

Звіт про хід виконання проекту
**«Виявлення аномалій структури поверхні Місяця із використанням космічної
фотометрії високої роздільної здатності (проект LRO)», Етап 2**

з 01.03.2015 по 31.12.2015 р. по програмі «УкрІнКосмос» (Цільова комплексна програма НАН України з наукових космічних досліджень на 2012–2016 рр.)

Проект виконується в Радіоастрономічному інституті НАН України

Керівник проекту: Ю.Г. Шкуратов, чл.-кор. НАНУ, проф., д.ф.-м.н.

Відповідальний виконавець: В.Г. Кайдаш, с.н.с., к.ф.-м.н.

1. 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 косоного удару метеороїда, що утворив кратер.

2. Нами надано нове пояснення механізму, що може призводити до появи темних гало та променів навколо нових тільки не 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 продукуючи конденсовані плівки, які повсюди знаходять на поверхні частинок реголіту. Ці плівки в основному складаються з кластерів нанофазного заліза (npFe^0) 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 (npFe^0) ореоли можуть бути виявлені в основному в разі дуже молодих кратерів.

3. 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.

4. 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 (Рис.1.)

5. Проведений спільний аналіз спектрофотометричних даних, що отримані *in situ* вперше за 40 років після радянських Луноходів у ході м'якої посадки на Місяць китайського КА Chang'E-3, та орбітальної фотометрії LROC NAC з борту КА LRO з просторовим розділенням 1-2 м/пікс. Знайдено зону зміненої оптичної шорсткості, оцінені її розміри на розподілах фазових та часових відношень та показано, що порушення структури реголіту впливає на результати спектроскопії поверхні, зокрема, оцінки глибини полос поглинання у видимому та ближньому-ІЧ діапазоні спектру.

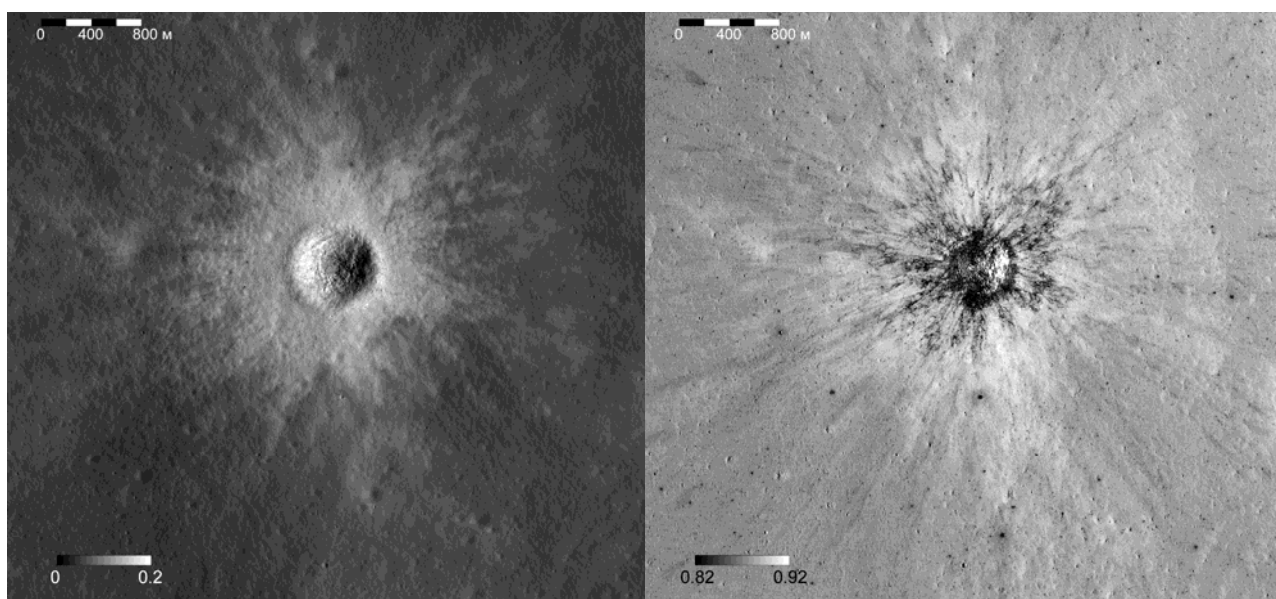


Рис.1. Молодий кратер на зображеннях камери LROC NAC. Зліва - видиме альbedo $B(56^\circ)$ для кута фази 56° . Справа - фазове відношення $B(72^\circ)/B(56^\circ)$. У фазовому відношенні кратер має дуже контрастну структуру променів. Темні частини променів є зонами, в яких викиди створюють сильну шорсткість. Світлі частини променів виділяються або тому, що в їх світлому матеріалі багаторазове розсіювання помітно нівелює тінювий ефект, або тому, що це зони викиду дрібнодисперсного матеріалу, який вирівнює шорсткість непорушеної поверхні, що теж зменшує тінювий ефект.

Таким чином, надійність нового методу оптичного дистанційного зондування доведено детектуванням фотометричних аномалій, пов'язаних зі змінами структури поверхневого шару реголіту у місцях посадки космічних апаратів, тобто там, де вплив людської діяльності на реголіт Місяця відомий. Отримані результати можуть бути використані при плануванні та реалізації космічних місій до Місяця та інших безатмосферних тіл Сонячної системи космічними агенціями світу.

За тематикою проекту опубліковано із участю виконавців проекту наступні наукові статті:

1. 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.

2. 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.

3. **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.

4. **V. Kaydash, Yu. Shkuratov**, M. Wolff and G. Videen. Terrestrial planets. In “Polarimetry of Stars and Planetary Systems”. Kolokolova, L., Hough, J., Lvasseur-Regourd A.-C., Eds. ISBN: 9781107043909, 2015. p.289- 302.

Опубліковані тези доповідей на конференціях:

1. **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

2. 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.