця у ході космічної місії NASA Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO). Одержання нових даних про структуру, оптичні

та фізичні властивості місячної поверхні із використанням даних високої роздільної здатності.

Методи дослідження – отримання та аналіз просторових розподілів фазових відношень, фазових залежностей показників кольору для вивчення фотометричних властивостей реголіту поверхні Місяця.

У проекті отримано такі результати:

Зроблено оцінку масштабів і величини зміни структури місячної поверхні внаслідок дії на неї як природних, так і антропогенних чинників. Для цієї оцінки використані дані орбітальної фотометрії найвищої роздільної здатності у поєднанні з методом фазових відношень, який дає можливість оцінювати шорсткість світлорозсіювальної поверхні в масштабах менше елементу розділу зображення.

Доведено, що розроблений авторами метод дає можливість фотометричної інтерпретації зображень місячної поверхні в термінах її шорсткості. Показано, що з використанням методу є можливість дистанційної ідентифікації місць осипів ґрунту та ударного розтопу. Надійність нового методу доведена детектуванням фотометричних аномалій, пов'язаних зі змінами структури поверхневого шару реголіту у місцях документованого впливу людської діяльності на реголіт Місяця.

Розроблено інтерпретаційну основу для аналізу фотометричних даних про Місяць. Зокрема, це дає можливість дистанційної ідентифікації районів утворення нових кратерів, падіння невеликих комет або метеороїдних роїв на поверхню Місяця.

Запропоновано механізм, що може призводити до появи темних променів (гало) навколо молодих кратерів. Механізм заснований на різниці фазових залежностей яскравості ореолів (променів) і їх навколишніх поверхонь.

Із застосуванням методів фазових та часових відношень вивчені нові кратери природнього походження на поверхні Місяця; виявлені темні гало та променеві системи цих кратерів, що характеризуються значним нахилом фазової функції. Надано нове пояснення механізму, що може призводити до появи темних гало та променів навколо нових тільки що утворених місячних

кратерів.

Надано інтерпретацію утворення фотометричних аномалій, які пов'язані з дією газових струменів посадочних модулів космічних кораблів на місячну поверхню. Показано, що метод фазових відношень може бути успішно застосований не тільки для дослідження місць посадок, але і схилів молодих місячних кратерів, де процеси транспортування реголіту можуть бути сильно розвинені.

Надійність нового методу дистанційного зондування доведено детектуванням фотометричних аномалій, пов'язаних з відомим впливом людської діяльності на реголіт Місяця.

Запропоновано метод перетворення картографічних проекцій зображень, отриманих ширококутовими камерами з низьких орбіт, з урахуванням впливу рельєфу, і обговорений вибір цифрових карт рельєфу Місяця, які найбільш прийнятні для обробки даних камери LROC WAC.

Розроблений новий метод побудови безшовних мозаїк розподілу відбивної здатності місячної поверхні із використанням даних камери LROC WAC космічного апарату LRO. Нові мозаїки застосовані для аналізу фотометричної аномалії у місячному Морі Хмар. Наявність аномалії можна пояснити відмінностями структури поверхні від оточуючих регіонів. Ця область може бути зоною неглибокого затоплення піднятої формації материкового складу. Матеріал цієї формації міг бути піднятий і змішаний із верхніми шарами ґрунту.

За даними камери LROC WAC космічного апарату LRO вивчено ефект когерентного зворотного розсіювання поверхнею Місяця та знайдено, що ефект є малим у видимому світлі. Ширина опозиційного сплеску когерентного зворотного розсіювання становить 1-4°. Максимальна амплітуда сплеску близька до 8%. Показано, що фотометричне калібрування даних LROC WAC є близьким до середніх даних телескопічної абсолютної фотометрії.

Проведено порівняльне дослідження місячних аномалій (так званих червоних плям) із використанням характеристик, виміряних космічними апаратами Clementine, LRO, та Chandrayaan-1. Північно-східний квадрант кратера Коперник показує себе як червона пляма на Місяці та є подібним до

інших екструзій ріолітового хімічного складу. Показано, що червона пляма кратеру Копернік утворена із ріолітової екструзії шляхом удару. Асиметрія аномалії може бути пов'язана із відхиленням ударника від нормального падіння.

Проведено моделювання розсіювання світла реголітоподібними частинками неправильної форми, які мають розміри набагато більше, ніж довжина хвилі падаючого світла з розмірним параметром $X = 200$ із використанням розривного методу Галеркіна у часовій області. Порівняння рішення DGTD для гладко огранених частинок з отриманим за геометрооптичною моделлю показує хороший збіг для кривих інтенсивності і поляризації в залежності від кута розсіювання. Якщо вводиться шорсткість поверхні у масштабі довжини хвилі, то дифузне розсіювання на шорсткуватих поверхнях втілюється в гладких і позбавлених особливостей кривих для всіх елементів матриці розсіювання, що узгоджується з лабораторними вимірами реальних зразків.

Отримані у проекті дані можуть бути використані при плануванні і реалізації космічних місій до Місяця та інших безатмосферних тіл Сонячної системи космічними агенціями світу.

ЗМІСТ

Список виконавців.....	2
Реферат.....	3
Зміст.....	10
Вступ.....	13
Суть звіту.....	15
1 Вибір і залучення до опрацювання необхідних Шмідтівських оглядів та створення спеціальної бази даних.....	15
2 Створення опорного каталогу позагалактичних джерел.....	17
2.1 Вступ до розділу	17
2.2 Дані.....	18
2.3 Виведення сферичних координат галактик.....	19
2.4 Рішення проблеми.....	22
3 Перша версія каталогу XPM2.....	27
Висновки до розділів 1, 2, 3.....	28
4 Створення фінальної версії каталогу XPM2U.....	29
4.1 Вхідні дані.....	29
5 Створення фінальної версії каталогу XPM2U.....	31
5.1 Астрометрична редукція.....	31
5.2 Модель редукції.....	32
5.3 Рівняння блиску в SuperCOSMOS.....	33
5.4 Каталог.....	35
6 Формування спеціальних вибірок зір різних підсистем.....	37
Висновки до розділів 4, 5, 6.....	38
7. Створення програм для обчислення кінематичних параметрів Галактики з використанням різних способів усереднення власних рухів по небесній сфері.....	39
7.1. Створення бази даних та програмного забезпечення для опрацювання каталогів.....	39
7.2. Створення програмного забезпечення для обчислення кінематичних	

параметрів Галактики з використанням різних способів усереднення власних рухів по небесній сфері.....	40
8. Тестування створених програм і обчислення кінематичних параметрів за власними рухами зір змішаного спектрального складу, зокрема кутової швидкості обертання галактики на відстані сонця.....	41
8.1. Вступ.....	41
8.2. Кінематика Галактики за власними рухами зірок.....	42
8.3. Використані каталоги.....	44
Висновки до розділів 7, 8.....	51
9. Створення каталогу РМА.....	52
9.1. Головні принципи виведення власних рухів зір каталогу РМА.....	52
9.2 Створення вибірки галактик.....	53
9.3. Виведення абсолютних власних рухів в галактичній площині.....	55
10. Визначення кінематичних параметрів галактики за даними каталогів АРМ та Gaia DR1.....	58
10.1. Аналіз кінематичних параметрів Галактики, отриманих в межах фізичної моделі Огороднікова-Мілна.....	60
11. Нові комп'ютерні програми Висновки.....	68
Висновки до розділу 9, 10, 11.....	69
12. Порушення структури місячної поверхні, спричинені космічними апаратами.....	71
12.1 Дані вузькокутової камери КА LRO.....	71
12.2 Місце посадки КА Аполлон-11.....	73
12.3 Місце посадки КА Аполлон-12.....	76
12.4 Кратер, утворений в місці падіння КА Рейнджер-9.....	80
13 Оцінка глибини порушення поверхневої структури реголіту.....	84
13.1 КА Аполлон-11	85
13.2 КА Аполлон-12	88
13.3 КА Рейнджер-9	89
14 Метод фазових відношень як засіб для вивчення структури місячної поверхні.....	92

	12
14.1 Долина Шретера.....	92
14.2 Кратер Коші	95
15 Виявлення та інтерпретація аномалій структури і складу поверхні місяця оптичними методами.....	100
15.1 Аномалії фотометричної функції місячної поверхні природного походження.....	103
15.1.1 Молоді кратери кілометрових розмірів	102
15.1.2 Кратер Hall J.....	107
15.1.3 Кратер Sensorinus	110
15.2 Нова фотометрична інтерпретація темних гало та променевих систем місячних кратерів.....	114
15.2.1 Вступ	114
15.2.2 Дані та їх обробка	116
15.2.3 Результати і обговорення.....	118
15.2.4 Темні гало	122
ВИСНОВКИ.....	125

ВСТУП

Головною метою першого етапу проекту було визначення кінематичних параметрів Галактики за допомогою абсолютних власних рухів зір. Створення нового каталогу положень та абсолютних власних рухів близько одного мільярда зірок для всієї небесної сфери дає можливість отримати уточнені значення кінематичних параметрів Галактики та руху Сонця не тільки поблизу Сонця, але і на значних відстанях від нього. Основою для виконання кінематичних досліджень є, створений нами каталог XPM2. Взагалі, такий підхід в подальшому дозволить шляхом комбінування даних із створеного каталогу XPM2 та даних космічної місії GAIA провести детальне дослідження кінематики Галактики та отримати нові наукові результати світового рівня. Але перш ніж вирішити цю задачу необхідно створити базу даних, що містить каталоги та огляди з астрометричними та фотометричними параметрами, а також необхідну висхідну інформацію. Вирішенню цих задач присвячено роботи, що виконувались впродовж 2013-2015 років.

Але у зв'язку з публікацією першого релізу проекту Gaia, що отримав назву Gaia DR1, ми дещо змінили акценти своєї роботи. А саме, вирішили створити новий каталог зірок — PMA, на основі використання наземних даних із каталогу 2MASS та даних космічного проекту Gaia DR1. В створеному нами каталозі PMA представлені положення, абсолютні власні рухи, а також запозичені із каталогу 2MASS та Gaia DR1 зоряні величини. Каталог покриває все небо від -90° до $+90^\circ$ схилення, включаючи Галактичну площину і містить приблизно 400 мільйонів об'єктів. Оскільки результати отримано як комбінацію наземних та космічних спостережень, то система положень каталогу повторює систему Gaia DR1, а система власних рухів є незалежною. Точність положень об'єктів із діапазону слабких зоряних величин у випадковому відношенні не поступається кращим світовим взірцям і становить приблизно 70 - 120 мас. Точність абсолютних власних рухів тих же об'єктів становить від 1 до 5 мас/рік в залежності від зоряної величини. Тому цей каталог можна розглядати як джерело, що надає якісно новий матеріал для дослідження кінематики зір

Галактики.

Використовуючи дані цього каталогу було виконано кінематичний аналіз яскравих зір ($9 < m < 12$) нашої Галактики. Константи Оорта, швидкість сонячного руху відносно локального стандарту спокою і координати апекса отримано двома незалежними методами — за допомогою моделі Огороднікова-Мілна та методом розкладання поля швидкостей за векторними сферичними функціями. Для порівняння отриманих результатів ми також виконали кінематичний аналіз власних рухів зірок каталогу TGAS (Tycho-Gaia Astrometric Solution). Одночасно на цьому ж матеріалі була протестована програма «VSH» для знаходження коефіцієнтів розкладу поля швидкостей зірок за векторними сферичними функціями в тангенціальній площині. Отримані результати є першими результатами, що визначені за власними рухами зір PMA і є незалежними від Gaia DR1 і це дуже важливо, оскільки з'явилась можливість тестування як даних Gaia DR1, так і даних PMA. Саме для цього ми створили низку нових комп'ютерних програм. На мові програмування C++ створена програма «VSH» для знаходження коефіцієнтів розкладу поля швидкостей зірок за векторними сферичними функціями, а також створено супутній комплекс програм «C-TRANSFORM», для перетворення координат із однієї системи в іншу, розбиття даних за інтервалами зоряних величин, а в кожному інтервалі - розбиття сфери на пікселі за допомогою бібліотеки Healpix (HEAL_BIN_MAG). Створено комплекс програм «PLOTING» для автоматичної побудови графіків за даними з декількох файлів одночасно. Написана програма «RPM» для обчислення “приведених власних рухів”, які використовуються у випадках відсутності паралаксів, як статистичний метод оцінки відстаней до об'єктів.

СУТЬ ЗВІТУ

1 ВИБІР І ЗАЛУЧЕННЯ ДО ОПРАЦЮВАННЯ НЕОБХІДНИХ ШМІДТІВСЬКИХ ОГЛЯДІВ ТА СТВОРЕННЯ СПЕЦІАЛЬНОЇ БАЗИ ДАНИХ

Для створення каталогу положень та власних рухів зірок XPM2 було відібрано більш ніж 1.5 Тб даних. Ці дані представляють собою оригінальні виміряні положення x та y небесних об'єктів на платівці, а також детальну фотометричну та геометричну інформацію про зображення даного об'єкта. Загальна кількість об'єктів які залучені для створення каталогу XPM2 сягає приблизно 7 мільярдів, що дає можливість отримати більш ніж 1 мільярд положень там абсолютних власних рухів зірок з систематичною точністю не гірше 0.1 мас/год. Для роботи з такими великими за обсягом даними було створено спеціальне програмне забезпечення, а також базу даних на основі PostgreSQL. Для підвищення ефективності роботи бази даних було встановлено додатковий нестандартний програмний пакети `pg_sphere`, а також спеціально розроблено оригінальний математичний пакет `pgkhao`. Ці пакети дають можливість швидко проводити різні математичні та статистичні дослідження залучених даних, проводити порівняння та ототожнення зірок в різних каталогах, як за координатами так і за іншими параметрами, а також забезпечувати швидкий доступ до інформації будь-яким стандартним математичним пакетам програм.

Створена база даних включає кілька десятків сучасних каталогів та оглядів з астрометричними, фотометричними та астрофізичними параметрами, а також необхідну додаткову інформацію. База даних включає більше 20 сучасних астрометричних, астрофізичних каталогів, що містять необхідні вхідні данні для опрацювання Шмідтівських оглядів, а також проведення астрометричного та астрофізичного аналізу створеного каталогу XPM2. Загальний обсяг бази даних становить понад 3 ТБ.

Для проведення спеціальних математичних та статистичних досліджень, а також використання нелінійних методів аналізу, було створено комплекс спеціального програмного забезпечення, що дозволяє швидко отримати

результати для дуже великих масивів даних. Створене програмне забезпечення дало можливість провести дослідження та аналіз систематичних похибок положень зірок в залежності як від координат, так і від зоряних величин в сучасних каталогах зірок. Необхідно відмітити, що створене програмне забезпечення дозволяє проводити аналіз дуже великих масивів даних, при цьому швидкість обчислювань перевищує в десятки та сотні раз аналогічні стандартні програми з сучасних математичних пакетів.

Використання SQL мови дозволяє проводити тільки стандартний аналіз даних, що містяться в базі даних PostgreSQL. Розроблені ж спеціальні обчислювальні програми дозволяють організувати обробку та редукцію, теоретично необмежених в обсязі висхідних даних, при цьому не впливаючи на точність та швидкість розрахунків. Завдяки використанню спеціального алгоритму «Kahan summation algorithm» точність обчислень залишається високою, як для лінійних методів обробки (МНК), так і для нелінійних і не залежить від кількості об'єктів. Більшість програмних пакетів створено на мові програмування C/C++ як для користувачів Windows так і UNIX ОС, а також з використанням сучасних математичних програм MATLAB, OCTAVE.

2 СТВОРЕННЯ ОПОРНОГО КАТАЛОГУ ПОЗАГАЛАКТИЧНИХ

ДЖЕРЕЛ

2.1 Вступ до розділу

Як добре відомо, для виведення власних рухів зірок всіх сучасних високощільних каталогів, в якості опорної системи була використана система HCRF [17]. На сьогоднішній день є тільки один високощільний каталог - XPM [8], що покриває всю небесну сферу в діапазоні від 10 до 22 зоряної величини, в якому власні рухи зірок є абсолютними, тобто прив'язаними безпосередньо до положень приблизно одного мільйона позагалактичних об'єктів XSC [30]. Він був створений на основі даних з каталогів 2MASS [30] і USNO - A2.0 [24] і містить HCRF - положення та абсолютні власні рухи близько 314 мільйонів зірок. Координатні осі системи, що задається каталогом XPM не мають обертання відносно позагалактичних джерел DR7 [29], LQAC [32] і ICRF2 з невизначеністю приблизно 0.2 мсд/рік. Випадкові помилки абсолютних власних рухів зірок XPM дещо відрізняються в північній і південній півкулях і складають $\pm (3 \div 8)$ мсд/рік і $\pm (5 \div 10)$ мсд/рік для північного і південного півкулі відповідно. Оскільки при створенні каталогу була застосована оригінальна методика, при якій виведені абсолютні власні рухи не залежать від систематичних помилок координат зірок і галактик в порівнюваних каталогах, а залежать тільки від їх випадкових помилок, то виведена система власних рухів зірок XPM ніяк не залежить від системи власних рухів зірок HCRF. У статті [9] було показано, що положення зірок у каталозі XPM (віднесені до системи HCRF) і виведені незалежно від системи HCRF абсолютні власні рухи зірок XPM, матеріалізують Міжнародну небесну опорну систему (ICRS) [2] в оптичному та ближньому інфрачервоному діапазоні довжин хвиль. Отриману систему власних рухів зірок цілком правомірно використовувати як в оптичному, так і в ближньому інфрачервоному діапазонах, оскільки очевидно, що немає фізичних причин для існування різних швидкостей руху однієї і тієї ж зірки, що спостерігається в різних фільтрах.

Разом з тим слід зазначити, що вжиті зусилля по виключенню рівняння блиску у власних рухах зірок каталогу XPM, не привели до його повного

усунення, особливо в діапазоні від 11 до 16 зоряної величини. Це можна пояснити, якщо припустити, що рівняння блиску на Шмідтівських пластинках істотно нелінійне і, отже, екстраполяція рівняння блиску по яскравим зіркам $Tucho - 2$ [15] в слабку область діапазону зоряних величин може бути не завжди коректною. Також необхідно відзначити, що притаманні Шмідтівським пластинкам спотворення у вигляді пилок і розривів хоч і були в значній мірі видалені, проте в деяких високощільних полях залишкові спотворення присутні.

Ще одним істотним недоліком каталогу XPM є занижене число зірок у синій області спектра. Це викликано тим, що в каталог XPM увійшли тільки ті зірки USNO - A2.0, які перетнулися з зірками каталогу 2MASS.

Метою нашої подальшої роботи є виведення другої версії каталогу XPM, яка міститиме значно більше число зірок з меншим рівнем помилок. Головним чином ми зосереджуємо свої зусилля на мінімізації систематичних помилок у виведених положеннях і власних рухах зірок. Для побудови такого каталогу, який ми назвали XPM2, насамперед, необхідно створити високощільний опорний фрейм, осі якого не матимуть обертання по відношенню до позагалактичних об'єктів і будуть узгоджені з ICRF2. Опорними об'єктами такого фрейму будуть служити координати десятків мільйонів галактик.

2.2 Дані

Як показав аналіз даних різних оглядів, заснованих на Шмідтівських пластинках що покривають все небо, найбільш придатними для нашої мети є дані SSS - SuperCOSMOS Science Survey. Детальний опис цієї програми можна знайти в трьох базових статтях [12, 13, 14]. Електронний ресурс SSA - SuperCOSMOS Science Archive надає зручний доступ до необхідних даних. Ці дані містять різну астрометричну, фотометричну та іншу допоміжну інформацію, в тому числі, виміряні машиною SuperCOSMOS координати x , y всіх об'єктів, що містяться на Шмідтівських пластинках, отриманих в північній і південній півкулях в синьому, червоному і ближньому інфрачервоному фільтрах. Ця обставина є надзвичайно важливою для нас, оскільки дозволяє реалізувати алгоритм виведення положень об'єктів, що містяться на конкретній платівці, що використовує в якості опорних об'єктів тільки галактики.

На відміну від каталогу XPM, схема побудови каталогу XPM2 передбачає виведення положень об'єктів в кожному з вищевказаних оглядів на епоху спостережень кожної конкретної Шмідтівської пластинки. Для принципового вирішення цього завдання, крім виміряних машиною SuperCOSMOS прямокутних координат галактик, необхідно мати незалежні від SSA сферичні координати галактик, що містяться на конкретній Шмідтівській пластівці. В якості вихідних положень галактик, які надалі коригувалися з метою їх

приведення у систему LQRF2, ми використовували сферичні координати галактик із каталогу GSC2.3 [18].

Оскільки каталоги SuperCOSMOS, GSC2.3 і 2MASS були приведені до системи HCRF, положення галактик в них не повинні залежати від епох їхніх спостережень, але можуть помітно відрізнятися через внутрішні випадкові і систематичні помилки, викликані різними причинами і які неминуче присутні в будь-яких каталогах.

Дані PSC (2MASS), які в систематичному відношенні найкращим чином узгоджуються з сучасними каталогами, такими як UCAC4 [39], SPM4 [11] були використані для виправлення зональних систематичних помилок положень галактик в каталозі GSC2.3.

Остаточні положення зірок, що визначаються у XPM2, будуть виведені із застосуванням виправлених положень GSC2.3 — галактик.

2.3 Виведення сферичних координат галактик

Остаточні сферичні координати галактик до яких будуть прив'язані положення і власні руху об'єктів XPM2 ми плануємо отримати в системі координат, що задається каталогом LQRF2. Каталоги LQRF та LQRF2, за заявами авторів, є оптичною реалізацією ICRS і містять приблизно 160 тисяч квазарів, положення яких в систематичному відношенні узгоджені з ICRF2 на мілісекундному рівні точності. Тим самим, дані цього каталогу задають порівняно високощільну, хоча на жаль нерівномірну інерційну систему відліку в області слабких зоряних величин. Безпосереднє порівняння положень LQRF2 - квазарів з їх положеннями в інших каталогах, наприклад GSC2.3, PSC (2MASS) дозволяє судити наскільки ці каталоги узгоджені між собою.

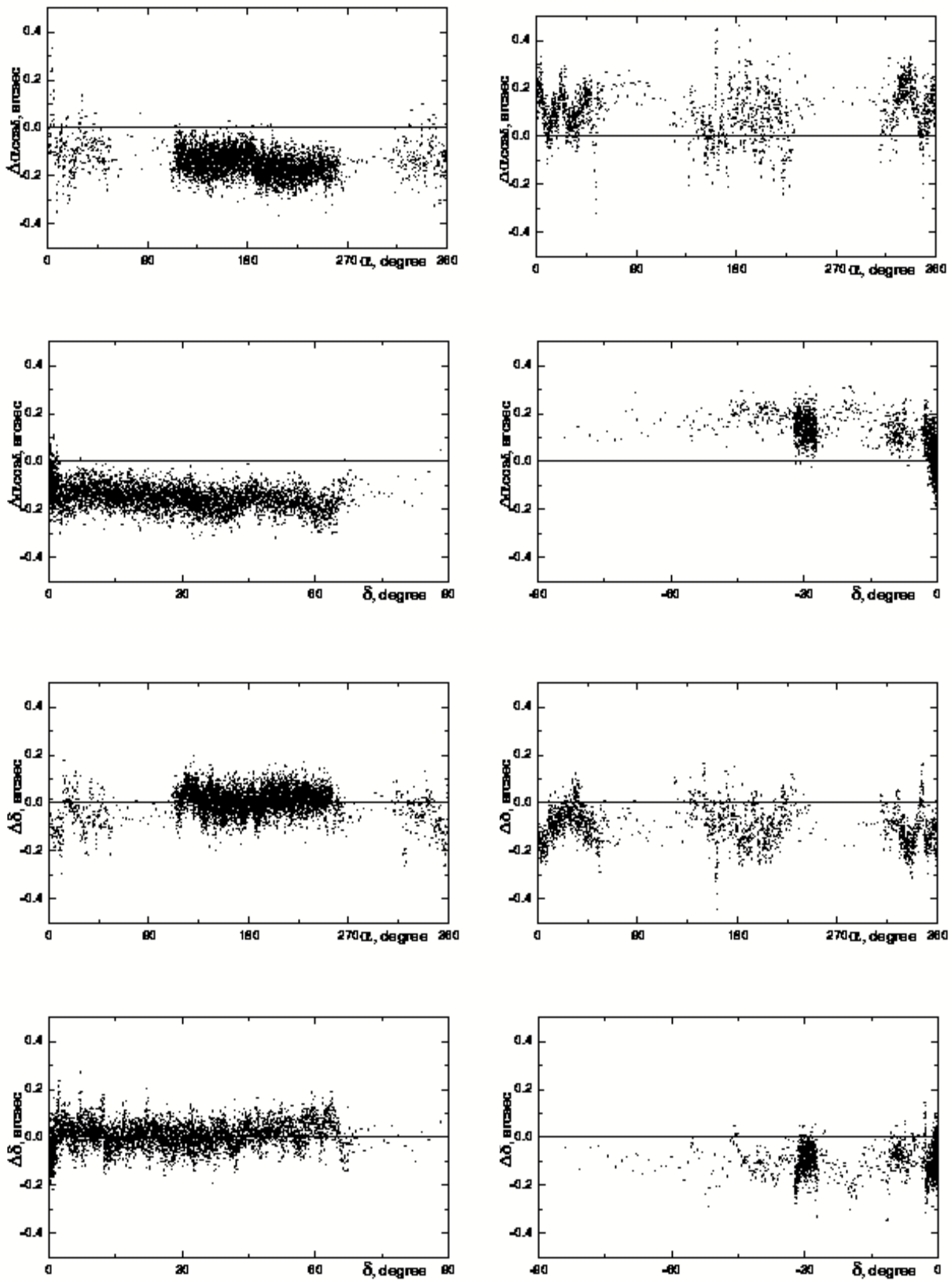


Рисунок 2.1 Порівняння положень LQRF2-квazarів з їх положеннями в GSC2.3 каталозі. Зліва - північна півкуля, праворуч — південна.

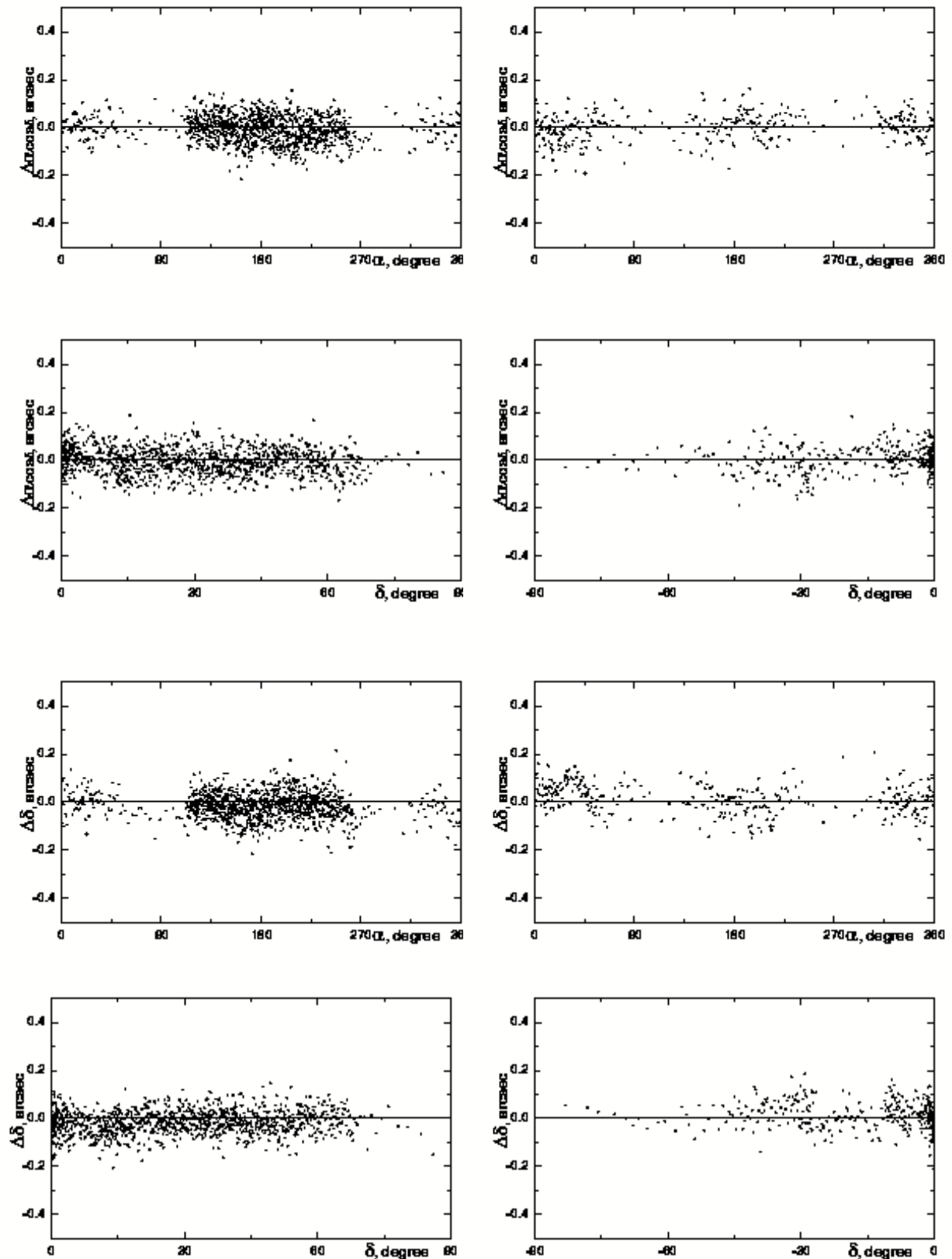


Рисунок 2.2 Порівняння положень LQRF2-квazarів з їх положеннями у PSC (2MASS) каталозі. Зліва - північна півкуля, праворуч - південна.

На рисунках 2.1, 2.2 представлені результати порівняння положень квазарів LQRF2 з їх положеннями в каталогах GSC2.3 і PSC (2MASS). Оскільки число

квazarів в каталозі LQRF2 нерівномірно покриває небесну сферу, а їх кількість на індивідуальних пластинках незначна, ми наводимо результати порівняння окремо для північної та південної півкуль. Як видно з рис. 1 координатні різниці (GSC2.3 - LQRF2) показують не тільки глобальні відхилення від системи LQRF2. Проглядаються також і зональні спотворення, зазвичай властиві Шмідтівським пластинкам і які іноді сягають величини приблизно 1 секунда дуги. Число спільних об'єктів при перетині LQRF2 - GSC2.3 і LQRF2 - 2MASS у вікні пошуку радіусом 1.5 секунди склало приблизно 30 тисяч.

Поведінку координатних різниць LQRF2 - 2MASS цілком можна пояснити випадковим розкидом, викликаним випадковими помилками положень квазарів в порівнюваних каталогах. З рисунку добре видно, що існуючи систематичні відмінності в положеннях цих об'єктів є незначними. Тому в подальших процедурах, в якості більш високощільної опорної системи ми тимчасово використовуємо систему PSC (2MASS) замість LQRF2.

2.4 Вирішення проблеми

Процедура приведення положень SSA - галактик до системи PSC (2MASS) для кожного з оглядів J (B), R і I складається з наступних кроків. Спочатку виконується крос - ідентифікація підмножини SSA - галактик, для яких виконана умова 90% реальності, з галактиками каталогу GSC2.3, для яких вказано спеціальну позначку «3» і які одночасно можна бачити на пластинках J (B), R і I. На сайті SSA наведено критерій відбору галактик з 90% реальністю, суть якого полягає в наступному: Реальність в цьому контексті значить, що галактика повинна бути видимою на UKJ, UKR та UKI пластинках, повинна бути класифікована як не зіркова в UKJ і UKR оглядах, не повинна бути деблендована в UKJ або UKR і повинна мати хорошу якість в UKJ, UKR та UKI оглядах (тобто якість < 128). Магнітудне обрізання при $B_j < 20.0$ надає реальність краще ніж 90%. Кількість спільних галактик при такому перетині склало приблизно 70 мільйонів. Вибір каталогу GSC2.3 для приведення положень його галактик до системи PSC (2MASS) обумовлений декількома обставинами. По перше, хоча сферичні координати об'єктів GSC2.3 були виведені з тих же самих Шмідтівських пластинок, які використовувалися для

SuperCOSMOS, виміряні координати GSC2.3 були отримані за допомогою іншої вимірювальної машини. У цьому сенсі дані GSC2.3 і SuperCOSMOS є незалежними. По друге, сферичні координати GSC2.3 - галактик при зазначених вище умовах крос - ідентифікації, є результатом усереднення трьох положень галактик з пластинок оглядів J (B), R і I, внаслідок чого, вони мають відносно високу випадкову точність, що складає приблизно 300 мсд і порівнянну з точністю галактик в XSC (2MASS). Природно, що усереднені положення галактик віднесені до середньої епохи J (B), R і I пластинок.

На наступному кроці, об'єкти отриманого перетину (SSA - GSC2.3) ототожнювалися у вікні радіусом 1.5 кутові секунди з об'єктами PSC (2MASS). Число загальних галактик склало приблизно 50 мільйонів. На малюнку 5 наведено графіки залежностей координатних різниць GSC2.3 - PSC (2MASS) від положень на конкретній платівці. Візуальний перегляд аналогічних графіків для всіх 1715 полів SuperCosmos показує, що в переважній більшості випадків координатні різниці GSC2.3 - PSC (2MASS) - галактик істотно викривлені. Але встановити для них будь - який загальний шаблон практично не можливо, оскільки в різних полях спотворення мають найрізноманітніший вигляд.

З графіків на рис.2.3 добре видно, що існують значні координатні спотворення в полях, що відповідають розмірам пластинок і особливо помітні на їхніх краях. Такі типові спотворення координат з амплітудою 0.5 сек і більше містяться практично у всіх каталогах, що використовують дані Шмідтівських пластинок, наприклад в USNO - A2.0, USNO — B1 [25], PPMXL [28] і навіть у UCAC3 [38]. Враховуючи зауваження, зазначені вище ми вважаємо, що положення галактик PSC (2MASS) є в даному порівнянні еталонними, а представлені на рис. 2.3 особливості поведінки різниць обумовлені систематичними помилками в каталозі GSC2.3. Це припущення є досить обґрунтованим і добре підтверджується рис. 2.5, на якому для того ж поля, що і на рис. 2.3, наведено різниці координат галактик, що містяться в каталогах UCAC4 і 2MASS, і в яких дані Шмідтівських пластинок не використовувалися. І хоча координати об'єктів в цих каталогах частково скорельовані, відсутність в різницях координат розривів та інших нерегулярних

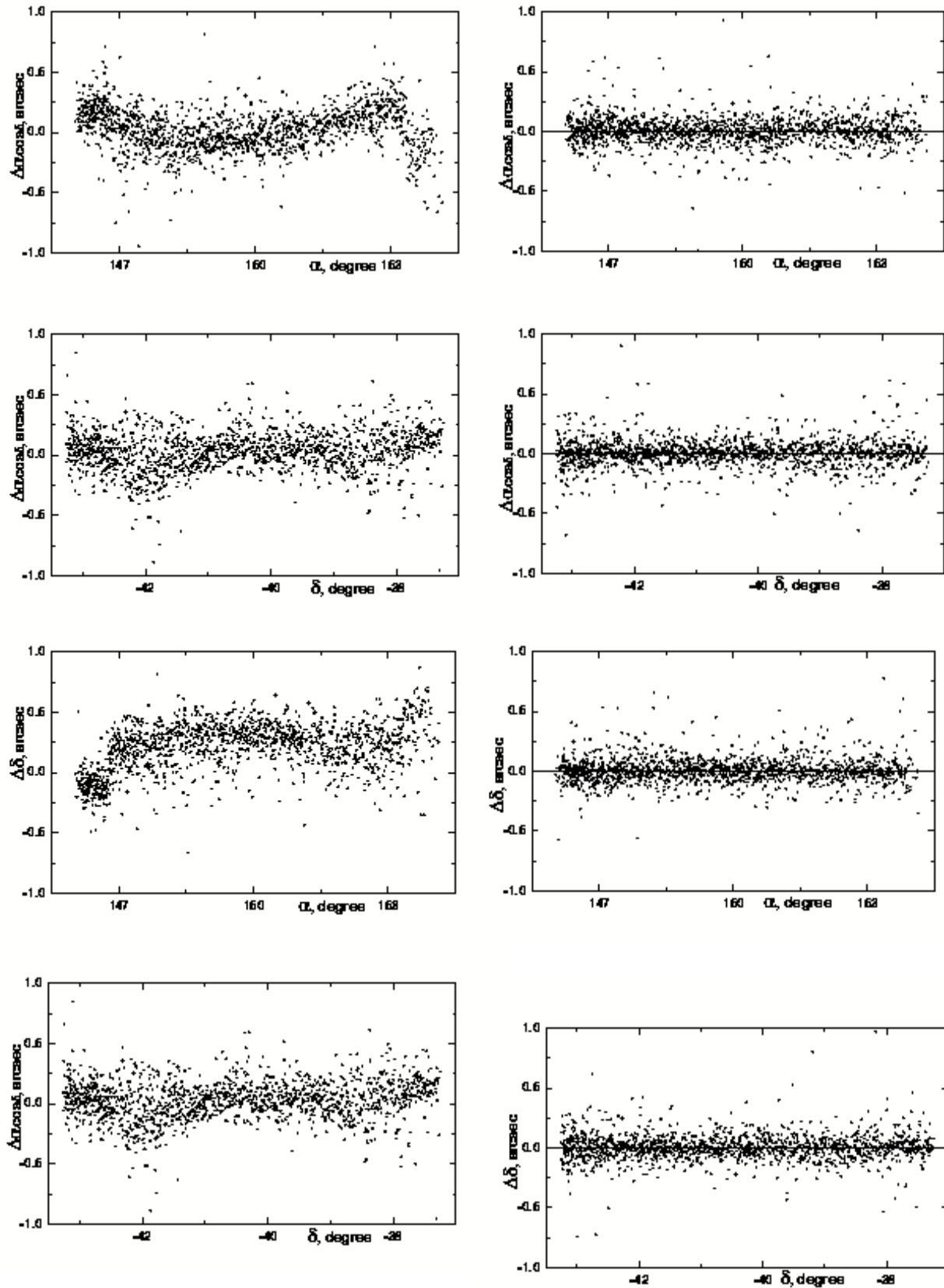


Рисунок 2.3 Порівняння положень GSC2.3-квазарів з їх положеннями у PSC (2MASS) каталозі в полі 65852 як функція від RA та Dec до і після корекцій.

проявів у всіх полях, що відповідають конкретним Шмідтівським пластинкам, свідчить про відсутність значущих зональних спотворень в 2MASS.

Очевидно, що використання відповідних математичних функцій, наприклад поліномів, для усунення спотворень неефективно, оскільки явні розриви на краях полів згладжуються, а не усуваються. Тому для усунення координатних спотворень (зональних систематичних помилок) в каталозі GSC2.3 був застосований двомірний медіанний фільтр за допомогою якого було отримано двомірні корекції для кожного конкретного поля. Оскільки кількість загальних галактик на перетині GSC2.3 і PSC становить близько 50 мільйонів (у середньому 29 тисяч на пластинку), корекції були отримані для кожного індивідуального поля.

Перед застосуванням медіанного фільтра вихідні різниці GSC2.3 - PSC були виправлені за рівняння блиску, яке апроксимовано лінійною залежністю від зоряної величини. Тут ми також вважаємо, що положення галактик PSC (2MASS) є в даному порівнянні еталонними, тобто не залежать від зоряної величини. На рис. 2.3 наведено типові залежності координатних різниць галактик після корекцій в залежності від координат на платівці. З рисунку добре видно, що спотворення в різницях координат практично відсутні. Середньо - квадратичні відхилення координатних різниць GSC2.3 мінус PSC після виключення зональних систематичних помилок склали приблизно 250 - 350 мсд залежно від конкретного поля.

Також на рис. 2.4 ми наводимо залежності тих же різниць координат галактик GSC2.3 - PSC (2MASS) від зоряної величини до і після корекції. Якщо положення галактик PSC (2MASS) справді не залежать від зоряної величини, то після застосування медіанного фільтра виправлені різниці координат також не повинні залежати від зоряної величини. Однак, як видно з малюнків, залишкове рівняння блиску присутнє в різницях координат. Причина такої поведінки поки залишається неясною. Але оскільки на цьому етапі головним завданням є редукція положень галактик GSC2.3 в PSC (2MASS), то яка б не була причина такої поведінки, ми виключаємо залишкове рівняння блиску в кожному

конкретному полі, апроксимуючи його лінійною залежністю від зоряної величини J каталогу GSC2. 3.

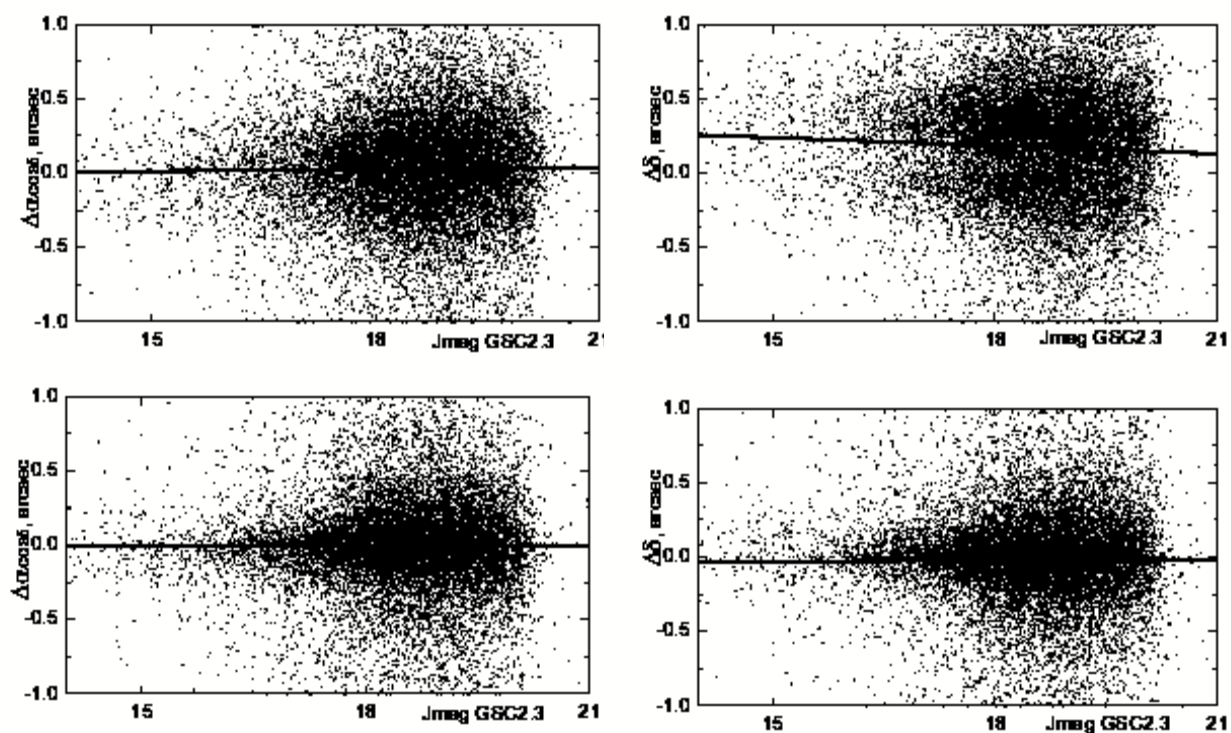
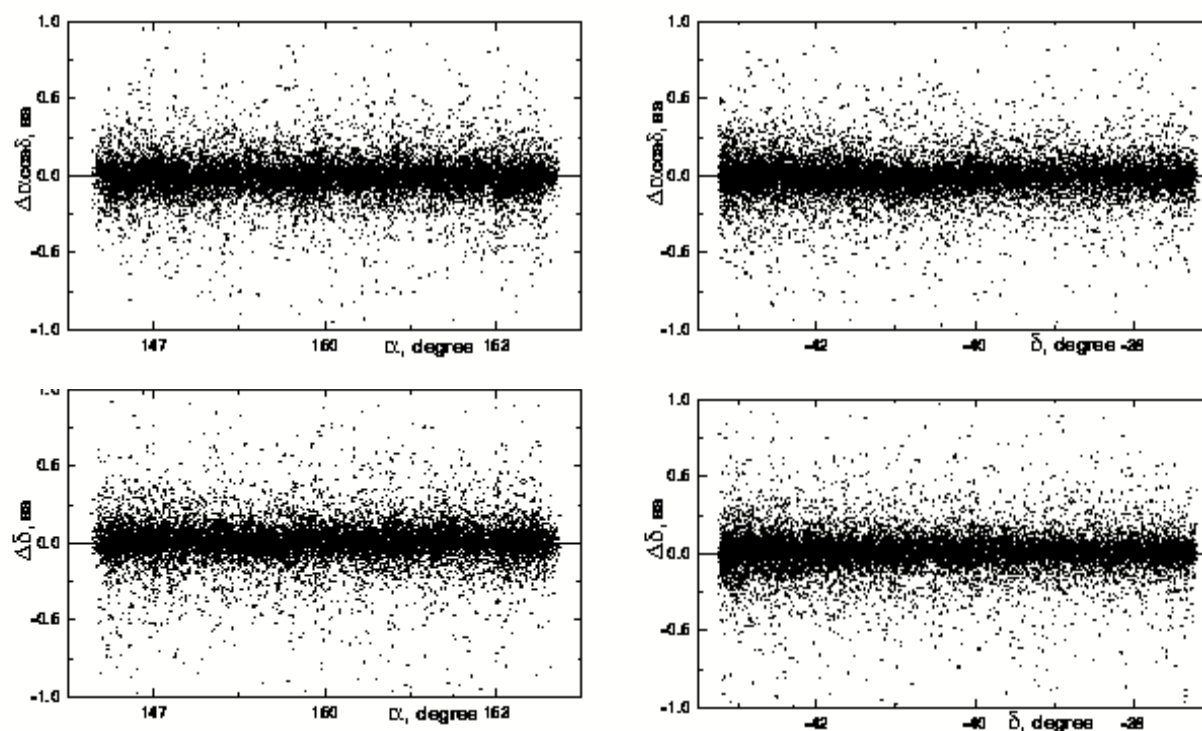


Рисунок 2.4 Залежність різниць координат галактик від зоряної величини до і після корекції



2.5 Порівняння положень UCAC4-галактик з їх положеннями у PSC (2MASS) каталозі у вибраному полі 65852 як функція від RA та Dec

На останньому кроці ми застосували отримані для кожного конкретного поля корекції для усунення систематичних спотворень координат всіх GSC2.3 - галактик, які містяться на перетині SSA і GSC2.3 і таким чином отримали сферичні координати GSC2.3 - галактик, які виправлені за зональні помилки і приведені в систему, що задається положеннями позагалактичних об'єктів PSC (2MASS).

3 ПЕРША ВЕРСІЯ КАТАЛОГУ XPM2

На даний час перша версія каталогу XPM2 містить близько 1 мільярда об'єктів, що покривають все небо. Схема виведення цієї версії каталогу XPM має такий вигляд. Спочатку виконувалась редукція положень всіх об'єктів, що містяться на конкретній платівці у фільтрах J, R і I огляду SuperCosmos в систему координат, яка задається положеннями галактик із створеного нами опорного каталогу. Для цього ми використовували наведені в документації огляду SuperCosmos дані, зокрема виміряні координати x та y , положення оптичного центру кожної платівки, тощо. Положення всіх об'єктів було отримано на епоху спостережень конкретної платівки у фільтрах J, R і I з використанням самої простої — лінійної моделі редукції. Такий підхід надає можливість отримати уявлення про систематичні помилки на кожній платівці.

Середні положення і власні руху зірок були отримані по їх індивідуальним положенням в різні епохи. Для кожного поля були використані наявні в нашому розпорядженні пластинки, отримані в різні епохи.

Для виведення середніх положень і власних рухів зірок з індивідуальних положень була застосована лінійна регресія:

$$\alpha(T_0) = \alpha_0 + \mu_\alpha \cos \delta (T_0 - T_0),$$

$$\delta(T_0) = \delta_0 + \mu_\delta (T_0 - T_0)$$

де T_0 середня епоха спостереження даного поля. Зважування в даному випадку не застосовувалося.

Отримані дані в подальшому використовувались для виконання багатьох

тестів та попереднього порівняння і аналізу даних спільних об'єктів каталогів XPM2 та XPM.

Висновки до розділів 1, 2, 3

Таким чином ми досягаємо головної мети цієї роботи - отримати високощільний каталог позагалактичних джерел, що рівномірно покривають все небо за винятком невеликої зони поблизу галактичного екватора. Загальне число позагалактичних об'єктів склало близько 70 мільйонів. Однак слід зауважити, що на цьому етапі положення галактик ще не приведені у систему LQRF2, яка є оптичною реалізацією системи ICRS, а лише віднесені до системи відліку, що задається положеннями галактик каталогу 2MASS. Остаточна прив'язка положень галактик і зірок виведеного каталогу XPM2 до системи LQRF2 буде виконана після проміжного виведення положень зірок в системі 2MASS. Це викликано тим, що коректне ототожнення LQRF2 - квазарів, які є практично точковими об'єктами, з квазарами, що виводяться в каталозі, можливо тільки в тому випадку, коли будуть отримані положення точкових об'єктів - тобто зірок. Остаточною перевіркою правильності виконаних процедур буде крос - ідентифікація квазарів з отриманого каталогу XPM2 з квазарами LQRF2. Очевидно, що їх кількість має стати більшою, ніж при перетині з 2MASS, а середня різниця їх положень повинна дорівнювати нулю.

Використовуючи дані отриманого опорного каталогу, ми вивели першу версію каталогу положень та власних рухів об'єктів, що покривають майже все небо, за винятком невеликого регіону поблизу галактичного екватора. Цей каталог названо нами XPM2 і він містить близько 1 мільярда об'єктів від приблизно 10 до 22 зоряної величини.

Дані отриманих каталогів можуть бути використані не тільки для вище зазначених цілей, а й у багатьох інших астрономічних додатках.

4 СТВОРЕННЯ ФІНАЛЬНОЇ ВЕРСІЇ КАТАЛОГУ XPM2U

4.1. Вхідні дані

Попередні дослідження даних SuperCOSMOS показали, що виміряні координати зображень небесних об'єктів обтяжені помітними випадковими і систематичними помилками. При цьому слід зазначити, що зображення на Шмідтівських пластинках мають специфічні як геометричні так і магнітудно-залежні спотворення. Основною причиною таких спотворень є механічна деформація фотопластинки при її закріпленні в спеціальному утримувачі. Це призводить до того, що спотворення по суті є унікальними для кожної конкретної пластинки. З цієї причини редукцію необхідно виконувати також в кожній конкретній платівці кожного з оглядів J, R і I.

Оскільки ми намагаємося створити високоточний астрометричний каталог, необхідно дуже критично підходити до вибору як опорних, так і визначаємих зірок. Їх виміряні координати повинні бути достатньо надійними. Для цього з подальшої роботи виключаються всі зоряні зображення, чиї координати не можуть розглядатися як надійно виміряні.

У SSA наведені параметри об'єктів, що описують кожну детекцію, в тому числі виміряні координати x , y . Проте, не всі ці записи відносяться до реальних астрономічним сімейств об'єктів (зірок, квазарів, галактик, туманностей і т.д.). Серед записів каталогу є багато таких, які є небажаними. Їх походження викликано помилковими об'єктами, що задетектовані на даній платівці. Більшість типів помилкових об'єктів в SSS даних описані в [33]. З метою уникнути використання таких помилкових об'єктів, ми відбирали за допомогою спеціально створеної програми об'єкти з SSA, які підходять для наших цілей. При цьому використовувалися представлені в SSA критерії, які дозволяли відкидати помилкові детекції. Критерієм правильності застосування цих критеріїв була вибіркова візуальна інспекція на деяких площадках.

4.2. Опорний каталог

Для виведення положень об'єктів XPM2U в якості опорних зірок використовувалися зірки каталогу UCAC4. Як відомо, каталог UCAC4 містить положення і власні руху приблизно 105 мільйонів об'єктів приблизно до $R =$

16^m, що покривають все небо. Положення та власні рухи цих об'єктів були виведені з комбінації спостережень на 20 см астрографі USNO. За заявами авторів каталогу позиційна точність зір в UCAC4 в середню епоху спостережень складає приблизно 15-100 мас (міліарксекунд) на координату, в залежності від зоряної величини, а формальні помилки у власних рухах є в діапазоні від 1 до 10 мас/рік в залежності від зоряної величини та спостережної історії. Систематичні помилки власних рухів оцінюються величиною приблизно 1-4 мас/рік.

Формально нуль-пункт системи власних рухів яскравих зірок UCAC4 прив'язаний до HCRF через зірки Hipparcos/Tycho2, а слабких - до положень позагалактичних джерел з каталогу XSC - 2MASS (формально в системі Tycho2). Процедура встановлення нуль-пунктів власних рухів в каталозі UCAC4 полягала в знаходженні для яскравої області зоряних величин різниць положень об'єктів (Hipparcos - Lick1) і (Hipparcos - YSJ1) в епоху спостережень Lick1 і YSJ1, а в слабкій області - різниць положень об'єктів (XSC - Lick1) і (XSC - YSJ1). Ці позиційні зміщення досягають декількох сотень мілісекунд, а джерело їх виникнення абсолютно не зрозуміле. Для усунення цих позиційних різниць авторами було зроблено припущення про існування лінійного рівняння блиску (РБ) для всього діапазону зоряних величин каталогів Lick1 і YSJ1. Нахил цієї прямої був визначений шляхом ділення різниці між зміщеннями в яскравому ($\sim 7.5^m$) і слабкому ($R = 16^m$) кінці діапазону зоряних величин на його протяжність, що дорівнює 8.5^m . Отримане таким чином РБ використовувалося для корекції положень всіх об'єктів в каталогах Lick1 і YSJ1. В даній процедурі припущення про існування РБ в даних Lick1, YSJ1 є цілком виправданим і не викликає сумнівів, проте припущення про відсутність РБ в даних 2MASS і лінійності РБ в каталогах Lick1 і YSJ1 ніяк не обгрунтовані. Вірогідно, що лінійне РБ було введено як найбільш проста форма поведінки позиційних різниць в залежності від зоряної величини. На пластинках Lick1 і YSJ1 присутні зображення і пересичених, і насичених, і ненасичених зірок. Всередині кожної зони хід РБ повинен бути, швидше за все, близьким до лінійного, відповідно до характеристичної кривої емульсії, і як наслідок, з різними нахилами. Тому

вважати, що РБ у власних рухах UCAC4 і SPM4, що використовують однакову процедуру установки нуль-пункту, повністю виключено, навряд чи правомірно. Найімовірніше залишкове РБ у власних рухах об'єктів UCAC4 все ж таки присутнє.

Та все ж таки, каталог UCAC4 єдиний каталог системи HCRF, дані якого задовольняють всім необхідним вимогам для використання його в якості опорного при виведенні каталогу XPM2U. А саме: покриває всю небесну сферу без пропусків, містить на пластинках Шмідта (6×6 градусів) десятки тисяч опорних зірок аж до 16 зоряної величини і не корелюють з даними Шмідтівських оглядів. Дотримання цих вимог дозволяє за допомогою даних SuperCOSMOS поширити систему HCRF в область слабких зоряних величин приблизно до 21 - 22, за умови, що РБ в даних SuperCOSMOS для діапазону зоряних величин 16 - 21 не є суттєво нелінійним. Найімовірніше ця умова виконується, оскільки асиметрія профілів ненасичених зображень зірок є мінімальною, а характеристична крива залишається все ще майже лінійною.

5 СТВОРЕННЯ ФІНАЛЬНОЇ ВЕРСІЇ КАТАЛОГУ XPM2U

5.1. Астрометрична редукція

Астрометрична редукція спостережень, отриманих на Шмідтівських телескопах не є тривіальною процедурою. Класична астрометрична редукція була розроблена для астрографів класичного типу з порівняно невеликим плоским полем зору. Такі телескопи створюють зображення області зоряного неба, яке з хорошим наближенням можна розглядати як центральну проекцію сфери на площину. Для таких телескопів основні положення гауссової оптики є справедливими. Однак для понад ширококутних і понад світлочутливих систем, якими є телескопи Шмідта зі сферичним полем зору, поняття геометричної оптики, строго кажучи, втрачають сенс. Тим не менше, і в цьому випадку, центральна проекція є найбільш близькою математичною моделлю реальної астрофотографії, за допомогою якої все ж можна вирішувати багато астрометричних завдань. При цьому, в кожному конкретному випадку необхідно вибирати відповідну модель редукції і доповнювати її необхідними членами з метою мінімізації розбіжностей між моделлю і реальною фотографією.

5.2. Модель редукції

Оскільки астрометрична редукція спостережень, отриманих на Шмідтівських телескопах з використанням тільки класичного підходу, найчастіше є неефективною, ми змушені були застосувати двох-крокову процедуру. На першому кроці ми використовували модель редукції із застосуванням полінома 5 ступеня. Очевидно, цю модель необхідно розглядати як формально інтерполяційну при переході від вимірних координат до тангенціальних, що є цілком виправданим при значному числі опорних зірок.

Оцінки параметрів моделі і помилок редукції були визначені на основі узагальненого методу депенденсів.

Системи умовних рівнянь для визначення параметрів моделі редукції в матричному вигляді мають такий вигляд:

$$X_{Nm}A_{m1} = \Xi_{N1}; \quad X_{Nm}B_{m1} = \Theta_{N1}$$

де матриця X_{Nm} має N рядків і m стовпців, заданих коефіцієнтами (вимірними координатами N опорних зірок) умовних рівнянь, A_{m1} , B_{m1} одностовпцові матриці, складені з визначаємих параметрів a_i і b_i , $i = 1, 2, \dots, m$; Ξ і Θ - одностовпцові матриці, складені з тангенціальних координат ξ_i , η_i опорних зірок.

Рішення системи умовних рівнянь за способом найменших квадратів доставляє незміщені найімовірніші значення шуканих величин:

$$\tilde{A}_{m1} = C^{-1}_{mm} X_{mN} \Xi_{N1} \text{ и } \tilde{B}_{m1} = C^{-1}_{mm} X_{mN} \Theta_{N1}.$$

Тут $\tilde{A}_{m1}$ і $\tilde{B}_{m1}$ - вектори оцінок шуканих параметрів a_i і b_i , $i = 1, 2, \dots, m$; C^{-1}_{mm} - симетрична матриця, зворотня по відношенню до матриці нормальних рівнянь

$$C_{mm} = X_{mN} X_{Nm}.$$

Оцінки параметрів $\tilde{A}_{m1}$ і $\tilde{B}_{m1}$ було визначено з урахуванням зважування тангенціальних координат, які залежать від точності їх сферичних координат, наведених в опорному каталозі UCAC4. В даному випадку значення ваги залежить від точності координат опорних зірок і зв'язується з кількістю повних копій одного й того ж спостереження (імітація повторних спостережень), з подальшим округленням ваги до найближчого цілого значення.

Оцінки помилок редукції виконувались на основі внутрішньої збіжності початкових даних

$$\sigma^2 = \sum v_i^2 / N - m$$

з урахуванням кореляцій параметрів a_i (між собою) і b_i (між собою). Кореляційними матрицями параметрів a_i і b_i служать матриці

$$K(a_i a_i) \text{ и } K(b_i b_i),$$

Вплив конфігурації опорних і визначаємих зірок оцінювався величиною

$$[\lambda^2] = X_{1m}^0 C^{-1}_{mm} X_{m1}^0, \text{ где } X_{1m}^0 = \|1, x_0, y_0, x_0^2, \dots, x_0^{pq}, y_0^{rs}\|, \text{ а } X_{m1}^0 = (X_{1m}^0)^T$$

яка дозволяє в наочній формі помітити і коригувати індивідуальний внесок кожної опорної зірки в загальну сумарну помилку редукції. Індекс 0 вказує на виміряні координати визначаємого об'єкта.

На другому етапі ми використовували медіанний фільтр. З метою знаходження апроксимуючої функції в кожному полі був побудований двовимірний медіанний фільтр, за допомогою якого була отримана апроксимуюча функція, що описує поведінку медіанного середнього в даному полі. Для цього кожне індивідуальне поле розміром 6×6 градусів розбивалося на 1000×1000 осередків, усередині яких були обчислені значення медіанного середнього. З різних можливих варіантів фільтрів ми використовували саме медіанний фільтр, оскільки він надає можливість визначити таку функцію, яка практично повністю повторює поведінку вихідної функції в точках розривів на відміну від інших фільтрів, зазвичай просто згладжують ці розриви. Ця особливість медіанного фільтра дозволяє в даній задачі відновити вихідну функцію майже без спотворень.

5.3. Рівняння блиску в SuperCOSMOS

Після виконання редукції ми аналізували поведінку нев'язок опорних зірок залежно від зоряної величини для кожного конкретного поля. Каталог UCAC4 містить астрометричну інформацію тільки для зірок до $R = 16^m$, в той час як на пластинках SuperCOSMOS містяться зірки до 22^m . В каталозі SuperCOSMOS в діапазоні від 10 до 16 зоряної величини РБ суттєво нелінійне і ця обставина робить не коректною його екстраполяцію в область слабких зоряних величин. Щоб визначити УБ в SuperCOSMOS в діапазоні слабкіше 16 зоряної величини в

якості опорних зірок ми використовували зірки каталогу XPM з цього піддіапазону. Каталог XPM в даній задачі може розглядатися як каталог положень 2MASS з абсолютними власними рухами зірок. Як відомо [10], система положень каталогу XPM є по суті системою положень 2MASS, а система власних рухів прив'язана до положень галактик XSC (2MASS). Нуль-пункт системи власних рухів зірок UCAC4 був скоректований шляхом усунення лінійного РБ між зміщеннями положень у яскравому (зірки Hipparcos) і слабкому (галактики XSC) кінцях діапазону зоряних величин. Таким чином, нуль-пункти системи власних рухів зірок каталогів XPM і UCAC4 в слабкому кінці діапазону зоряних величин, приблизно на 18^m - 19^m , збігаються, а в яскравій частини на 10^m - 11^m , дещо відрізняються. В [7] було показано, що ця відмінність становить близько 2 мас/рік. За заявами авторів каталогу UCAC4, хоча положення 2MASS і не були прямо використані в UCAC4, 2MASS дані були використані для корекції магнітудно-залежних помилок в даних UCAC4 і типові систематичні різниці UCAC4 мінус 2MASS становлять 10 мас. Таким чином, систему положень 2MASS можна розглядати, як продовження системи UCAC4 в слабку область, а відмінність систем власних рухів зірок каталогів XPM і UCAC4 в діапазоні слабше 16^m не повинно перевищувати 0.5 мас/рік. Вищенаведені міркування є обґрунтуванням для використання астрометричних параметрів зірок XPM в області слабкішій 16^m . Цей підхід робить виведену систему положень і власних рухів об'єктів SuperCOSMOS такою, що практично не відрізняється від системи положень і власних рухів об'єктів UCAC4.

Усунення РБ було виконано в кожному індивідуальному полі кожного з оглядів J, R і I шляхом введення корекцій, отриманих з апроксимації нев'язок опорних зірок залежно від зоряної величини гладкою функцією (поліномом). Слід зазначити, що поведінка нев'язок в полях навіть одного і того ж огляду помітно відрізняється. Іноді РБ по обох координатах досягає декількох сотень мас, а іноді майже відсутнє. Слід зазначити, що РБ для одного і того ж поля одного і того ж огляду в каталогах SuperCOSMOS і USNO-A2.0 [24] істотно відрізняється. Ймовірно це пов'язано з використанням як різних вимірювальних машин (PPM і SuperCOSMOS) так і способів визначення фотометричних

центрів зірок (метод моментів і Fermi-Dirac distribution function).

5.4. Каталог

Каталог XPM2U створено на основі редукції виміряних координат із оглядів SSA (SuperCOSMOS Science Archive) в систему HCRF. В каталозі XPM2U представлені положення, власні рухи, а також зоряні величини, приблизно для одного мільярда об'єктів, головним чином зірок та галактик, магнітуда яких сягає 21 - 22 зоряної величини. Каталог покриває практично все небо від -90° до $+90^\circ$ схилення, включаючи Галактичну площину.

Положення зір каталогу виведено для кожного індивідуального поля із усіх оглядів на епоху їх спостережень. Середньоквадратична помилка положень зір після редукції в систему UCAC4 на епоху спостережень становить від 70 до 250 мас в залежності від конкретної пластинки та зоряної величини.

Власні рухи було виведено для кожної зорі із її положень в кожен епоху спостережень. Для південної півкулі ми мали зазвичай 3 точки, з середньою часовою протяжністю приблизно 23 роки. Для північної півкулі — 4 точки, а середня часова протяжність становила близько 50 років. Середньоквадратична помилка власних рухів також помітно залежить від зоряної величини і становить від 2-5 мас/рік для яскравих зір до 5-15 мас/рік для слабких зір.

Щоб мати наочне уявлення про систематичні помилки власних рухів зір каталогу XPM2U, ми проводимо їх порівняння з власними рухами спільних зір із каталогів PRMXL та XPM. Результати цього порівняння для одного із довільних полів приведено на рисунках 5.1-5.4.

Добре видно, що власні рухи зір в порівнюваних каталогах мають хоча і не значні, та все ж систематичні відмінності. Це не є несподіванкою, оскільки вони можуть бути обтяжені індивідуальними рівняннями блиску.

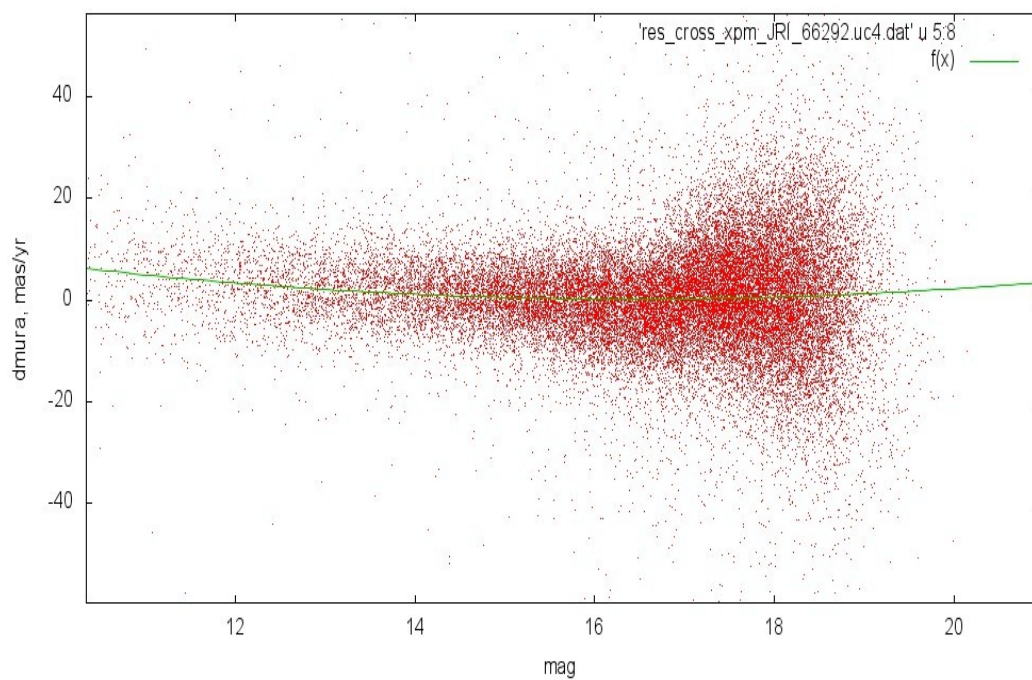


Рис.5.1. Залежність різниці власних рухів зір $\Delta\mu_\alpha \cos \delta$ між каталогами ХРМ та ХРМ2U від зоряної величини.

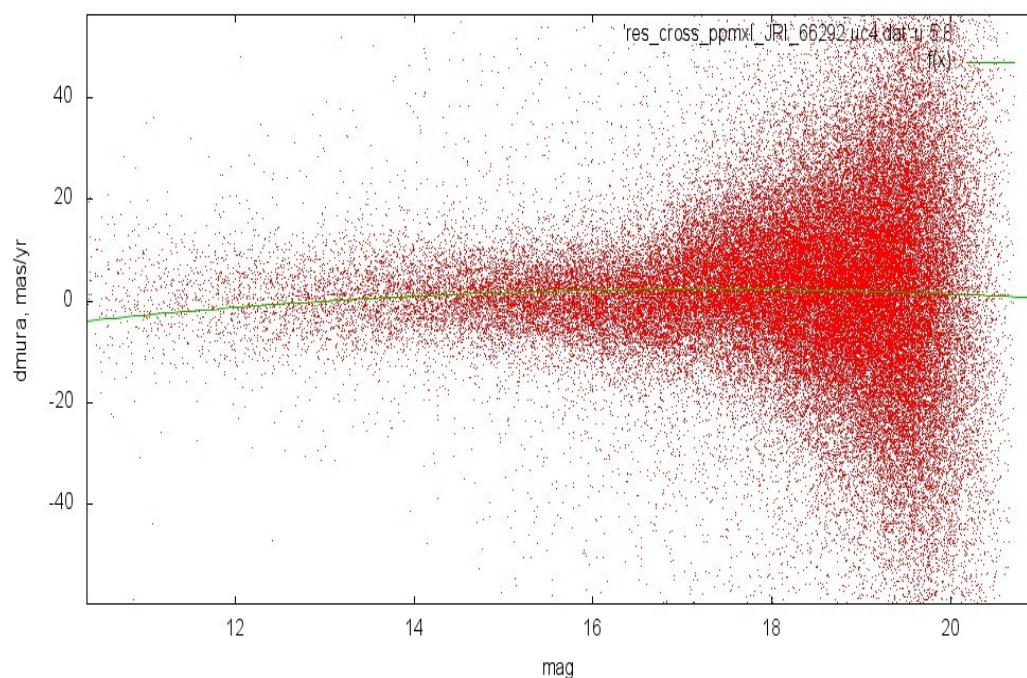


Рис.5.2. Залежність різниці власних рухів зір $\Delta\mu_\alpha \cos \delta$ між каталогами RPMXL та ХРМ2U від зоряної величини.

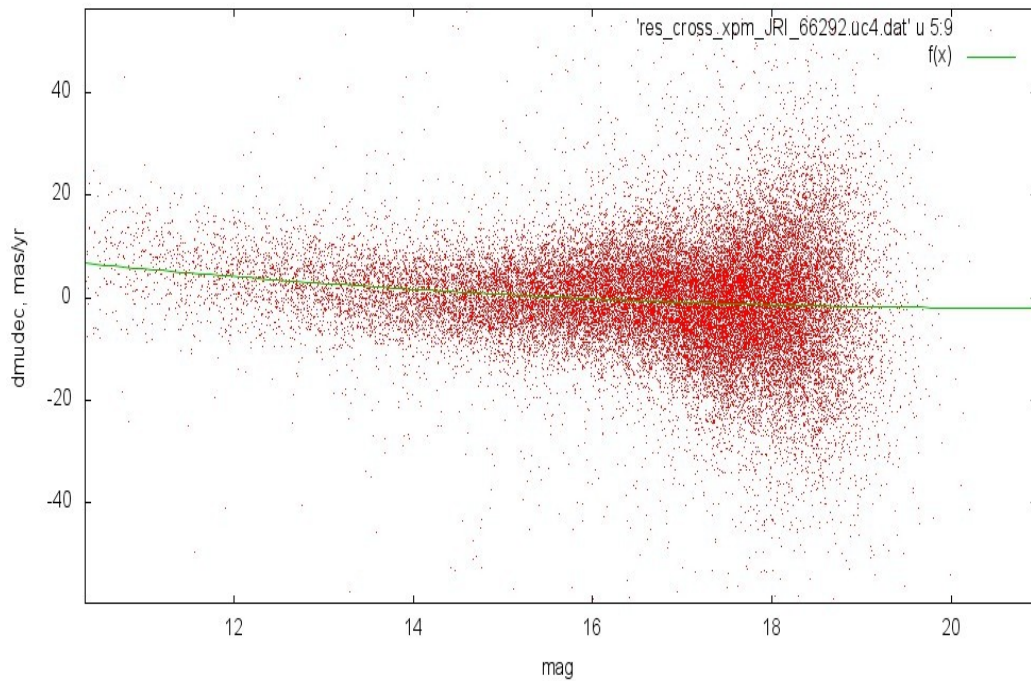


Рис.5.3. Залежність різниці власних рухів зір $\Delta \mu_\delta$ між каталогами ХРМ та ХРМ2U від зоряної величини.

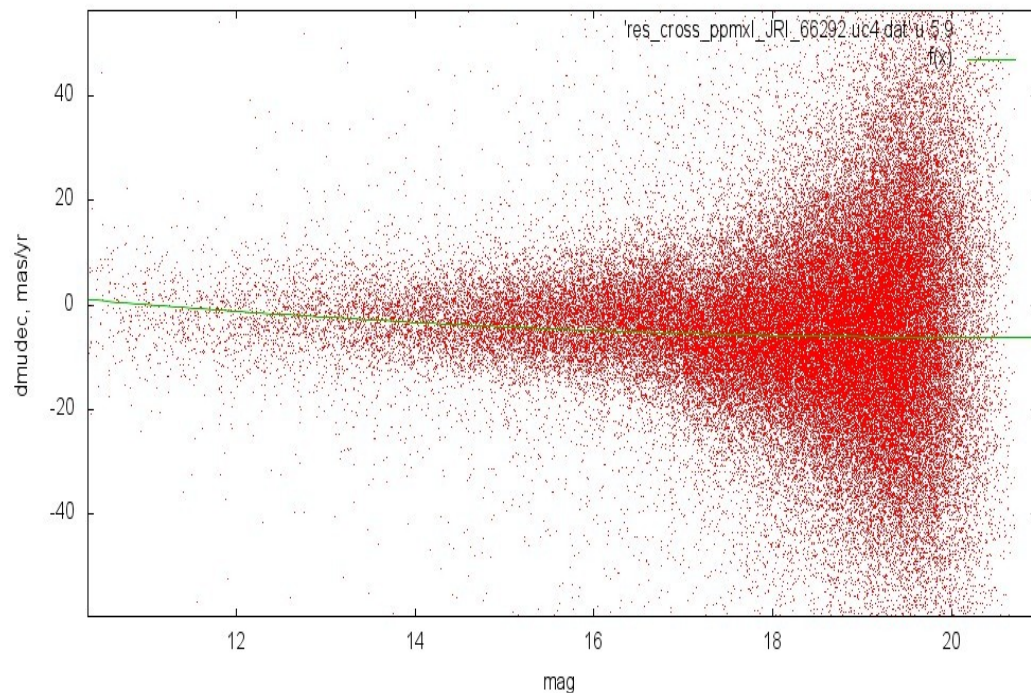


Рис.5.4. Залежність різниці власних рухів зір $\Delta \mu_\delta$ між каталогами PPMXL та ХРМ2U від зоряної величини.

6 ФОРМУВАННЯ СПЕЦІАЛЬНИХ ВИБІРОК ЗІР РІЗНИХ ПІДСИСТЕМ

Для формування спеціальних вибірок вивчено метод приведених власних рухів для відбору зірок різних класів світності на основі фотометричної інформації та інформації про їх власні рухи. На основі проведеного

моделювання оцінено вплив випадкових і систематичних помилок власних рухів на здатність методу відокремлювати зірки-гіганти червоного згущення від близьких за кольором карликів головної послідовності класу $\sim K$. Зроблено попередній висновок про практичну неможливість відокремити гіганти від зірок висхідної гілки і K-карликів при використанні JHK-фотометрії 2MASS для зірок слабкіше $J \sim 11.75^m$ і точності власних рухів гірше ~ 5 мас/рік.

Додатково, на основі моделювання вдалося показати що фотометрія 2MASS в поєднанні з інформацією про власні рухи дозволяє виділити червоні карлики головної послідовності від M до L класів для значно більшого діапазону зоряних величин, аж до $K \sim 15$.

Методом приведених власних рухів з використанням JHK-фотометрії 2MASS з каталогу XPM2U відібрані зірки-гіганти червоного згущення в діапазоні галактичних широт вище і нижче $+/- 20$ градусів.

Висновки до розділів 4, 5, 6

Таким чином ми досягаємо головної мети цієї роботи - отримати високощільний каталог положень і власних рухів зір. Загальне число об'єктів в каталозі склало близько 1 мільярда. Створений каталог XPM2U це перший в світі каталог, який містить практично стільки ж об'єктів, скільки планується отримати в космічному проекті GAIA. Він покриває практично все небо від -90° до $+90^\circ$ схилення, включаючи Галактичну площину та надає можливість прямого використання Міжнародної опорної системи координат (ICRS) в діапазоні слабких зоряних величин, що сягають $21^m - 22^m$.

Однак слід зауважити, що на цьому етапі положення зір ще не приведено у систему LQRF2, яка є оптичної реалізацією системи ICRS, а лише прив'язані до системи положень і власних рухів каталогів UCA4 та 2MASS. Остаточна прив'язка положень об'єктів виведеного каталогу XPM2U до системи LQRF2 буде виконана після створення каталогу XPM2G, завершення роботи над яким ми плануємо в 2015 році. Також слід зазначити, що відібрані з каталогу XPM2U за допомогою JHK-фотометрії 2MASS зірки-гіганти червоного згущення в діапазоні галактичних широт вище і нижче ± 20 градусів, будуть використані для кінематичних досліджень Галактики.

7 СТВОРЕННЯ ПРОГРАМ ДЛЯ ОБЧИСЛЕННЯ КІНЕМАТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ГАЛАКТИКИ З ВИКОРИСТАННЯМ РІЗНИХ СПОСОБІВ УСЕРЕДНЕННЯ ВЛАСНИХ РУХІВ ПО НЕБЕСНІЙ СФЕРІ.

7.1. Створення бази даних та програмного забезпечення для опрацювання каталогів

Для створення каталогу положень та власних рухів зірок XPM2 було відібрано більш ніж 1.5 Тб даних. Ці дані представляють собою оригінальні виміряні положення x та y небесних об'єктів на платівці, а також детальну фотометричну та геометричну інформацію про зображення даного об'єкта. Загальна кількість об'єктів які залучені для створення каталогу XPM2 сягає приблизно 7 мільярдів, що дає можливість отримати більш ніж 1 мільярд положень та абсолютних власних рухів зірок з систематичною точністю не гірше 0.1 мас/год. Для роботи з такими великими за обсягом даними було створено спеціальне програмне забезпечення, а також базу даних на основі PostgreSQL. Для підвищення ефективності роботи бази даних було встановлено додатковий нестандартний програмний пакет `pg_sphere`, а також спеціально розроблений оригінальний математичний пакет `pgkhaos`. Ці пакети дають можливість швидко проводити різні математичні та статистичні дослідження залучених даних, проводити порівняння та ототожнення зірок в різних каталогах, як за координатами так і за іншими параметрами, а також забезпечувати швидкий доступ до інформації будь-яким стандартним математичним пакетам програм.

Створена база даних включає кілька десятків сучасних каталогів та оглядів з астрометричними, фотометричними та астрофізичними параметрами, а також необхідну додаткову інформацію. В базі даних розміщено більше 20 сучасних астрометричних, астрофізичних каталогів, що містять необхідні вхідні дані для опрацювання Шмідтівських оглядів, а також проведення астрометричного та астрофізичного аналізу створеного каталогу XPM2. Загальний обсяг бази даних становить понад 3 ТБ.

Для проведення спеціальних математичних та статистичних досліджень, а

також використання нелінійних методів аналізу, було створено комплекс спеціального програмного забезпечення, що дозволяє швидко отримати результати для дуже великих масивів даних. Створене програмне забезпечення дало можливість провести дослідження та аналіз систематичних похибок положень зірок в залежності як від координат, так і від зоряних величин в сучасних каталогах зірок. Необхідно відмітити, що створене програмне забезпечення дозволяє проводити аналіз дуже великих масивів даних, при цьому швидкість обчислювань перевищує в десятки та сотні раз аналогічні стандартні програми з сучасних математичних пакетів.

Використання SQL мови дозволяє проводити тільки стандартний аналіз даних, що містяться в базі даних PostgreSQL. Розроблені ж спеціальні обчислювальні програми дозволяють організувати обробку та редукцію, теоретично необмежених в обсязі висхідних даних, при цьому не впливаючи на точність та швидкість розрахунків. Завдяки використанню спеціального алгоритму «Kaha summation algorithm» точність обчислень залишається високою, як для лінійних методів обробки (МНК), так і для нелінійних і не залежить від кількості об'єктів. Більшість програмних пакетів створено на мові програмування C/C++ як для користувачів Windows так і UNIX ОС, а також з використанням сучасних математичних програм MATLAB, OCTAVE.

Створена база даних та програмне забезпечення є необхідним інструментарієм для опрацювання такого матеріалу, що містить дуже великий обсяг інформації. В таблицях бази даних інколи міститься сотні мільйонів записів та кілька сотень стовпців. Тому програмне забезпечення, що створене для обробки цих великих масивів даних є повністю новим і дуже ефективним.

7.2. Створення програмного забезпечення для обчислення кінематичних параметрів Галактики з використанням різних способів усереднення власних рухів по небесній сфері.

Для вирішення методом найменших квадратів систем лінійних рівнянь (зокрема - рівнянь Огороднікова-Мілна і т. п.) створено програму `ogm_solve` для обробки великих обсягів даних. Особливостями цієї реалізації є:

Потокова орієнтованість, що дозволяє організувати обробку теоретично

необмеженого обсягу вихідних даних, які не вміщуються в оперативну пам'ять комп'ютера.

Гнучкість при виборі системи рівнянь. Наприклад, користувач може записати систему рівнянь (модель) в окремому текстовому файлі, без необхідності змінювати вихідний текст програми і збирати її заново. Можливість у рамках одного сеансу розрахунку обраховувати до 256 різних систем рівнянь (моделей).

Створена база даних була протестована в процесі виведення кінематичних параметрів, описаного в наступному розділі. Виявилось, що при опрацюванні такого великого обсягу даних необхідно використовувати так звану “довгу арифметику”. Використання звичайної арифметики призводить до помилок, які виникають внаслідок обмеженої разрядності чисел.

8 ТЕСТУВАННЯ СТВОРЕНИХ ПРОГРАМ І ОБЧИСЛЕННЯ КІНЕМАТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЗА ВЛАСНИМИ РУХАМИ ЗІР ЗМІШАНОГО СПЕКТРАЛЬНОГО СКЛАДУ, ЗОКРЕМА КУТОВОЇ ШВИДКОСТІ ОБЕРТАННЯ ГАЛАКТИКИ НА ВІДСТАНІ СОНЦЯ.

8.1. Вступ

Вже майже два десятиліття HCRF (Hipparcos Celestial Reference Frame) є оптичної реалізацією ICRS (International Celestial Reference System, [2]). Її розширенням в область слабких зоряних величин приблизно до $V = 11.5$ є каталог Tycho-2 [15], що містить положення і власні руху близько 2.5 мільйонів зірок. Всі інші каталоги, які поширюють систему HCRF в область слабких зоряних величин використовують зірки Hipparcos [17] і Tycho-2 як опорні. Прикладами таких каталогів є каталоги PPMXL, SPM4, UCAC4, 2MASS та інші, отримані на основі або тільки фотографічних або тільки ПЗС спостережень, або ж з їх комбінацій. Особливостями цих каталогів є те, що за допомогою їх даних в яскравому кінці діапазону зоряних величин на будь-який момент часу система Hipparcos/Tycho2 відтворюється надійно, а в слабкому кінці, відтворена система може значно відрізнятись від системи Hipparcos/Tycho2, наприклад, через наявність залишкових зональних або систематичних помилок, таких як рівняння блиску.

Так в роботах [9, 10] зазначається, що система власних рухів каталогу Hipparcos можливо обтяжена систематичною помилкою приблизно 2 мсд/рік (мілісекунда дуги на рік), що викликана прив'язкою до системи абсолютних власних рухів декількох тисяч яскравих зірок з використовуваних для цієї мети каталогів SPM2, NPM1 і KSZ. У роботах [11, 39] зазначається, що в каталозі Tycho-2 можливо присутні систематичні зональні помилки, а також помилки у власних рухах, ймовірно викликані рівнянням блиску. Таким чином можна констатувати, що з кожним роком не тільки випадкова, але і систематична точність каталогів, що спираються на систему HCRF, особливо в слабкій області буде деградувати. Іншими словами, зазначені факти ставлять під сумнів інерціальність системи HCRF, а значить і достовірність інших застосувань, наприклад кінематичних досліджень в Галактиці, що вимагають як високої систематичної точності, так і високої щільності зірок і повноти охоплення всієї небесної сфери.

Напередодні створення каталогів за проектом GAIA масові астрометричні каталоги XPM, PPMXL і UCAC4 є базою для проведення різних астрономічних робіт. В даний час ми створили новий високощільний каталог XPM2. Цей каталог містить приблизно один мільярд об'єктів, для яких наведені положення, а також власні рухи. Каталог покриває все небо в діапазоні зоряних величин $10 < V < 22$ і не має ніяких пропусків в зоні галактичного екватора. Крім астрометричної інформації, в каталозі XPM2 наведені зоряні величини у видимому діапазоні B, R, I, а для деяких об'єктів і в ближньому інфрачервоному J, H, K з їх помилками з каталогу 2MASS. Для північного неба використовувалися огляди POSS-I (R) і POSS-II (B), а для південного неба - SERC-J і SERC-R з середньою різницею епох близько 40 і 12 років відповідно. Далі ми представляємо деякі результати використання даних XPM2 для зоряно-кінематичних досліджень та їх порівняння з результатами, отриманими за даними інших каталогів. Для цього ми використовуємо відому кінематичну модель Огороднікова-Мілна.

8.2. Кінематика Галактики за власними рухами зірок та робочі рівняння

У даній роботі використовується прямокутна галактична система

координат, осі якої, спрямовані від спостерігача в бік галактичного центру ($l = 0^\circ$, $b = 0^\circ$, вісь x), у напрямку галактичного обертання ($l = 90^\circ$, $b = 0^\circ$, вісь y) і в напрямку північного полюса Галактики ($b = 90^\circ$, вісь z). У моделі Огороднікова-Мілна прийняті позначення, які були введені в роботах Клюба [4, 5] і застосовувалися в роботах Монта [6, 7]. Як відомо з роботи, при використанні тільки власних рухів зірок, один з діагональних елементів матриці деформації не може бути визначений. Тим не менш, визначення різниць діагональних елементів матриці деформації, наприклад у вигляді $(M_{11}^+ - M_{22}^+)$ і $(M_{33}^+ - M_{22}^+)$ є можливим.

При такому підході робочі рівняння записуються в наступному вигляді:

$$\begin{aligned} \mu_l \cos b = & \frac{1}{r} (X_0 \sin l - Y_0 \cos l) - M_{32}^- \cos l \sin b - M_{13}^- \sin l \sin b + M_{21}^- \cos b + \\ & + M_{12}^+ \cos 2l \cos b - M_{13}^+ \sin l \sin b + M_{23}^+ \cos l \sin b - 0.5(M_{11}^+ - M_{22}^+) \sin 2l \cos b \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \mu_b = & \frac{1}{r} (X_0 \cos l \sin b + Y_0 \sin l \sin b - Z_0 \cos b) + M_{32}^- \sin l - M_{13}^- \cos l - \\ & - 0.5M_{12}^+ \sin 2l \sin 2b + M_{13}^+ \cos l \cos 2b + M_{23}^+ \sin l \cos 2b - 0.5(M_{11}^+ - M_{22}^+) \cos^2 l \sin 2b + \\ & + 0.5(M_{33}^+ - M_{22}^+) \sin 2b. \end{aligned} \quad (2)$$

де X_0 , Y_0 , Z_0 - компоненти швидкості пекулярного руху Сонця, M_{12} , M_{13} , M_{23} - компоненти вектора твердотілого обертання малої навколосонячної околиці навколо відповідних осей. Кожна з величин M_{12}^+ , M_{13}^+ , M_{23}^+ описує деформацію у відповідній площині. Величини M_{21} і M_{12}^+ є аналогами постійних Оорта B і A і пов'язані коефіцієнтом пропорційності 4.74. Діагональні компоненти тензора деформації M_{11}^+ , M_{22}^+ і M_{33}^+ описують загальне стиснення або розширення всієї зоряної системи. Таким чином мається одинадцять шуканих невідомих, які ми визначаємо методом найменших квадратів.

Величина $1/r$ - паралактичний фактор, який в цій роботі приймається рівним одиниці. У цьому випадку зірки віднесені до одиничній сфери. При такому підході всі визначаємі параметри пропорційні геліоцентричній відстані центроїда зірок і виражені в тих же одиницях, що і компоненти власного руху зірок, тобто в мсд/рік. Такий метод аналізу зіркових рухів використовується

вимушено, через відсутність високоточних паралаксів зірок.

Результати рішення системи рівнянь (1), (2), отримано на основі зірок каталогів XPM2, PPMXL і UCAC4 змішаного спектрального складу, в залежності від зоряної величини і представлено на рисунках 7.1 та 7.2. Нами були використані тільки ті зірки каталогів, які задовольняли обмеженню на модуль тангенціальною швидкості зірки $|\mu_t|^2 = (\mu_\alpha \cos\delta)^2 + (\mu_\delta)^2 < 300$ мсд/рік. При цьому відкидалися зірки, просторова швидкість яких, перевищувала гіперболічну, наприклад зірки, які мають гігантські пекулярні швидкості, отримані в результаті вибухів і зближень.

Для отримання залежності параметрів від зоряної величини виконувалась розбивка на інтервали зоряних величин шириною в 1 магнітуду. У кожному інтервалі зоряних величин вся небесна сфера розбивалася на тисячу шістьсот тридцять три області рівної площі, так звані площадки Шарльє. Сенс розбивки полягає в тому, що незважаючи на різницю в кількості зірок, кожній площадці присвоюється одинична вага при вирішенні системи умовних рівнянь (1) та (2). Отримані дані використовувалися для вирішення системи рівнянь (1), (2). У кожному інтервалі зоряних величин випадкові помилки визначення всіх шуканих параметрів складають 0.05 - 0.10 мсд/рік, помилки визначення величин $(M^{+}_{11}-M^{+}_{22})$ і $(M^{+}_{33}-M^{+}_{22})$ - в два рази більше. Методика отримання даних, використовуваних для вирішення системи рівнянь (1), (2) для каталогів XPM2, UCAC4 і PPMXL абсолютно однакова.

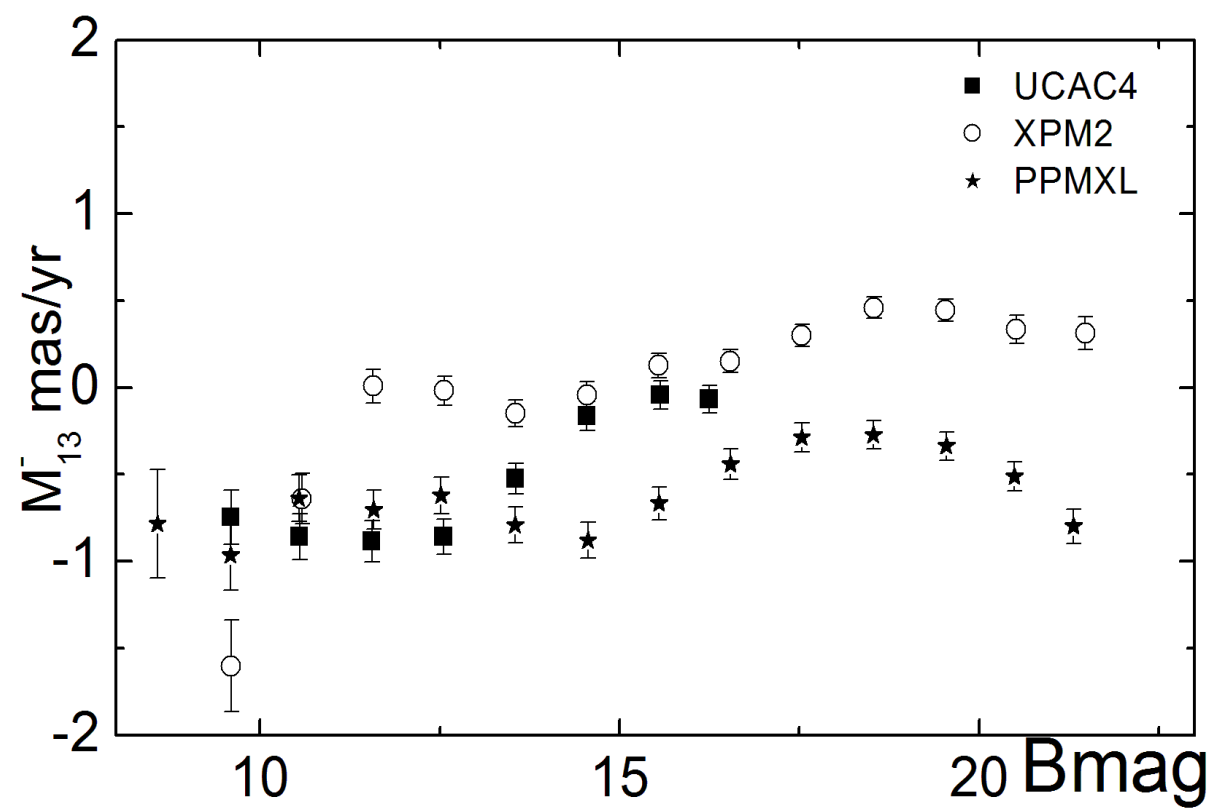
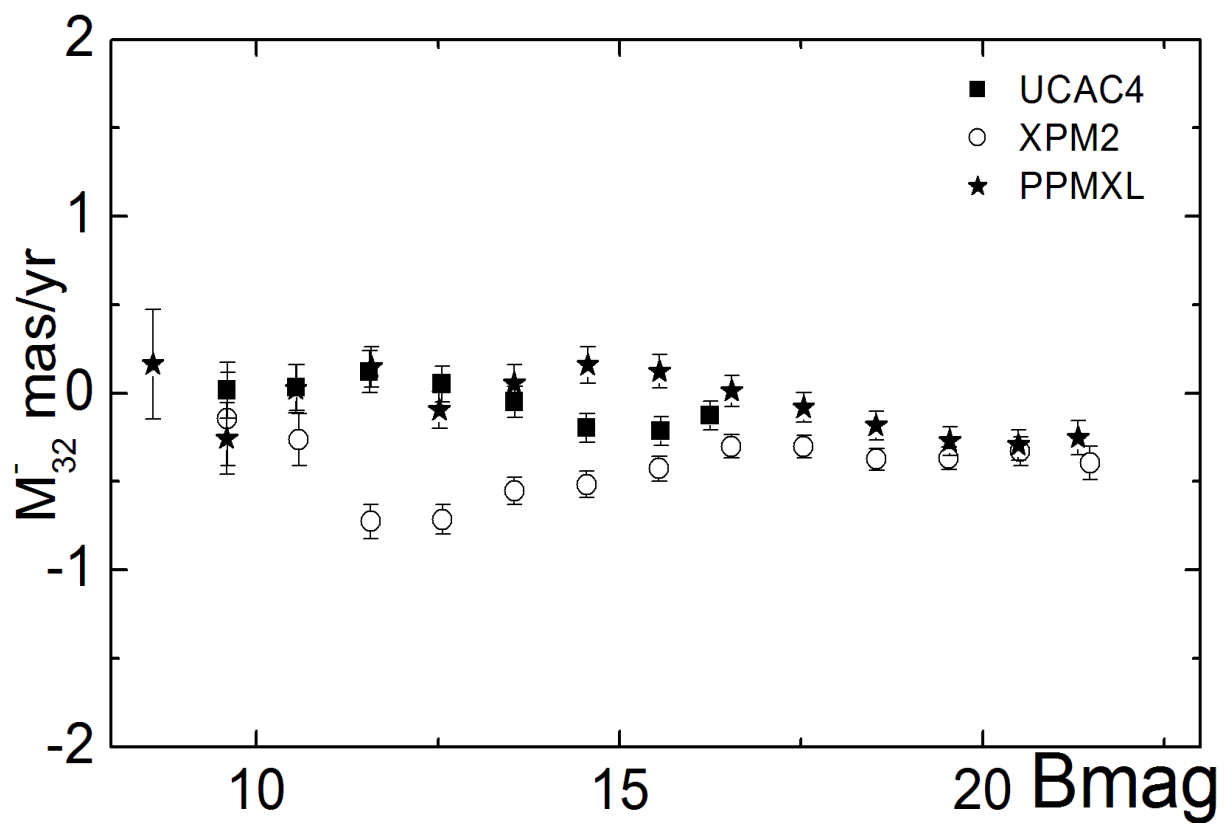
8.3. Використані каталоги.

Нещодавно створений і ще не опублікований астрометричний каталог XPM2 в даний час є єдиним масовим каталогом, в якому містяться власні рухи приблизно одного мільярда зірок до $B < 23$. Він має повне заповнення неба в інтервалі схилень $-90^\circ < \delta < 90^\circ$. Точність власних рухів слабких зірок в каталозі XPM2 лежить в межах від 3 до 10 мсд/рік. Відносно своїх власних рухів, каталог XPM2 являє собою незалежну від HCRF, реалізацію оптичної системи відліку.

Каталог UCAC4 містить 113 мільйонів зірок, що покривають все небо від 8 до 16 зоряної величини в нестандартній фотометричній смузі між V і R.

Точність координат на середню епоху оцінюється в 15-100 мсд, а формальні помилки власних рухів - в 1-10 мсд/рік, залежно від зоряної величини. Систематичні помилки власних рухів містяться в межах 1-4 мсд/рік. Каталог містить координати і власні рухи і вважається повним до $R = 16$. Каталог UCAC4 є останнім каталогом в проєкті UCAC. У цьому проєкті не використовувалися фотографічні спостереження для отримання положень зірок і всі спостереження були виконані між 1998 і 2004 роками тільки з використанням ПЗЗ - приймачів. А для отримання власних рухів зірок використовувалися фотографічні спостереження NPM і SPM. Каталог UCAC4 поширює систему ICRS/Tycho-2 на слабкі зірки.

Каталог PPMXL містить інформацію про положення і власні рухи в системі ICRS приблизно 900 мільйонів зірок до зоряної величини $V = 20$ з повним покриттям неба. Середні помилки власних рухів розташовані в межах від 4 до 10 мсд/рік, а точність координат на епоху 2000.0 оцінюється значеннями від 80 до 120 мсд для 410 млн об'єктів, для яких відомі положення в каталозі 2MASS [21]. Для решти зірок точність положень коливається між значеннями 150-300 мсд. Нами були використані ті зірки каталогу, для яких наведена хоча б одна із зоряних величин $b1$ або $b2$. Якщо наведені обидві, то магнітуда приймалася рівною $(b1 + b2)/2$. Зрештою кількість використаних зірок з каталогу PPMXL склала приблизно 750 мільйонів.



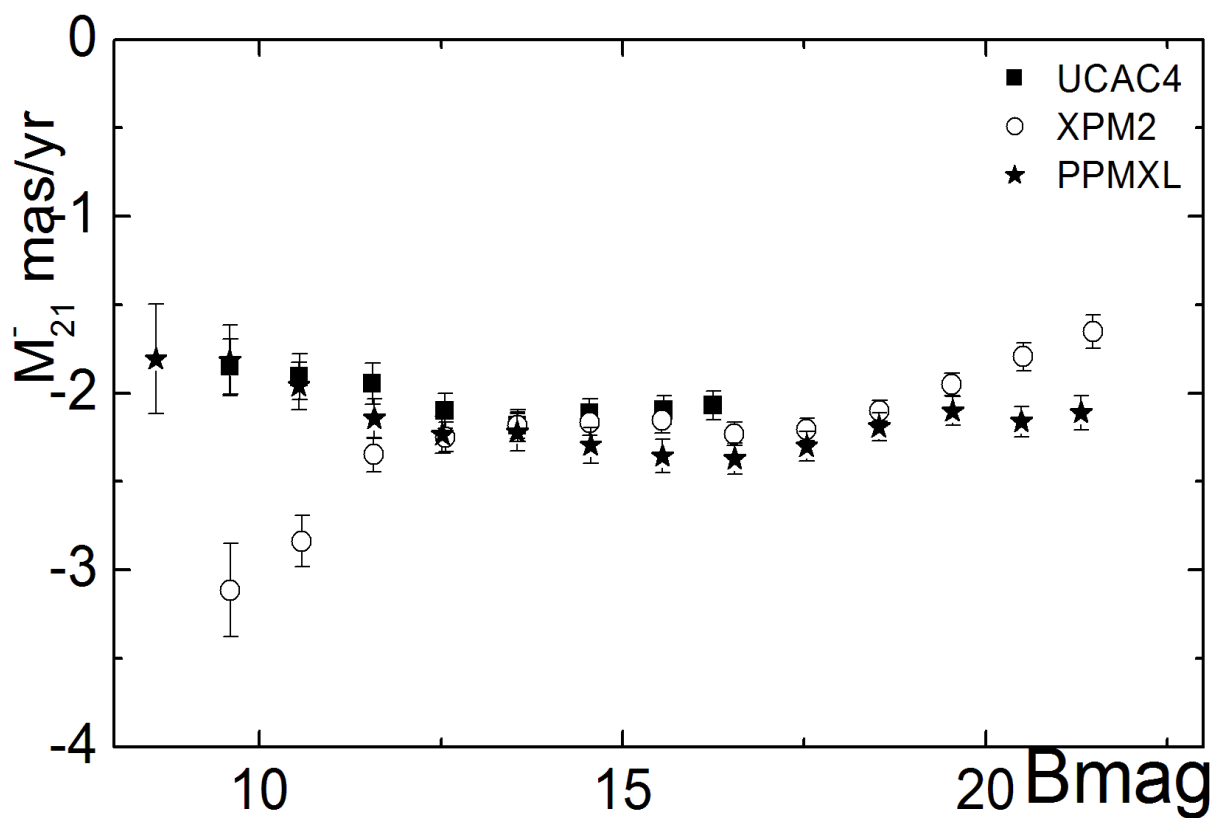
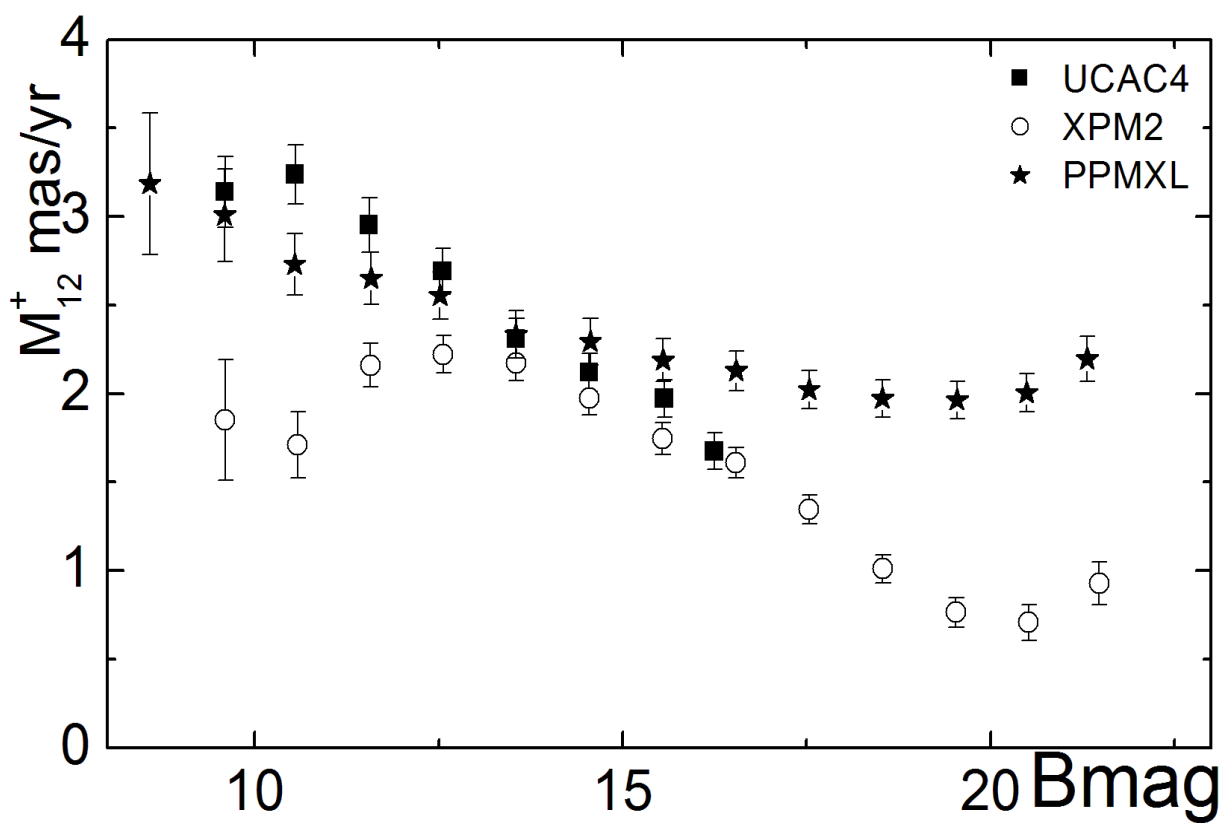


Рис.7.1. Компоненти тензорів обертання в залежності від зоряної величини.



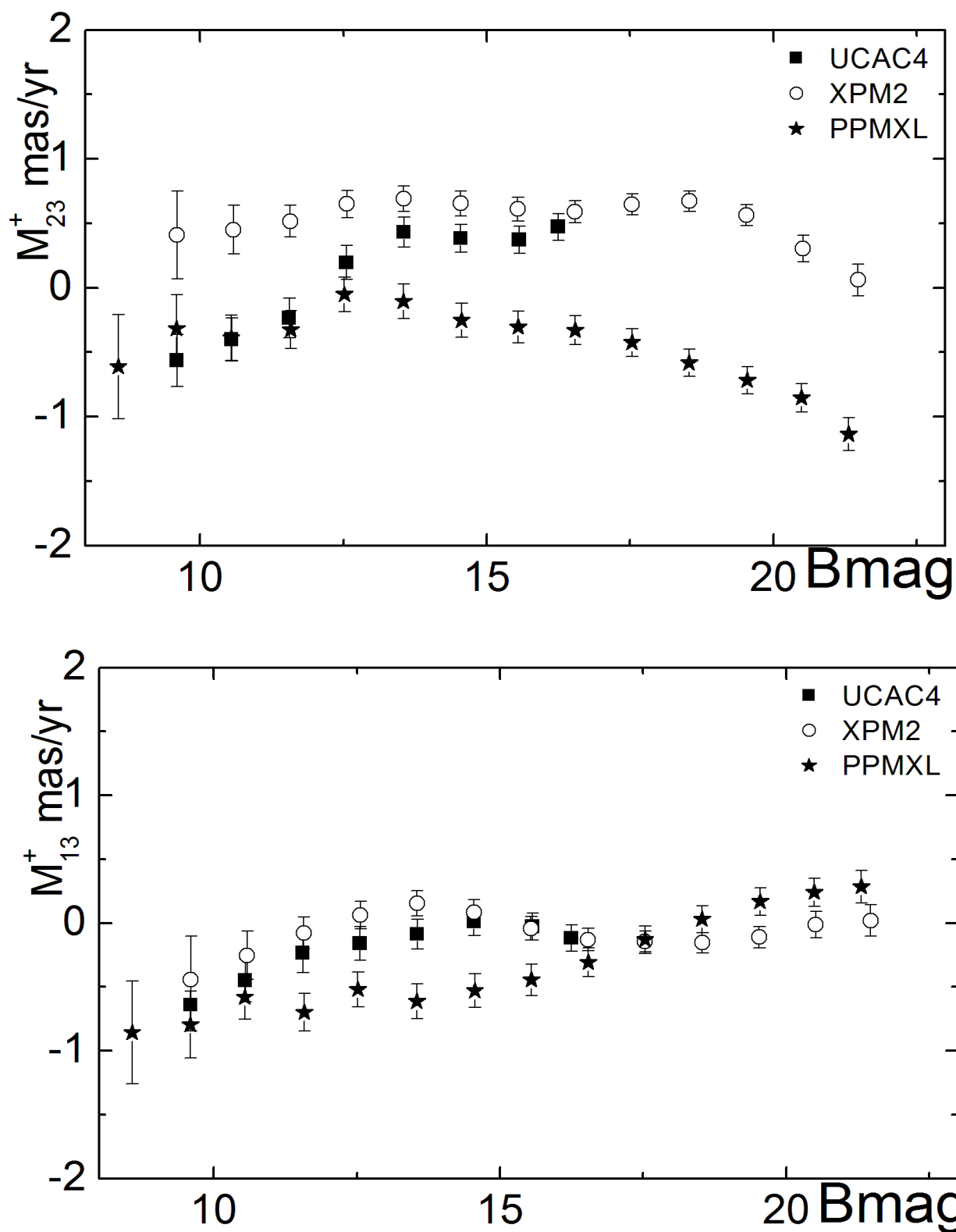


Рис.7.2. Компоненти тензорів деформації в залежності від зоряної величини.

Як видно з наведених рисунків компоненти тензора обертання, отримані по зірках XPM2 і UCAC4 в діапазоні зоряних величин > 15 , добре узгоджуються між собою як за величиною, так і по поведінці. Ці ж компоненти, отримані за

даними PPMXL в яскравій області краще узгоджуються з такими в UCAC4.

Цей же висновок можна зробити і для компонент тензора деформації. При цьому, поведінка цих компонент для каталогів XPM2 і UCAC4 починає збігатися приблизно з 13 зоряної величини. Тільки компонента M^+_{31} для каталогу PPMXL в слабкій області узгоджується з аналогічними компонентами для каталогів XPM2 і UCAC4. Інші компоненти відрізняються більш ніж на 1 мсд/рік. Це свідчить про те, що в слабкій області системи власних рухів XPM2 і UCAC4 порівняно краще узгоджуються між собою, ніж в яскравій. Система власних рухів PPMXL помітно відрізняється в слабкій області зоряних величин як від UCAC4, так і від XPM2.

Ми також отримали значення поправки до постійної прецесії за власними рухами зірок різних зоряних величин.

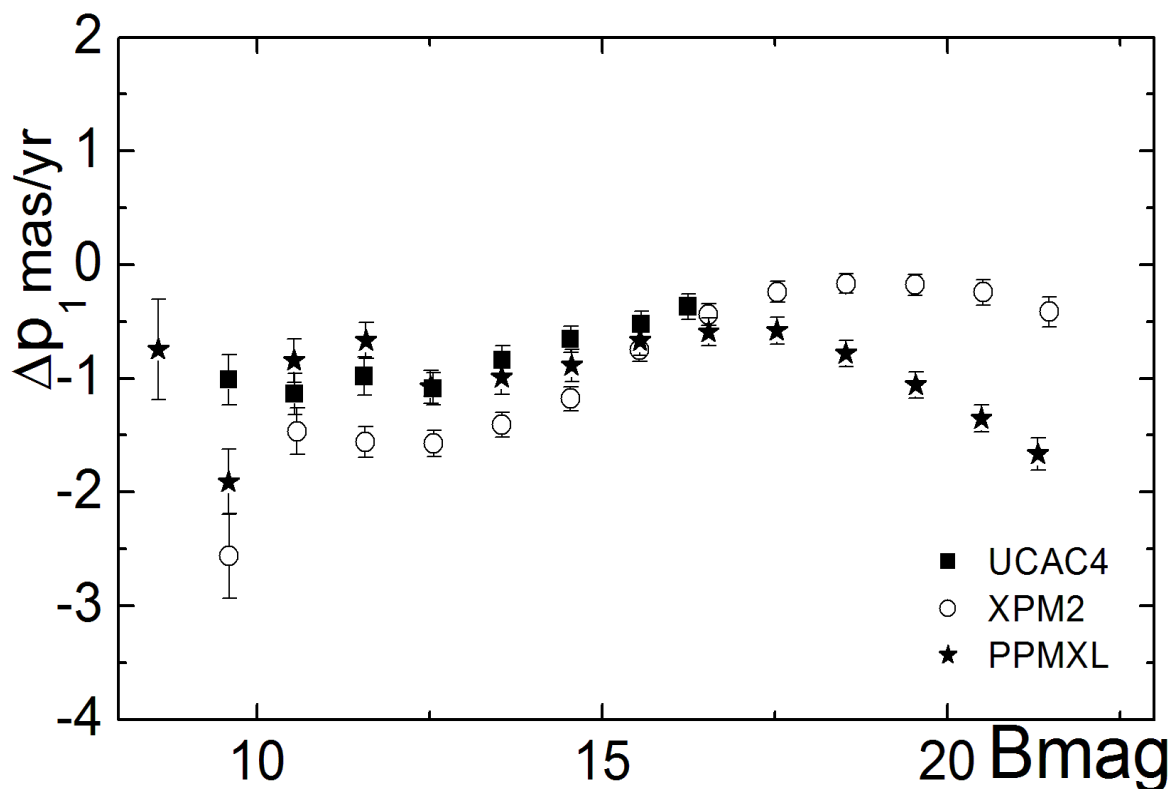


Рис.7.3. Залежність поправки до сталої прецесії від зоряної величини.

Виявилося, що тільки для слабких зірок каталогу XPM2 така поправка не потрібна. Очевидно, що поправка прецесії не може залежати від зоряної величини і поведінка Δp , яку ми спостерігаємо на рис.7.3, на нашу думку, викликана наявністю рівняння блиску у власних рухах зірок використаних каталогів.

На рисунку 7.4 представлено залежності кутової та лінійної швидкості Сонця на відстані 8.5 кпс.

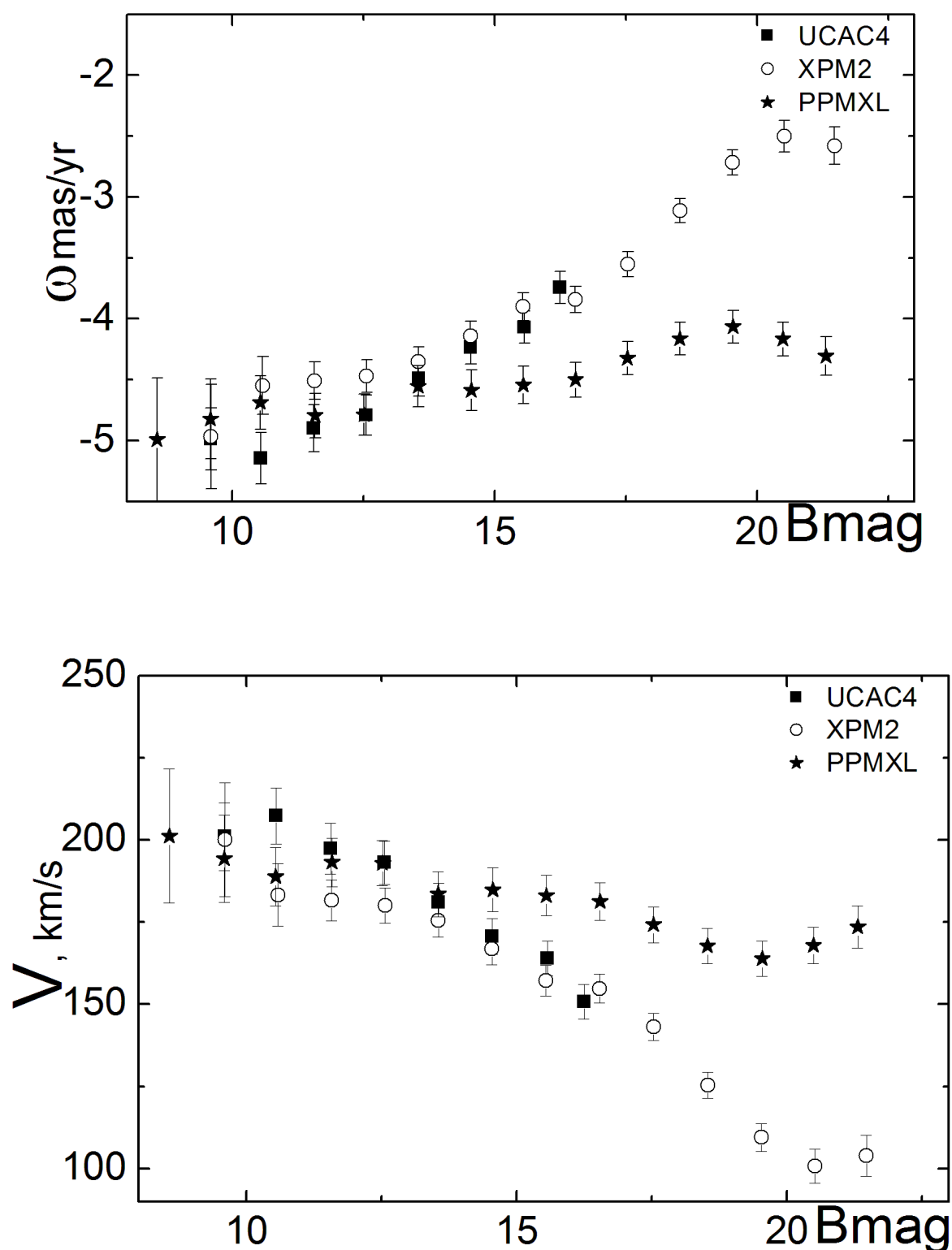


Рис.7.4. Кутова швидкість обертання Галактики $\omega = M_{12}^+ - M_{12}$ в миллісекундах дуги в рік в залежності від зоряної величини і відповідна їй лінійна кругова швидкість на відстані 8.5 кпс

Отримана за власними рухами яскравих зірок, використовуваних каталогів, кутова швидкість обертання Галактики на відстані Сонця становить приблизно -5 мсд/рік і не суперечить прийнятому значенню МАС. Для більш слабких зірок ми бачимо зміну кутової швидкості аж до значень приблизно -2.5 мсд/рік, що відповідає зміні кругової лінійної швидкості галактичного обертання від 200 км/сек до приблизно 100 км/сек на навколосонячній відстані рівній 8.5 кпс.

Висновки до розділів 7, 8

Проведені дослідження показали можливість використання власних рухів зірок сучасних каталогів для кінематичного аналізу не тільки яскравих зірок, що знаходяться порівняно близько до Сонця, а й зірок, розташованих порівняно далеко. У результаті виконаної роботи отримано кінематичні параметри Галактики за даними 3 найбільш високощільних каталогів. Ці результати добре узгоджуються в яскравій області з результатами інших досліджень. Однак у слабкому діапазоні зоряних величин отримані результати порівнювати ні з чим, оскільки вони отримані фактично вперше. Наведене порівняння кінематичних параметрів за даними 3 каталогів свідчить про хорошу якість власних рухів в каталозі XPM2, особливо в його слабкому діапазоні зоряних величин.

Кінематичний аналіз власних рухів зірок каталогів XPM2, PPMXL і UCAC4 виконано на основі лінійної моделі Огороднікова - Мілна. Показано, що кінематичні параметри Галактики узгоджуються в яскравій області з прийнятими МАС значеннями. Встановлено, що постійна Оорта В практично не залежить від зоряної величини і її середнє значення дорівнює приблизно 10.5 км/с/кпк. Разом з тим отримані значення постійної Оорта А виявилися залежить від зоряної величини і змінюються в межах від 14.22 км/с/кпк до 5 км/с/кпк. Однією з причин виявленого ефекту може бути присутність рівняння блиску у власних рухах зірок використовуваних каталогів.

9 СТВОРЕННЯ КАТАЛОГУ PMA

9.1. Головні принципи виведення власних рухів зір каталогу PMA

Ідея створення опорного каталогу дуже проста. Каталог PMA був виведений з комбінації двох каталогів - 2MASS і Gaia DR1 [19]. Різниця епох спостережень цих каталогів становить приблизно 15 років. Положення об'єктів в каталозі Gaia DR1 віднесені до системи ICRF, а в каталозі 2MASS - до HCRF. Порівнюючи ці положення можна визначити власні рухи загальних об'єктів, що містяться в каталогах, шляхом ділення різниці положень на проміжок часу між спостереженнями.

Отримані таким способом власні рухи покривають всю небесну сферу без пропусків. Далі в ми називаємо їх відносними і аналізуємо в кожному з пікселів, на які за наведеною нижче процедурою розбивалася вся небесна сфера.

Поведінка власних рухів в конкретних пікселях розміром приблизно $6^\circ \times 6^\circ$ не завжди може бути описана гладкими функціями координат, на відміну від поведінки власних рухів з каталогу TGAS [20]. Ми вважаємо, що власні рухи зірок повинні мати плавну поведінку в залежності від координат, а скачки і розриви, які спостерігаються на графіках є наслідком помилок в положеннях 2MASS. Для усунення цих спотворень і отримання виправлених власних рухів був застосований метод, який використовувався при виведенні каталогу XPM, Перш за все, було отримано список загальних об'єктів 2MASS і Gaia DR1 шляхом крос-ідентифікації каталогів з вікном пошуку радіусом 0.5 кутової секунди. Це дозволяє включати в список всі зірки з власними рухами до 33 мас в рік. Для надійного ототожнення в заданому вікні пошуку, положення об'єктів 2MASS були приведені на епоху спостережень Gaia DR1 за допомогою власних рухів зірок з каталогу XPM. Після ототожнення об'єктів у вікні пошуку, для кожного з них були обчислені різниці положень, які очевидно викликані їх власним рухом і систематичними помилками використаних каталогів. У даному випадку ми нехтуємо помилками Gaia DR1 і вважаємо, що систематичні помилки, що містяться в різницях положень, належать каталогу 2MASS. Щоб усунути ці, очевидні на малюнках спотворення, ми використовували

двовимірний медіанний фільтр, за допомогою якого, були отримані корекції, для приведення положень зірок і галактик 2MASS в систему Gaia DR1. Після застосування корекцій до всіх об'єктів, різниці положень зірок (2MASS - Gaia DR1) в середньому стають рівними нулю, а різниці положень галактик отримують додаткові зміщення, викликані власними рухами зірок.

Оскільки власні рухи галактик на даному рівні точності ми вважаємо рівними нулю, то на наступному етапі ми апроксимуємо отримані різниці положень галактик підходящою функцією, а потім віднімаємо цю функцію з різниць положень галактик і зірок, отриманих на попередньому кроці. При цьому, середні значення різниць положень галактик стають рівними нулю, а середні різниці положень зірок - це тільки зміщенням цих зірок за ~ 15 років, що викликані їх власними рухами. Як відомо, отримані таким способом власні рухи називаються абсолютними власними рухами, оскільки їх нуль-пункт встановлений за допомогою положень позагалактичних джерел.

У наведених вище поясненнях, для полегшення розуміння, ми говоримо про різниці положень, хоча насправді, ми працювали з різницями положень, діленими на різницю епох. Це викликано тим, що епохи спостережень для зірок конкретного пікселя і в каталозі 2MASS і в каталозі Gaia DR1 могли помітно відрізнятися, що ускладнювало аналіз отриманих різниць.

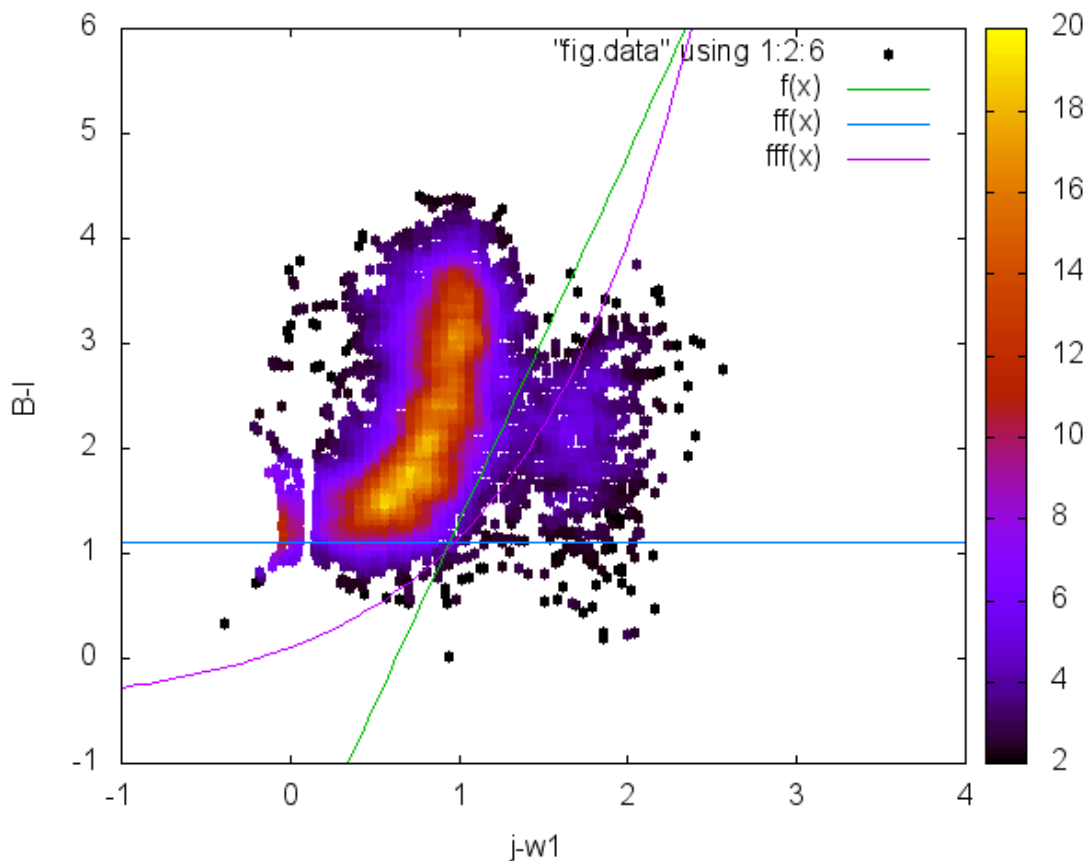
9.2 Створення вибірки галактик.

Одним з ключових моментів виведення каталогу абсолютних власних рухів є формування вибірки галактик, за координатами яких, здійснюється процедура абсолютизації.

Кілька критеріїв відбору були застосовані для створення вибірки. Матеріалом для цього послужили дані декількох каталогів - SuperCOSMOS, 2MASS і WISE [37]. Перш за все, ми скористалися критеріями, які виражені в термінах «реальності» для каталогу SuperCOSMOS і наведені на Electronic resource SSA - SuperCOSMOS Science Archive. При використанні цих критеріїв кількість галактик в перетині SuperCOSMOS з 2MASS склала приблизно 70 мільйонів. Однак, проведені дослідження показали, що така вибірка галактик є сильно забрудненою, особливо поблизу галактичного екватора.

Тому, ми дещо модифікували підхід, використаний для корекції власних рухів зірок в роботі [34], і заснований на методі, запропонованому незалежно [27] and [16] для поділу зірок і галактик за показником кольору ($J - W1$). Основна ідея модифікації полягає в залученні для поділу зірок і позагалактичних джерел не тільки показника кольору ($J - W1$), але і показника кольору ($B - I$) з каталогу SuperCOSMOS.

Для побудови колірних діаграм ми перетнули отриману вибірку галактик (критерії реальності галактик краще ніж 90%) з каталогом WISE. На малюнку 1 представлені колірні діаграми ($B - I$) від ($J - W1$) для різних пікселів нашого каталогу, з яких добре видно, що це підмножина містить дуже багато галактичних об'єктів.



Максимуми числа галактик припадають на різні значення показників кольору ($B - I$) і ($J - W1$), а їх положення на діаграмі залежать від координат конкретного пікселя. При цьому спостерігається очевидна кореляція з величиною поглинання світла. Відбір галактик проводився в кожному

конкретному пікселі з тієї області діаграми, яка була виділена нижче описаною процедурою.

Перш за все, на колірній діаграмі, побудованій за даними з координатами $|l| > 90^\circ$ і $|b| > 15^\circ$, була виділена область, для якої справедливі умови $(J - W1) > 1.2$ і $(B - I) > 1.2$. Це обрізання було вибрано в результаті візуального перегляду колірних діаграм для всіх пікселів каталогу. Ми не прагнули отримати повну вибірку галактик. Ми вважаємо, що для нашої задачі більш важливою є мінімальна забрудненість вибірки галактик. Тому обрані критерії в деяких пікселях є надмірно жорсткими, що призводить до зменшення числа галактик. В отриманій області ми емпірично підібрали залежність $(B - I)$ від $(J - W1)$ у вигляді $y = 3.5x - 2.2$ для низько-щільних пікселів і залежність $(B - I)$ від $(J - W1)$ у вигляді $y = \exp(x - 0.5) - 0.5$, для високо-щільних пікселів. Візуальний контроль всіх пікселів каталогу показав, що сформована таким способом вибірка галактик досить надійно відокремлена від зірок, а кількість галактик, що входять до неї становить приблизно 4 мільйони.

Після складання вибірки позагалактичних джерел, які відповідають нашим вимогам, ми зробили крос-ідентифікацію цих об'єктів в каталогах 2MASS і Gaia DR1. Кількість галактик в різних пікселях варіюється від декількох сотень до десятків тисяч, а їх загальна кількість дорівнює приблизно 4 мільйонам. Це забезпечує установку нуль-пункту власних рухів як в кожному конкретному пікселі, так і практично по всьому небу, за винятком зони уникнення, де позагалактичні об'єкти не видно.

9.3. Виведення абсолютних власних рухів в галактичній площині.

Оскільки поблизу екваторіальної площині нашої Галактики позагалактичні об'єкти через величезне поглинання не помітні, ми не можемо визначити в цій області сфери абсолютні власні рухи. Проте в нашому розпорядженні є власні рухи, отримані без опори на галактики, а тільки лише із зіставлення координат зірок в 2MASS і Gaia DR1. Положення зірок в цих каталогах, як уже згадувалося вище, віднесені до різних систем. Положення об'єктів в 2MASS узгоджені з HCRF через зірки Tycho-2, а положення Gaia DR1 наведено в опорному фреймі, який узгоджено з ICRF краще ніж 0.1 мас в епоху J2015.0 і

який не має обертання по відношенню до ICRF на рівні 0.03 мас/рік. Ми вважаємо, що каталог Gaia DR1 є безпомилковим, а помилки в відносних власних рухах ми відносимо до помилок каталогу 2MASS.

Оскільки ми вивели також абсолютні власні рухи для всієї сфери, за винятком галактичної площини, нуль-пункт яких встановлено щодо нерухомих галактик, ми можемо розглядати їх як незалежні від будь-якої опорної системи.

Якщо отримати різниці відносних і абсолютних власних рухів $\Delta F (\alpha, \delta)$, то вони нададуть можливість перейти від однієї системи власних рухів до іншої. Для цього ми застосовуємо метод розкладу поля швидкостей за векторними сферичними функціями, описаний в роботах [22, 23], та ін. Априорі ми не задаємо ніякої моделі поля швидкостей, а шукаємо всі значущі коефіцієнти розкладу для всієї області, в якій є як відносні так і абсолютні власні рухи. Після чого ми використовуємо для переходу від однієї системи до іншої тільки ті коефіцієнти розкладу, які пов'язані з глобальними характеристиками поля швидкостей, а саме з твердотілим обертанням однієї системи щодо іншої. Решту значущих коефіцієнтів розкладу ми не використовуємо, оскільки вони можуть відображати також локальні особливості поля швидкостей, не обов'язково присутні в галактичній площині. Щоб уникнути впливу рівняння блиску на функцію $\Delta F (\alpha, \delta)$, ті ж самі корекції, що були застосовані до абсолютних власних рухів, були також застосовані до відносних власних рухів.

У роботі [21] було показано, що тороїдальні коефіцієнти першого порядку в розкладу систематичних різниць власних рухів зірок дозволяють обчислити швидкість взаємного обертання цих систем. Формули, що встановлюють зв'язки між компонентами вектора повороту (обертання) і тороїдальними коефіцієнтами першого порядку, наведені, наприклад, в статтях [35, 36]. Як випливає з цих робіт, швидкості зміни - $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ визначаються через відповідні коефіцієнти t_{101}, t_{110} і t_{111} за допомогою співвідношень

$$\omega_x = t_{111} / 2.89, \omega_y = t_{110} / 2.89, \omega_z = t_{101} / 2.89.$$

Використовуючи ці коефіцієнти і припускаючи їх незалежність від зоряної величини, оскільки ніякі корекції, що залежать від зоряної величини, в абсолютні власні рухи не вносились, ми отримуємо значення систематичних

різниць відносних і абсолютних власних рухів РМА, спричинені тільки твердотілим обертанням за допомогою формули

$$\Delta F(\alpha, \delta) = \sum t_{nkp} T_{nkp}(\alpha, \delta). \quad (2)$$

Для переведення власних рухів зірок з однієї системи в іншу потрібно до відносних власних рухів додати поправки виду $\Delta\mu_\alpha \cos\delta = \Delta F(\alpha, \delta)$ і $\Delta\mu_\delta = \Delta F(\alpha, \delta)$, де $\Delta F(\alpha, \delta)$ обчислені за формулою (2), з коефіцієнтами t_{101} , t_{110} і t_{111} .

10 ВИЗНАЧЕННЯ КІНЕМАТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ГАЛАКТИКИ ЗА ДАНИМИ КАТАЛОГІВ АРМ ТА GAIA DR1

Робочі рівняння. У даній роботі використовується прямокутна галактична система координат, осі якої, спрямовані від спостерігача в бік галактичного центру ($l = 0^\circ$, $b = 0^\circ$, вісь x), у напрямку галактичного обертання ($l = 90^\circ$, $b = 0^\circ$, вісь y) і в напрямку північного полюса Галактики ($b = 90^\circ$, вісь z). У моделі Огороднікова-Мілна прийняті позначення, які були введені в роботах Клюбa і застосовувалися в роботах Монта. Як відомо з роботи, при використанні тільки власних рухів зірок, один з діагональних елементів матриці деформації не може бути визначений. Тим не менш, визначення різниць діагональних елементів матриці деформації, наприклад у вигляді $(M_{11}^+ - M_{22}^+)$ і $(M_{33}^+ - M_{22}^+)$ є можливим.

При такому підході робочі рівняння записуються в наступному вигляді:

$$\begin{aligned} \mu_l \cos b = & \frac{1}{r} (X_0 \sin l - Y_0 \cos l) - M_{32}^- \cos l \sin b - M_{13}^- \sin l \sin b + M_{21}^- \cos b + \\ & + M_{12}^+ \cos 2l \cos b - M_{13}^+ \sin l \sin b + M_{23}^+ \cos l \sin b - 0.5(M_{11}^+ - M_{22}^+) \sin 2l \cos b \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \mu_b = & \frac{1}{r} (X_0 \cos l \sin b + Y_0 \sin l \sin b - Z_0 \cos b) + M_{32}^- \sin l - M_{13}^- \cos l - \\ & - 0.5M_{12}^+ \sin 2l \sin 2b + M_{13}^+ \cos l \cos 2b + M_{23}^+ \sin l \cos 2b - 0.5(M_{11}^+ - M_{22}^+) \cos^2 l \sin 2b + \\ & + 0.5(M_{33}^+ - M_{22}^+) \sin 2b. \end{aligned} \quad (2)$$

де X_0 , Y_0 , Z_0 - компоненти швидкості пекулярного руху Сонця, M_{12}^- , M_{13}^- , M_{23}^- - компоненти вектора твердотілого обертання малої навколосонячної околиці навколо відповідних осей. Кожна з величин M_{12}^+ , M_{13}^+ , M_{23}^+ описує деформацію у відповідній площині. Величини M_{21}^- і M_{12}^+ є аналогами постійних Оорта B і A і пов'язані коефіцієнтом пропорційності 4.74. Діагональні компоненти тензора деформації M_{11}^+ , M_{22}^+ і M_{33}^+ описують загальне стиснення або розширення всієї зоряної системи. Таким чином маємо одинадцять шуканих невідомих, які ми визначаємо методом найменших квадратів.

Величина $1/r$ - паралактичний фактор, який приймається рівним одиниці. У

цьому випадку зірки віднесені до одиничної сфери. При такому підході всі визначаємі параметри пропорційні геліоцентричній відстані центроїда зірок і виражені в тих же одиницях, що і компоненти власного руху зірок, тобто в мас/рік. Такий метод аналізу зіркових рухів використовується вимушено, через відсутність високоточних паралаксів зірок.

Результати розв'язання системи рівнянь (1), (2), отримано на основі зірок каталогів PMA та TGAS змішаного спектрального складу, в залежності від зоряної величини і представлено на рисунках 1 та 2. Нами були використані тільки ті зірки з каталогів, які задовольняли обмеженню на модуль тангенціальної швидкості зірки $|\mu_t|^2 = (\mu_\alpha \cos\delta)^2 + (\mu_\delta)^2 < 300$ мас/рік. При цьому відкидалися зірки, просторова швидкість яких, перевищувала гіперболічну, наприклад зірки, які мають гігантські пекулярні швидкості, отримані в результаті вибухів і зближень.

Для отримання залежності параметрів від зоряної величини виконувалось розбиття на інтервали зоряних величин шириною в 1 магнітуду. Отримані дані використовувалися для вирішення системи рівнянь (1), (2). У кожному інтервалі зоряних величин випадкові помилки визначення всіх шуканих параметрів складають 0.05 - 0.10 мас/рік, помилки визначення величин $(M_{11}^+ - M_{22}^+)$ і $(M_{33}^+ - M_{22}^+)$ - в два рази більше. Методика отримання даних, що використовувалась для вирішення системи рівнянь (1), (2) для каталогів PMA та TGAS абсолютно однакова.

Використані каталоги. Тільки що створений і ще не опублікований астрометричний каталог PMA в даний час є єдиним масовим каталогом, в якому містяться власні рухи приблизно 400 мільйонів зірок до $B < 20$. Він має повне заповнення неба в інтервалі схилень $-90^\circ < \delta < 90^\circ$. Точність власних рухів слабких зірок в каталозі PMA лежить в межах від 3 до 5 мас/рік. Відносно своїх власних рухів, каталог PMA являє собою незалежну від HCRF, реалізацію оптичної системи відліку.

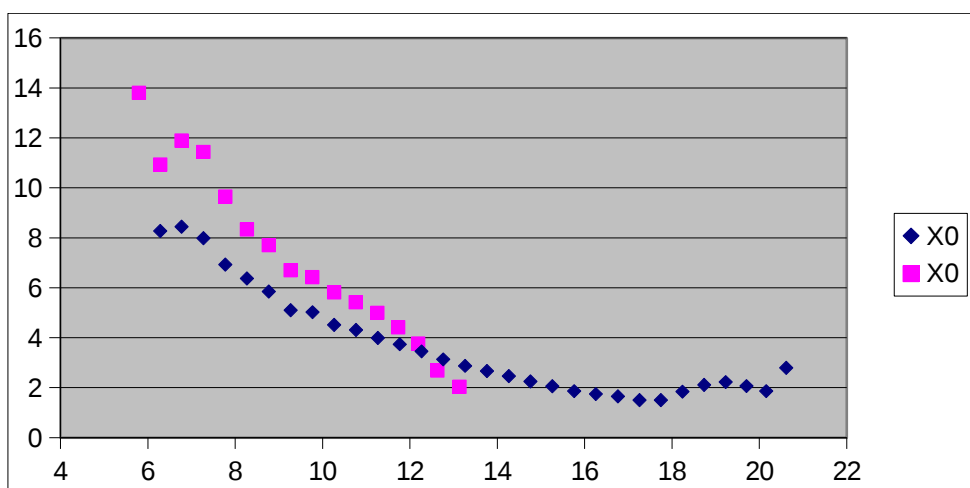
Каталог TGAS містить близько 2 мільйонів зірок, що покривають все небо до 12 зоряної величини в нестандартній фотометричній смузі G. Точність координат на епоху J2015 оцінюється в 10 мас, а формальні помилки власних

рухів - в 1 мас/рік, залежно від зоряної величини.

10.1. Аналіз кінематичних параметрів Галактики, отриманих в межах фізичної моделі Огороднікова-Мілна.

На рисунках 9.1 — 9.7 приведено залежності кінематичних параметрів від зоряної величини, отриманих за даними PMA і TGAS. Як видно з наведених рисунків, компоненти швидкості пекулярного руху Сонця X_0 , Y_0 , Z_0 , отримані по зірках PMA і TGAS, не зовсім добре узгоджуються між собою як за величиною, так і по поведінці. Також не узгоджуються між собою поведінки компонентів тензора обертання відносно осі X , в діапазоні зоряних величин більших за 11. Дві інші компоненти тензора обертання, в діапазоні з 9 зоряної величини і слабше, майже співпадають між собою. Це стосується і компоненти тензора деформації в площині XY .

Кутова швидкість обертання в залежності від зоряної величини становить приблизно 5.5 мас/рік і практично (на рівні кількох мас) не відрізняється для обох каталогів. Отримане за власними рухами яскравих зірок значення кутової швидкості обертання Галактики на відстані Сонця не суперечить прийнятому значенню МАС.



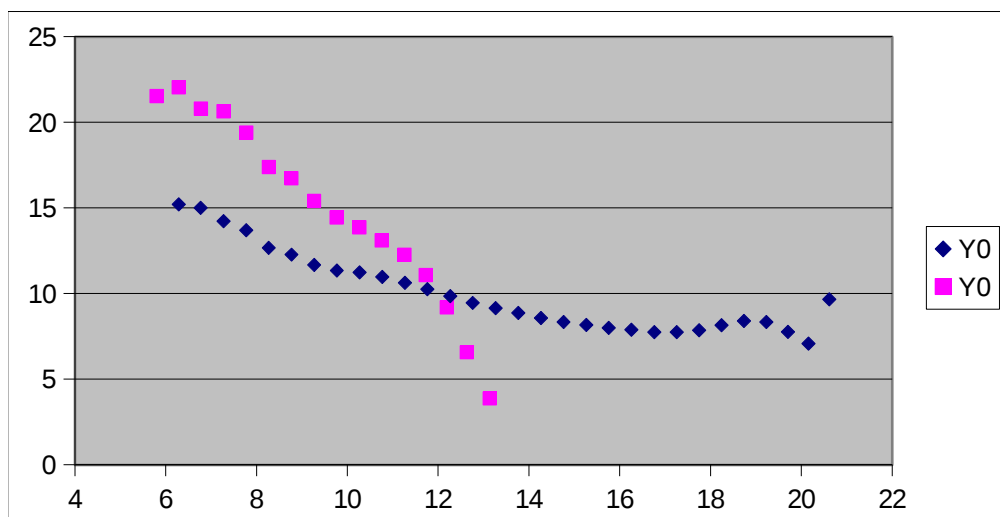


Рис. 9.1. Компонента пекулярного руху Сонця X_0 , в залежності від зоряної величини.

Рис. 9.2. Компонента пекулярного руху Сонця Y_0 , в залежності від зоряної величини.

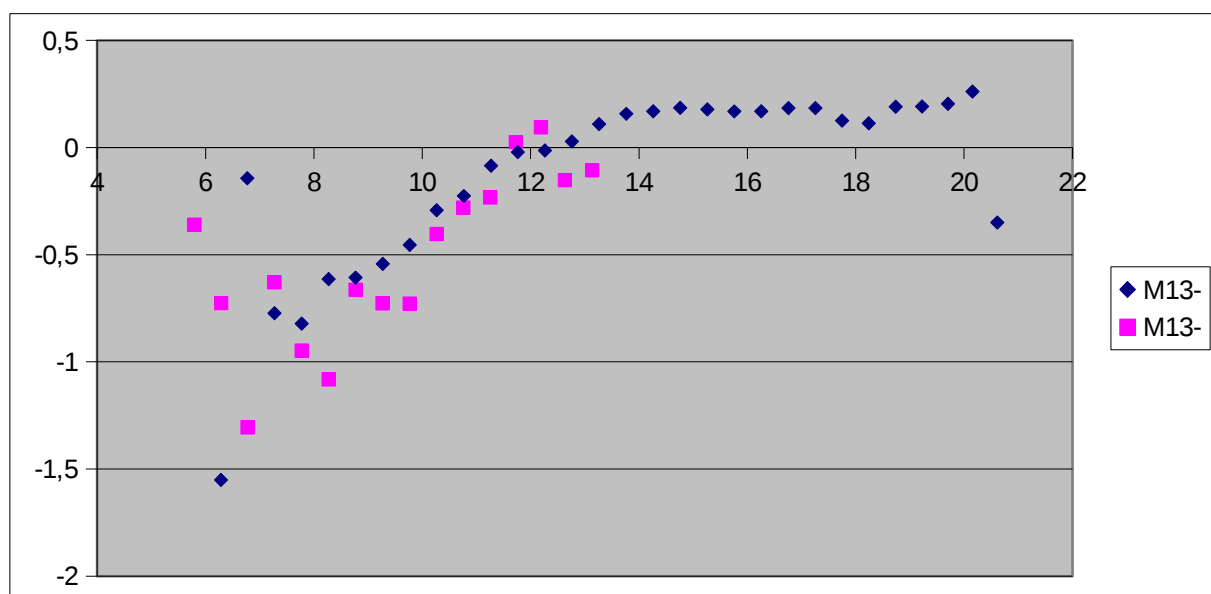


Рис. 9.3. Компонента тензора обертання відносно осі Y , в залежності від зоряної величини.

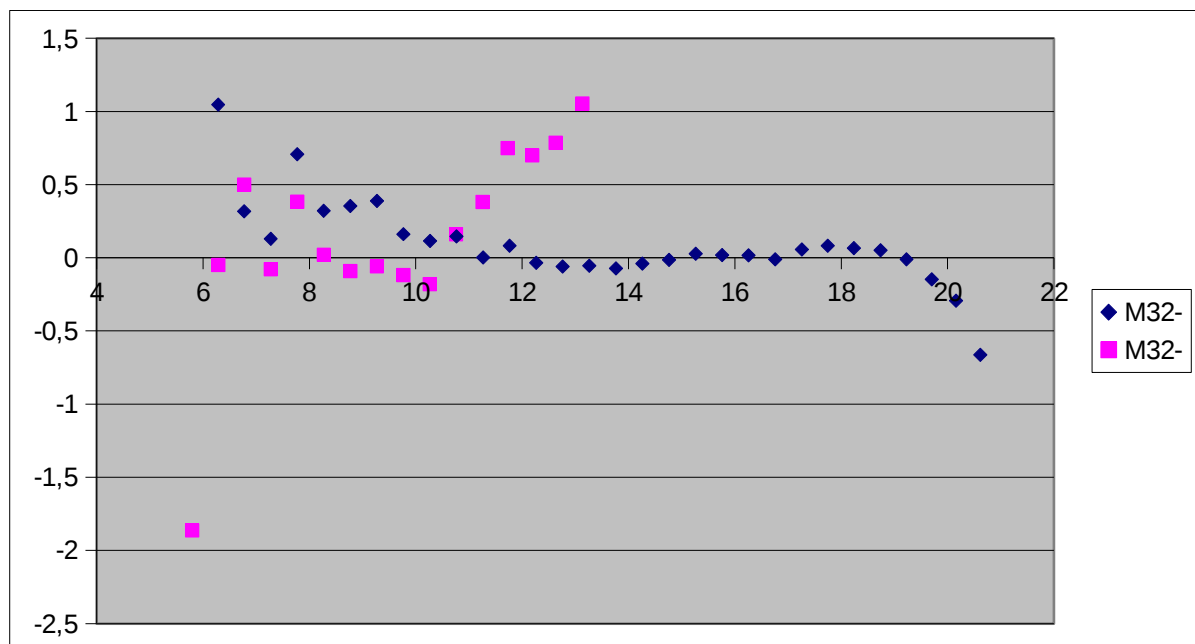


Рис.9.4. Компонента тензора обертання відносно осі X , в залежності від зоряної величини.

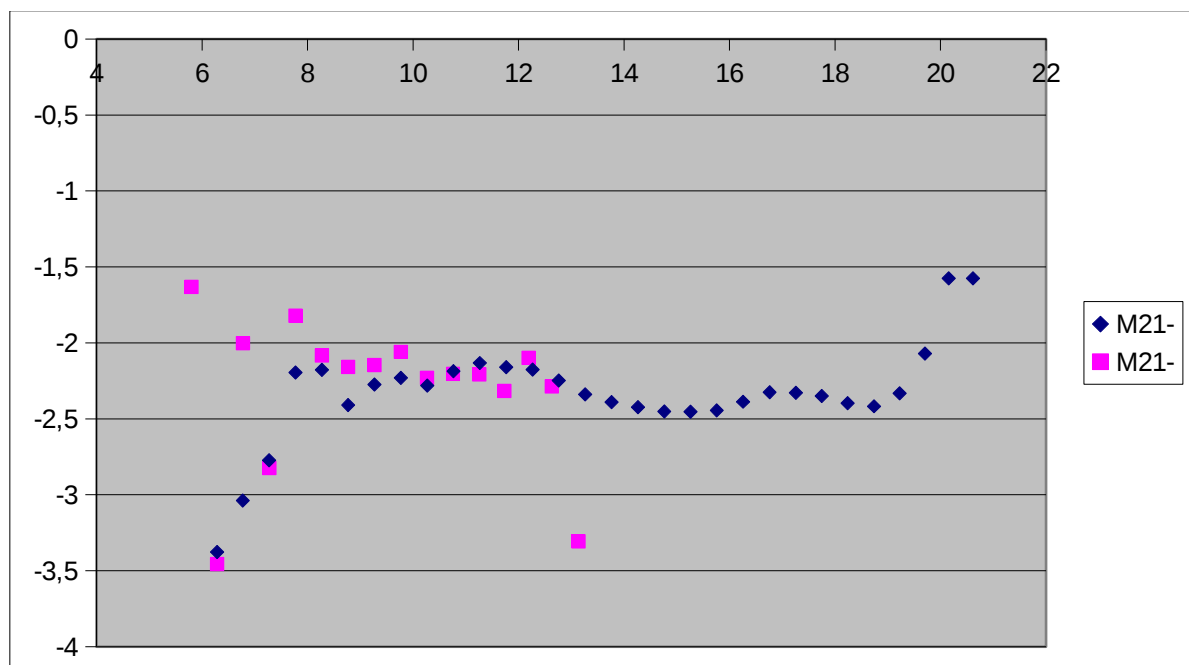


Рис. 9.5. Компонента тензора обертання відносно осі Z , в залежності від зоряної величини.

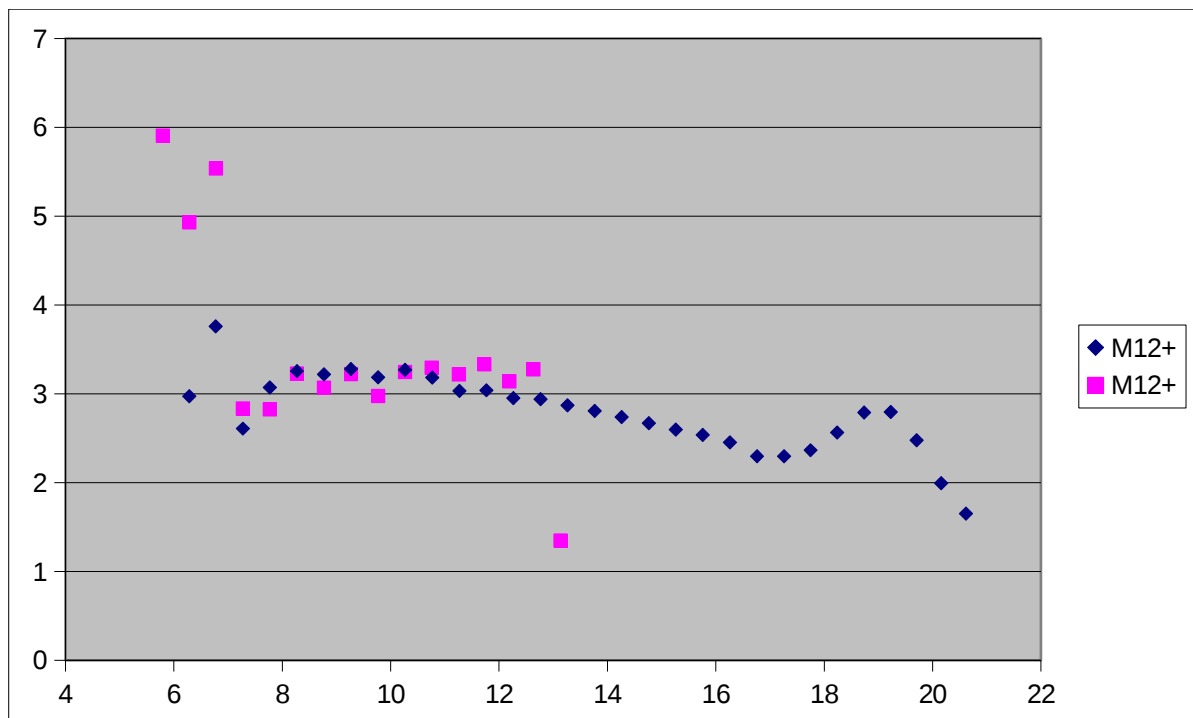


Рис. 9.6. Компонента тензора деформації в площині XY , в залежності від зоряної величини..

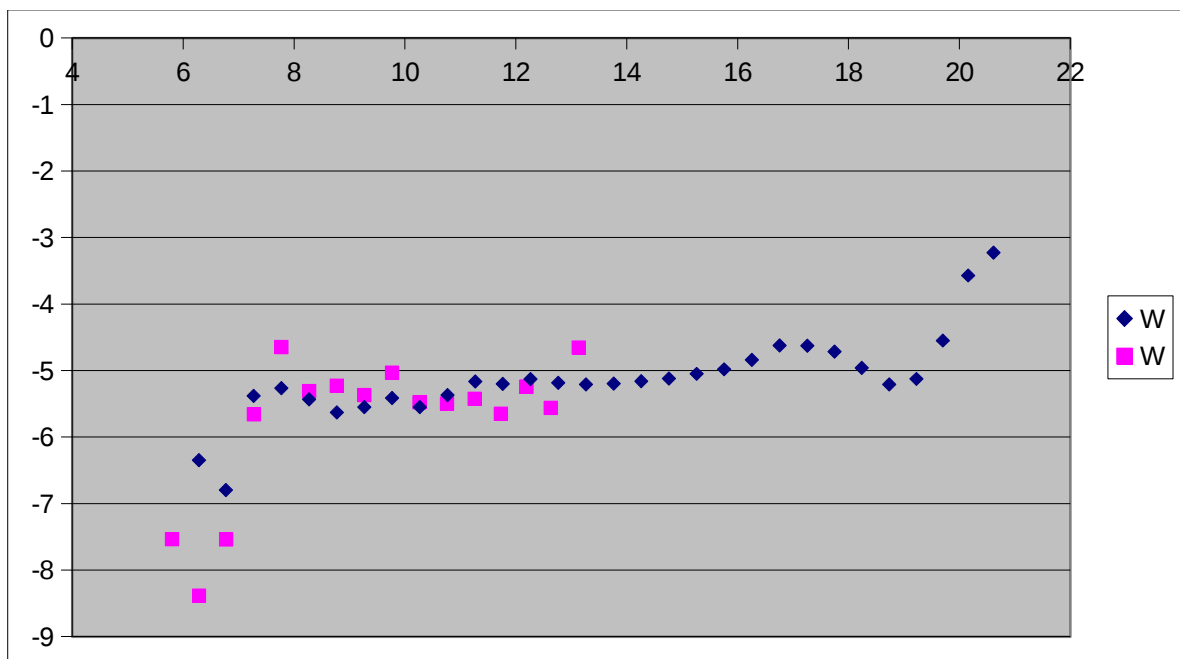


Рис. 9.7. Кутова швидкість обертання в залежності від зоряної величини

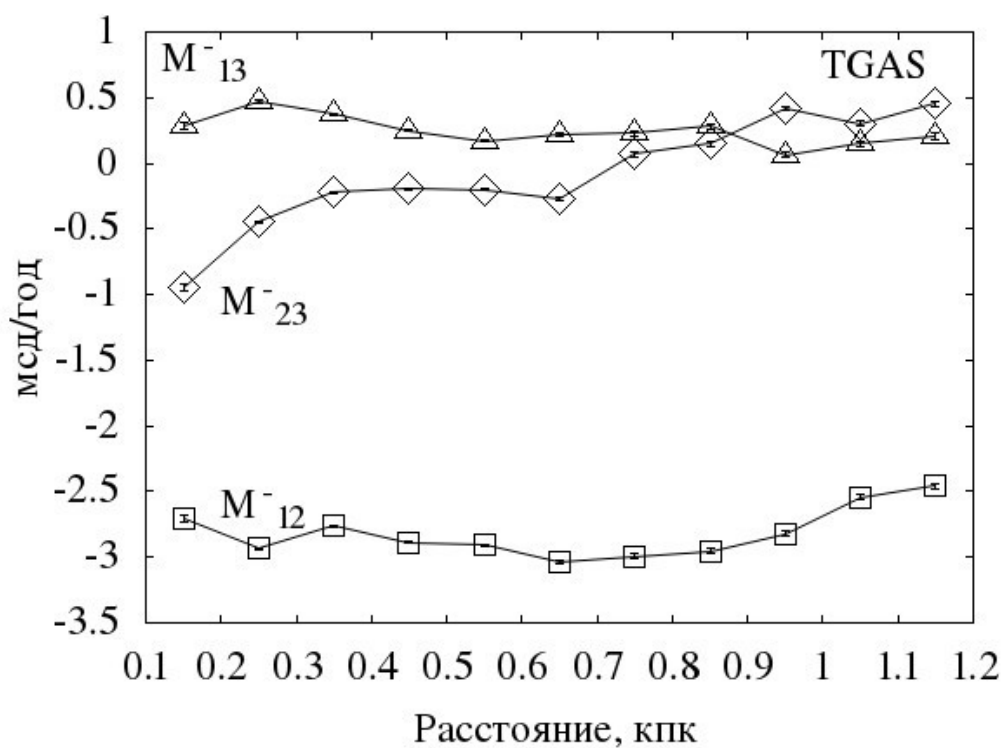


Рис. 9.8. Компоненты тензора вращения в зависимости від відстані

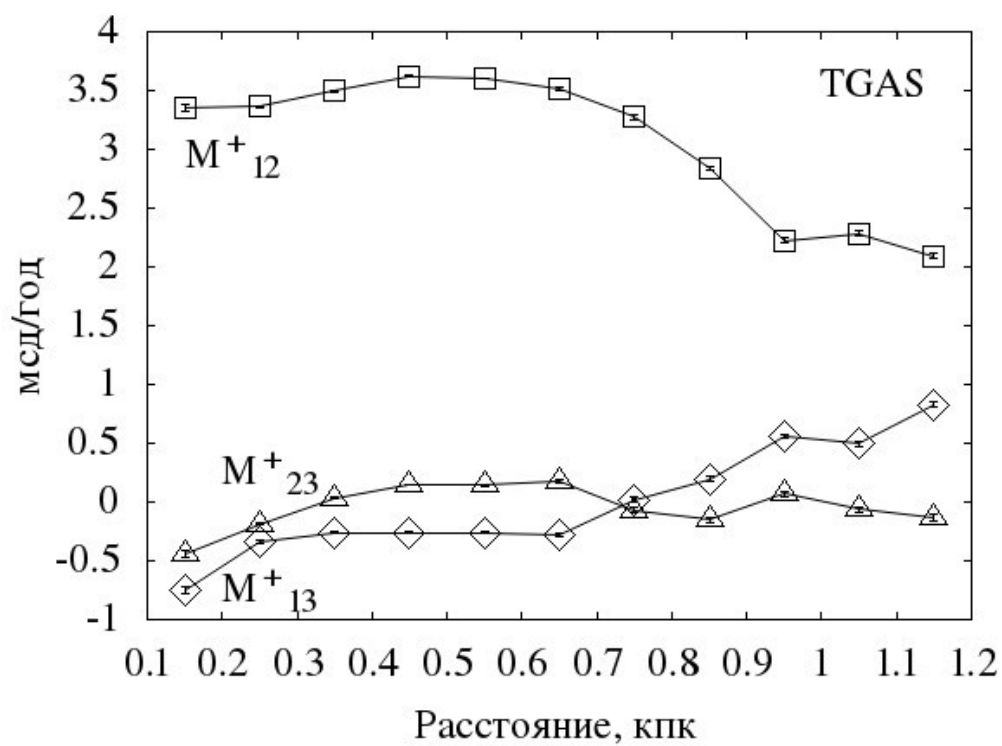


Рис. 9.9. Компоненты тензора деформации в зависимости від відстані

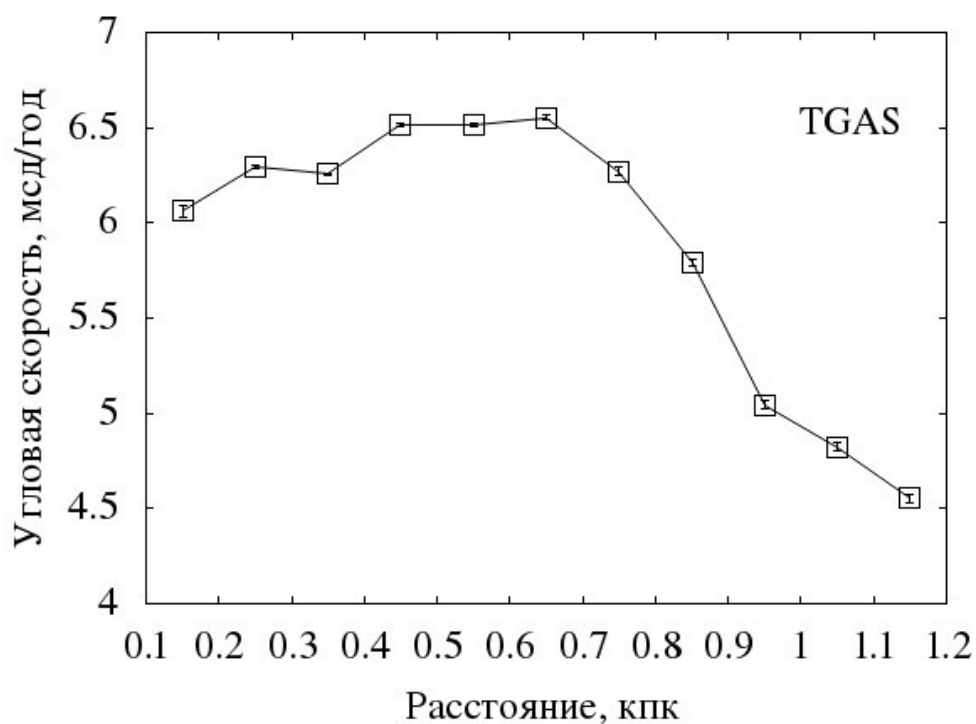


Рис. 9.10. Кутова швидкість обертання в залежності від відстані

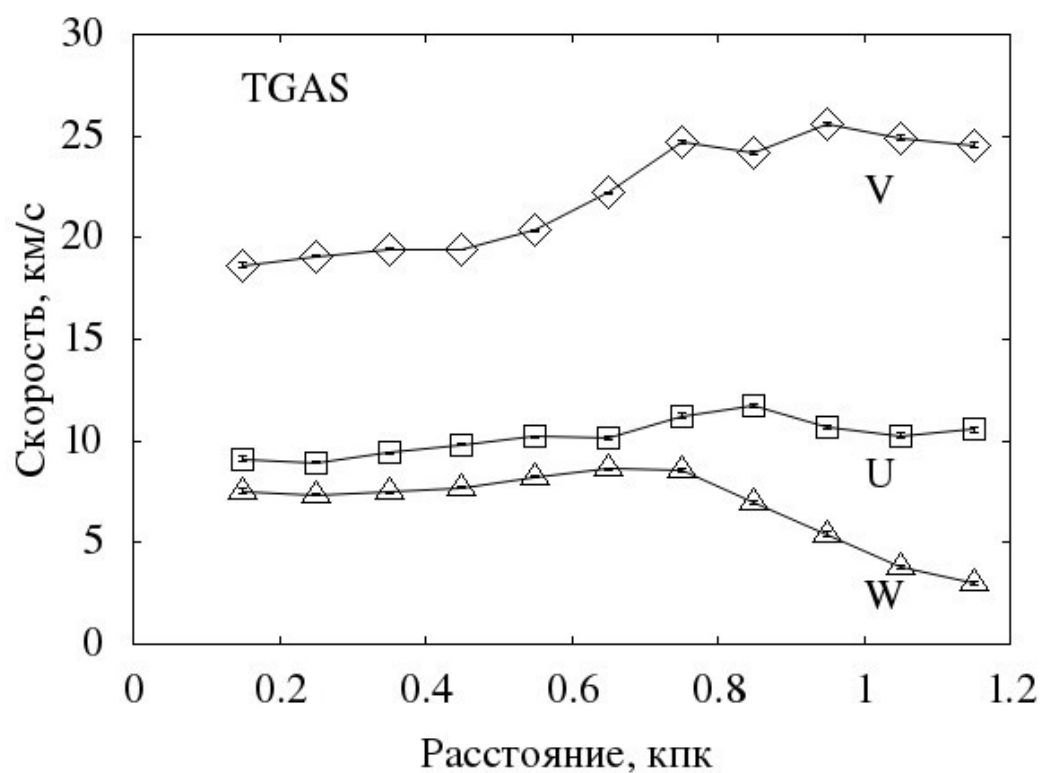


Рис. 9.11. Компоненти швидкості Сонця в залежності від відстані

10.2 Кінематичні параметри Галактики, отримані методом розкладання поля швидкостей за векторними сферичними функціями.

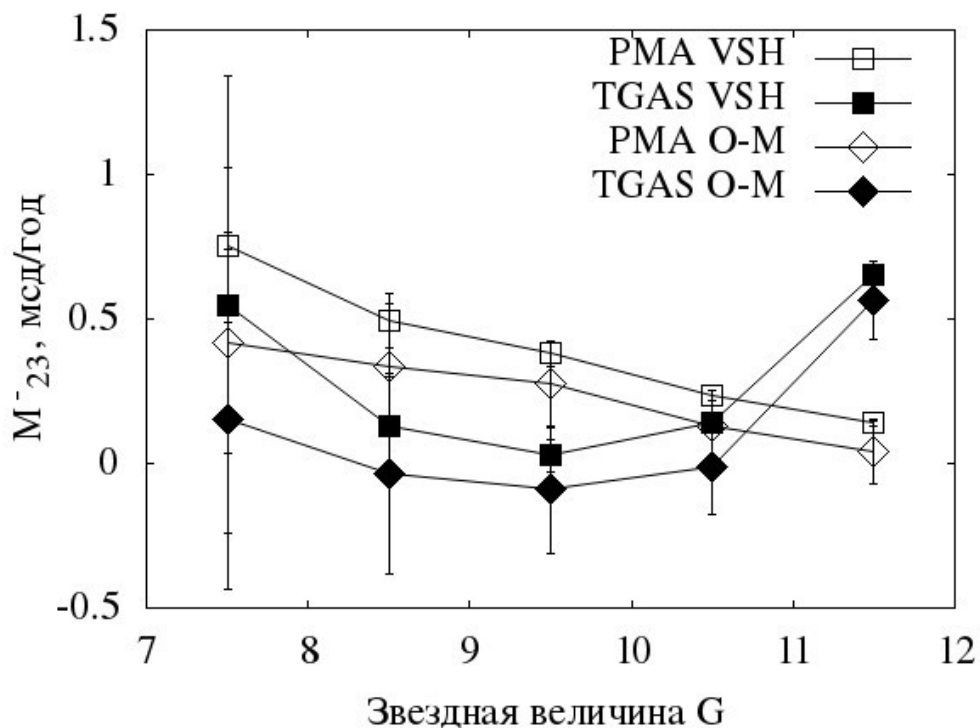


Рис. 10.1. Компоненти швидкості Сонця в залежності від вістані

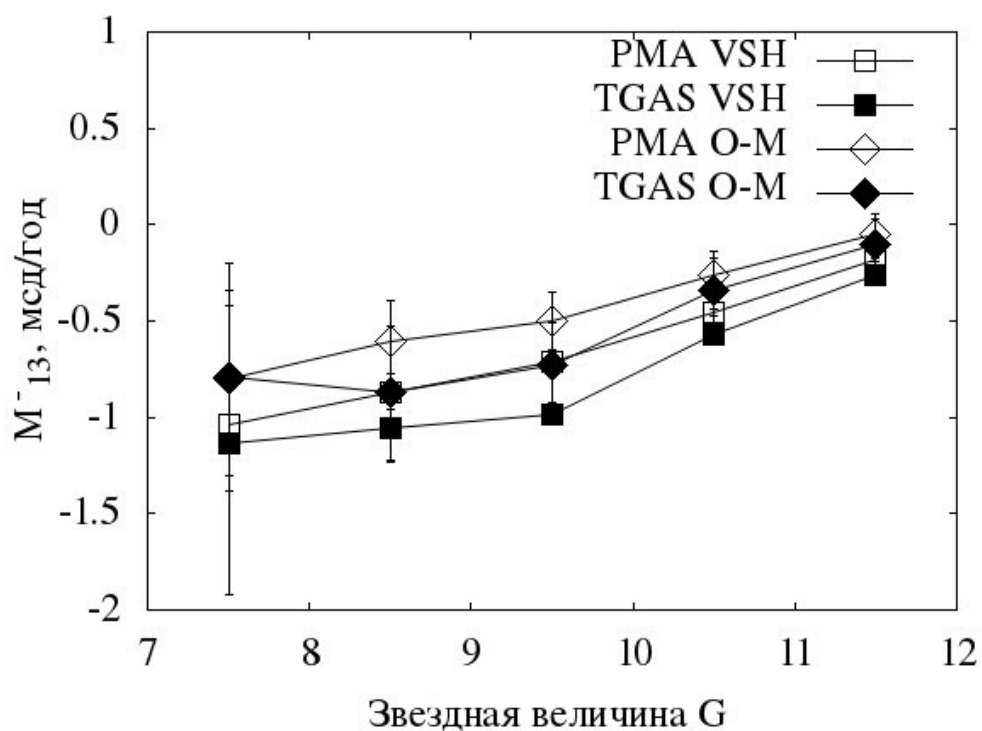


Рис. 10.2. Компоненти швидкості Сонця в залежності від вістані

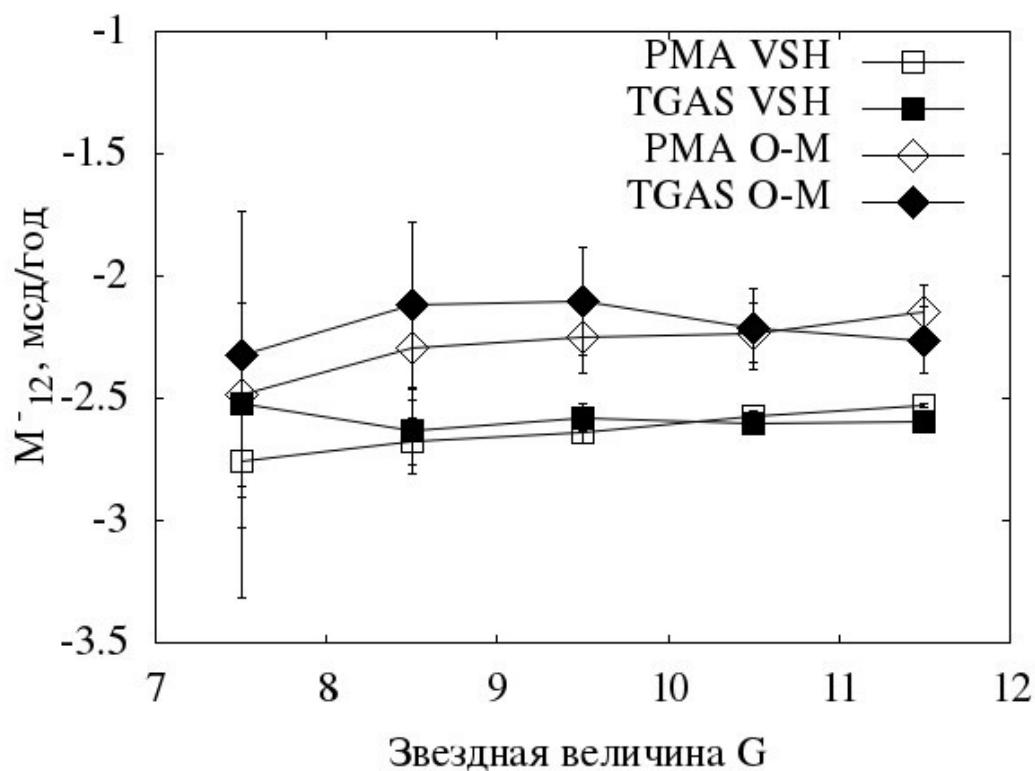
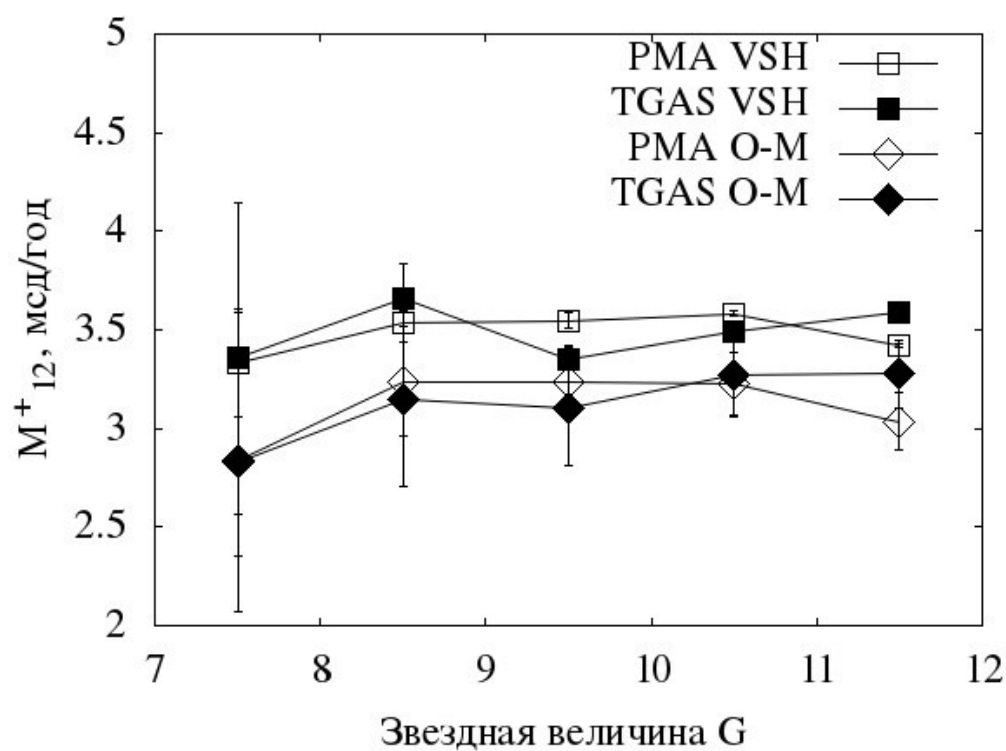


Рис. 10.3. Компоненты тензора обертання в залежності від відстаніРис.



9.15. Компоненти швидкості Сонця в залежності від вістані

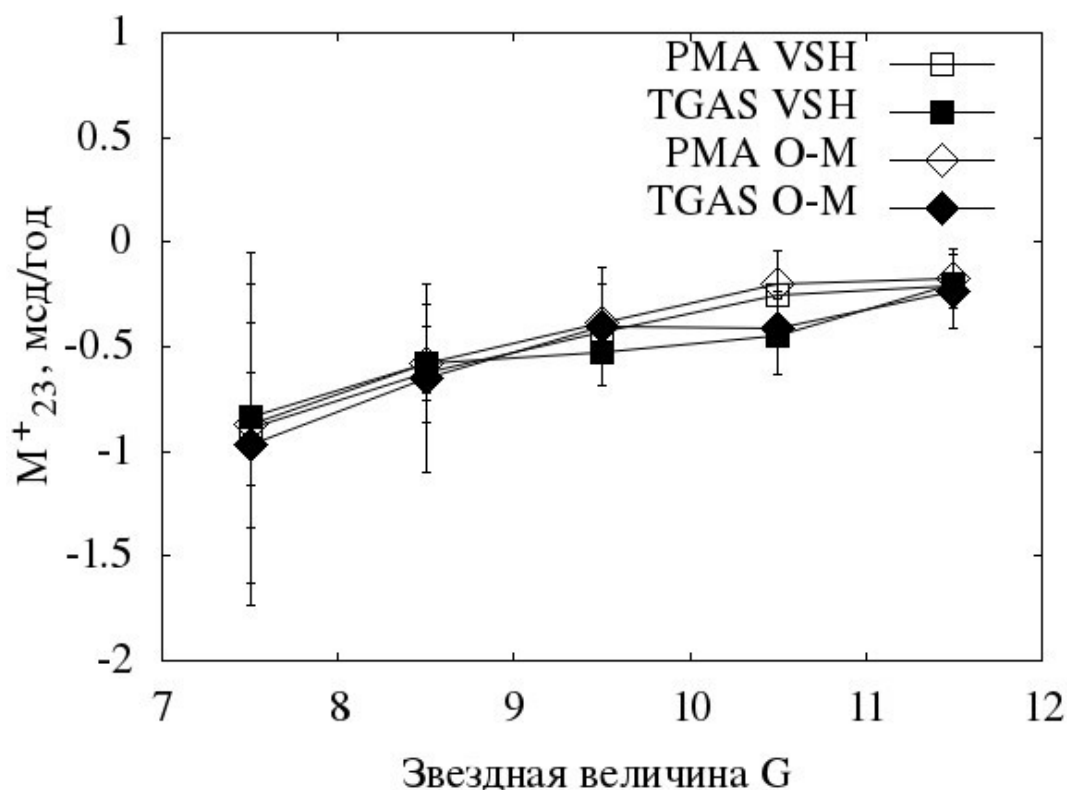


Рис. 9.16. Компоненти швидкості Сонця в залежності від відстані

11 НОВІ КОМП'ЮТЕРНІ ПРОГРАМИ

На мові програмування Сі створена програма «VSH» для знаходження коефіцієнтів розкладання поля швидкостей зірок за векторними сферичними функціями в тангенціальній площині. Також створено супутній комплекс програм на мові Сі, який включає трансформацію координат з екваторіальної площини в галактичну («C-TRANSFORM»), розбиття даних по інтервалам зоряних величин, а в кожному інтервалі - розбиття сфери на пікселі за допомогою бібліотеки Healpix («HEAL_BIN_MAG»).

Створено комплекс програм «PLOTING» для автоматичної побудови графіків за даними з декількох файлів одночасно. Дані, при необхідності, можуть бути апроксимовані різними функціями в інтервалах розглянутих величин. Цей комплекс програм незамінний, наприклад, при глобальному аналізі поведінки власних рухів по всій небесній сфері в залежності від

екваторіальних α , δ або галактичних l , b координат або від зоряної величини. Програма «PLOTING» неодноразово використовувалася для аналізу різних робочих версій каталогів XPM2 і XРМА.

Написана програма обчислення “приведених власних рухів” «RPM». Через відсутність паралаксів для більшості об'єктів в сучасних каталогах “приведені власні рухи” є статистичним засобом оцінки відстаней до об'єктів. При порівнянні графіків “приведений власний рух” M_v - показник кольору (JK) з графіком абсолютна зоряна величина M_v - показник кольору (JK), було проведено калібрування M_v , що дозволило визначити межу між червоними карликами і рештою населення діаграми M_v - (JK). Отриманий результат використовувався надалі при створенні каталогу XРМА.

Висновки до розділу 9, 10, 11

У результаті виконаної роботи отримано кінематичні параметри Галактики за даними каталогів РМА та TGAS. Кінематичний аналіз власних рухів зірок каталогів РМА та TGAS виконано на основі лінійної моделі Огороднікова - Мілна. Показано, що кінематичні параметри Галактики узгоджуються в яскравій області з прийнятими МАС значеннями. Проведені дослідження показали можливість використання для кінематичного аналізу власних рухів не тільки яскравих зірок каталогу РМА, що знаходяться порівняно близько до Сонця, а й зірок, розташованих порівняно далеко. Із рисунків добре видно, що поведінка кінематичних параметрів в діапазоні слабких зоряних величин РМА не протирічить поведінці в яскравій частині.

1. Отримано результати кінематичних досліджень Галактики з використанням даних каталогів GAIA DR1 і XРМА.
2. Константи Оорта, швидкість сонячного руху відносно локального стандарту спокою і координати апекса отримано двома незалежними методами — за допомогою моделі Огороднікова-Мілна та методом розкладання поля швидкостей за векторними сферичними функціями.
3. Отримано значення кутової швидкості обертання Галактики в діапазоні (0 - 1200) пс за власними рухами GAIA DR1-зірок, що мають паралакси, а також отримано залежність кутової швидкості обертання Галактики від зоряної

величини за власними рухами ХРМА-зірок та GAIA DR1-зірок.

4. Підтверджено висновки інших авторів про існування позамодельних гармонік поля швидкостей та виявлено, що не всі параметри моделі Огороднікова- Мілна є статистично значущими.

5. Створено нові комп'ютерні програми. Більшість програмних пакетів створено на мові програмування C/C++ як для користувачів Windows так і UNIX ОС. Серед них програма «VSH», «PLOTING», «RPM» та інші. Вони є необхідним інструментарієм для опрацювання матеріалу, що містить дуже великий обсяг інформації. Створене програмне забезпечення було протестовано в процесі виведення каталогу РМА та виведенні кінематичних параметрів за даними каталогів РМА, TGAS та інших. Програмне забезпечення, що створене для обробки цих великих масивів даних є повністю новим і дуже ефективним.

На основі бази даних організовано доступ до створених в НДІ астрономії каталогів за посиланням: <http://astrodata.univer.kharkov.ua/astrometry/db/>.

Використовуючи каталог РМА як опорний ми плануємо створити новий каталог положень та абсолютних власних рухів близько одного мільярда зірок для всієї небесної сфери, що надасть можливість отримати уточнені значення кінематичних параметрів Галактики та руху Сонця не тільки поблизу Сонця, але і на значних відстанях від нього.

12 ПОРУШЕННЯ СТРУКТУРИ МІСЯЧНОЇ ПОВЕРХНІ, СПРИЧИНЕНІ КОСМІЧНИМИ АПАРАТАМИ

Людська діяльність на місячній поверхні впливає на структуру верхнього шару реголіту і це може бути виявлено методом фазових відношень. Зокрема, за допомогою даних космічного апарату (КА) Клементина (1994 р., роздільна здатність зображень - 100 м/піксел) вдалося знайти фотометричну аномалію точно в місці посадки космічного корабля (КК) Аполлон-15 (Kreslavsky and Shkuratov, 2003). Дослідження місць посадок космічних апаратів були продовжені нами з використанням даних високої роздільної здатності LRO і методу фазових відношень для місць посадок КК Аполлон-14, - 15 і - 17 (Kaydash et al., 2011). Безпосередньо у місцях посадок вдалося виявити порушення структури місячної поверхні, викликані ударом струменів двигунів посадочних модулів і діяльністю астронавтів на поверхні, що підтвердило наші ранні результати (Kreslavsky and Shkuratov, 2003). У цьому розділі ми розглядаємо місця посадок КК Аполлон-11 і 12, використовуючи дані LRO.

12.1 Дані вузькокутової камери КА LRO

Американський КА LRO був запущений 18 червня 2009 р. Цей КА призначений для досліджень Місяці, метою яких є виявлення і опис перспективних місць посадок пілотованих і безпілотних КК для подальшої колонізації нашого супутника (Chin et al., 2007; Robinson et al., 2010). До складу наукової апаратури LRO увійшов комплекс камер LROC (Lunar Reconnaissance Orbiter Camera), що містить, зокрема, вузькокутову камеру NAC (Narrow Angle Camera). Детектором у камері є ПЗЗ-лінійка Kodak KLI - 5001G (динамічний діапазон - 12 біт). Живляча оптика камери - телескоп системи Річі-Кретьєна ($D=200$ мм, $F=700$ мм) з полем зору 2.86° . Смуга спектральної чутливості LROC NAC знаходиться в діапазоні 400-750 нм (Robinson et al., 2010). Камера LROC NAC здатна дати просторову роздільну здатність 50 см/піксел з висоти 50 км.

При такій роздільній здатності можлива надійна ідентифікація посадочних ступенів КК серії Аполлон і КА серії Луна на зображеннях LROC NAC.

Таким чином, на даний момент є величезний масив зображень (~360000), отриманих для деяких ділянок за різних умов освітлення і спостереження, тобто при різних фазових кутах α (<http://lroc.sese.asu.edu/news/index.php?/archives/359-LROC-5th-PDS-Release.html>). Усі дані калібровані і представлені в одиницях мікроват/(см²·ст·нм), з урахуванням темнового відліку, плоского поля і впливу нелінійного відгуку приймача (ПЗЗ матриці) (Korokhin et al., 2014). Після врахування сонячної сталої і приведення до відстані Сонце – Земля в 1 а.о. відліки зображень переведено до одиниць альbedo (radiance factor) (Robinson et al., 2010).

Серед цього масиву зображень нами були вибрані такі, які отримані для одних і тих же ділянок при різних фазових кутах α_1 і α_2 , але близьких кутах освітлення і азимутних кутах. Близькість цих кутів для компонент фазового відношення дозволяє ослабити вплив рельєфу поверхні, що розрішається на знімках. Таким чином, відношення зображень дає інформацію про структуру поверхні (шорсткості), яка визначає стрімкість фазової функції f (Нарке, 1993), але не розрішається на знімках. Провідним чинником у формуванні цієї стрімкості є тінювий ефект, який створюється реголітовими частинками (Нарке, 1993; Shkuratov et al., 2005) з розміром близько 100 мкм. Обчислюючи фазові відношення $\xi = f(\alpha_1)/f(\alpha_2)$, вважаємо в цій роботі, що $\alpha_1 < \alpha_2$.

Параметр ξ залежить не лише від тінювого ефекту; він також залежить від багаторазово розсіяного світла, яке засвічує тіні, що створюються частинками. Це призводить до того, що між ξ і альbedo поверхні, зазвичай, спостерігається зворотна кореляція (Kaydash et al., 2009; Shkuratov et al., 2010). Істотні відхилення від цієї кореляції ми називаємо аномаліями. Зокрема, якщо для деякої світлої ділянки поверхні значення параметра ξ помітно більш того, що передбачає рівняння регресії відміченої кореляції, то це називається позитивною аномалією; у протилежному випадку говоритимемо про негативну аномалію.

Для того, щоб отримати придатні для аналізу фазові відношення, зображення компонент мають бути ретельно суміщені на рівні долів піксела. Був застосований алгоритм суміщення, що давно використовується, в кожному вікні за критерієм максимуму коефіцієнта кореляції «rubber - sheet geometric transformation» з формальною точністю суміщення 1/10 піксела (Kreslavsky and Shkuratov, 2003; Kaydash et al., 2009).

12.2 Місце посадки КА Аполлон-11

У період з 16 по 24 липня 1969 року проходив перший історичний політ людини до Місяця для висадки на її поверхню. До складу екіпажа КК Аполлон-11 входили: Нейл Армстронг (командир), Едвін Олдрін - вони вчинили посадку, і Майкл Коллінз - залишався на орбіті. Посадка на Місяць була здійснена в південній частині Моря Спокою з координатами: $0^{\circ}41'$ північної широти, $23^{\circ}26'$ східної довготи. Головним завданням експедиції був збір зразків матеріалу місячної поверхні; як у найближчій околиці місячної кабіни (у разі несподіваного переривання місії), так і плановий збір зразків в ширшій околиці.

Фрагменти зображень M119699983R і M119693197L, отримані камерою LROC NAC, включають місце посадки КК Аполлон-11 і мають однакову роздільну здатність і близькі кути падіння і азимуту підсонячної точки, але різні фазові кути α (див. Таблицю. 12.1). Кути спостереження є також близькими, що означає зйомку по різні сторони від нормалі до місячної поверхні для двох вказаних знімків. Фрагмент M119693197L, що відповідає більшому фазовому куту ($\alpha = 76.11^{\circ}$), показаний на рисунку 12.1 (а). Тут добре видно посадочний модуль Ігл (Eagle) (лівіше за кратер Little West). Невелике підвищення альbedo в околиці місця посадки важко інтерпретувати беззаперечно: це може бути пов'язано як з дією газів посадочного ступеня, так і з тим, що посадка Ігл сталася в місці з трохи підвищеним альbedo навколо кратера Little West.

Таблиця 12.1 Характеристики зображень, отриманих камерою LROC NAC для місць посадок КК Аполлон-11 і 12, а також місця падіння КА Рейнджер-9.

КА	Номер кадру	Роздільна здатність м/піксел	Кут спостереження, град.	Кут падіння, град.	Фазовий кут, град.	Азимут підсонячної точки, град.	Широта центру кадру, град.	Довгота центру кадру, град.
Аполлон-11	M119699983R С	0.68	20.07	55.99	35.93	178.93	0.03	23.45
	M119693197L С	0.67	21.03	55.08	76.11	178.37	0.03	23.5
Аполлон-12	M109386083R С	0.50	4.75	3.63	2.07	205.23	-3.02	336.55
	M124728623L С	0.50	8.29	4.73	11.4	240.85	-2.59	336.57
Рейнджер-9	M129302602R С	0.50	18.02	56.33	38.63	188.72	-12.57	357.59
	M129309387R С	0.51	20.91	55.45	76.09	193.19	-12.56	357.55

При розгляді зображення фазового відношення (рисунки 12.1 (б)), на якому темніші тони відповідають меншим значенням фазового відношення $\xi = f(\alpha_1)/f(\alpha_2)$, $\alpha_1 < \alpha_2$, стає добре видимою темна пляма діаметром близько ста метрів. Вона є негативною фотометричною аномалією. Пляма формується як ореолом навколо кратера, так і дією двигуна модуля Ігл. Із-за такого накладення центр тяжіння плями зміщений від точки посадки. Можливо, також, що ця асиметрія, частково, пов'язана з особливостями роботи посадки на Місяць посадочного модуля: відомо, що Нейл Армстронг вимушений був на малій висоті «протягнути» час посадки за штатну межу, щоб уникнути попадання в кратер Little West. Так або інакше, пляма має структуру; деякі її деталі можна інтерпретувати як сліди дії газових струменів. Ці сліди дуже схожі на ті, що були виявлені в місцях посадок КК Аполлон-14, 15 і 17 (Kaydash et al., 2011). В цілому, для досліджуваної ділянки спостерігається зворотна кореляція між альбедо і параметром ξ , хоча в цьому районі поверхня фотометрично досить однорідна. Ми оцінюємо відмінності нахилу фазової залежності в плямі, що оточує місце посадки, від сусідніх ділянок поверхні в межах 10 %.

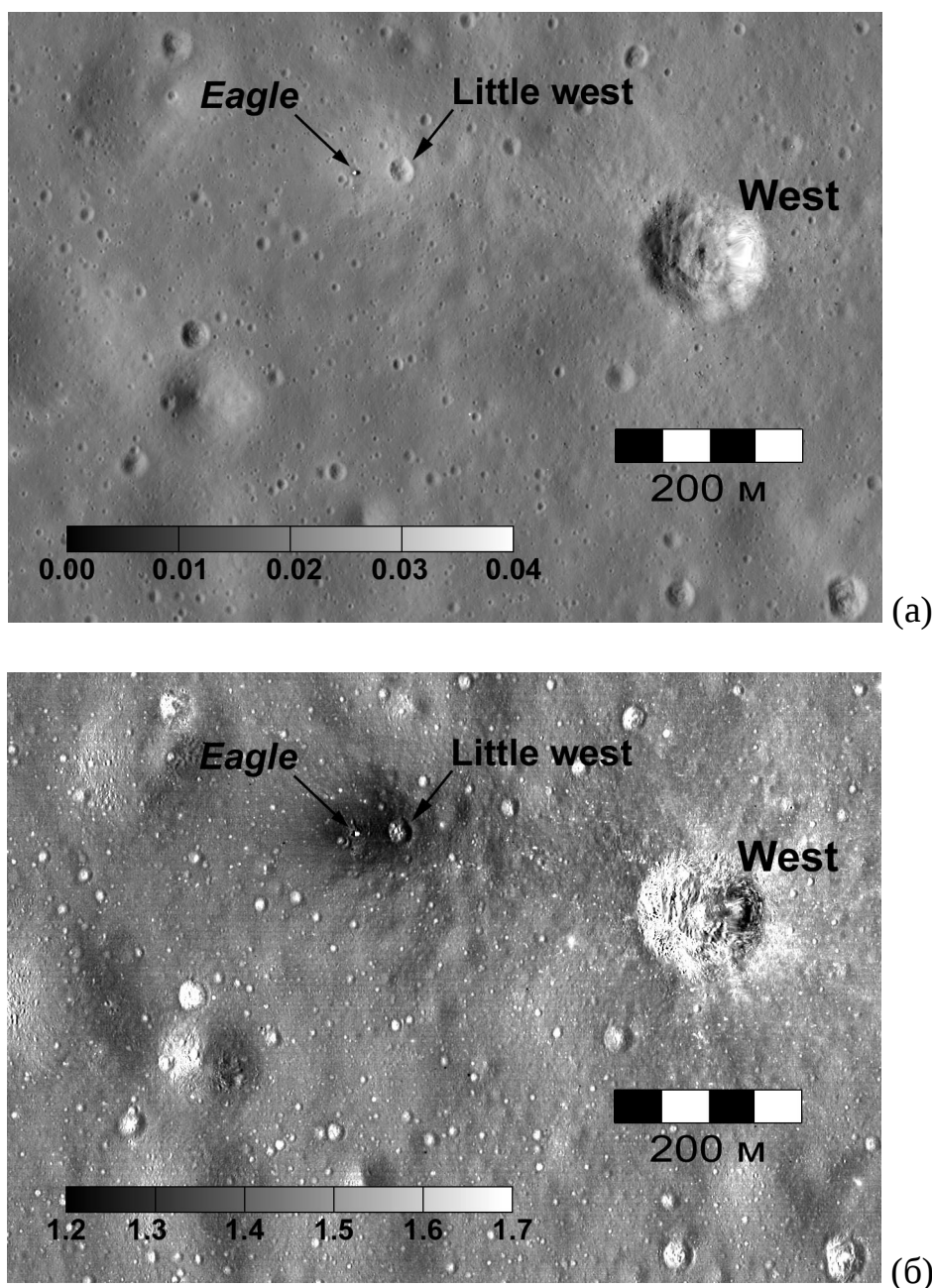


Рисунок 12.1 Місце посадки КК Аполлон-11, сфотографоване камерою LROC NAC : (а) - зображення видимого альбедо, отримане при фазовому куті $\alpha = 76.1^\circ$ з просторовим розділенням 0.67 м/піксел, (б) - зображення, що передає розподіл фазового відношення $f(36^\circ)/f(76.1^\circ)$ для тієї ж області. Стрілками вказані посадочний модуль Ігл і кратер Little West. Показаний динамічний діапазон зміни видимого альбедо і просторовий масштаб зображення. Тут і далі на усіх зображеннях північ вгорі, схід праворуч.

Відзначимо, що на оригінальних альбедних зображеннях видно слабкі сліди астронавтів, які в першу експедицію відходили від апарату лише на невелику відстань. На фазовому відношенні (рисунок 12.1 (б)) вони видно

виразно, як короткі світлі смужки, що відходять від посадочного модуля (позитивні фотометричні аномалії).

12.3 Місце посадки КА Аполлон-12

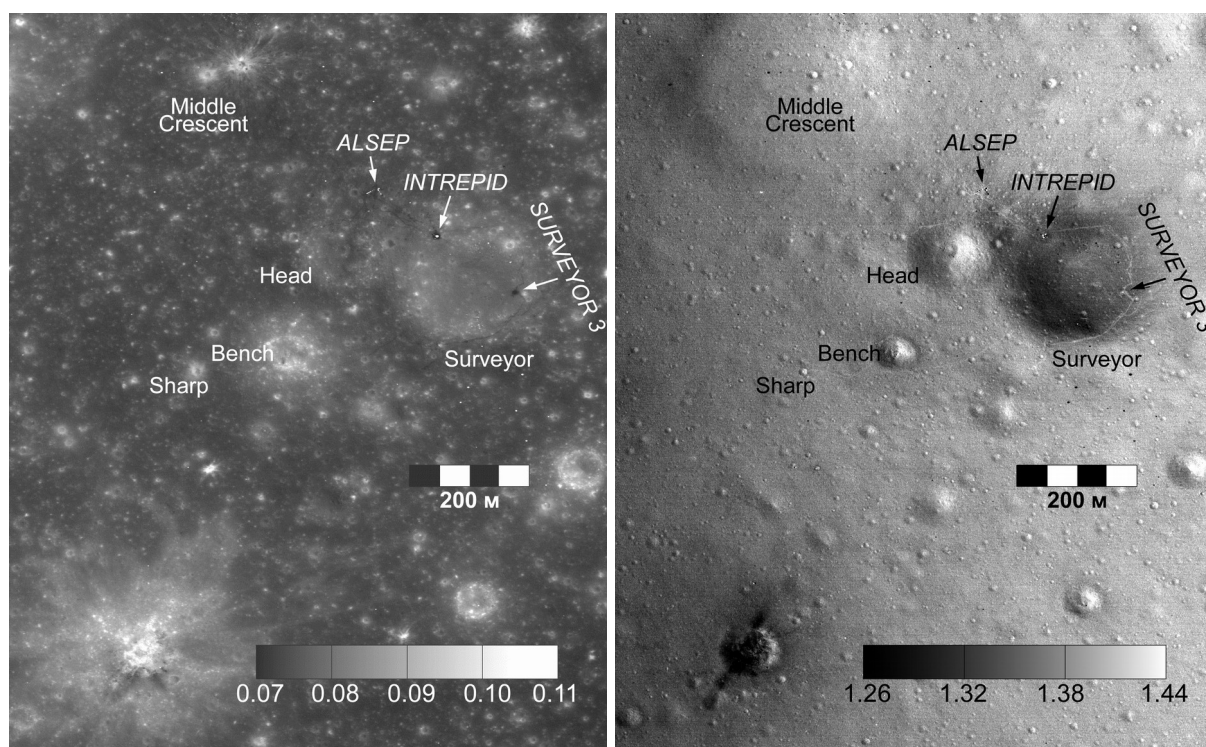
Друга пілотована експедиція на Місяць відбулася 14 - 24 листопада 1969 року. Посадочний модуль КК Аполлон-12 вчинив посадку в Океані Бур в точці з координатами: $3^{\circ}12'$ південної широти і $23^{\circ}23'$ західних довготи, недалеко від місця посадки на Місяць КА Сервейер-3 (квітень 1967 року.). Астронавти Чарльз Конрад і Алан Бін дійшли до КА Сервейер-3 (відстань 183 метри) і демонтували деякі деталі конструкції цього апарату для доставки їх на Землю. Вони також зробили фотографії околиць станції Сервейер-3 для того, щоб порівняти їх з фотографіями тих же ділянок, зробленими 30-ма місяцями раніше камерами КА Сервейер-3. Ніяких достовірних змін на поверхні в масштабах 1 мм - 1 см знайдено не було, проте астронавти відмітили запилення деталей станції.

Фрагменти кадрів LROC NAC M109386083RC і M124728623LC, що включають місце посадки КК Аполлон-12, мають ідентичну роздільну здатність і кути падіння (див. Таблицю 12.1), що не сильно розрізняються. Фрагмент M124728623LC, що відповідає більшому фазовому куту ($\alpha = 11.4^{\circ}$), показаний на рисунку 12.2 (а). На краю кратера видно як посадочний модуль Інтрепід (Intrepid), так і станцію Сервейер-3 (показані стрілками разом з комплексом наукової апаратури ALSEP - Apollo Lunar Surface Experiments Package). Кратери Surveyor, Sharp, Bench, Head, Middle Crescent, досліджені астронавтами, також вказані на рис. 12.2 (а),(б). Слабоконтрастні темні смужки, що відходять від посадочного модуля, - сліди пересування астронавтів. Ці сліди набагато краще виділяються на зображенні фазового відношення (рисунок 12.2 (б)) як світлі смуги (позитивні аномалії). Під час другої експедиції астронавти використовували транспортер для переміщення устаткування (Modular Equipment Transporter, MET) і відходили від апарату на істотно більші відстані, чим під час першої експедиції КК Аполлон-11. Зокрема, відмінно видно сліди уздовж валу кратера, що сполучають посадочний модуль і станцію Сервейер-3.

Відмітимо, що частину слідів не видно на зображенні яскравості, але добре помітно на зображенні фазового відношення.

При розгляді зображення фазового відношення ($\xi=f(2.1^\circ)/f(11.4^\circ)$) (рисунок 12.2 (б)) виділяється темна пляма розміром 200 x 200 м, приблизно співпадаюча з кратером Surveyor. Локальні зміни топографії поверхні в кратері можуть дещо спотворювати розподіл цього фазового відношення, проте істотне зменшення параметра (в північній частині кратера (поблизу модуля Інтрепід) і в східній частині кратера не може бути пояснено лише впливом місцевого рельєфу.

Таким чином, ця пляма є негативною фотометричною аномалією, яка є зоною дії газових струменів двигуна модуля Інтрепід. Пляма, як і у разі КК Аполлон-11, має променеву структуру, деталі якої можна інтерпретувати як сліди удару газових струменів. Знову відмітимо схожість цих слідів з тими, що були виявлені в місці посадки КК Аполлон-14, 15 і 17 (Kaydash et al., 2011). Розмір плями такий, що покриває місце посадки КА Сервейер-3. Це узгоджується з тим, що ця станція виявилася покритою тонким шаром пилу, видутого при посадці КК Аполлон-12. Як і у разі КК Аполлон-11, ми оцінюємо відмінності нахилу фазової залежності в плямі, що оточує місце посадки, в межах 10%. Відмітимо, що навіть при порівняно невеликій різниці фазових кутів для зображень, що входять у фазове відношення $f(2.1^\circ)/f(11.4^\circ)$, використаний метод дозволяє упевнено виявляти фотометричні аномалії (Кайдаш, Шкуратов, 2014).



(a)

(б)

Рисунок 12.2 Місце посадки КК Аполлон-12 і КА Сервейер-3. (а) - зображення видимого альбедо, отримане при фазовому куті $\alpha = 11.4^\circ$ з просторовою роздільною здатністю 0.50 м/піксел. (б) - зображення розподілу фазового відношення $f(2.1^\circ)/f(11.4^\circ)$ для тієї ж області. Стрілками вказані комплекс наукової апаратури ALSEP, посадочний модуль Інтрєпід і станція Сервейер-3.

Таким чином, ми побудовано розподіли фазових відношень для місць посадок модулів АМС серії Луна та КА Apollo. Знайдені нами фотометричні аномалії в межах посадкових майданчиків, очевидно, пов'язані з реактивним впливом їх двигунів. Цей вплив руйнує первісну структуру місячного реголіту (структура типу повітряного замка) та роздмухує пил, що призводить до послаблення тіньового ефекту і, отже, до зменшення нахилу фазової функції.

Всі проаналізовані місця розташування модулів Apollo та Луна мають у відповідності до потужності їх двигунів особливості фазових відношень, чітко асоційовані із місцями посадки (Кайдаш, Шкуратов, 2014). Єдиним винятком із знайдених фотометричних аномалій є зонд Луна-24, фотометрична особливість якого зміщена на 150 м на південний схід від станції. Виходячи з того, що модуль Луна-24 працював у звичайному режимі, не має причин для такого зсуву. Нами запропоновано наступне пояснення: місця посадок невдалої експедиції Луна-23 і успішної Луна-24 ідентифіковані помилково, так як вони розташовані в зоні похибки визначення місця посадки. Ми припускаємо, що через неправильну обробку вимірювань радіолокаційної системи визначення відстані, швидкості, і бічного дрейфу, двигун АМС Луна-23, перш ніж був вимкнений, призвів до відскоку АМС, що призвело до додаткового 150 м дрейфу та жорсткої посадки.

Ми критично проаналізували існуючу гіпотезу, що зразки ґрунту АМС Луна-24 не представляють матеріал морської поверхні із Моря Криз за даними методів дистанційного зондування, а, скоріш, матеріал з більшої глибини, що був відкритий впливу космічного середовища протягом відносно короткого часу. За допомогою оптичного прогнозу вмісту хімічних елементів і ступеню зрілості місячної поверхні ми показали, що гіпотеза про низький ступінь зрілості місця посадки АМС Луна -24 у порівняння із АМС Луна-23 не підтверджується. Ми показали, що метод фазових відношень дає можливість надійно ідентифікувати зрушення реголітової структури різних місць посадки АМС серії Луна навіть за умов присутності більш незрілого ґрунту, як у місці посадки Луна-20. Зроблено висновок, що можлива помилкове визначення місць посадок Луна-23 і Луна-24 потребує перегляду у поясненні різниці результатів хімічного прогнозу за даними дистанційного зондування і реальних вимірів.

12.4 Кратер, утворений на місці падіння КА Рейнджер-9

Апарати серії Рейнджер були призначені для виконання перших розвідувальних досліджень місячної поверхні. Головною метою було отримання знімків місячної поверхні з різною роздільною здатністю в процесі падіння апарату (жорсткої посадки) на місячну поверхню. КА Рейнджер-7 - Рейнджер-9 повністю виконали програму, передавши багато зображень Місяця високої якості. Останні зображення (перед зіткненням з поверхнею) мали роздільну здатність близько метра. Старт КА Рейнджер-9 відбувся 21 березня 1965 року. Маса апарату була близько 366 кг. Під час керованого падіння на Місяць з метою отримання зображень її поверхні (24 березня 1965 року) було передано 5814 знімки Місяця з відстані від 2363 км до 600 м. Точка посадки на Місяць знаходиться в кратері Альфонс: $12^{\circ}54'$ південної широти, $2^{\circ}24'$ західної довготи. На рисунку 12.3 показана послідовність зображень місячної поверхні, отриманих при жорсткій посадці КА Рейнджер-9; білим кружком позначено місце посадки цього апарату. У лівому верхньому кутку у поле зору камери майже цілком потрапляє кратер Альфонс, правий нижній знімок показує останнє зображення, отримане перед падінням апарату, див. : http://www.msso.com/mars_images/mardi_mpl/mardi_hardware/history/ranger/ranger_9.html.

Місце жорсткої посадки КА Рейнджер-9 було надійно ідентифіковано на знімках LROC NAC: <http://lroc.sese.asu.edu/news/index.php?/archives/210> - LROC - Coordinates - of - Robotic - Spacecraft.html; на цьому ж сайті можна знайти місця м'якої і жорсткої посадок інших КА, а також місця падіння на Місяць деяких відпрацьованих блоків КА. Нами були використані фрагменти зображень LROC NAC M129302602RC і M129309387RC, які включають місце посадки КА Рейнджер-9 і близькі як по розділенню, так і по куту падіння сонячних променів і їх азимуту (див. Таблицю. 12.1). Фрагмент кадру M129309387RC, що відповідає меншому фазовому куту ($\alpha = 38.63^{\circ}$) показаний

на рисунку 12.4 (а). Наслідком жорсткої посадки станції Рейнджер-9 являється невеликий (близько 15 м) кратер із слабкими променями, який добре видно в правій частині зображення. Променева система цього кратера незвичайна тим, що тут видно як темні, так і світлі структури. При розгляді зображення фазового відношення $f(39^\circ)/f(76^\circ)$ (рисунок 1.4. (б)) променева система кратера видна значно краще; вона виявляється набагато довшою, чим на знімках, що входять до пари фазового відношення. Високі значення параметра ξ для цього кратера і його променевої системи дозволяють розглядати місце падіння КА як позитивну фотометричну аномалію. Ореол навколо кратера створений викидами каменів і уламків породи; вони створюють в зоні ореолу шорстку поверхню.

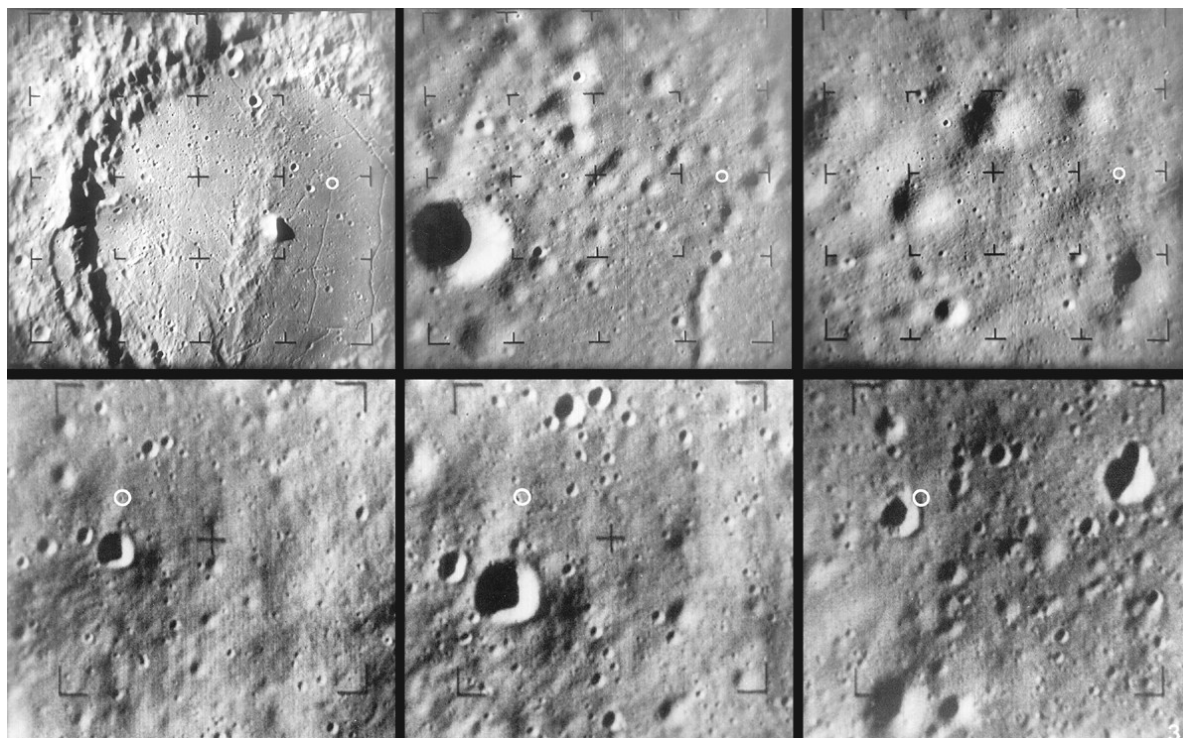
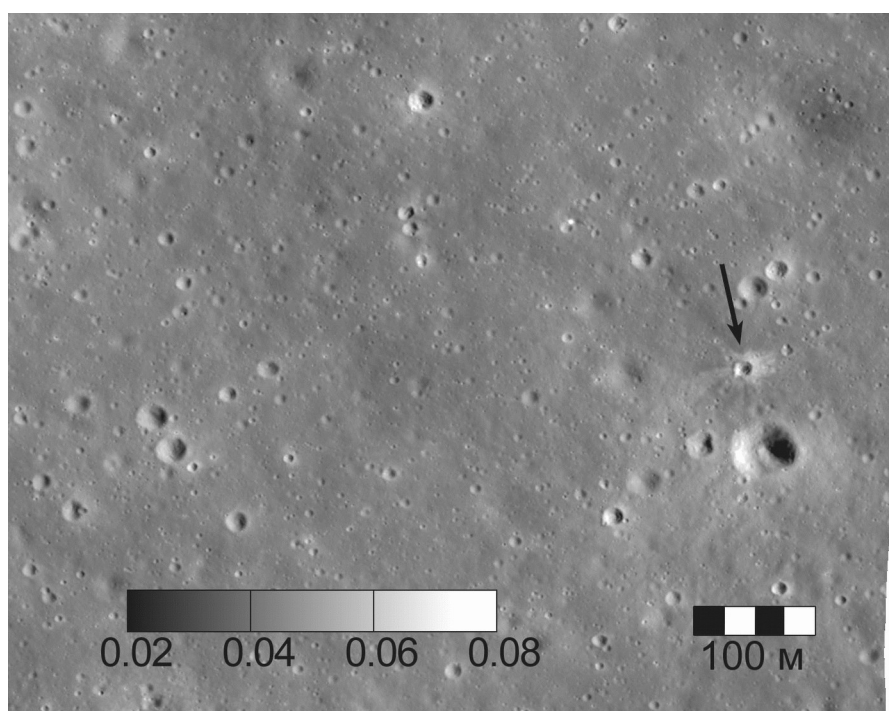
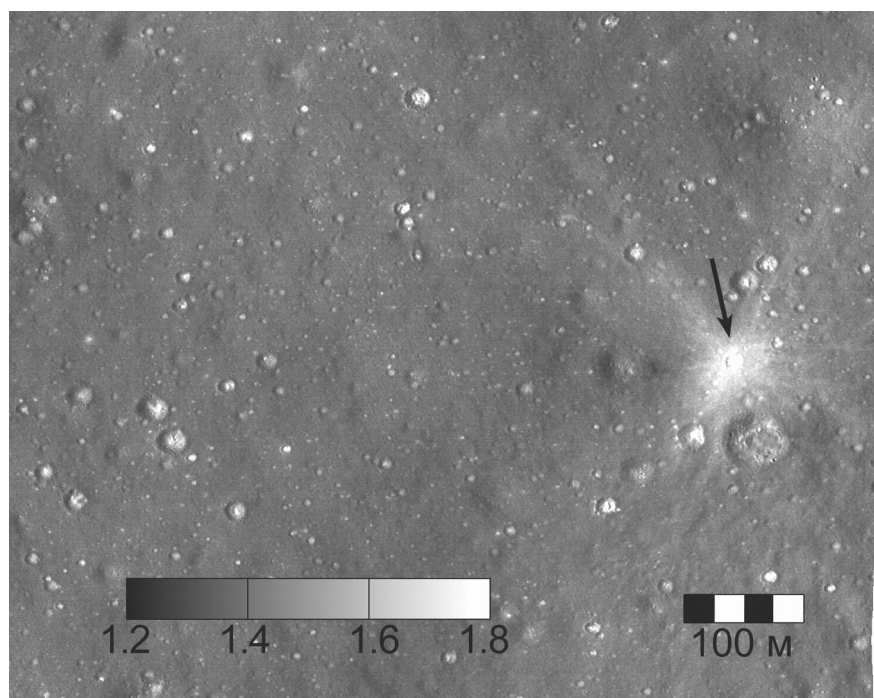


Рисунок 12.3 Знімки кратера Альфонс, отримані при падінні КА Рейнджер-9. Світлим кружком показано місце жорсткої посадки. Відстань до Місяця, з якої зроблений кожен зі знімків, зменшується від лівого верхнього кадру до нижнього правого кадру.

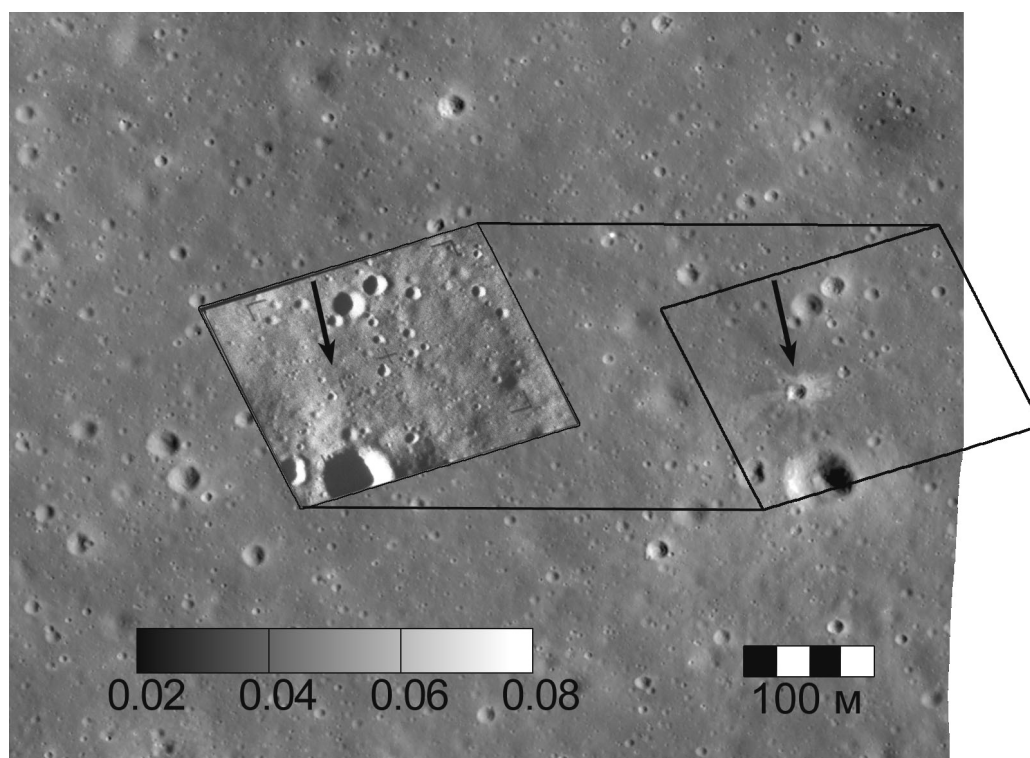
Відмінності нахилу фазової залежності в плямі, що оточує місце жорсткої посадки, знаходяться в межах 10-15 %. На рисунку 12.4 (в) зображення місячної поверхні, отримане КА Рейнджер-9 перед падінням на Місяць, переведено в проекцію рисунку б (а); таким чином, можна порівняти зображення, отримані безпосередньо перед утворенням ударного кратера, і через 55 років після цієї події (знімок на рисунку 12.4 (в) може бути знайдений за адресою: <http://www.lpi.usra.edu/resources/ranger/frame/?msn=9&cam=P&plt=11>).



(a)



(б)



(в)

Рисунок 12.4 Місце падіння КА Рейнджер-9. (а) - розподіл видимого альбедо ($\alpha = 39^\circ$) за даними *LROC/NAC*, (б) - розподіл фазового відношення $f(39^\circ)/f(76^\circ)$ за даними *LROC NAC*, Стрілкою показаний сам кратер (і місце його утворення на

знімку Рейнджер-9). (в) - зображення, отримане КА Рейнджер-9 перед падінням 24 березня 1965 р. (камера Р4, знімок 11, висота над поверхнею 1.67 км), переведено в проекцію рисунка (а). Стрілкою показаний сам кратер (і місце його утворення на знімку Рейнджер-9).

13 ОЦІНКА ГЛИБИНИ ПОРУШЕННЯ ПОВЕРХНЕВОЇ СТРУКТУРИ РЕГОЛІТУ.

Інтерпретація виявлених негативних аномалій як зони порушення поверхневої структури реголіту ударом газових струменів неминуче викликає питання про глибину такого порушення. Відомо, що з глибиною ступінь зрілості місячного реголіту зменшується. Ступенем зрілості служить відносна кількість відновленого заліза FeO в частинках ґрунту. Це залізо представлене найдрібнішими глобулами, впровадженими в силікатну матрицю реголітових частинок; розмір глобул складає десятки нанометрів. Нанофазне залізо впливає на нахил спектру у видимому діапазоні і глибину смуг поглинання піроксенів і олівінів в районі 1 мкм (чим більше FeO , тим менш контрастні смуги). Таким чином, міра зрілості місячної поверхні може бути оцінена по колірних відношеннях $C(0.750/0.415 \text{ мкм}) = A(0.750 \text{ мкм})/A(0.415 \text{ мкм})$ і $C(0.95/0.75 \text{ мкм}) = A(0.95 \text{ мкм})/A$, де $A(\lambda)$ - видиме спектральне альbedo (Lucey et al., 2000b; Le Mouélic et al., 2000; Shkuratov et al., 1999, 2003; Pieters et al., 2006). Найбільш інтенсивне дозрівання ґрунту відбувалося в поверхневому шарі завтовшки близько декількох сантиметрів. Частинки цього шару схильні до ударів мікрометеоритів і дії протонів сонячного вітру; саме ці чинники визначають формування нанофазного заліза. Таким чином, по колірних відношеннях $C(0.750/0.415 \text{ мкм})$ і $C(0.95/0.75 \text{ мкм})$ можна оцінити глибину дії двигунів місячних модулів КА Аполлон на місячну поверхню. Якщо ця глибина більше 10 см, в місці посадки мають бути помітні аномалії відношень $C(0.750/0.415 \text{ мкм})$ і $C(0.95/0.75 \text{ мкм})$, що свідчать про пониження зрілості ґрунту.

13.1 КА Аполлон-11

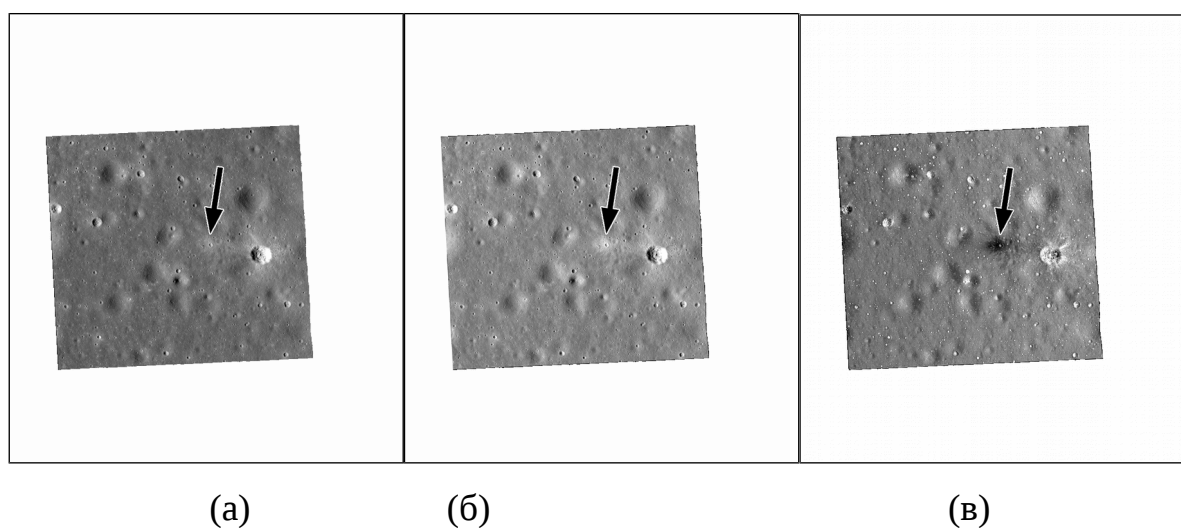
Глобальна спектральна зйомка Місяця з найбільшою просторовою роздільною здатністю проведена японським КА SELENE (SELEnological and ENgineering Explorer) в 2007-2009 рр. Камера Multiband Imager (MI) цього КА дозволила зняти з 100-км орбіти поверхню Місяця з просторовою роздільною здатністю 20 м/піксел в п'яти вузьких спектральних смугах: ($\lambda = 0.415, 0.750, 0.900, 0.950, 1.000$ мкм (Ohtake et al., 2008, 2010). Зображення, отримані цим апаратом, доступні в Інтернеті: <https://www.soac.selene.isas.jaxa.jp/archive/>. Для побудови розподілу кольорних відношень $C(0.750/0.415 \text{ мкм})$ і $C(0.95/0.75 \text{ мкм})$ в районі посадки КК Аполлон-11 нами був використаний кадр MVA_2B2_01_04167N008E0238, (див. Таблицю 13.1).

Таблиця 13.1 Характеристики зображень, отриманих камерою MI/SELENE для місць посадок КК Аполлон-11 і 12, а також місця падіння КА Рейнджер-9. Просторова роздільна здатність усіх кадрів складає 20 м/піксел.

КА	Номер кадру	Кут спостереження, град.	Кут падіння, град.	Фазовий кут, град.	Азимут підсонячної точки, град.	Широта центру кадру, град.	Довгота центру кадру, град.
Аполлон-11	MVA_2B2_01_04167N008E0238	0.5	14.2	14.3	86.92	0.67	23.69
Аполлон-12	MVA_2B2_01_02378S029E3368	0.7	18.8	19.04	76.72	-2.92	336.76
Рейнджер-9	MVA_2B2_01_03858S126E3578	1.9	47.1	46.8	281.65	-12.61	357.84

Порівняння даних КА LRO і SELENE для місця посадки КА Аполлон-11 наведено на рисунку 13.1, де верхній ряд зображень отриманий за даними LROC NAC, а нижній - за даними MI/SELENE. Для зручності ми привели просторову

роздільну здатність, проекцію і масштаб знімків LROC NAC до знімків MI/SELENE. Різниця початкової роздільної здатності цих знімків велика (0.6 проти 20 м/піксел), проте, фотометрична аномалія поблизу посадочного модуля досить велика (див. рисунок 13.1 (в)), щоб упевнено ідентифікуватися на знімках MI/SELENE, якщо ґрунт в цій аномалії незрілий. Як видно з рисунків 13.1 (д), (е), розподіли відношень $C(0.750/0.415 \text{ мкм})$ і $C(0.950/0.750 \text{ мкм})$ не показують яких-небудь особливостей в області фотометричної аномалії, тобто ґрунт там не має помітних відхилень ступеня зрілості. Таким чином, глибина порушень структури поверхневого шару Місяця посадочними модулями КК Аполлон невелика, не більше 10 см. В той же час вал і зона найближчих викидів кратера West (~300 м на схід від місця посадки) виразно видно на зображеннях колірних відношень $C(0.750/0.415 \text{ мкм})$ і $C(0.950/0.750 \text{ мкм})$, що вказує на низький ступінь зрілості ґрунту у безпосередній близькості кратера West.



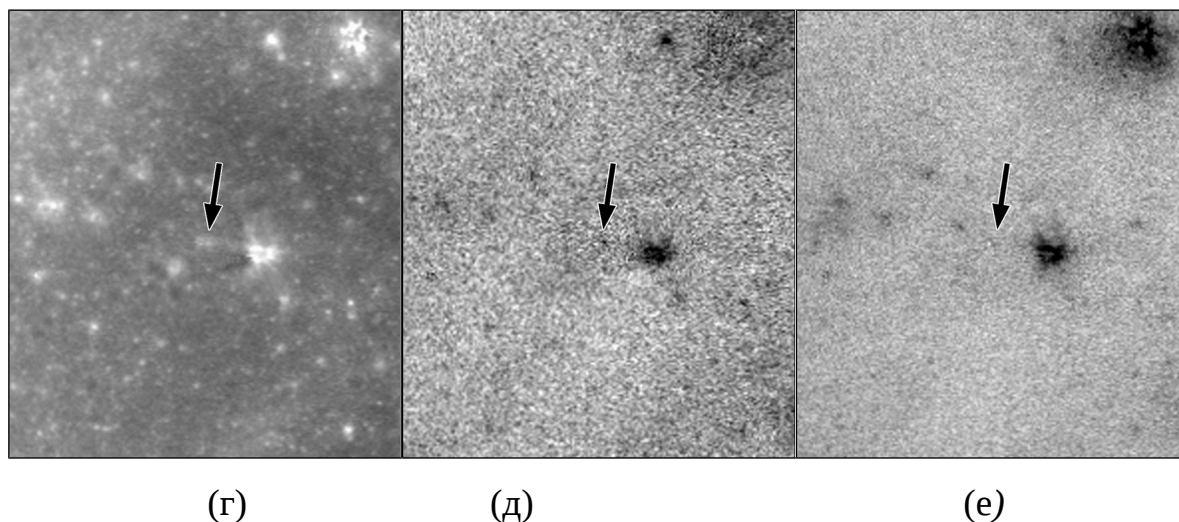
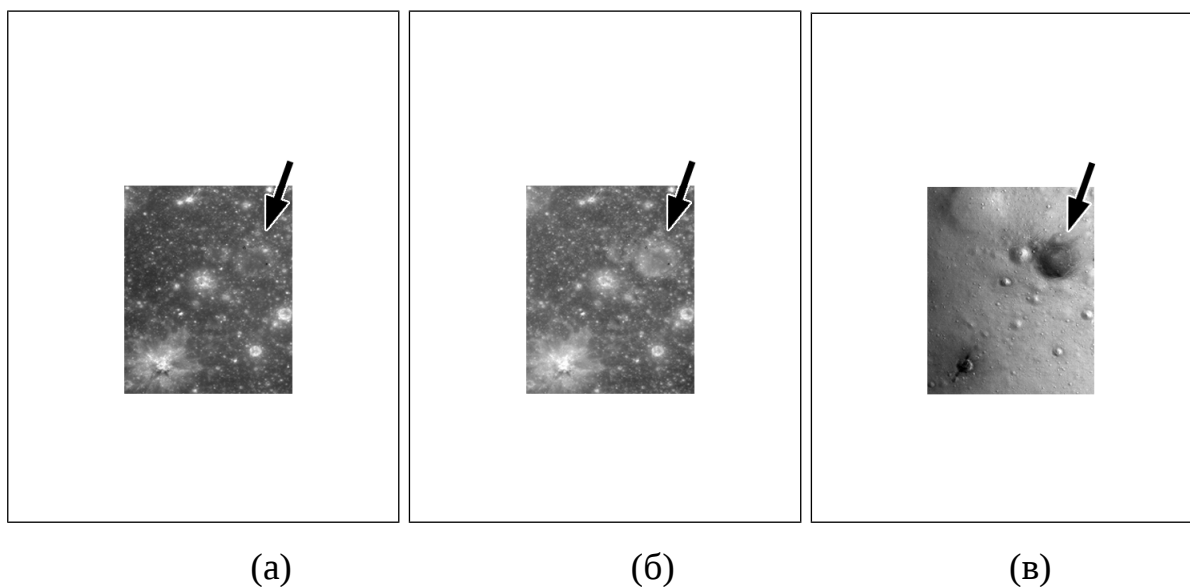


Рисунок 13.1 Порівняння зображень LROC NAC і MI/SELENE для місця посадки КК Аполлон-11 (роздільна здатність, проекція і масштаб зображень LROC NAC приведені до знімків MI/SELENE. Верхній ряд - LROC NAC : (а) - видиме альbedo при $\alpha = 36^\circ$, (б) - видиме альbedo при $\alpha = 76^\circ$, (в) - фазове відношення $f(36^\circ)/f(76^\circ)$. Нижній ряд - MI/SELENE: видима яскравість при ($\lambda=0.750$ мкм) - (г), колірне відношення $C(0.750/0.415$ мкм) - (д), колірне відношення $C(0.950/0.750$ мкм) - (е). Стрілка вказує на місце посадки. Темніший тон відповідає меншим значенням яскравості, фазових і колірних відношень.

13.2. КА Аполлон-12

Для місця посадки КК Аполлон-12 ми використовуємо кадр MVA_2B2_01_02378S029E3368 MI/SELENE з метою оцінки ступеня зрілості місячного ґрунту в цьому районі (див. Таблицю 2.1). На рисунку 13.2 аналогічно рисунку 13.1 верхній ряд зображень - дані LROC NAC, представлені з просторовою роздільною здатністю, в проекції і масштабі знімків MI/SELENE, а нижній ряд - яскравість і колірні відношення за даними MI/SELENE. Ми знову відмічаємо відсутність на розподілах параметрів $C(0.750/0.415 \text{ мкм})$ (рисунок 13.2 (д)) і $C(0.950/0.750 \text{ мкм})$ (рисунок 13.2 (е)) помітних варіацій, які б співпадали з негативною фотометричною аномалією в місці посадки КК Аполлон-12. Кратери в околицях місця посадки, навпаки, виділяються як області з меншими значеннями цих колірних відношень. Таким чином, можна зробити висновок, що за ступенем зрілості місячний ґрунт в місці посадки КК Аполлон-12 не відрізняється від найближчих ділянок поверхні, тобто дія газових струменів двигунів цього КК, як і у разі КК Аполлон-11, не привела до глибокого порушення структури ґрунту.



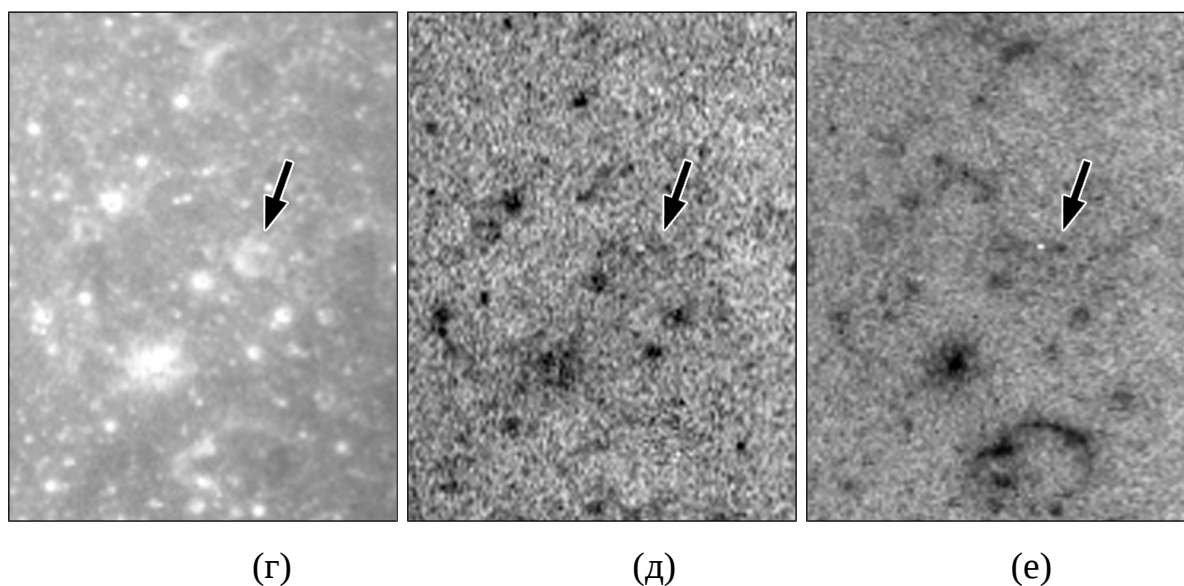


Рисунок 13.2 Порівняння зображень LROC NAC і MI/SELENE для місця посадки КК Аполлон-12 (роздільна здатність, проекція і масштаб зображень LROC NAC приведений до знімків MI/SELENE). Верхній ряд - LROC NAC : видиме альbedo при $\alpha=2.1^\circ$ - (а), видиме альbedo при $\alpha = 11.4^\circ$ - (б), фазове відношення $f(2.1^\circ)/f(11.4^\circ)$ - (в). Нижній ряд – MI/SELENE: видиме альbedo для $\lambda=0.750$ мкм - (г), колірне відношення $C(0.750/0.415$ мкм) - (д), колірне відношення $C(0.950/0.750$ мкм) - (е). Стрілка вказує на місце посадки КК Аполлон-12.

13.3. КА Рейнджер-9

Підвищення міри шорсткості місячного ґрунту при ударній події, зазвичай, асоціюється з екскавацією речовини з під поверхневих шарів і, отже, з оголенням незрілого ґрунту. Для виявлення такого ґрунту в місці падіння КА Рейнджер-9 ми використали дані спектральної зйомки КА Селена (кадр MVA_2B2_01_03858S126E3578, див. Таблицю 13.1). Слід зазначити, що розміри позитивної фотометричної аномалії невеликі (яскраве гало з високими значеннями (не більше 40-50 м в діаметрі), тому ідентифікація цього об'єкту на

зображеннях MI/SELENE дещо ускладнена. Проте, ми порівняли зображення видимого альбедо і фазового відношення за даними LROC NAC з яскравістю і колірними відношеннями за даними MI/ SELENE. На рисунку 13.3 (а) представлені видиме альбедо ($\alpha = 39^\circ$) і розподіл фазового відношення $f(39^\circ)/f(76^\circ)$ за даними LROC/NAC, переведені в проекцію і масштаб зображень MI/SELENE. Для надійнішої ідентифікації ми використали фрагмент фотомозаїки з роздільною здатністю 7.4 м/піксел, побудованою за даними камери Terrain Camera на борту КА SELENE (фрагмент кадру TCO_MAP_02_S12E357S15E360SC). Ця камера отримувала монохроматичні стереозображення у видимому діапазоні спектру з метою глобального фотогеологічного картографування. Ударний кратер КА Рейнджер-9 розрізняється на цьому зображенні (див. рисунок 13.3 (в)). Невелика пляма з низькими значеннями колірного відношення $C(0.750/0.415 \text{ мкм})$ (показана стрілкою на рисунку 13.3 (д) надійно ототожнюється з фотометричною аномалією. На зображенні для колірного відношення $C(0.950/0.750 \text{ мкм})$ ми також спостерігаємо деяке зменшення значень, але в даному випадку ця область дифузна і захоплює як кратер, утворений КА Рейнджер-9, так і більший кратер розміром ~ 50 м на південь від кратера Рейнджер-9. Таким чином, з певною упевненістю можна говорити про зміну спектральних властивостей ґрунту в місці падіння КА Рейнджер-9; ця зміна вказує на присутність незрілого ґрунту в ударному кратері і зоні найближчих викидів.

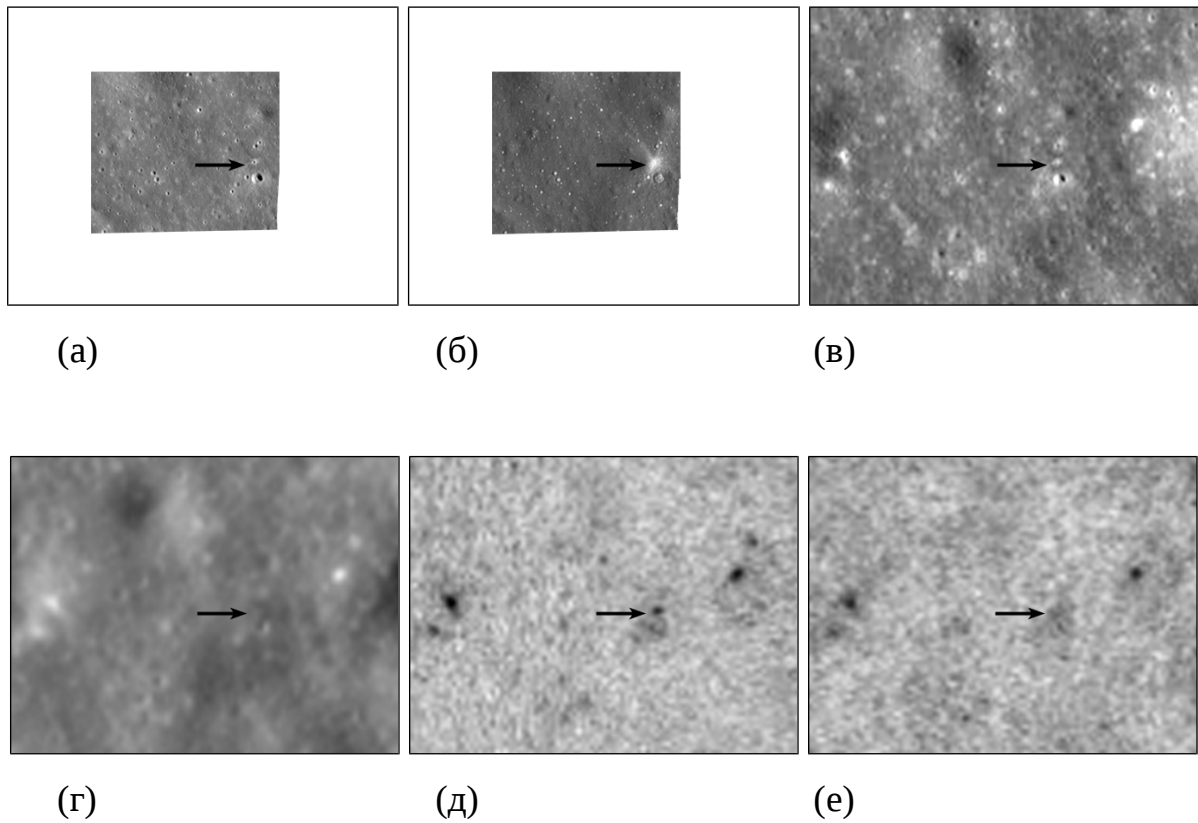


Рисунок 13.3 Порівняння фазових відношень за даними LROC NAC з колірними відношеннями за даними MI/SELENE для місця падіння КА Рейнджер-9. (а) - розподіл видимого альбедо ($\alpha = 39^\circ$) за даними LROC NAC, (б) - розподіл фазового відношення $f(39^\circ)/f(76^\circ)$ за даними LROC NAC, (в) - фрагмент фотомозаїки Селена/Terrain Camera з роздільною здатністю 7.4 м/піксел (зображення *TCO_MAP_02_S12E357S15E360SC*). Нижній ряд відповідає знімкам MI/SELENE : видима яскравість для ($\lambda = 0.750$ мкм - (г), колірне відношення $C(0.750/0.415$ мкм) - (д), колірне відношення $C(0.950/0.750$ мкм) - (е). Стрілкою показаний ударний кратер в місці падіння КА Рейнджер-9.

14 МЕТОД ФАЗОВИХ ВІДНОШЕНЬ ЯК ЗАСІБ ДЛЯ ВИВЧЕННЯ СТРУКТУРИ МІСЯЧНОЇ ПОВЕРХНІ .

14.1. Долина Шретера

Ми картографували фазове відношення для частини найбільш звивистого місячного каньйону долини Шретера [Wilhelms, 1987]. На рисунку 14.1 показано зображення відбивної здатності для західного схилу каньйону – «Голова Кобри». Ми використали невеликий фрагмент знімка M102486385LC (роздільна здатність 1.46 м/піксел, $\alpha=66^\circ$), при цьому цифрові відліки пікселів калібровані в значеннях видимого альbedo, $\mu\text{W}/\text{cm}^2\cdot\text{sr}\cdot\text{nm}$; відповідний масштаб показаний на рисунку 14.1. Схили утворення Голова Кобри (напрямок вниз за схилом відповідає напрямку справа наліво на знімку) характеризуються варіаціями яскравості. Це мереживо, можливо, є доказом схилових процесів. Уламки можуть переміщуватись схилом під дією сили тяжіння і накопичуватись коло підніжжя схилу в невеликих низинах рельєфу. Обвали та зсуви також можуть ініціювати лавини місячного пилу.

Для отримання зображення фазового відношення ми поєднали зображення, показане на Рис. 14.1 (ліворуч) із зображенням для більшого фазового кута M102479227LC (1.43 м/пікс, $\alpha=78^\circ$). Частка поєднаних зображень ($66^\circ/78^\circ$) представлена на рисунку 14.1 (праворуч). Це зображення значною мірою вільне від впливу альbedo, тому відтворює варіації нахилу фазової функції. Яскраві ділянки на фазовому відношенні, що відповідають збільшеному фазовому нахилу, - позитивні фотометричні аномалії; деякі з них вказані білими стрілками. Деякі темніші ділянки на зображенні (виключаючи ділянки темних тіней) відповідають меншому фазовому нахилу (негативні аномалії). Ці ділянки показані темними стрілками .

Ми відмічаємо, що велика частина схилу в середині зображення з виразними варіаціями яскравості не проявляється на розподілі фазового

відношення. Ми вважаємо, що області позитивних фотометричних аномалій відповідають збільшеній шорсткості поверхні, що природним чином пов'язане з накопиченням валунів, кам'яних блоків, фрагментів каменів з розмірами аж до роздільної здатності зображення (~ 1.5 м) при силових процесах. Картографування фазового відношення дозволяє розрізняти форми потоків, що рухаються вниз по схилу (порівняйте, лопатеві деталі показані білими стрілками і волокнисті об'єкти в нижній частині рисунку 14.1). Негативні фотометричні аномалії, можуть вказувати на пил, що виникає при ерозії порід при мікрометеоритному бомбардуванні і сповзанні вниз за схилом під дією гравітації. Ця пилова лавина може вирівнювати місцеву топографію, роблячи поверхню гладшою. Ми відмічаємо, що фотометричні аномалії, викликані зміною верхніх шарів реголіту, не можуть бути виявлені на розподілі яскравості (рисунок 14.1 ліворуч).

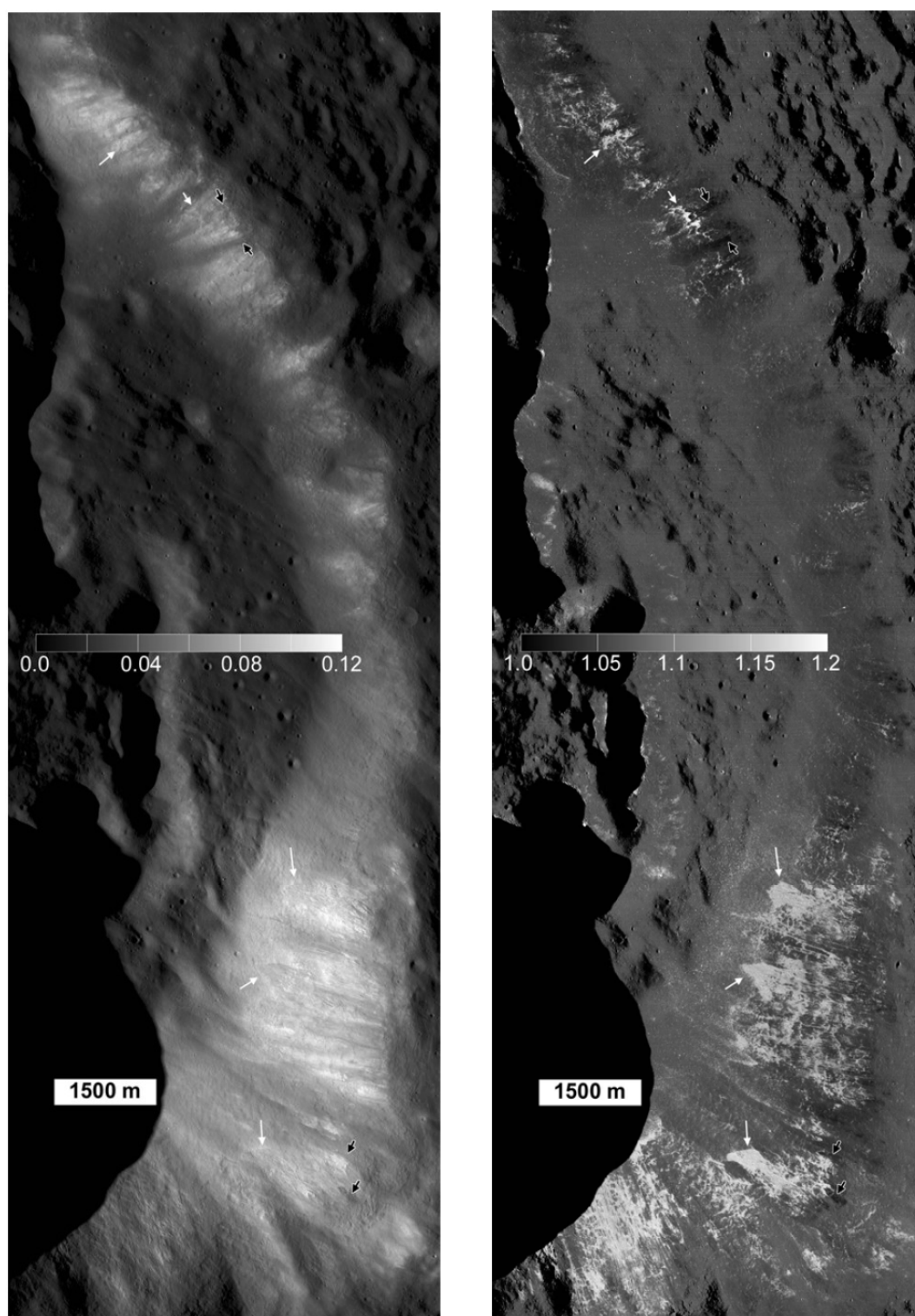


Рисунок 14.1 Ліворуч: Долина Шретера знята камерою LROC NAC. Відліки калібровані в одиницях видимого альбедо. Північ вгорі. Праворуч: Зображення фазового відношення ($66^\circ/78^\circ$) для тієї ж ділянки. Відліки наведено в одиницях відносного фазового нахилу.

14.2. Кратер Коші

Ми застосовуємо метод фазових відношень для пошуку схилових процесів в кратерах, використовуючи дані LROC NAC / LRO для кратера Коші. Ми картографували фазове відношення для північної частини валу, схилу, і днища 14-кілометрового кратера Коші (38.6° E, 9.6° N) в східній частині моря Спокою. Для отримання фазового відношення ми використали відкалібровані зображення NAC LROC, M144375369RC ($\alpha=65^\circ$) і M144368584R[L]C ($\alpha\approx 29^\circ$), отримані з просторовою роздільною здатністю 0.5 м/піксел (Robinson et al., 2010). Ми поєднали ці зображення, використовуючи метод «м'якого» суміщення [див., наприклад., Kaydash et al., 2010]. Важливо, що ці зображення мають близькі умови освітлення. Ліва частина рисунку 14.2 представляє зображення яскравості для кратера Коші; вал видно вверху зображення, дно кратера - в нижній частині. Цифрові відліки пікселів калібровані в одиницях $\mu\text{W}/\text{cm}^2\cdot\text{sr}\cdot\text{nm}$; відповідний масштаб динамічного діапазону показаний на рисунку 14.2. Варіації яскравості, видимі на знімку, - прояв альbedo, умов освітлення, і шорсткості поверхні; в той же час зображення фазового відношення (права частина рисунку 14.2) в основному проявляє шорсткість поверхні. Шорсткість головним чином формується осколками і валунами (за розміром менше роздільної здатності зображення) накопиченими в невеликих западинах, терасах, і тому подібне. Ми відмічаємо, що деталі схильних процесів чітко видно на фазовому відношенні, проте важко помітні на яскравісному зображенні. Візуальне порівняння яскравісного зображення і фазового відношення $A(65^\circ)/A(29^\circ)$ чітко показує відсутність прямої кореляції між цими двома розподілами. Тому, фазове відношення значною мірою вільне від варіацій альbedo, показуючи переважно варіації фазового нахилу. Більш темні ділянки відповідають тут крутішій фазовій функції. Ми інтерпретуємо області нижчих значень $A(65^\circ)/A(29^\circ)$ як збільшену шорсткість поверхні, що виникає внаслідок накопичення валунів, кам'яних блоків і фрагментів каменів з розмірами менше 0.5 м при схилових процесах.

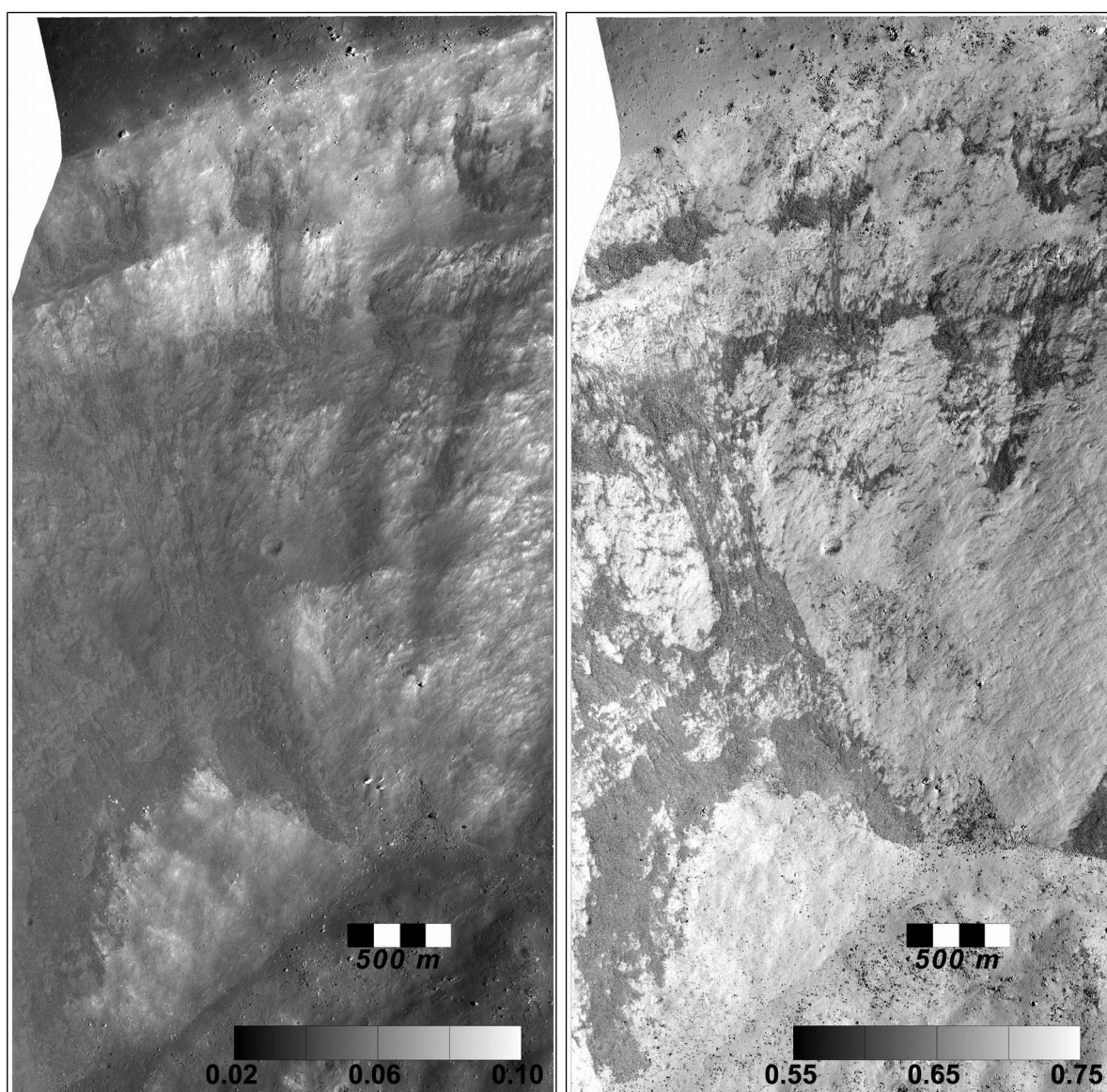


Рисунок 14.2 Ліворуч: Фрагмент зображення LROC NAC північної частини валу, схилу, і дна кратера Коші. Фазовий кут для зображення - 65° . Праворуч: Розподіл фазового відношення $A(65^\circ)/A(29^\circ)$ для тієї ж ділянки. Північ вгорі. Оригінальне розділення складає 0.5 м/пікс.

Причиною цих процесів може бути бомбардування мікрометеоритами, що ініціює зсуви і обвали на схилах кратера. Ми також ідентифікували інші об'єкти з високою шорсткістю на зображенні фазового відношення (наприклад, лопатеві потоки і струмені в похилих западинах). У багатьох випадків деталі, видимі на обох зображеннях, показують різну форму. Для оцінки відносного віку цих потоків, ми оцінили ступінь зрілості їх реголіту.

Таким чином, нами досліджені схиліві процеси в місячних кратерах (Джордано Бруно, Кеплер, Коші, долина Шретера). Варіації шорсткості реголіту Місяця найчастіше асоціюються із оновленням верхнього шару реголіту за рахунок таких схилових процесів, як зсуви ґрунту в районах із значною топографією (схили, вали, ближні зони викидів кратерів, тектонічні розломи, та ін.). За допомогою нашого аналізу ви маємо можливість дистанційної ідентифікації місць осипів ґрунту та ударного розтопу (Kaydash et al., 2014a).

Глобальний огляд спектрофотометрії, проведений за допомогою камери Multiband Imager (MI) на борту КА SELENE дозволив отримати зображення в декількох спектральних каналах з просторовим розділенням 20 м/піксел [Ohtake et al. 2010]. Ми використали зображення MI/SELENE для побудови розподілу показника кольору $C(0.95/0.75 \mu m)$, який є характеристикою глибини смуги поглинання з центром поблизу 1 мкм в місячних мінералах. Ступінь зрілості місячної поверхні може бути оцінений за допомогою цього спектрального відношення, так як незрілий реголіт характеризується більш низькими значеннями $C(0.95/0.75 \mu m)$ [Lucey et al., 200b, Pieters C. et al. 2006]. Рисунок 14.3 наводить розподіл показника кольору за даними MI/SELENE для кратера Коші, $\alpha = 15^\circ$. Обведена контуром частина зображення відповідає рисунку 14.2.

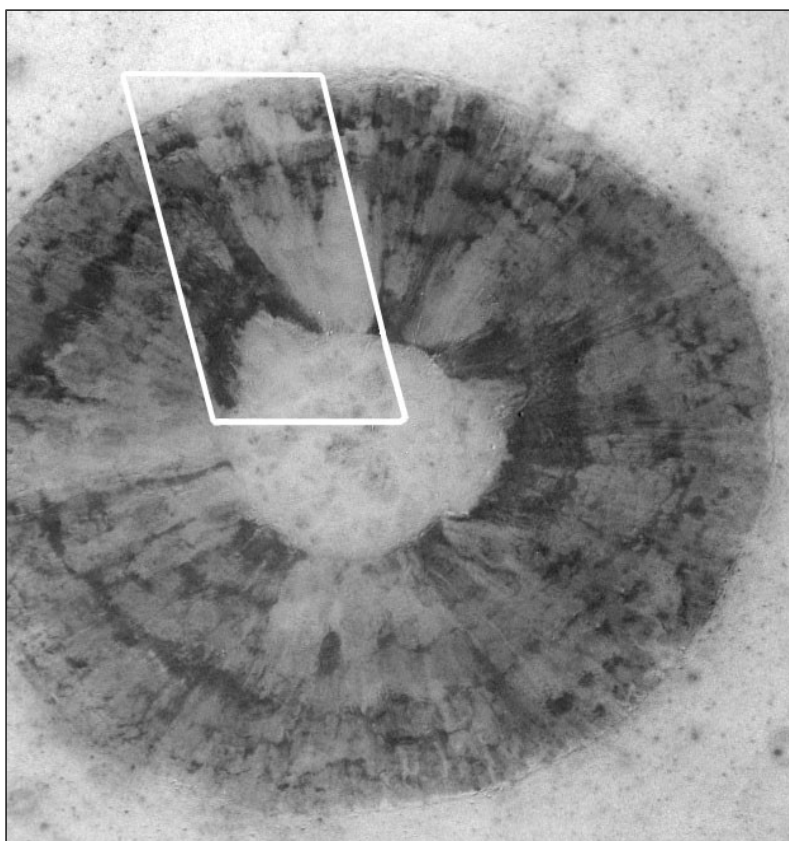
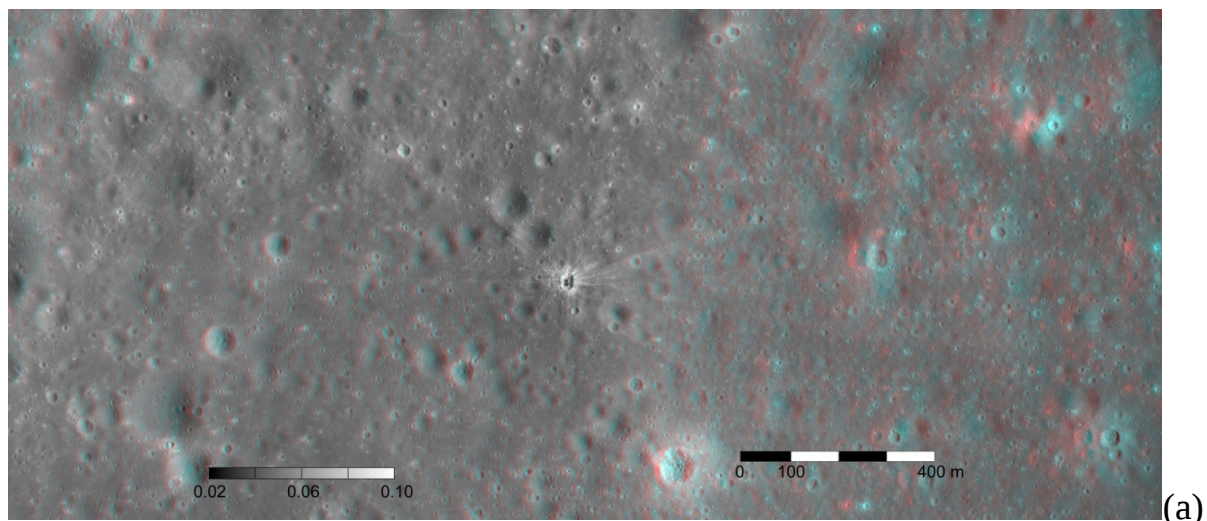


Рисунок 14.3 Спектральне відношення $C(0.95/0.75 \text{ мкм})$ для кратера Коші за даними MI/SELENE; фазовий кут 15° . Темніший тон відповідає нижчим значенням спектрального відношення. Обведена ділянка відповідає ділянці показаному на рисунку 14.1. Роздільна здатність складає 20 м/піксел.

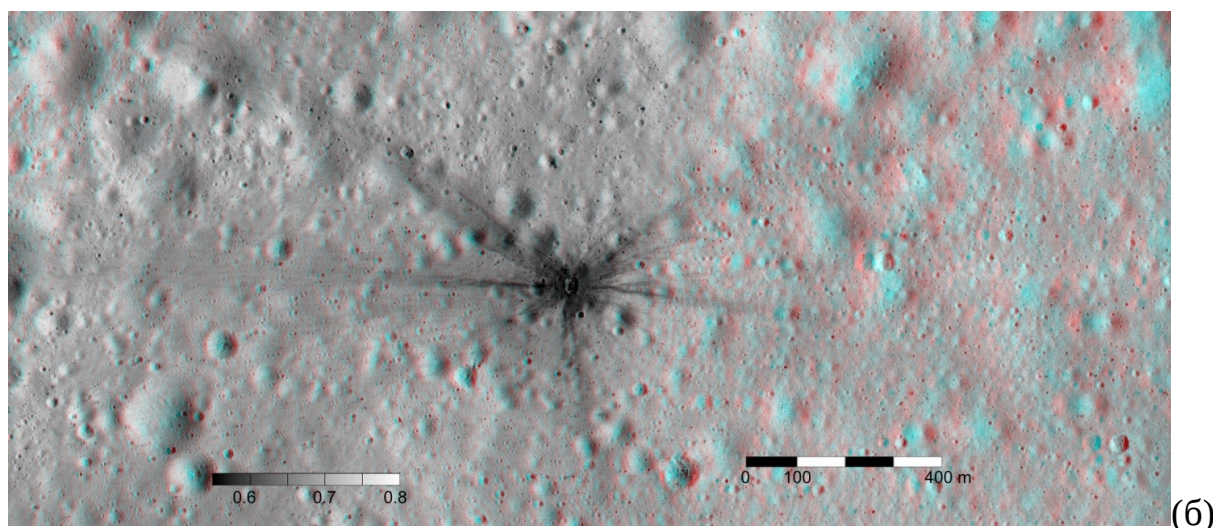
Порівняння фазового відношення і показника кольору виявляє хороший збіг ділянок підвищеної шорсткості з ділянками низьких значень $C(0.95/0.75 \text{ мкм})$. Таким чином, схилів процеси в кратерах, що призводять до зміни їх поверхні, оголяють незрілий реголіт.

Нами були проаналізовані сучасні гіпотези походження місячних кратерів із темними променевими системами та гало, а саме: гіпотеза відкладення ударного розтопу, гіпотеза наявності темних склоподібних матеріалів у зоні викидів кратерів, та вплив так званих криптоморів Місяця. Запропонований альтернативний механізм походження темних гало та променів за рахунок

різниці у фазових залежностях яскравості гало (променів) та навколишньої поверхні. Для перевірки цього механізму відібрані та оброблені зображення високої роздільної здатності у базі LROC NAC для штучних молодих ударних кратерів, що утворені прискорювачами Saturn IVB в ході місій КА Apollo (Рис. 14.4.).



(а)



(б)

Рисунок 14.4. Анагліфічні зображення штучного ударного кратеру, утвореного падінням прискорювача Apollo 13 Saturn IVB: (а) Видиме альbedo, (б) Фазове відношення. Темний тон в (б) відповідає більш шорсткій поверхні. Фазове відношення виявляє деталі променевої структури, що ледве видимі в зображеннях яскравості.

Побудовані відповідні фазові відношення, що характеризують нахил

фазової функції, та знайдений ефект інверсії променів у порівнянні з навколишньою поверхнею. Метод фазових відношень застосований до зображень молодих місячних кратерів природнього походження, що виявляють темні гало при спостереженні на великих фазових кутах. Порівняно особливості фазових відношень, пов'язаних із локальними варіаціями шорсткості у зонах викидів природніх кратерів, із аналогічним збуреннями місячного реголіту у штучних кратерах. Зроблено оцінку кривини фазової функції із застосуванням зображень LROC NAC, отриманих у трьох діапазонах фазових кутів. Проінтерпретовані особливості розподілу кривини фазової функції як збільшення шорсткості у зоні найближчих викидів із кратеру, що робить фазову функцію крутіше в діапазоні великих фазових кутів.

Нами запропоновано механізм, що може призводити до появи темних променів (гало) навколо молодих кратерів. Механізм заснований на різниці фазових залежностей яскравості ореолів (променів) і їх навколишніх поверхонь. Тобто, для малих кутів фаз ореоли можуть бути яскравіші, ніж їх оточення; навпаки, у більшій фазі спостерігається інверсія (див. Рисунок 14.4.). Ефект інверсії є результатом впливу шорсткості поверхні, тому що у зоні викидів (ореоли та промені) поверхня повинна бути більш шорсткою ніж у навколишніх ділянках.

15 ВИЯВЛЕННЯ ТА ІНТЕРПРЕТАЦІЯ АНОМАЛІЙ СТРУКТУРИ І СКЛАДУ ПОВЕРХНІ МІСЯЦЯ ОПТИЧНИМИ МЕТОДАМИ

15.1 Аномалії фотометричної функції місячної поверхні природнього походження

У цьому розділі будуть розглянуті всі приклади використання методу фазових відношень стосовно ряду молодих кратерів, що мають круті схили. Одним з важливих результатів є те, що потоки на внутрішніх стінках кратерів,

які раніше вважалися розплавом, швидше за все, є порівняно свіжими осипами цих стінок.

Для ідентифікації та аналізу природніх змін оптичних властивостей місячної поверхні ми використовуємо дані вузькокутової камери LROC NAC KA LRO (див. розділ 1.4). На даний момент є величезний масив NAC зображень (всього $\sim 1,180,000$ станом на 16 вересня 2015), отриманих для деяких ділянок при різних умовах освітлення і спостереження, тобто при різних фазових кутах α (<http://lroc.sese.asu.edu/posts/879>). Серед цього масиву зображень нами були обрані такі, які отримані для одних і тих же ділянок при різних фазових кутах α_1 і α_2 , але близьких кутах висвітлення і азимутальних кутах сонячних променів. Близькість цих кутів для компонент фазового відношення дає можливість послабити вплив того рельєфу поверхні, який розділяється на знімках. Провідним чинником у формуванні нахилу фазової кривої яскравості є тіньовий ефект, який створюється реголітовими частинками [Нарке, 1993, Shkuratov et al., 2011] з розміром близько 100 мкм. Відношення $B(\alpha_1)/B(\alpha_2)$ залежить не тільки від тіньового ефекту; воно також залежить від внеску багаторазово розсіяного світла, яке засвічує тіні, що створені частинками, послаблюючи тим самим тіньовий ефект; це призводить до того, що між відношенням $B(\alpha_2)/B(\alpha_1)$, де $\alpha_2 > \alpha_1$, і альbedo поверхні часто спостерігається пряма кореляція [Kaydash et al., 2009, Shkuratov et al., 2010]. Істотні відхилення від цієї кореляції ми називаємо аномаліями. Зокрема, якщо для деякої світлої ділянки поверхні значення відношення $B(\alpha_2)/B(\alpha_1)$ помітно більше того, що передбачає рівняння регресії зазначеної кореляції, то ми це називаємо негативною аномалією; в іншому випадку, можна говорити про позитивну аномалію.

Для того щоб отримати придатні для аналізу розподіли (карти) фазових відношень, зображення компонент повинні бути ретельно суміщені на рівні частинок пікселя. Для суміщення ми застосовували алгоритм суміщення в ковзному вікні за критерієм максимуму коефіцієнта кореляції «rubber-sheet

geometric transformation» з формальною точністю суміщення 1/10 пікселя [Kaydash et al., 2009].

15.1.1 Молоді кратери кілометрових розмірів

Кратери кілометрових розмірів зазвичай мають глибину близько 100 метрів. Це означає, що при їх формуванні був пробитий не тільки шар реголіту, але й, можливо, більш глибокий шар мегареголіту. У ударному процесі такого масштабу витягуються фрагменти скельних підстилаючих порід.

Дослідження методом фазових відношень місячного кратера діаметром 2 км, який знаходиться на валу старого кратера Römer R, на південний схід від кратера LeMonnier, з координатами 24.4° N, 33.9° E було виконано з використанням зображень, дані про які представлені в табл. 15.1. Знімок кратера (стрілка), зроблений камерою КК Аполлон-15 в 1971 р. з висоти 107 км при куті освітлення 39° , показаний на рис. 15.1 (http://wms.lroc.asu.edu/apollo/view?image_name=AS15-M-0392). Зображення, охарактеризовані в табл. 15.1, були використані для побудови мозаїки для кожного з двох фазових кутів.

Таблиця 15.1 Знімки LRO NAC, використані для дослідження безіменного кратера, розташованого між кратерами Römer M і Littrov D (див. рис. 4.4)

Номер кадру	M142048270R	M142048270L	M142041488R	M142041488L
Простор. розд., м/пікс	0.51	0.51	0.50	0.50
Кут спостереження, град	19.17	22.01	16.87	14.03
Кут падіння, град	30.94	30.9	31.43	31.39
Фазовий кут, град.	44.66	46.84	25.0	25.37

Мозаїка зображень видимого альбедо для кута фази 25° і зображення фазового відношення $B(46^{\circ})/B(25^{\circ})$ представлені на рис. 15.2а і 15.2б,

відповідно. Як видно, варіації фазового відношення досить значні і впевнено детектуються.

Ми також досліджували методом фазових відношень інший молодий кратер, який знаходиться всередині великого старого кратера Hertzprung S. Координати кратера – 0.78°N , 132.94°W , а діаметр – 700 м. На рис. 15.3. представлений пояснювальний знімок цього кратера (стрілка) на мозаїці, складеній із зображень, що отримані ширококутовою камерою LROC WAC. Об'єкт розташований на внутрішній частині вала старого кратера Hertzprung S (див. <http://target.lroc.asu.edu/q3/#>). Рисунок 15.4 представляє зображення видимого альбедо для кута фази 56° - (а) і зображення фазового відношення $B(72^{\circ})/B(56^{\circ})$ - (б). Для побудови фазового відношення використані знімки високої роздільної здатності камери LROC NAC, описані в табл. 15.2.

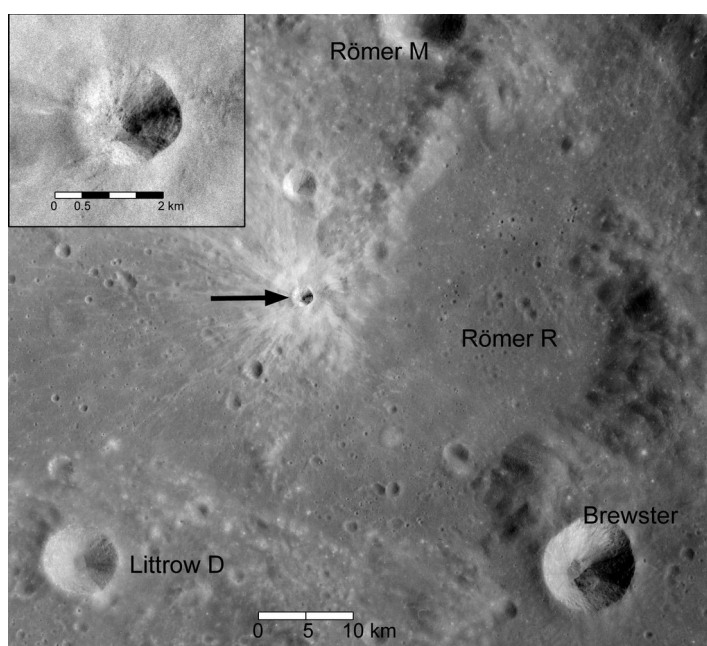
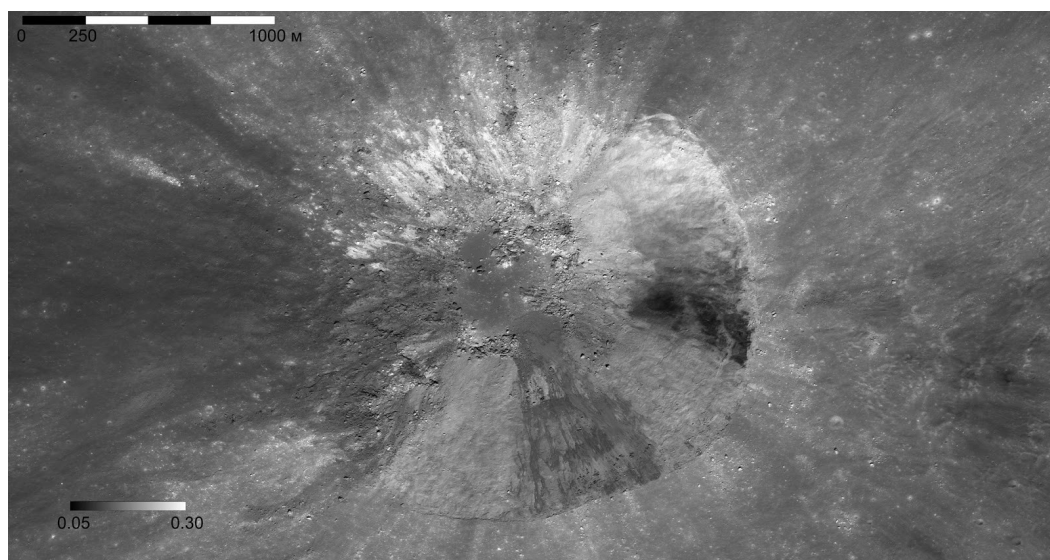


Рисунок 15.1 Зображення AS15-M-0392 досліджуваного молодого кратера (вказано стрілкою), зроблене камерою КК Аполлон-15 в 1971 р. з висоти 107 км при куті фази 39° .

Таблиця 15.2 Знімки LRO NAC Місяця, використані для дослідження безіменного кратера, розташованого в кратері Hertzprung S (див. рис. 15.4)

Номер кадру	M191466684L	M191480983L	M191473833L
Простор. розд., м/пікс	1.18	1.203	1.145
Кут спостереження, град	15.58	19.22	1.75
Кут падіння, град	54.99	52.92	53.97
Фазовий кут, град.	39.4	72.13	55.72

Перший і другий описані кратери, (див. відповідно, рис. 15.2 і 15.4) сильно відрізняються один від одного. Другий кратер має більш розвинену променеву систему, хоча й в околиці першого кратера простежуються порівняно слабкі промені. У фазовому відношенні менший кратер має дуже контрастну структуру променів. Темніші частини променів на рис. 15.4б являють собою зони, в яких викиди створюють сильну шорсткість. Як і слід було очікувати, ці зони розташовані ближче до центру кратера. Світлі частини променів виділяються на рис. 15.4б, або тому, що в їх світлому матеріалі багаторазове розсіювання помітно нівелює тіньовий ефект, або тому, що це зони викиду дрібнодисперсного матеріалу, який вирівнює шорсткість незайманою поверхні, що теж зменшує тіньовий ефект.



(a)

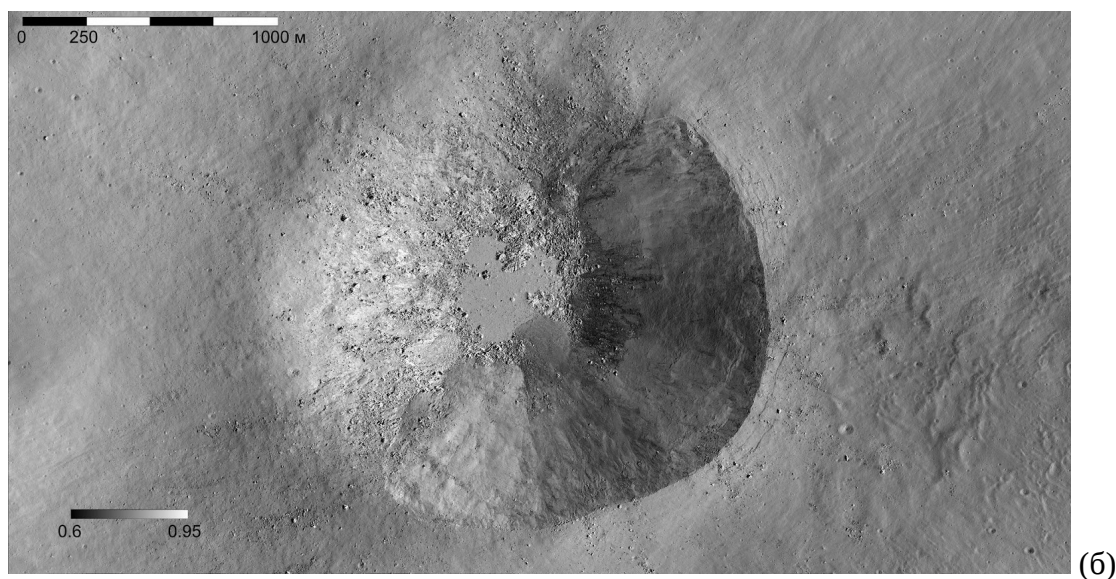


Рисунок 15.2. Мозаїка зображень LROC NAC видимого альбедо для кута фази 25° – (а), та зображення фазового відношення $B(46^\circ)/B(25^\circ)$ – (б).

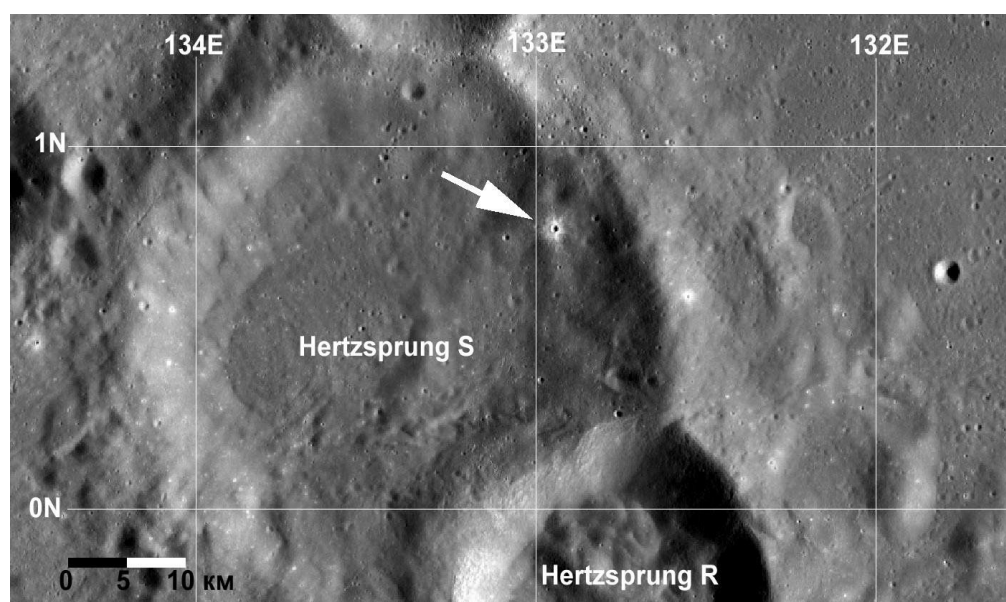
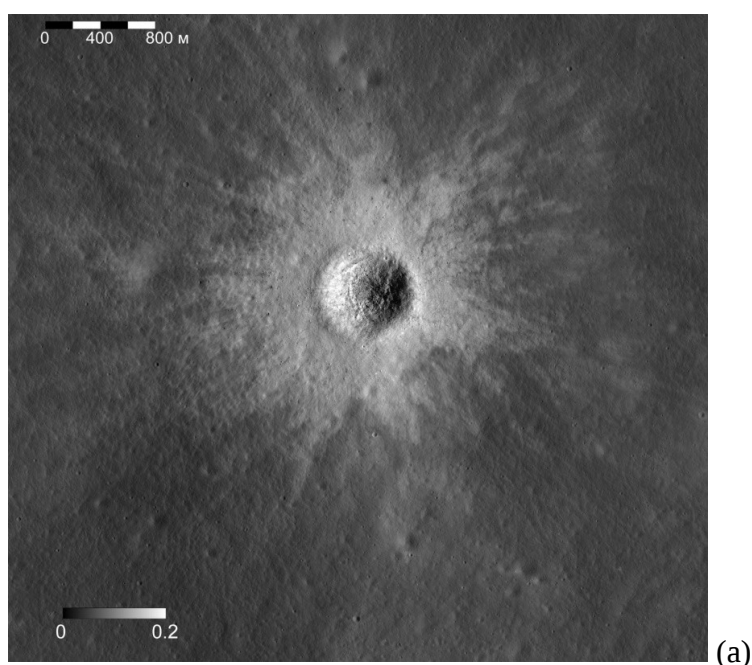


Рисунок 15.3 Зображення молодого кратера (стрілка) на мозаїці ширококутної камери LROC WAC. Цей кратер розташований на внутрішній частині вала більшого кратера Hertzprung S (<http://target.lroc.asu.edu/q3/#>)

У більшого кратера (рис. 15.4а) спостерігається потужний односторонній викид вліво темної речовини, однак він практично не виділяється в фазовому відношенні, тобто в шорсткості. Можна припустити, що структура поверхні

викиду встигла уніфікуватися, а значить вона помітно старше ділянок, видимих на внутрішньому схилі цього кратера. Слід особливо підкреслити, що рисунок цих утворень в яскравості і шорсткості помітно різниться. Це означає, що там є схиліві рухи і хімічно (розплав), і структурно (осип) різний матеріал. Аналогічні особливості спостерігалися при дослідженні великого молодого кратера Джордано Бруно [148]. Потоки сипучого матеріалу перекривають потоки застиглого розплаву; це особливо помітно на південній частині внутрішнього валу. Відзначимо незвично плоске дно кратера, на якому накидані камені (рис. 15.4а).



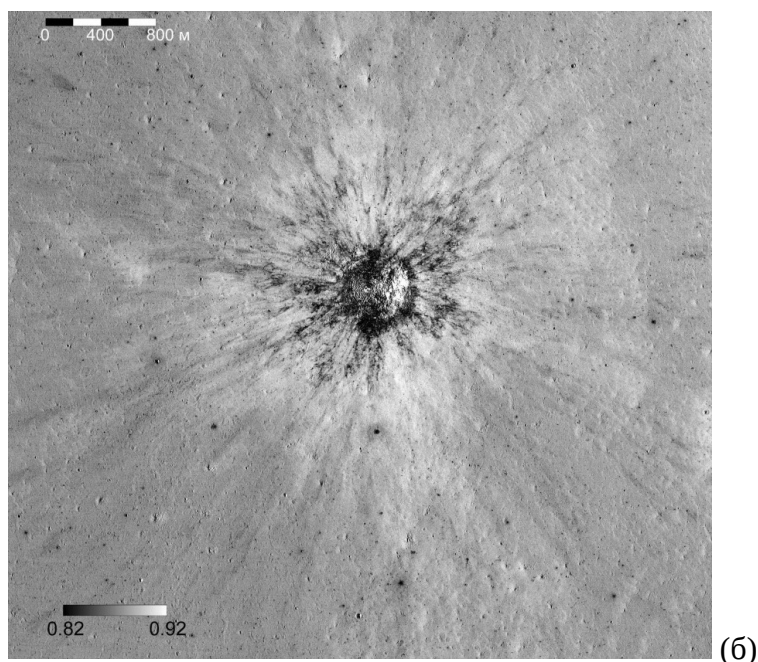


Рисунок 15.4 Зображення видимого альбедо для кута фази 56° – (а). Зображення фазового відношення – (б).

15.1.2 Кратер Hall J

Цей кратер має діаметр 7.6 км і знаходиться в Озері Сновидінь (Lacus Somniorum) (див. рис. 15.5). Координати кратера 35.47° N, 36.90° E. Для побудови фазового відношення використані знімки високої роздільної здатності камери LROC NAC (табл. 153.) Рисунок 15.5 являє собою контекстне зображення околиць кратера Hall J на мозаїці зображень камери LROC WAC (<http://target.lroc.asu.edu/q3/#>). Рисунок 15.6а показує зображення видимого альбедо для кута фази 55° , яке охоплює північну сторону валу всередині кратера. Розподіл фазового відношення $B(82^\circ)/B(55^\circ)$ для тієї ж ділянки наведено на рис. 15.6б. Знову ми бачимо схиловий візерунок, створений потоками розплаву і осипами. Однак, на відміну від попереднього випадку (рис. 15.4а і 15.4б), тут спостерігається непогана кореляція малюнків схилів, видимих в яскравості і шорсткості. Це, ймовірно, пов'язано з тим, що кратер Hall J старіший кратера, показаного на рис. 15.4. У кратера Hall J потоки застиглого

розплаву, можливо, вже перекриті осипами. На днище кратера (тут воно не показано) видно безліч каменів і великих уламків, що перемістилися по схилу під дією сили тяжіння. Вони накопичуються не тільки біля підніжжя схилу, але і в локальних зниженнях рельєфу на схилах. Обвали і зсуви можуть ініціювати лавини місячного пилу. Підвищену шорсткість створюють камені розміром нижче роздільності знімків; в даному випадку < 1 м.

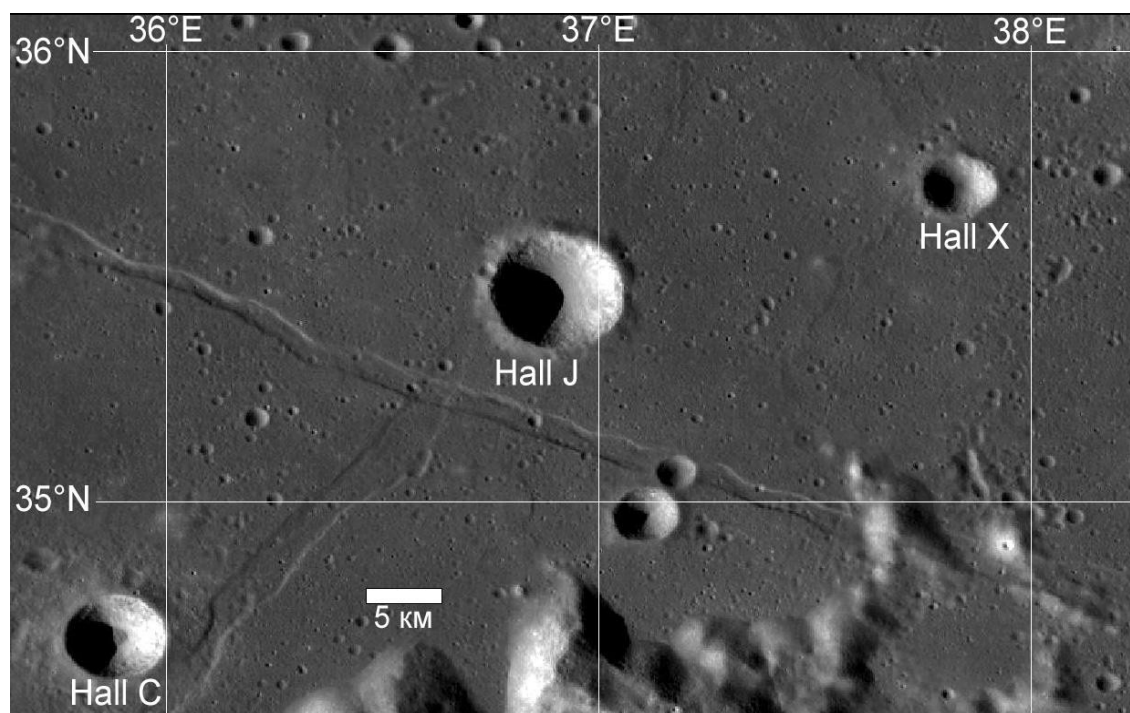


Рисунок 15.5 Зображення околиць кратера Hall J на мозаїці зображень камери LROC WAC (<http://target.lroc.asu.edu/q3/#>)

Таблиця 15.3 Знімки LRO NAC, використані для дослідження кратера Hall J (рис. 3.5)

Номер кадру	M144388465LC	M144388465RC	M144381680RC
Простор. розд., м/пікс	0.55	0.54	0.47
Кут спостереження, град	32.45	29.6	1.16
Кут падіння, град	55.11	55.18	55.8
Фазовий кут, град.	83.89	81.44	54.85

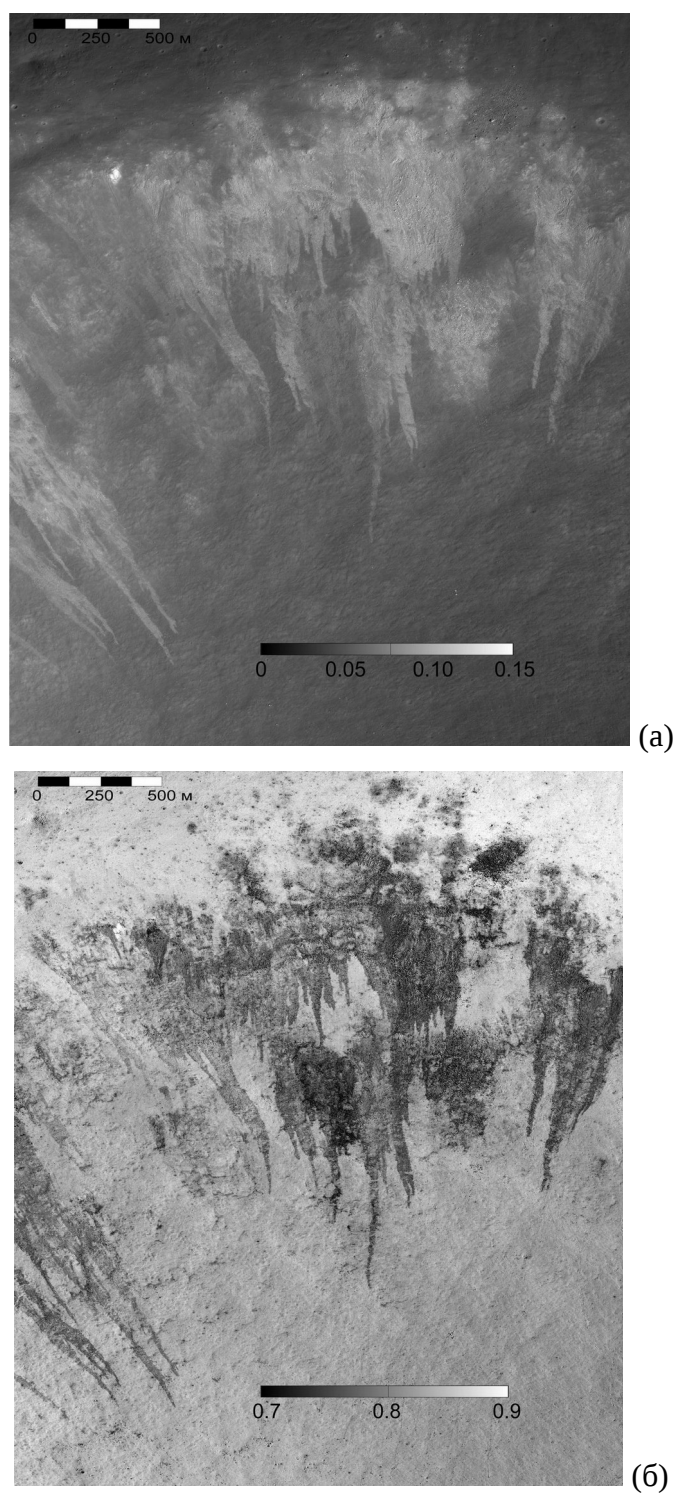


Рисунок 15.6 Зображення видимого альбедо кратера Hall J при куті фази 55° – (а). Зображення фазового відношення $B(82^\circ)/B(55^\circ)$ – (б).

15.1.3 Кратер Sensorinus

У повний Місяць кратер Sensorinus (Цензорін) є одним з найяскравіших кратерів видимої сторони Місяця. Він знаходиться в північній частині материка, що розташована на південь від Моря Спокою; його діаметр 4.1 км, а координати 0.417°S , 32.691°E . Зображення околиць кратера Sensorinus на мозаїці зображень, що отримані камерою LROC WAC (<http://target.lroc.asu.edu/q3/#>), представлено на рис. 15.7. Цей кратер молодший, ніж кратер Hall J; в його викидах міститься світла материкова речовина. Для побудови фазового відношення для цього району були обрані знімки LROC NAC, інформація про які наведена у табл. 15.4. Рисунок 15.8а представляє зображення кратера Sensorinus при фазовому куті 70° . Просторова роздільність зображення – 0.5 м/пікс. Кратер виглядає дещо несиметричним, що пов'язано з ракурсом зйомки камерою LROC NAC. Фазове відношення $B(70^{\circ})/B(27^{\circ})$ наведено на рис. 15.8б. Як впливає з табл. 15.4 кути падіння і відбиття сонячних променів близькі у компонентних зображеннях фазової пари. Таким чином, різниця в фазовому куті у великій мірі забезпечується різницею азимутів падаючих променів. Тому на зображенні фазового $B(70^{\circ})/B(27^{\circ})$ помітно вплив рельєфу поверхні, який розділяється камерою.

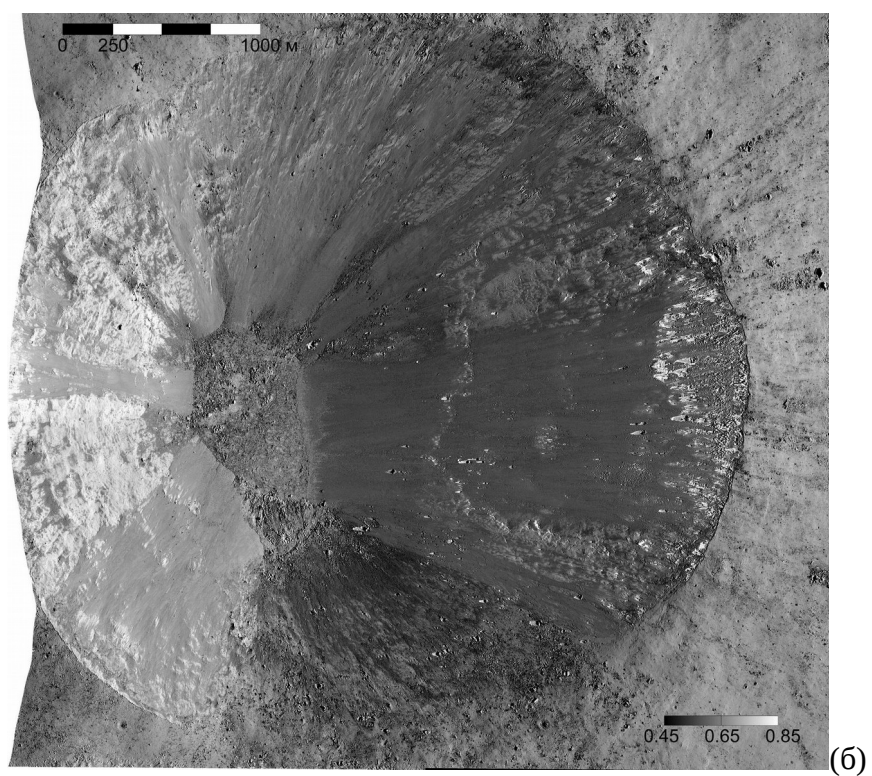
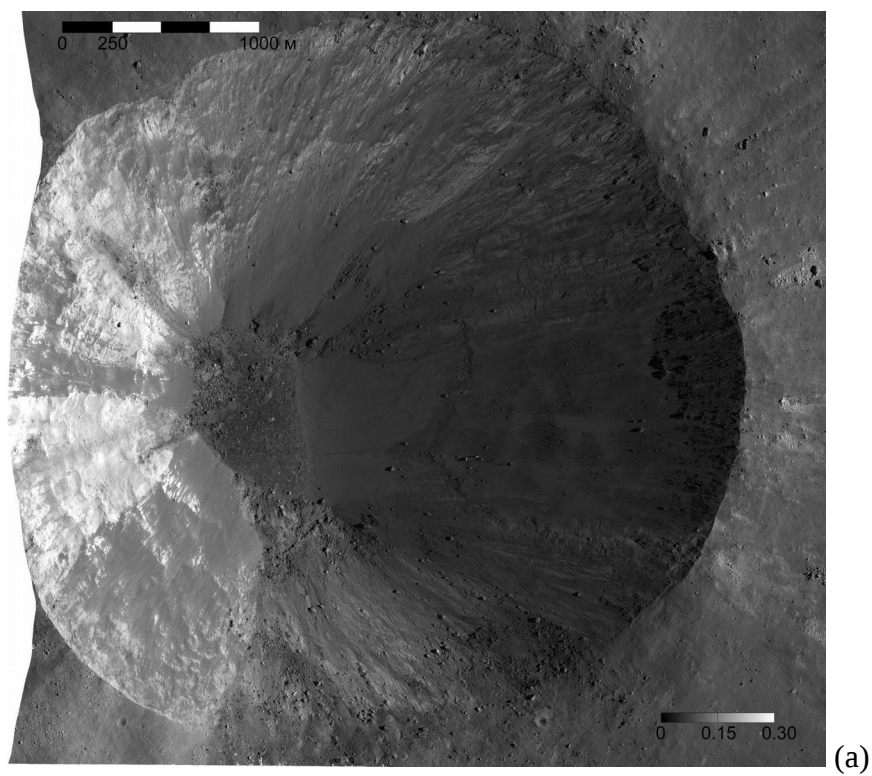


Рисунок 15.8 Фрагмент зображення LROC NAC кратера Sensorinus. Фазовий кут для зображення становить 70° . Просторове розділення – 0.5 м/пікс.

Таблиця 15.4 Дані знімків, використаних для дослідження кратера Sensorinus

Номер кадру	M159732131R	M159732131L	M159738917R	M159738917L
Простор. розд., м/пікс	0.49	0.49	0.50	0.51
Кут спостереження, град	21.34	18.51	22.54	25.38
Кут падіння, град	46.77	46.7	45.86	45.78
Фазовий кут, град.	25.44	28.21	68.38	71.15

Послабити вплив топографії місцевості на розподіл фазового відношення дає можливість наступний прийом. Будується кореляційна діаграма «видиме альbedo – фазовий нахил» (в даному випадку «альbedo (70°) – фазовий нахил B(70°)/B(27°). Потім, по діаграмі знаходиться рівняння регресії. Великою мірою кореляція створюється тим, що яскравість і фазовий нахил схожим чином залежать від топографії. Тому має сенс картографувати параметр, що характеризує відхилення від лінії центральної регресії. Для кратера Sensorinus кореляційна діаграма «видиме альbedo B(70°) – фазове відношення B(70°)/B(27°)» показана на рис. 15.9.

На діаграмі видно пряму кореляцію між зазначеними величинами. У першому наближенні вона описується наступним рівнянням регресії: $B(70^\circ)/B(27^\circ) = 1.468 B(70^\circ) + 0.482$ (суцільна сіра лінія), з коефіцієнтом кореляції 0.72. Діаграма побудована за всіма $\sim 3.5 \cdot 10^7$ пікселями зображень, наведених на рис.15.8а і 15.8б. Більш темний тон на діаграмі відповідає більшій частоті зустрічальності даної комбінації параметрів «фазове відношення – видиме альbedo». Параметр δ характеризує віддаленість точок від лінії регресії (чорна лінія, перпендикулярна лінії регресії):

$$\delta = [B(70^\circ)/B(27^\circ) - K_1 B(70^\circ) - K_2]/(K_1^2 + 1)^{1/2},$$

де $K_1 = 1.468$, а $K_2 = 0.482$.

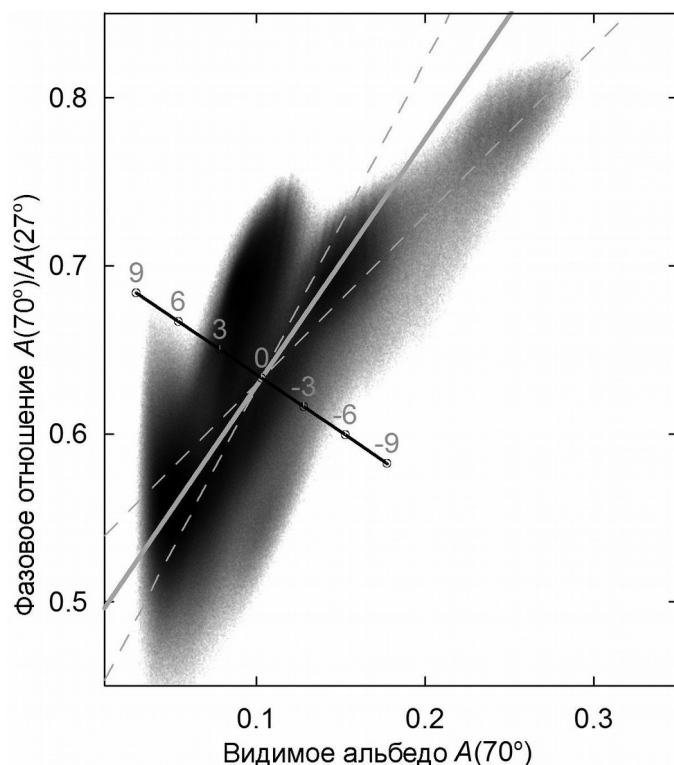


Рисунок 15.9 Діаграма «видиме альbedo (70°) – фазовий нахил $B(70^\circ)/B(27^\circ)$ » для кратера Censorinus.

Рисунок 15.10 представляє зображення, що передає розподіл параметра δ для кратера Censorinus. Шкала показує діапазон варіацій δ . Як видно, це зображення помітно відрізняється від зображень, що показані на рис. 15.8; це говорить про те, що ефект топографії тут значно знівельований. Ми інтерпретуємо позитивні значення δ на рис. 15.10 як збільшену шорсткість поверхні, яка виникає внаслідок накопичення валунів, кам'яних блоків і фрагментів каменів з розмірами менше 0.5 м при схилових процесах. Відзначимо, що сліди схилових процесів чітко видно на розподілі параметра δ , проте важко помітити на зображенні яскравості. Причиною цих процесів може бути бомбардування невеликими метеороїдними тілами, що ініціює зсуви та обвали на крутих схилах кратера.

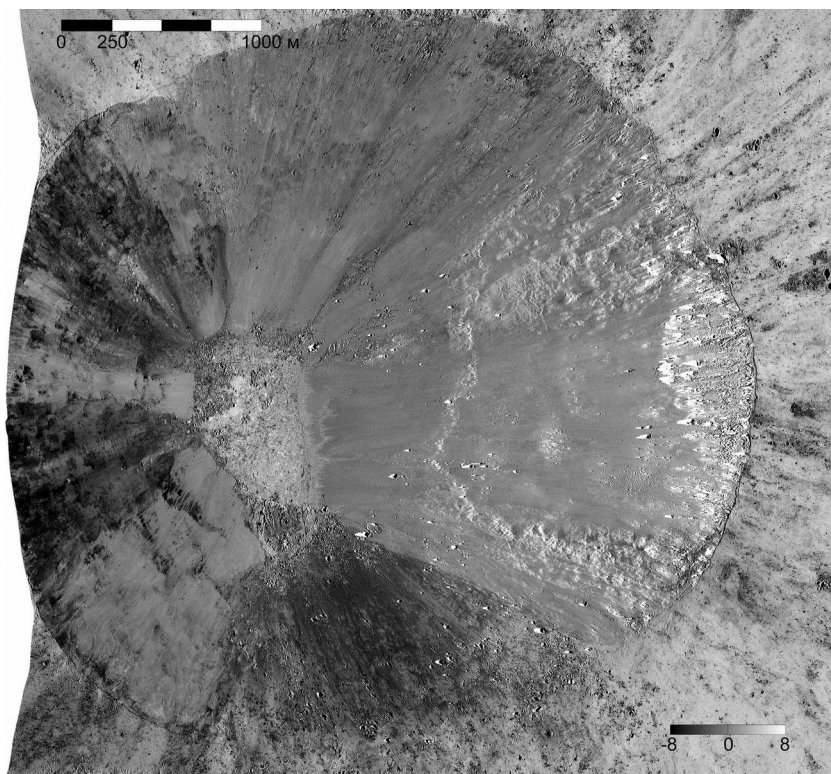


Рисунок 3.10 Зображення, що передає розподіл параметра δ для кратера Sensorinus. Шкала показує діапазон варіацій δ .

Таким чином, ми продемонстрували можливості дослідження схилових процесів в місячних кратерах методом фазових відношень. Варіації шорсткості реголіту Місяця найчастіше асоціюються з оновленням верхнього шару реголіту за рахунок таких схилових процесів, як зсуви в районах, в яких є круті схили.

15.2 Нова фотометрична інтерпретація темних гало та променевих систем місячних кратерів

15.2.1 Вступ

Останні ударні події на видимій півкулі Місяця виявлені за допомогою кількох місячних моніторингових програм пошуку спалахів, що викликані метеорними тілами. Серед цих програм є як аматорські так і професійні огляди [Madiedo et al., 2014, Perna et al., 2013, Suggs et al., 2014]. Для реєстрації та дослідження таких спалахів використовуються наземні телескопи малих

розмірів, які оснащені чутливими відеокамерами. Програма місячного моніторингу ударів НАСА дозволила виявити спалахи за допомогою устаткування Центру космічних польотів ім. Маршала (Marshall Space Flight Center) [Suggs et al., 2014]. Програма відео моніторингу попелястої частини Місяця MSFC дозволила зареєструвати більше 300 місячних ударних подій з моменту початку досліджень в 2006 р. [179]. Проект, що отримав назву MIDAS (Система виявлення та аналізу ударів на Місяці – Moon Impacts Detection and Analysis System), працює з 2009 року з тією ж метою – реєстрації ударних спалахів [Madiedo et al., 2014]. Найяскравіший спалах було зареєстровано апаратурою MSFC 17 березня 2013 (наприклад, [163]). Автори [Madiedo et al., 2014] припустили, що швидкість ударника 17 березня 2013 р. була 25,6 км/с, а маса ударника – 16 кг, а діаметр кратера був 18.8 м.

Таким чином, сотні нових кратерів розміром у кілька десятків метрів можуть бути ідентифіковані за зображеннями, що отримані вузькокутовою камерою (NAC) під час місії LRO (Lunar Reconnaissance Orbiter) НАСА, які мають просторову роздільну здатність 0.5 м з 50-км орбіти [Robinson et al., 2010]. Вивчення дуже свіжих місячних кратерів важливо, оскільки ступінь їх деградації є мінімальним, і, отже, первинна шорсткість викинутої породи дуже тонких відкладень, наприклад, в результаті ударного метаморфізму кратера речовин може бути досліджена. LROC NAC зображення таких кратерів дають можливість провести експертизу структури надр Місяця, так як відстань від викинутого матеріалу корелює з його глибиною до удару (наприклад, [Melosh, 1989]).

Ми тут розглянемо новий місячний кратер за даними зображень LROC NAC, що отримані до і після удару 17 березня 2013 року. В наших дослідженнях було використано методика фазових відношень, що запропонована в [Shkuratov et al., 2011]. Всі зміни в шорсткості поверхні, які можуть бути виявлені за допомогою оптичних методів ми називаємо оптичною шорсткістю. Відмінності фотометричних властивостей при різних фазових

кутах (фазових відношень) і до, і після ударної події (залежність від часу) припускає унікальну можливість для вивчення зміни шорсткості поверхні. Дуже важливо, що зображення в кожній парі повинні бути отримані в максимально наближених умовах освітлення / спостереження.

15.2.2 Дані та їх обробка

Отримання фазових відношень та відношень, залежних від часу, вимагає попередньої обробки та уніфікації вихідних зображень. Наприклад, для залежних від часу відношень дуже бажано використовувати компоненти з тими ж умовами освітлення / спостереження. Що стосується фазових відношень, то компоненти неминуче відрізняються фотометрично через фазовий кут α . Тим не менше, найбільш надійні результати можуть бути отримані, якщо різниця в α обумовлена тільки кутом огляду при рівних азимутальних кутах та кутах падіння; у цьому випадку спостерігається виключно паралактичне спотворення, і ці спотворення можуть бути компенсовані застосуванням алгоритму "гумового листа" [Kaydash et al., 2009].

Залежність видимого альбедо від α характеризується фазовою функцією $f(\alpha)$. Її нахил регулюється, в основному, тіньовим ефектом, який збільшується зі збільшенням шорсткості поверхні (наприклад, [Shkuratov et al., 2011, Napke, 1993]). Ефект альбедо, хоча некогерентне багаторазове розсіяння також має місце, зменшує нахил $f(\alpha)$. Області викидів молодих кратерів можуть мати поверхню, яка грубіше, ніж в околицях, а ореоли і зони променів кратерів є зонами порушень поверхонь. Таким чином, методика фазових відношень дуже підходить в якості інструменту для оцінки оптичної шорсткості.

На місячній ділянці, де 17 березня 2013 року стався найяскравіший спалах, був знайдений новий кратер (20.7135°N, 335.6698°W) діаметром 18.8 м (Robinson et al., 2015). Є декілька відповідних зображень, отриманих за допомогою LROC NAC до удару, що робить можливими фотометричні дослідження нового кратеру і його системи променів. У таблиці 3.5 наведені всі

зображення, які ми використовували для залежних від часу та кута фази зображень у цій роботі. Ми обробили вибрані зображення NAC шляхом перетворення вихідних даних у фактор яскравості (наприклад, [Harke, 1993]), для чого зробили селенографічну прив'язку та розрахунок фотометричних кутів для кожного пікселя в кадрах. Для цього ми використовуємо програмне забезпечення ISIS (isis.astrogeology.usgs.gov) з останніми ядрами SPICE (naif.jpl.nasa.gov/pub/naif/pds/data/lro-l-spice-6-v1.0/lrosp_1000).

Для отримання фазової функції ми провели суміщення двох відповідних зображень з субпіксельною точністю і отримали фазове відношення зображень шляхом ділення їх відповідних пікселів ([Kaydash, Shkuraov, 2012]). Кожен з кадрів, що використовувався для вивчення залежності від часу був приведений до стандартних фотометричних умов з поділом на функцію Ломмеля-Зеєлігера: $\cos i / (\cos e + \cos i)$, де i та e – кут падіння та кут спостереження, відповідно. Хоча ця функція – не найкраща для фотометричних поправок ([Shkuratov et al., 2011]), але вона дуже проста і добре працює при малих варіаціях i та e . Всі кадри відображаються в загальній картографічній проекції з ефективною просторовою роздільністю 1 м/пікс.

Таблиця 3.5 Місцеположення зображень LROC NAC з новим місячним кратером.

Тип співвідношення		Номер зображення NAC	Розділення, м/пікс.	Кут падіння, (°)	Кут спостереження, (°)	Фазовий кут, (°)	Азимут Сонця, (°)
Фазове відношення		M1131985103L	1.36	25.8	25.2	44.9	243.1
		+M1131985103R					
		M1131999331R	1.0	26.7	4.4	24.2	230.9
Залежність від часу при $\alpha=20^\circ$	До	M1132006428R	1.22	27.5	19.4	20.8	228.5
	Після	M186048671R	1.05	20.7	1.2	20.1	244.6
Залежність від часу при $\alpha=40^\circ$	До	M1129645568L+ M1129645568R	1.15	47.3	7.9	40.0	200.5
	Після	M183689789L + M183689789R	1.35	40.5	1.78	42.12	204.9

15.2.3 Результати і обговорення

На рисунку 15.11a,b показані, відповідно, зображення LRO NAC до удару M183689789L і після удару M1129645568L новоствореного місячного кратера і його найближчих околиць. Обидва зображення отримані при фазовому куті, близько до $\sim 40^\circ$. Автори [Robinson et al., 2015] повідомили про зону низького коефіцієнту відбиття, що простирається від асиметричного викида з високим коефіцієнтом відбиття до більш симетричного візерунка від 50 м від кратера на захід-південний захід до 80 м від кратера на схід-північний схід. Ми також підтвердили це утворення з темним гало і застосовували методику фазового відношення, щоб перевірити, чи темні гало виявляють фотометричні аномалії, які можуть бути інтерпретовані з погляду змін шорсткості поверхні.

Два NAC зображення M1131985103L/R і M1131999331R були отримані при близьких значеннях кута падіння та азимутального кута сонячного світла, але з різним кутом спостереження (див таблицю 15.5). Це робить можливим отримання фазового відношення $f(45^\circ)/f(24^\circ)$. Відзначимо, низькі значення фазового відношення в круговій зоні 100-150 м з центром в новому кратері (рис. 15.11c). Ледь помітна область низьких значень фазового відношення витягнута в північно-західному напрямку і в південно-східному напрямку, що нагадує "метелика", є типовою для косих ударів [Melosh, 1989]. Низькі значення фазових відношень $f(45^\circ)/f(24^\circ)$ відповідають більш високому нахилу фазової кривої $f(\alpha)$ і, отже, більш високій оптичній шорсткості, як і можна було очікувати.

За даними LROC NAC ми також розрахували два відношення в залежності від часу (після/до того (A/B)), використовуючи зображення, отримані при $\alpha \sim 20^\circ$ (NAC кадри M1132006428R і M186048671R) і $\alpha \sim 40^\circ$ (NAC кадри M1129645568L / R і M183689789L / R), див таблицю 15.5. Друге відношення було представлено раніше у зворотній формі [Robinson et al., 2015]. На рисунку 15.11d представлено розподіл $(A/B)_{40}$. Сам кратер і його найближче оточення (<2.0 м від центру) перенасичені на вихідних зображеннях через високі

значення коефіцієнта відбиття. Розподіл $(A/B)40^\circ$ виявив ряд невеликих слабких променів і плям, що радіально розподілені навколо кратера.

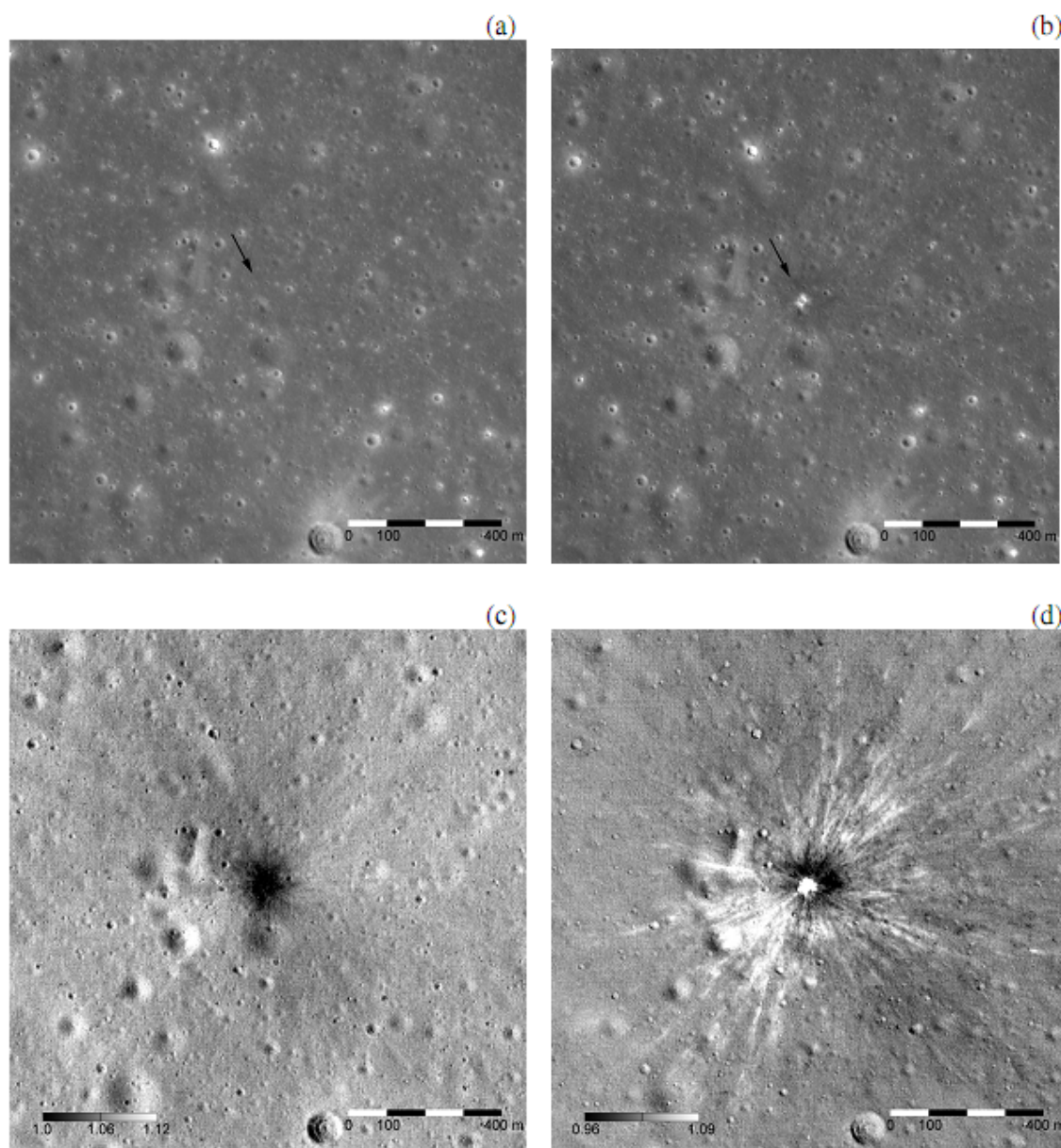


Рисунок 15.11 Зображення місцеположення кратера, створеного 17 березня 2013: зображення LRO NAC до удару M183689789L – (a), і після удару M1129645568L – (b) зображення видимого альbedo – (c); нормалізоване фазове відношення $f(45^\circ)/f(24^\circ)$ у відносних одиницях при $\alpha = 40^\circ$ – (d). Стрілка вказує на новий кратер. Північ угорі, захід зліва скрізь у цьому розділі.

Як і автори [Robinson et al., 2015] ми також відзначили наступну послідовність: асиметричну зону високого відбиття на радіальній відстані < 20 м, потім темне-гало в основному поширене в північно-східному напрямку до 50..80 м за внутрішньою зоною високого відбивання. Наступна зона високого відбиття складається з окремих яскравих променів, розподілених в середньому майже однорідне по азимуту, і простирається до 800 м. Це трохи відрізняється від оцінок [Robinson et al., 2015], які вказують відстань до 1000 м. Ми тільки виявили деякі яскраві плями, видимі на відстані > 800 м від кратера.

На рисунку 15.12 показано зображення з нижчим розділенням, ніж зображення, представлені на рис. 15.11. Це дає можливість нам краще бачити масштаби збурень поверхні, що пов'язані з викидами з нового кратера. Зокрема, цей рисунок дає можливість порівнювати фазові відношення та відношення залежності від часу на великих відстанях від нового кратера, до 2..3 км. Перш за все, відзначимо, що помітних змін розподілу фазового відношення на відстанях > 800 м від кратера (рис. 15.12a), майже не видно. У той же час ми виявили асиметричну систему променів, що складається з матеріалу з нижчою відбивною здатністю (у порівнянні з непорушеною поверхнею до ударного явища) і простирається навіть далі, ніж на 2..3 км від кратера (рис. 15.12b,c). Автори [Robinson et al., 2015] не відзначили існування цих променів з низькою відбивною здатністю, розташованих далеко від кратера, хоча вони повідомили про окремі плями в 30 км зоні від кратера.

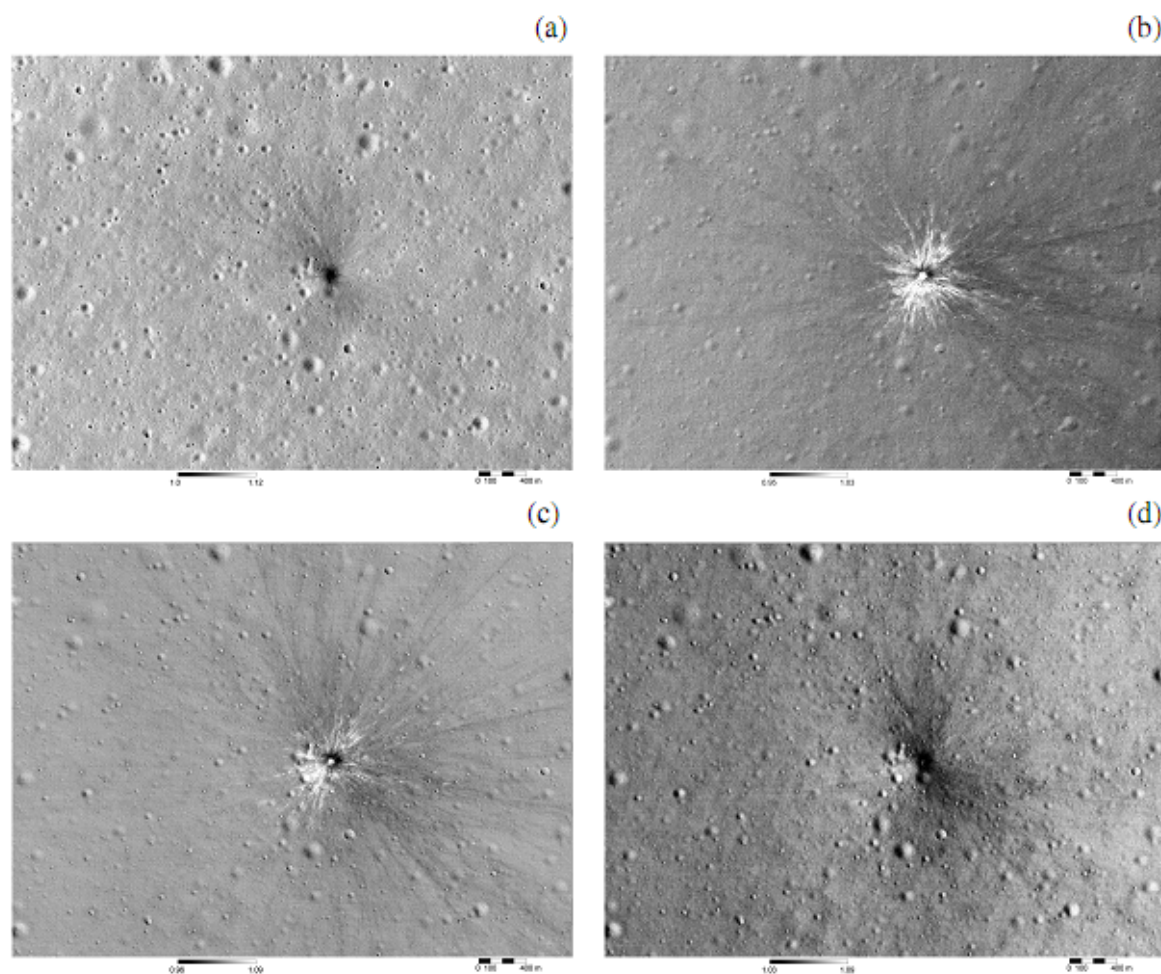


Рисунок 15.12 Зображення для кратера, створеного 17 березня 2013, з нижчим розрішенням, ніж на рис. 4.3%1, щоб показати масштаби події: (a) - фазові відношення $f(45^\circ)/f(24^\circ)$; (b) - відношення залежності від часу (A/B) при 20° ; (c) - відношення залежності від часу (A/B) при 40° ; (d) - відношення (c) до (b).

На рис. 15.12 показано два відношення залежності від часу (A/B), розраховані для зображень, знятих при 20° – (b) і 40° – (c), відповідно; як видно, відношення дещо відрізняються. Це не сюрприз, так як так звана оптична шорсткість повинна якимось чином залежати від фотометричних умов спостережень. Залежно від типу шорсткості, елементи структури поверхні при різних фазових кутах по-різному впливають на тіньовий ефект. Відношення від часу, побудовані на різних фазових кутах дають можливість отримати фазові

відношення залежності від часу. Рисунок 15.12d показує відношення зображень (с) до (b). Це відношення показує, що різниця між відношеннями залежності від часу не надто драматична, і особливість малюнку "метелика" стає більш різким.

15.2.4 Темні гало

Зображення фазових відношень та відношень залежності від часу показують фотометричні структури навколо нових кратерів, які можуть бути віднесені до відмінностей в складі і шорсткості. Наприклад, більш низькі значення фазових відношень $f(45^\circ)/f(24^\circ)$ (рис. 15.12с) відповідають більшій крутизні фазових функцій, тобто вищій шорсткості поверхні. Відношення залежності від часу систематично показують фотометричні візерунки на великих відстанях від кратера, порівняно з розподілами фазового відношення. Для детального порівняння ми розрахували радіальні профілі для фазового відношення та відношення залежності від часу для обох кратерів, які представлені на рис. 15.13.

Кожна точка на графіку являє собою середнє в круглій області в 2 м шириною. Області мають спільний з кратером центр. Всі криві нормовані на їх власні значення на відстані 270 метрів від центру двох кратерів.

Незважаючи на асиметрію фазового відношення і відношення залежності від часу округи кратера на профілях відношень видно деталі. Наприклад, фазові відношення $f(45^\circ)/f(24^\circ)$ для кратера, що виник 17 березня, підтверджують швидку зміну візерунку до відстані в 120-150 м і насичення при більших відстанях. Відношення залежності від часу показують швидке зменшення до неглибокого мінімуму на 50..60 м. Положення мінімумів відповідає темному гало. При більших відстанях спостерігається поступове збільшення до насичення. Таким чином, ми прийшли до висновку, що найбільш значні зміни в фазовому відношенні не корелюють зі структурою темних гало. Це означає, що гало частково може бути особливістю складу поверхні.

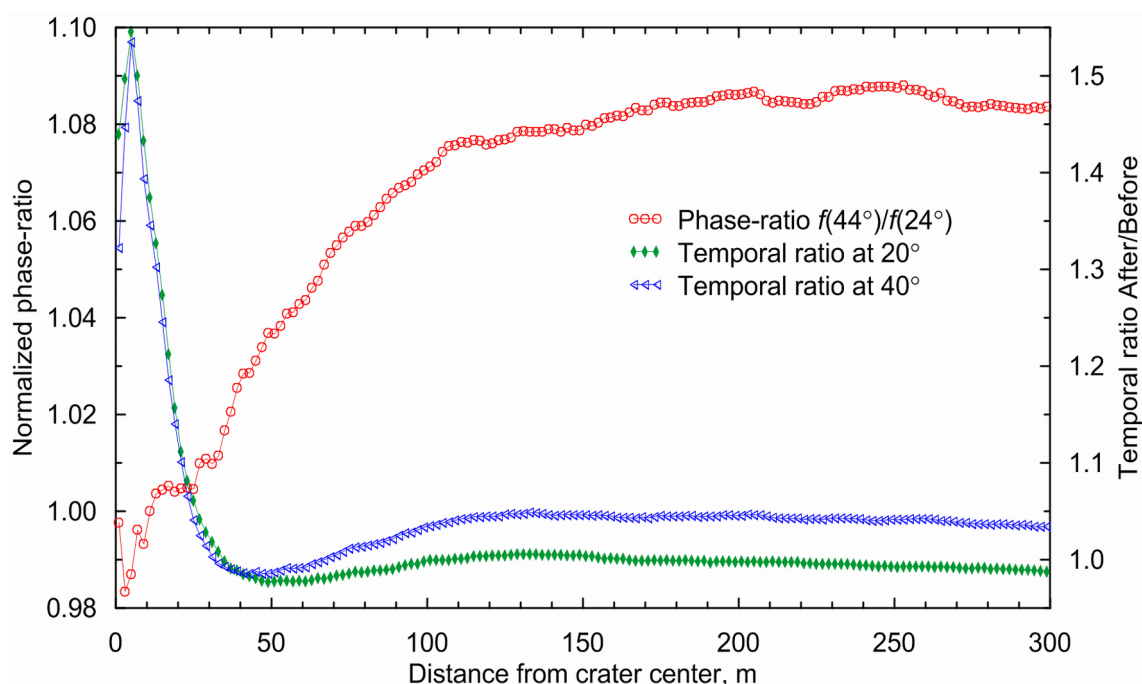


Рисунок 15.13 Радіальні профілі для фазового відношення і відношення залежності від часу для кратера, що виник 17 березня 2013 р. Кожна точка на графіку є результатом усереднення в круглих областях з 2 м шириною.

Ми можемо припустити, що гало – це відкладення темному матеріалу, «викопаного» ударом. Тим не менш, слід зазначити, що всі нові кратери, включаючи ті, які були сформовані падінням космічних апаратів [Kaydash, Shkuratov, 2014], мають темні гало і промені. Припущення, що у всіх цих ділянок існує шар темних матеріалів, здається, дуже неприродним. Таким чином, ми можемо зробити висновок, що ореоли можуть утворюватися в процесі утворень кратерів і не відносяться до ударних розкопок.

Гіпер-швидкісні удари призводять до таких фізичних ефектів, як плавлення і випаровування ударника і мішені. Ми вважаємо, що невелика частина цього пару може конденсуватися навколо кратерів у вигляді конденсованих плівок, які всюди можуть бути знайдені на поверхні частинок реголіту [Harke, 2001]. Ці плівки в основному складаються з кластерів нанофазного заліза (npFeO) розміром 10 нм. Це залізо є ефективним хромофором (наприклад, [Noble et al.,

2007]); навіть 4% моношару таких npFeO кульок може забезпечити помітне потемніння (див. рис. 10 в роботі [Shkuratov et al., 1999b]). Якщо масу ударника взяти 20 кг, то при швидкості $v = 25\text{--}30$ км/с кількість пару може бути оцінена, використовуючи відповідне рівняння в [Melosh, 1989], порядку в 100 кг для вивчених кратерів.

Ми визначили, що необхідна кількість npFeO для генерації оптичного ефекту становить порядку 100 г нанофазного заліза для поширення в області з радіусом 70 м. Таким чином, тільки 10-3 випарованої маси необхідно для створення темних ореолів; в той час як осаджена частина пару оцінюється в 5 кг [Svetsov, 2011]. Якщо ми припустимо, що залізо складається з 10% від маси осаджених парів, то залишається 5-разовий запас ільменіту для раніше зробленої оцінки. Експеримент з випаровування показав, що пара може проникати в багато шарів в порошкоподібній поверхні перед осадженням [Starukhina et al., 1999]. Це може значно збільшити оптичну ефективність конденсату покриття. Тим не менш, ці можливі вклади повинні бути дуже тонкими, і вони повинні швидко зникнути через мікрометеоритну переробку реголіту. Ось чому такі темні (npFeO) ореоли можуть бути виявлені в основному в разі дуже молодих кратерів.

На завершення, зауважимо, що метод фазових відношень може бути успішно застосований не тільки для дослідження місць посадок, але і схилів молодих місячних кратерів, де процеси транспортування реголіту можуть бути сильно розвинені. Цим методом виявляються свіжі зсуви, накопичення уламкового матеріалу на внутрішніх стінках кратерів, терасах і днищах. Одним з важливих результатів є те, що потоки на внутрішніх стінках кратерів, які раніше вважалися розплавом, швидше за все, є порівняно свіжими осипами цих стінок. Метод фазових відношень в комбінації з традиційним картографуванням колірних відношень може бути ефективно використаний для вивчення астероїдів та супутників планет.

ВИСНОВКИ

Головний висновок, який можна зробити на основі отриманих результатів зводиться до наступного:

Оскільки кутові швидкості обертання в залежності від зоряної величини практично збігаються для обох каталогів, можна обгрутовано припустити, що залежність кутової швидкості обертання від відстані, отримана за даними каталогу GAIA DR1 повинна також збігатися з аналогічною залежністю, отриманою за даними каталогу XРМА, при умові, якби вони мали паралакси.

Звідси випливає, що (приймаючи відстань до центру Галактики рівною 10 кпс), кутова швидкість обертання на відстані 8.8 кпс від центру Галактики становить приблизно 4.5 мас/рік, що відповідає значенню лінійної швидкості обертання приблизно 188 км/сек, а на відстані 9.9 кпс — 6 мас/рік, що відповідає лінійної швидкості 282 км/сек.

Це підтверджує наш результат, отриманий за власними рухами слабких зірок каталогу XPM ще кілька років тому.

Із застосуванням методів фазових та часових відношень вивчені нові (що утворені у березні та серпні 2013 року) кратери природнього походження на поверхні Місяця, виявлені темні гало та променеві системи цих кратерів. За нашими даними, ці кратери та їх ореоли і промені характеризуються значним нахилом фазової функції. В побудованих нами оптичних розподілах шорсткості наявна асиметрична картина викидів для одного з кратерів. З урахуванням того, що ця асиметрія є східна із відомим розподілом "крила метелика", ми вважаємо цей факт доказом косого удару метеороїда, що утворив кратер.

Нами надано нове пояснення механізму, що може призводити до появи темних гало та променів навколо нових тільки но утворених місячних кратерів. Ми припускаємо, що темні гало навколо кратерів є тонкими плівками випаруваної речовини, що утворюються при ударі. Відомо, що надшвидкісні удари призводять до плавлення і випаровування ударника і мішені. Ми

вважаємо, що невелика частина цього пара може конденсуватися навколо кратерів продукуючі конденсовані плівки, які повсюди знаходять на поверхні частинок реголіту. Ці плівки в основному складаються з кластерів нанофазного заліза (npFeO) з розміром 10 нм. Тим не менш, ці можливі осаджування повинні бути дуже тонкими і швидко зникати через мікрометеоритну переробку реголіту. Ось чому такі темні (npFeO) ореоли можуть бути виявлені в основному в разі дуже молодих кратерів.

Проаналізовані раніше місця розташування посадочних модулів КК Apollo та Луна мають у відповідності до потужності їх двигунів особливості розподілів фазових відношень, чітко асоційованих з місцями їх посадки. Наша оцінка різниці у нахилі фазової залежності в плямі, що оточує місце посадки, від сусідніх ділянок поверхні, складає 10 %. Нами надано інтерпретацію утворення знайдених аномалій, які пов'язані з дією газових струменів посадкового модуля. Удар газових струменів може руйнувати пористу структуру верхніх шарів реголіту, видуваючи переважно дрібну фракцію частинок. Руйнування структури послаблює тіньовий ефект, зменшує нахил фазової кривої. Крім того, накачування реголіту газами може призводити до флюїдизації реголіту.

Показано, що метод фазових відношень може бути успішно застосований не тільки для дослідження місць посадок, але і схилів молодих місячних кратерів, де процеси транспортування реголіту можуть бути сильно розвинені. Цим методом виявляються свіжі зсуви, накопичення уламкового матеріалу на внутрішніх стінках кратерів, терасах і днищах. Важливим результатом застосування методу є те, що потоки на внутрішніх стінках кратерів, які раніше вважалися розплавом, швидше за все, є порівняно свіжими осипами цих стінок.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Andrei A.H. The large quasar reference frame (LQRF). An optical representation of the ICRS / A. H. Andrei, J. Souchay, N. Zacharias et al. // *Astron. and Astrophys.* – 2009. – Vol. 505, Issue 1. – P. 385-404.
2. Arias E. F. The extragalactic reference system of the International Earth Rotation Service, ICRS / E. F. Arias, P. Charlot, M. Feissel, et al. // *Astron. and Astrophys.* – 1995. – Vol. 303. – P. 604–608.
3. Arias E. F. et al., IERS 2009. The Second Realization of the International Celestial Reference Frame by Very Long Baseline Interferometry / Fey A. L. Gordon D. and Jacobs C. S. (eds.) // *IERS Technical Note.* – 2009. – № 35. – Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie. – 204 p.
4. Clube S.V.M. 1972, Galactic rotation and the precession constant. // *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* - 1972. 159. P. 289.
5. Clube S. V. M. 1973, Another look at the absolute proper motions obtained from the Lick pilot programme. // *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* - 1973. 161. P. 445 – 463.
6. du Mont B. A three dimensional analysis of the kinematics of 512 FK5/FK4 sup stars. // *Astron. and Astrophys.*, - 1977. - 61. P. 127 - 132.
7. du Mont B. 1978. A rediscussion of determination of precession and Galactic rotation from Lick proper motions referred to galaxies. // *Astron. and Astrophys.*, 1978. - 66. P. 441 – 451.
8. Fedorov P.N The XPM Catalogue: Absolute proper motions of 280 million stars / P. N. Fedorov, A. A. Myznikov, V S. Akhmetov // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* – 2009. – Vol. 393, Issue 1. – P. 133–138.
9. Fedorov P. N. An investigation of the absolute proper motions of the XPM catalogue / P. N. Fedorov, V. S. Akhmetov, V. V. Bobylev, A. T. Bajkova // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* – 2010. – Vol. 406, Issue 3. – P. 1734–1744.

10. Fedorov P. N. The XPM catalogue as a realization of the ICRS in optical and near-infrared ranges of wavelengths / P. N. Fedorov, V. S. Akhmetov, V. V. Bobylev and A. G. Gontcharov // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* – 2011. – Vol. 415, Issue 1. – P. 665– 672.
11. Girard T. M. The Southern Proper Motion Program. IV. The SPM4 Catalog / T. M. Girard, W. F. van Altena, N. Zacharias et al. // *The Astron. J.* – 2011. – Vol. 142, Issue 1, article id. 15 (2011).
12. Hambly N. C. The SuperCOSMOS Sky Survey – I. Introduction and description / N. C. Hambly, H. T. MacGillivray, M.A. Read et al. // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* – 2001. – Vol. 326, Issue 4. – P. 1279–1294.
13. Hambly N.C. The SuperCOSMOS Sky Survey – II. Image detection, parametrization, classification and photometry / N. C. Hambly, P M. J. Irwin and H. T. MacGillivray // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* – 2001. – Vol. 326, Issue 4. – P. 1295–1314.
14. Hambly N.C. The SuperCOSMOS Sky Survey – III. Astrometry / N. C. Hambly, P A. C. Davenhall, M. J. Irwin and H. T. MacGillivray // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* – 2001. – Vol. 326, Issue 4. – P. 1315–1327.
15. Hög E. The Tycho-2 Catalogue of the 2.5 Million Brightest Stars / E. Hög, C. Fabricius, V. Makarov et al. // *Astron. and Astrophys.* – 2000. – Vol. 355. – P. 27– 30.
16. Kovács, A. Star-galaxy separation strategies for WISE-2MASS all-sky infrared galaxy catalogues / Kovács, A., & Szapudi, I. // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc* - 2015, Volume 448, Issue 2, p.1305-1313
17. Kovalevsky J. The Hipparcos Catalogue as a realization of the extragalactic reference system / J. Kovalevsky, L. Lindegren, M. Perryman, et al. // *Astron. and Astrophys.* – 1997. – Vol. 323. – P. 620–633.
18. Lasker B. M. The second-generation Guide Star Catalog: Description and properties / B. M. Lasker, M.G. Lattanzi, B. J. McLean et al. // *Astron. J.* – 2008. – Vol. 136, Issue 2. – P. 735–766.

- 19.Lindegren L. Gaia Data Release 1. Astrometry – one billion positions, two million proper motions and parallaxes / L. Lindegren, U. Lammers, U. Bastian et al. // *Astron. and Astrophys.* - 2016. - manuscript no. Aa201628714
- 20.Michalik D. Quasars can be used to verify the parallax zero-point of the Tycho-Gaia Astrometric Solution / D. Michalik, L. Lindegren. // *Astron. and Astrophys.* - 2016. - 586, A26
- 21.Mignard F. Global and local bias in the FK5 from the Hipparcos data / F. Mignard and M. Froeschle // *Astronomy and Astrophysics* - 2000, v.354, p.732-739
- 22.Mignard F. Analyse de catalogues stellaires au moyen des harmoniques vectorielles. / Mignard F., Morando B. // *Journées 1990: Systèmes de référence spatio-temporels. Colloque André Danjon*, p. 151 – 158.
- 23.Mignard F. Analysis of astrometric catalogues with vector spherical harmonics / F. Mignard, S. Klioner // *Astronomy & Astrophysics*, Volume 547, id.A59, pp.
- 24.Monet D. The 526,280,881 Objects In The USNO-A2.0 Catalog // *Bulletin of the American Astronomical Society*. – 1998. – Vol. 30. – P. 1427.
- 25.Monet D. The USNO-B catalog / D. Monet, S. Levine, B. Canzian et al. // *Astron. J.* – 2003. – Vol. 125, Issue 2. – P. 984–993.
- 26.Perryman M. The Hipparcos Catalogue / M. Perryman, L. Lindegren, J. Kovalevsky et al. // *Astron. and Astrophys.* – 1997. – Vol. 323. – P. 49–52.
- 27.Pradhan, A. C., Ojha, D. K., Robin, A. C., Ghosh, S. K., & Vickers, J. J. A stellar population synthesis model for the study of ultraviolet star counts of the Galaxy / Pradhan, A. C., Ojha, D. K., Robin, et al. // *Astronomy & Astrophysics* - 2014, Volume 565, pp, 33.
- 28.Roeser, S. The PPMXL Catalog of Positions and Proper Motions on the ICRS. Combining USNO-B1.0 and the Two Micron All Sky Survey (2MASS) / S. Roeser, M. Demleitner, E. Schilbach // *Astron. J.* – 2010. – Vol. 139, Issue 6. – P. 2440–2447.

29. Schneider D.P. et al., The Sloan Digital Sky Survey Quasar Catalog. IV. Fifth Data Release / D. P. Schneider, P. B. Hall, G. T. Richards et al. // *Astron. J.* – 2007. – Vol. 134, Issue 1. – P. pp. 102-117.
30. Skrutskie M. F. The Two Micron All Sky Survey (2MASS) / M. F. Skrutskie, R. M. Cutri, R. Stiening et al. // *Astron. J.* – 2006. – Vol. 131, Issue 2. – P. 1163– 1168.
31. Souchay J. The construction of the large quasar astrometric catalogue (LQAC) / J. Souchay, A. H. Andrei, C. Barache et al. // *Astron. and Astrophys.* – 2009. – Vol. 494, Issue 2. – P. 799–815.
32. Souchay J. The second release of the Large Quasar Astrometric Catalog (LQAC-2) / J. Souchay, A. H. Andrei, C. Barache, S. Bouquillon, D. Suchet, F. Taris, and R. Peralta // *Astron. and Astrophys.* – 2012. – Vol. 537, Issue 1. – P. id.A99, 13 pp.
33. Storkey A. J. Cleaning sky survey data bases using Hough transform and renewal string approaches / Storkey, A. J.; Hambly, N. C.; Williams, C. K. I.; Mann, R. G. // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* – 2004. – Vol. 347, Issue 1. – P. 36–51.
34. Vickers J. J. A global correction to PPMXL proper motions / J. Vickers, S. Röser, and E. Grebel // *The Astronomical Journal*, 151:99 (9pp), 2016 April
35. Vityazev V. Comparison of the XPM and UCAC4 catalogs / Vityazev V. V., & Tsvetkov A. S. // *Astronomy Letters*, - 2015. - Volume 41, Issue 10, pp.575-592
36. Vityazev V. Systematic differences between the positions and proper motions of stars from the PPMXL and UCAC4 catalogs / Vityazev V. V., & Tsvetkov A. S. // *Astronomy Letters*, Volume 41, Issue 7, pp.317-333
37. Wright, E. L. The Wide-field Infrared Survey Explorer (WISE): Mission Description and Initial On-orbit Performance // Wright, E. L., Eisenhardt, P. R. M., Mainzer, A. K., et al. // *Astron. J.* – 2010. – Vol. 140, Issue 6. – P. 1868
38. Zacharias N. The Third US Naval Observatory CCD Astrograph Catalog (UCAC3) / N. Zacharias, C. Finch, T. Girard et al. // *Astron. J.* – 2010. – Vol.

- 139, Issue 6. – P. 2184–2199.
39. Zacharias N. The Fourth US Naval Observatory CCD Astrograph Catalog (UCAC4) / N. Zacharias, C.T. Finch, T.M. Girard, A. Henden, J.L. Bartlett, D.G. Monet, M.I. Zacharias // *Astron. J.* – 2013. – Vol. 145, Issue 2. – P. 1538
 40. Кайдаш В.Г., Ю. Г. Шкуратов. Нарушения структуры лунной поверхности вблизи места посадки КА «Луноход–1», *Астрономический вестник*, 2014, том 48, № 3, с. 183–191. DOI: 10.7868/S0320930X14030037
 41. Chin G., Scott B., Foote M., et al. Lunar Reconnaissance Orbiter Overview: The Instrument Suite and Mission // *Space Sci Rev.* 2007. V. 129. P. 391-419.
 42. Hapke B., 1993. *Theory of Reflectance and Emittance Spectroscopy*. Cambridge Univ. Press, Cambridge. 450 pp.
 43. Immer C., Metzger P., Hintze P., Nick A., Horan R. Apollo 12 Lunar Module exhaust plume impingement on Lunar Surveyor III // *Icarus*. 2011. 211(2). P. 1089-1102.
 44. Johnson J.R., Larson S.M., Singer R.B. A re-evaluation of spectral ratios for lunar mare TiO₂ mapping // *Geophys. Res. Lett.* 1991. 18 (11). P. 2153–2156.
 45. Kaydash V., Kreslavsky M., Shkuratov Y. et al. Photometric anomalies of the lunar surface studied with SMART-1 AMIE data // *Icarus*. 2009. V. 202. P. 393–413.
 46. Kaydash V., Shkuratov Yu., Korokhin V., Videen G. Photometric anomalies in the Apollo landing sites as seen from the Lunar Reconnaissance Orbiter // *Icarus*. 2011. V. 211. P. 89–96.
 47. V. Kaydash, Y. Shkuratov, G. Videen, Phase-ratio technique as applied to the assessment of lunar surface roughness. 40th COSPAR Scientific Assembly, 2014a. Abstract B0.1-0061-14
 48. Kaydash Vadym, Yuriy Shkuratov, Gordon Videen. Dark halos and rays of young lunar craters: a new insight into interpretation, (2014b) *Icarus* 231, 22–33, <http://dx.doi.org/10.1016/j.icarus.2013.11.025>.
 49. Korokhin Viktor V., Yuri I. Velikodsky, Eugene V. Shalygin, Yuriy G.

- Shkuratov, Vadym G. Kaydash, Gorden Videen, Retrieving lunar topography from multispectral LROC images, *Planetary and Space Science* 92 (2014) 65–76, 10.1016/j.pss.2014.01.008
50. Kreslavsky M.A., Shkuratov Y.G. Photometric anomalies of the lunar surface: Results from Clementine data // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108. E3. P. 5015.
 51. Le Mouélic S., Langevin Y., Erard S., et al. Discrimination between maturity and composition of lunar soils from integrated Clementine UVVIS-NIR data. Application to Aristarchus Plateau // *J. Geophys. Res.* 2000. V. 105 (E4). P. 9445–9455.
 52. Lucey P., Blewett D., and Hawke R. FeO and TiO₂ Concentrations in the South Pole-Aitken Basin: Implication for mantle composition and basin formation // *J. Geophys. Res. (Planets)*. 1998. V. 103. P. 3701–3708.
 53. Lucey P.G., Blewett D.T., Bradley L.L. Lunar iron and titanium abundance algorithm based on final processing of Clementine ultraviolet–visible images // *J. Geophys. Res.* 2000a. V. 105. P. 20297–20305.
 54. Lucey P.G., Blewett D.T., Taylor G.J., Hawke B.R. Imaging of the lunar surface maturity // *J. Geophys. Res.* 2000b. V. 105. P. 20377–20386.
 55. Lucey P.G. Mineral maps of the Moon // *Geophys. Res. Lett.* 2004. *Geophys. Res. Lett.* 31. L08701. doi:10.1029/2003GL019406.
 56. Ohtake M., Haruyama J., Matsunaga T., et al. Performance and scientific objectives of the SELENE (KAGUYA) Multiband Imager // *Earth Planets Space*. 2008. V. 60. P. 257–264.
 57. Ohtake M., Tsuneto Y., Yamamoto S., et al. Deriving the Absolute Reflectance of Lunar Surface Using Selene (Kaguya) Multiband Imager Data // *Space Science Reviews*. 2010. V. 154. 1–4. P. 57–77.
 58. Pieters C.M., Shkuratov Yu.G., Kaydash V.G., et al. Lunar soil characterization consortium analyses: pyroxene and maturity estimates derived from Clementine data // *Icarus*. 2006. V. 184. P. 83–101.
 59. Robinson M.S., Brylow S.M., Tschimmel M., et al. Lunar Reconnaissance

- Orbiter Camera (LROC) Instrument Overview // *Space Sci. Rev.* 2010. V. 150. P. 81–124.
60. Shkuratov Yu.G., Starukhina L.V., Kreslavsky M.A., et al. Principle of perturbation invariance in photometry of atmosphereless celestial bodies // *Icarus*. 1994. V. 109. P. 168-190.
 61. Shkuratov Yu.G., Kaydash V.G., Opanasenko N.V. Iron and titanium abundance and maturity degree distribution on the lunar nearside // *Icarus*. 1999. V. 137. P. 222–234.
 62. Shkuratov Yu., Stankevich D., Kaydash V., et al. Composition of the lunar surface as will be seen from SMART-1: simulation using Clementine data // *J. Geophys. Res. (Planets)*. 2003. V. 108 (E4). P. 1-1 – 1-12.
 63. Shkuratov Yu.G., Stankevich D.G., Petrov D.V., et al. Interpreting photometry of regolith-like surfaces with different topographies: Shadowing and multiple scatter // *Icarus*. 2005. V. 173. P. 3–15.
 64. Shkuratov Y., Kaydash V., Gerasimenko S., et al. Probable swirls detected as photometric anomalies in Oceanus Procellarum // *Icarus*. 2010. V. 208. P. 20–30.
 65. Wilhelms D. (1987) USGS Prof. Pap. 1348.
 66. Аллен К.У., Астрофизические величины, М.: Мир, 1977, 446с.
 67. Blewett, D., Levy C., Chabot N., Denevi B., Ernst C., Murchie S. Phase-ratio images of the surface of Mercury: Evidence for differences in sub-resolution texture // *Icarus* –2014. –V.242, –P.142–148.
 68. Clegg R.N., Jolliff B.L., Robinson M.S., Hapke B.W., Plescia J.B. Effects of rocket exhaust on lunar soil reflectance properties // *Icarus* –2014. –V.227, – P.176–194.
 69. Hapke, B., 2001. Space weathering from Mercury to the asteroid belt. *J. Geophys. Res.* 106, 10,039–10,073.
 70. Helfenstein P. et. al., Galileo observations of Europa's opposition effect, *Icarus* (1998), V. 135, p. 41-63.

- 71.Kaydash V.G., Shkuratov Y.G. Structural disturbance of the lunar surface caused spacecraft // Solar System Res. –2012a. –V.46(2), –P.108-118.
- 72.Kaydash V.G., Shkuratov Y.G. Structure perturbations of the lunar surface near the landing site of “Lunokhod-1” // Solar System Res. –2014a. –V.48(3), –P.167-175.
- 73.Kaydash V., Shkuratov Y., Videen G. (2012b) Phase-ratio imagery as a tool of lunar remote sensing, Journ. Quant. Spectrosc. Rad. Transfer 113, 2601-2607.
- 74.Kaydash V., Shkuratov Y., Videen G. Landing of the probes Luna 23 and Luna 24 remains an enigma // Planet. Space Sci. –2013a, –V.89, –P.172–182.
- 75.Kaydash, V., Pieters, C., Shkuratov, Y., Korokhin, V., 2013b. Lunar opposition effect as inferred from Chandrayaan-1 M³ data. J. Geophys. Res. Planets 118, 1221–1232.
- 76.Kaydash V.G., Shkuratov Y.G. Structure perturbations of the lunar surface near the landing site of “Lunokhod-1” // Solar System Res. –2014. –V.48(3), –P.167-175.
- 77.Kaydash V.G., Shkuratov Y.G. Structural disturbance of the lunar surface caused spacecraft // Solar System Res. –2012. –V.46(2), –P.108-118.
- 78.Lucey P.G., Blewett D.T., Bradley L.L. Lunar iron and titanium abundance algorithm based on final processing of Clementine ultraviolet–visible images // J. Geophys. Res. –2000a. –V. 105. –P. 20297–20305.
- 79.Lucey P.G., Blewett D.T., Taylor G.J., Hawke B.R. Imaging of the lunar surface maturity // J. Geophys. Res. –2000b. –V. 105. –P. 20377–20386.
- 80.Lucey P.G. Mineral maps of the Moon // Geophys. Res. Lett. –2004. L08701. doi:10.1029/2003GL019406.
- 81.Madiedo, J., Ortiz, J., Morales, N., Cabrera-Caño, J., 2014. A large lunar impact blast on 2013 September 11. Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 439, 2364–2369.
- 82.Melosh, H. J. Impact cratering: A geologic process. New York, Oxford University Press, 1989, 253 p

83. Mushkin, A., Gillespie, A.R. Estimating sub-pixel surface roughness using remotely sensed stereoscopic data. *Remote Sensing of Environment* 99 (2005), 75 – 83. doi:10.1016/j.rse.2005.02.018
84. Nelder, J., Mead, R., 1965. A simplex method for function minimization. *Computer J.*, 7, 308-313.
85. Noble, S., Pieters, C., Keller, L.P., 2007. An experimental approach to understanding the optical effects of space weathering. *Icarus* 192, 629–642.
86. Perna, D., Barucci, M.A., Fulchignoni, M., 2013. The near-Earth objects and their potential threat to our planet. *Astron. Astroph. Rev.* 21, 1–28.
87. Robinson, M. S., Brylow, S. M., Tschimmel, M., and 20 coauthors, 2010. Lunar Reconnaissance Orbiter Camera (LROC) Instrument Overview. *Space Science Reviews* 150, 81–124.
88. Robinson, M.S., Boyd, A.K., Denevi, B.W., Lawrence, S.J., McEwen, A.S., Moser, D.E., Povilaitis, R.Z., Stelling, R.W., Suggs, R.M., Thompson, S.D., Wagner, R.V. New crater on the Moon and a swarm of secondaries // *Icarus* – 2015. –V.252, –P.229–235.
89. Shalygin, E.V., Velikodsky, Yu.I., and Korokhin, V.V., 2003. Formulas of the perspective cartographic projection for planets and asteroids of arbitrary shape. *Lunar and Planet. Sci.* 34-rd. Abstract #1946. LPI Houston.
90. Shkuratov Y., Kaydash V., Sysolyatina X., Razim A., Videen G. Lunar surface traces of engine jets of Soviet sample return probes: The enigma of Luna-23 and Luna-24 landing sites // *Planet. Space Sci.* 2013. 75. 28–36.
91. Shkuratov Y., Kaydash V., Videen G. The crater Giordano Bruno as seen with optical roughness imagery // *Icarus*. –2012a. –V.218 (1), –P. 525-533.
92. Shkuratov, Y., Kaydash, V., Korokhin, V., Velikodsky, Y., Petrov, D., Zubko, E., Stankevich, D., Videen, G., 2012b. A critical assessment of the Hapke photometric model. *Journ. Quant. Spectrosc. Rad. Transfer* 113, 2431–2456. (<http://dx.doi.org/10.1016/j.jqsrt.2012.04.010>).
93. Shkuratov, Y., Kaydash, V., Korokhin, V., Velikodsky, Y., Opanasenko, N.,

- Videen, G., 2011. Optical measurements of the Moon as a tool to study its surface. *Planet. Space Sci.* 59, 1326–1371.
94. Shkuratov Yu., Starukhina L., Hoffmann H., Arnold G., 1999b. A model of spectral albedo of particulate surfaces: implication to optical properties of the Moon. *Icarus* 137, 235-246.
95. Starukhina, L.V., Shkuratov, Y.G., Skorik, S.K., 1999. Spread of condense products in a regolith-like medium: estimates and laboratory modeling. *Solar Syst. Res.* 33, 212-215.
96. Suggs, R.M., Moser, D.E., Cooke, W.J., Suggs, R.J., 2014. The flux of kilogram-sized meteoroids from lunar impact monitoring. *Icarus* 238, 23–36.
97. Svetsov, V., 2011. The late heavy bombardment and deficiency of impact vapor condensate on the Moon. *EPSC Abstracts Vol. 6*, EPSC-DPS2011-857.
98. Velikodsky, Yu.I., Opanasenko, N.V., Akimov, L.A., Korokhin, V.V., Shkuratov, Yu.G., Kaydash, V.G., Videen, G., Ehgamberdiev, S.A., and Berdalieva, N.E., 2011. New Earth-based absolute photometry of the Moon. *Icarus* 214, 30–45.

Статті 2013-1016

1. **Fedorov P. N.** The reference frame for the XPM2 // P. N. Fedorov, V. S. Akhmetov, V. M. Shulga // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. – 2014. – Vol. 440, p.624-630. IF = 5.107
2. **Akhmetov V.S.** The kinematics parameters of the Galaxy using data of modern asrometric catalogues. / Akhmetov V.S., Fedorov P.N., Velichko A.B., Shulga V.M. // Odessa Astronomical Publications. 2015 — vol. 28, p. 154
3. **Федоров П.М.** Кинематика Галактики по собственным движениям звезд / Федоров П.М, Ахметов В. С., Величко Г.Б., ШульгаВ.М. // Космічна наука і технологія. - 2015, 21(6):p. 62–67
4. **Akhmetov V.S.** An investigation of the FON-3 catalogue data using Wielen method. / Akhmetov V.S. // Odessa Astronomical Publications. 2016 — vol. здано до друку
5. **Величко Г.Б.** Кинематика Галактики по собственным движениям звезд / Величко Г.Б., Ахметов В. С. Федоров П.М., Шульга В.М. // Космічна наука і технологія. - 2016, здано до друку
6. **Akhmetov V.S.** The PMA Catalogue: 400 million positions and absolute proper motion / V.S Akhmetov, P.N. Fedorov, A.B. Velichko V.M. Shulga. // MNRAS, 2016 Здано до друку IF=4.952
7. V. **Kaydash**, Yu. **Shkuratov**, G. Videen. Dark halos and rays of young lunar craters: a new insight into interpretation, Icarus 231 (2014) 22–33, <http://dx.doi.org/10.1016/j.icarus.2013.11.025>. IF=3.038
8. В. Г. **Кайдаш** и Ю. Г. **Шкуратов**, Нарушения структуры лунной поверхности вблизи места посадки КА «Луноход–1», Астрономический вестник, 2014, том 48, № 3, с. 183–191. DOI: 10.7868/S0320930X14030037 IF=0.647
9. V. V. Korokhin, Y. I. Velikodsky, E. V. Shalygin, Yu. G. **Shkuratov**, V. G. **Kaydash**, G. Videen, Retrieving lunar topography from multispectral LROC images,

- Planetary and Space Science 92 (2014) 65-76, 10.1016/j.pss.2014.01.008 IF=1.875
10. Hao Zhang, Yazhou Yang, Ye Yuan, Weidong Jin, Paul G Lucey, Meng-Hua Zhu, **Vadim G Kaydash**, **Yuriy G Shkuratov**, Kaichang Di, Wenhui Wan, Bin Xu, Long Xiao, Ziwei Wang, Bin Xue. In situ optical measurements of Chang'E-3 landing site in Mare Imbrium: 1. Mineral abundances inferred from spectral reflectance. *Geophysical Research Letters* 42 (17), 6945-6950. 2015. IF=4.212
11. Weidong Jin, Hao Zhang, Ye Yuan, Yazhou Yang, **Yuriy G Shkuratov**, Paul G Lucey, **Vadim G Kaydash**, Meng-Hua Zhu, Bin Xue, Kaichang Di, Bin Xu, Wenhui Wan, Long Xiao, Ziwei Wang. In-situ optical measurements of Chang'E-3 landing site in Mare Imbrium: 2. Photometric properties of the regolith. *Geophysical Research Letters*. 2015. DOI: 10.1002/2015GL065789. IF=4.212
- 12 **В. Г. Кайдаш**, **Ю. Г. Шкуратов**, В.В. Корохин. «Космическая фотометрия высокого разрешения как метод выявления аномалий структуры поверхности Луны». *Космическая наука и технология*, 2015. Т. 21, № 5, С. 75-89.
13. **V. Kaydash**, **Yu. Shkuratov**, M. Wolff and G. Videen. Terrestrial planets. In “Polarimetry of Stars and Planetary Systems”. Kolokolova, L., Hough, J., Levasseur-Regourd A.-C., Eds. ISBN: 9781107043909, 2015. p.289- 302.
14. 1. V. Korokhin, Y. **Shkuratov**, V. **Kaydash**, A. Basilevsky, L. **Rohachova**, Y. Velikodsky, N. Opanasenko, G. Videen, D. Stankevich, O. Kaluhina. Characterization of a photometric anomaly in the lunar Mare Nubium. *Planetary and Space Science*. 2016. Volume 122, Pages 70–87. doi:10.1016/j.pss.2016.01.011 IF=1.942
15. Yu.I. Velikodsky, V.V. Korokhin, Yu.G. **Shkuratov**, V.G. **Kaydash**, Gorden Videen. Opposition effect of the Moon from LROC WAC data. *Icarus*, 2016. Volume 275, Pages 1–15. doi:10.1016/j.icarus.2016.04.005 IF=3.383
16. Y. **Shkuratov**, V. **Kaydash**, L. **Rohacheva**, V. Korokhin, M. Ivanov, Y. Velikodsky, G. Videen. Comparison of lunar red spots including the crater Copernicus. *Icarus*, 2016. Volume 272, Pages 125–139. doi:10.1016/j.icarus.2016.02.034. IF=3.383
17. Y. Grynko, Y. **Shkuratov**, and J. Förstner. Light scattering by irregular

particles much larger than the wavelength with wavelength-scale surface roughness. Optics Letters. Vol. 41, Issue 15, pp. 3491-3494 (2016) doi: 10.1364/OL.41.003491 IF=3.04

Сумарний імпакт-фактор опублікованих статей дорівнює 28.2

Абстракти доповідей на конференціях:

2013

1. Федоров П.Н. Каталог ХРМ как одна из возможностей расширения оптической реализации ICRS в область слабых звезд // П.Н. Федоров, В.С. Ахметов, А.А. Мызников. // Всероссийская астрометрическая конференция «ПУЛКОВО-2012». (ГАО РАН, Санкт-Петербург, Россия, 1-5 октября 2012г.) Тезисы докладов. - С.73.
2. П.М. Федоров: Створення інерціальної системи відліку за наземними спостереженнями. Нинішній стан проблеми. / Міжнародний семінар-конференція з нагоди 100-річчя від дня народження визначних астрометристів – співробітників ГАО НАН України: І.Г. Колчинського, О.К. Короля, А.О. Горині (ГАО НАН України, 24 травня 2013 р.)
3. Федоров П.Н. Опорная система для каталога ХРМ2 / П.Н. Федоров, В.С. Ахметов, А.А. Мызников, В.М. Шульга. // 13th Ukrainian Conference on space research. (Yevpatoria, Crimea, Ukraine; September, 2 – 6, 2013). Abstracts. – P. 97.

2014

1. В.С. Ахметов, П.Н. Федоров, А.Б. Величко, В.М. Шульга. Создание каталога ХРМ2. Выведение положений и абсолютных собственных движений миллиарда звезд., Сб. тезисов конференции "14-а Українська конференція з космічних досліджень ", Украина, Ужгород, 8-12 сентября, 2014, Программа и тезисы докладов.
2. Участь у роботі наукової конференції та спеціального семінару, що проходили в Головній астрономічній обсерваторії НАН України 17 липня 2014 року.

3. K. Sysoliatina, A. Razim, V. **Kaydash**, Y. **Shkuratov**, G. Videen. Lunar Opposition Effect as Inferred from High-resolution LRO Camera Data. Lunar and Planetary Science 45 (2014) Abstract # 1757.

4. V. **Kaydash**, Y. **Shkuratov**, G. Videen, PHASE-RATIO TECHNIQUE AS APPLIED TO THE ASSESSMENT OF LUNAR SURFACE ROUGHNESS. 40th COSPAR Scientific Assembly, 2014. Abstract B0.1-0061-14

2015

1. Akhmetov V.S. The catalogue XPM2. / Akhmetov V.S., Fedorov P.N., Velichko A.B. // 5-th Gamov Memorial International Conference dedicated to 111-th anniversary of George Gamov Astrophysics and Cosmology after Gamov: progress and perspectives and 15-th Odessa International Astronomical Gamov Conference-School Astronomy and beyond: Astrophysics, Cosmology, Cosmomicrophysics, Astroparticle Physics, Radioastronomy and Astrobiology (August 16-23, 20154, Odessa. Ukraine) Abstract, p. 44.

2. Akhmetov V.S. The kinematics parameters of the Galaxy using data of modern asrometric catalogues. / Akhmetov V.S., Fedorov P.N., Shulga V.M. // 5-th Gamov Memorial International Conference dedicated to 111-th anniversary of George Gamov Astrophysics and Cosmology after Gamov: progress and perspectives and 15-th Odessa International Astronomical Gamov Conference-School Astronomy and beyond: Astrophysics, Cosmology, Cosmomicrophysics, Astroparticle Physics, Radioastronomy and Astrobiology (August 16-23, 20154, Odessa. Ukraine) Abstract, p. 44.

3. Y. G. **Shkuratov**, L. V. **Rohachova**, V. V. Korokhin, V. G. **Kaydash**, Y. I. Velikodsky, D. G. Stankevich, G. Videen. Ejecta deposits of Copernicus crater. 46th Lunar and Planetary Science Conference (2015), Abstract # 1763

4. V. V. Korokhin, O. O. Kaluhina, Yu. I. Velikodsky, Yu. G. **Shkuratov**, V. G. **Kaydash**, L. V. **Rohachova**, G. Videen. A photometric anomaly in mare Nubium. 46th Lunar and Planetary Science Conference (2015), Abstract # 1343.

2016

1. Illiashyk M.P. The kinematics research of the Galaxy using of XPM catalogue data / Illiashyk M.P. Akhmetov, P.N. Fedorov, A.B. Velichko. // 23rd Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics April. 25-30, 2016 Kyiv, Ukraine. p.25
2. Velichko A.B. Kinematic parameters of the Galaxy using the XPM catalogue data. / Velichko A.B., Akhmetov, P.N. Fedorov // Astronomy and space physics in Kyiv university. International conference, May 24-27, 2016, Kyiv, Ukraine. p. 78.
3. Akhmetov V.S. An investigation of the FON-3 catalogue data using Wielen method. // 16-th Odessa International Astronomical Gamov Conference-School Astronomy and beyond: Astrophysics, Cosmology, Cosmomicrophysics, Astroparticle Physics, Radioastronomy and Astrobiology (August 14-20, 2016, Odessa. Ukraine) Abstract, p. 44.
4. Akhmetov V.S. The Kinematics research of the galaxy using of vector spherical harmonics method. / V.S Akhmetov, A.B. Velichko P.N. Fedorov, V.M. Shulga. // 16-th Odessa International Astronomical Gamov Conference-School Astronomy and beyond: Astrophysics, Cosmology, Cosmomicrophysics, Astroparticle Physics, Radioastronomy and Astrobiology (August 14-20, 2016, Odessa. Ukraine) Abstract, p. 44.
5. Fedorov P.N. Corrections of the absolute proper motions of the XPM catalogue. / P.N. Fedorov, V.S. Akhmetov, A.B. Velichko. // International Conference “Actual Questions of Ground-based Observational Astronomy ” Devoted to 195 thanniversary of Mykolaiv Astronomical Observatory MAO195, September 26-29, 2016, Mykolaiv, Ukraine Abstract, p. 29
6. Velichko A.B. Kinematic parameters of the Galaxy using the XPMc catalogue data / A.B. Velichko V.S. Akhmetov, P.N. Fedorov. // International Conference “Actual Questions of Ground-based Observational Astronomy” Devoted to 195 thanniversary of Mykolaiv Astronomical Observatory MAO195, September 26-29, 2016, Mykolaiv, Ukraine Abstract, p.31

7. Akhmetov V.S. Modern method of create and research the large astrometric catalogs / V. S Akhmetov, P.N. Fedorov, A.B. Velichko. // International Conference “Actual Questions of Ground-based Observational Astronomy ” Devoted to 195 thanniversary of Mykolaiv Astronomical Observatory MAO195, September 26-29, 2016, Mykolaiv, Ukraine Abstract, p. 35
8. **Shkuratov** Y.G., Korokhin V.V., Ivanov M.A., **Kaydash** V.G., **Rohacheva** L.V., Marchenko G.P., Videen G. Properties of dark mantles in lunar crater Alphonsus deduced from LROC WAC photometric measurements. Lunar Planet. Sci., 47-th, LPI Houston, 2016, Abstract #1340.
9. Korokhin V.V., **Shkuratov** Y.G., **Kaydash** V.G., Velikodsky Yu.I., Videen G. A new phase function of the lunar surface deduced from LROC WAC photometric measurements. Lunar Planet. Sci., 47-th, LPI Houston, 2016, Abstract #1248.
10. **Kaydash** V.G., **Shkuratov** Y.G., Videen G., Korokhin V. V. Condensate deposits of npFe0 around freshest lunar craters? Lunar Planet. Sci., 47-th, LPI Houston, 2016, Abstract #1142.