

# Курс «Космічна картографія»

## Лекція 11

### Побудова безшовних мозаїк альбедо поверхні Місяця за даними LROC WAC. Постановка задачі

ver. 2016.12.06

Корохін Віктор Валентинович

[v.v.korokhin@gmail.com](mailto:v.v.korokhin@gmail.com)

Institute of Astronomy,  
Kharkiv VN Karazin National University, Ukraine

2016, Харків

## План лекцій:

1. Дистанційне зондування планет.
2. Основи поверхневої фотометрії.
3. Короткий огляд NASA Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO) і камери WAC.
4. Проблеми існуючих мозаїк, отриманих за даними LROC WAC.
5. Специфіка даних LROC WAC.
6. Постановка задачі.

# **Дистанційне зондування планет**

# Ідея дистанційного зондування планет

Світло від освітлювача (Сонце або лазер) з відомими характеристиками (розподіл енергії по спектру, поляризація) розсіюється поверхнею та/або атмосферою планети



Розсіяне світло змінює свої характеристики  
(Розподіл енергії по спектру, поляризацію і т.д.)



Ми вимірюємо характеристики (зміни) цього світла



Ці зміни залежать від фізичних (оптичних) властивостей розсіювачів, з яких складається поверхня / атмосфера планети



Ми відновлюємо інформацію про фізичні властивості поверхні/атмосфери аналізуючи параметри розсіяного світла

# **Вивчення світла, розсіяного (відбитого) поверхнею/атмосферою планети**

- 1. Фотометрія** - вивчення зміни яскравості поверхні/атмосфери в залежності від змін умов освітлення і спостереження.
- 2. Спектрофотометрія і колориметрія** - вивчення розподілу енергії розсіяного світла по спектру.
- 3. Поляриметрія** - вивчення поляризації випромінювання.

# **Основи поверхневої фотометрії**

## Фотометричні кути

$\vec{N}$  – нормаль до поверхні

$i$  – кут падіння (освітлення)

$e$  – кут відбиття (розсіювання)

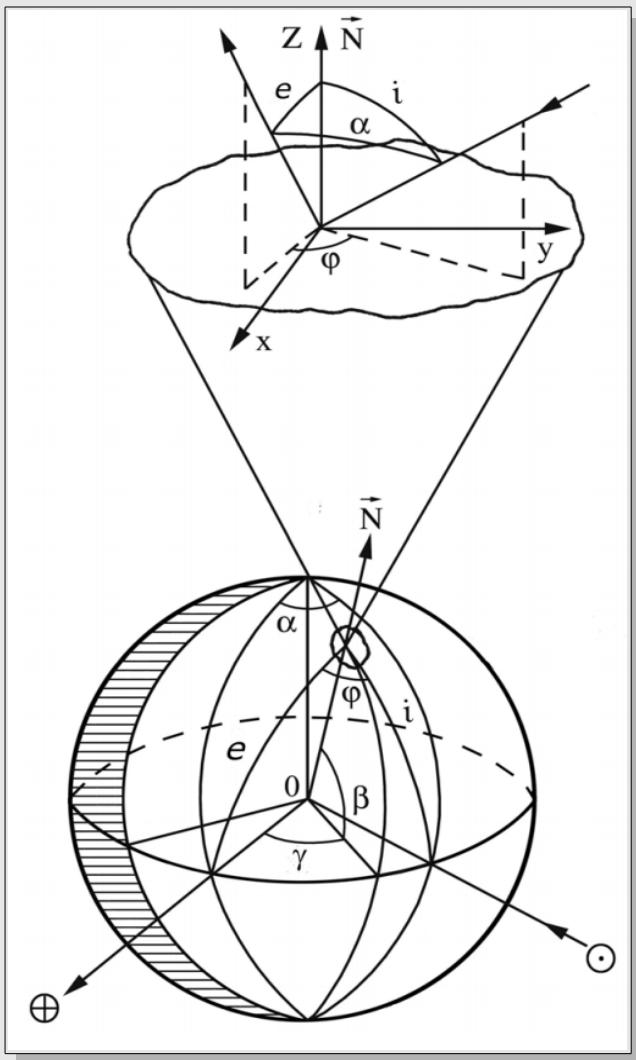
$\phi$  – кут між площинами падіння  
та відбиття

$\alpha$  – кут фази

$\beta$  - фотометрична широта

$\gamma$  – фотометрична довгота

( $\beta, \gamma$  – фотометричні координати)



Набори фотометричні кутів:

$(i, e, \phi)$   $(\alpha, i, e)$   $(\alpha, \beta, \gamma)$

## Основи фотометрії

Світловий потік  $\Phi$ , що розсіюється майданчиком на поверхні Місяця площею  $S$  в напрямку спостерігача в тілесному куті  $\Omega_0$ .

$$\Phi(\alpha, i, e, \lambda) = S \cdot \int_{\Omega_0} I(\alpha, i, e, \lambda) d\Omega. \quad (1)$$

де  $I(\alpha, i, e, \lambda)$  – інтенсивність,  $\lambda$  – довжина хвилі.

$\Phi$  експериментально вимірна. Інтенсивність світла  $I$  [W / m<sup>2</sup>·sr·μm] може бути представлена як

$$I(\alpha, i, e, \lambda) = E_0(\lambda) r_0(\lambda) F(\alpha, i, e, \lambda), \quad (2)$$

де  $E_0(\lambda)$  – нормальна освітленість майданчика,

$r_0(\lambda)$  – нормальний коефіцієнт відбиття на довжині хвилі  $\lambda$ ,

$F(\alpha, i, e, \lambda)$  - фотометрична функція.

Поверхнева яскравість майданчика

$$B(\alpha, i, e, \lambda) = I(\alpha, i, e, \lambda) / \cos e, \quad (3)$$

## Коефіцієнт відбиття, альбедо

Коефіцієнт відбиття майданчика

$$r(\alpha, i, e, \lambda) = B(\alpha, i, e, \lambda) / E_0(\lambda) = I(\alpha, i, e, \lambda) / (E_0(\lambda) \cos e). \quad (4)$$

Зі спостережень зручніше отримувати видиме альбедо (фактор яскравості)

$$A(\alpha, i, e, \lambda) = \pi r(\alpha, i, e, \lambda), \quad (5)$$

**Фізичний сенс видимого альбедо:** це коефіцієнт відбиття поверхні за даних умов освітлення і спостереження віднесений до коефіцієнту відбиття нормально освітленій Ламбертовської поверхні ( $r_0 = 1/\pi$ ).

"Автомобіль вже чекав на нас, вібруючи від ледь стримуваної енергії; його альбедо було настільки високим, а виблискуюче в позолоті сонце настільки яскравим, що мені довелося прищуритися, щоб не осліпнути".

«Нові пригоди Сталевого Щура» Гаррі Гаррісон

## Фотометрична функція

Видиме альбедо поверхні може бути виражено через фотометричну функцію  $F(\alpha, i, e, \lambda)$

$$A(\alpha, i, e, \lambda) = A_0 F(\alpha, i, e, \lambda), \quad (6)$$

де  $A_0$  – альбедо при стандартних умовах освітлення/спостереження, наприклад,  $A_0 = A(0,0,0)$ .

Фотометрична функція може бути факторізована

$$F(\alpha, i, e, \lambda) = f(\alpha, \lambda) D(\alpha, i, e, \lambda), \quad (7)$$

де  $f$  – фазова функція, а  $D$  – дискова функція.

**Предметом дослідження в фотометрії є:**

- 1) розподіл  $A_0$  по диску планети;
- 2) поведінка фотометричної функції для різних ділянок.

## Дискова функція

Місяць має в першому наближенні форму кулі.

Дискова функція описує закон розподілу яскравості по диску Місяця (наприклад, описує **падіння яскравості до термінатора**, або **зміну яскравості ділянки в залежності від її локального нахилу**), і залежить від  $i$  та  $e$  ( $\beta$  та  $\gamma$ ).

Дискова функція описує, як виглядала б Місяць, якби не було варіацій альбедо по її поверхні.

Дискова функція залежить і від кута фази, але ця залежність описує тільки нормувальний коефіцієнт для всього диска.

Дискова функція дозволяє приводити яскравість всіх точок на диску до стандартних умов ( $i = e = \alpha/2$ ):

$$A_{\text{eq}}(\alpha) = A(\alpha, \beta, \gamma) / D(\alpha, \beta, \gamma), \quad (8)$$

де  $A_{\text{eq}}(\alpha)$  - еквігональне альбедо.

## Дискова функція Акімова

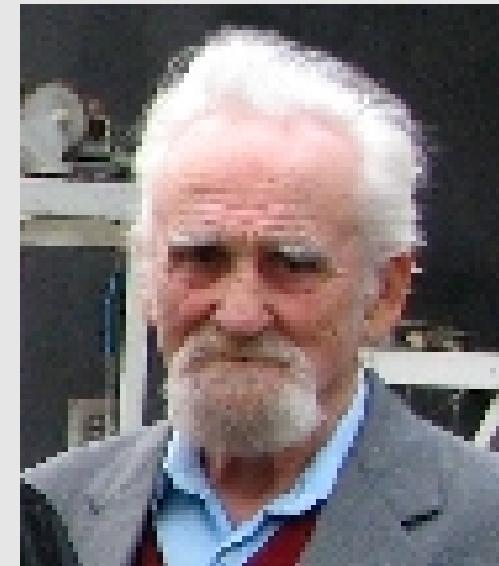
Найбільш адекватна дискова функція – формула Акімова:

$$D(\alpha, \beta, \gamma) = \cos(\alpha / 2) (\cos \beta)^{v\alpha / (\pi - \alpha)} \cos[(\gamma - \alpha / 2)\pi / (\pi - \alpha)] / \cos \gamma, \quad (9)$$

де  $v$  – коефіцієнт шорсткості ( $v = 0.34$  для морів і  $v = 0.52$  для материків).

Функція Акімова описує розподіл яскравості по диску Місяця значно точніше, ніж функції Lommel-Zeeliger, Minnaert і McEwen і вона значно простіше функції Нарке.

Теор. дискова функція виведена Акімовим в припущені граничної шорсткості поверхні. Пізніше Шкуратов Ю.Г. вивів цю формулу, виходячи з концепції фрактало-подібної структури поверхні.

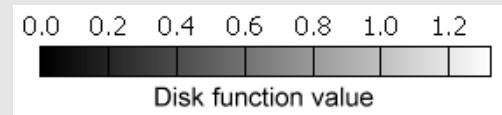
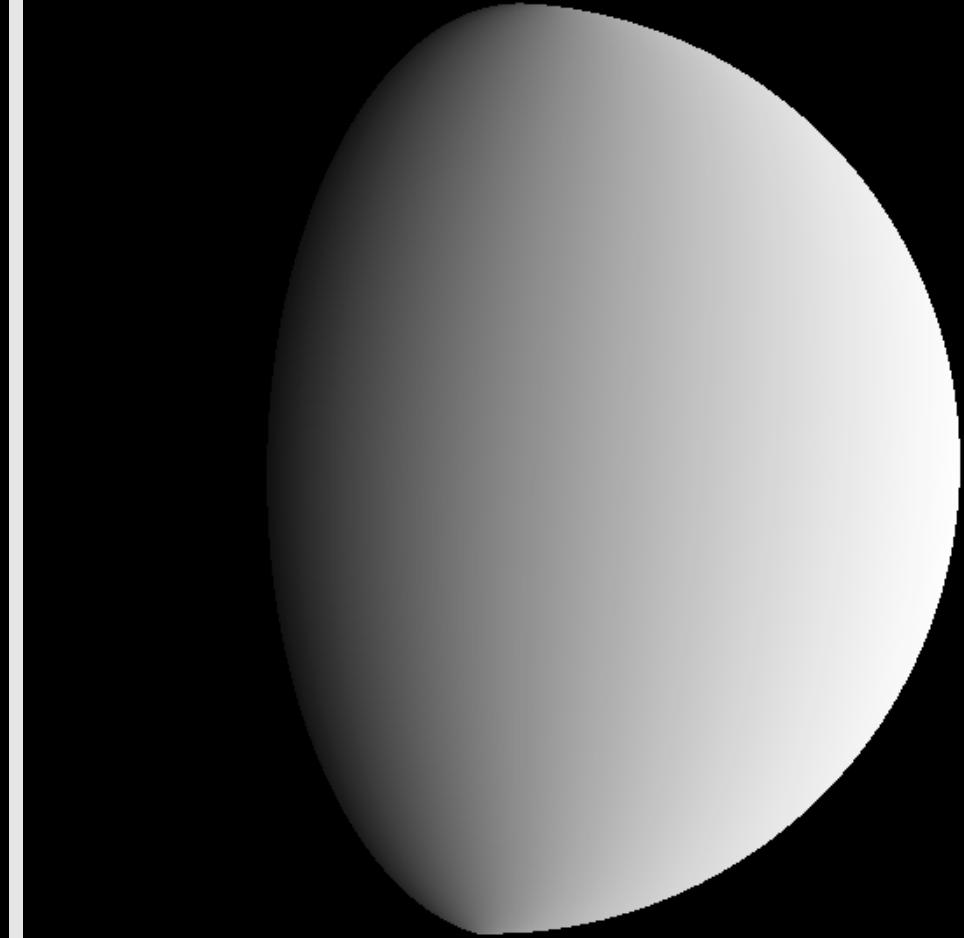


Л.О. Акімов

# Дискова функція



Видиме альбедо



$\alpha = -63.6^\circ$

Дискова функція

## Еквігональне альбедо



Видиме альбедо



Еквігональне альбедо



$\alpha = -63.6^\circ$

## Фазова функція місячної поверхні $f(\alpha)$

$f(\alpha)$  залежить тільки від  $\alpha$ .

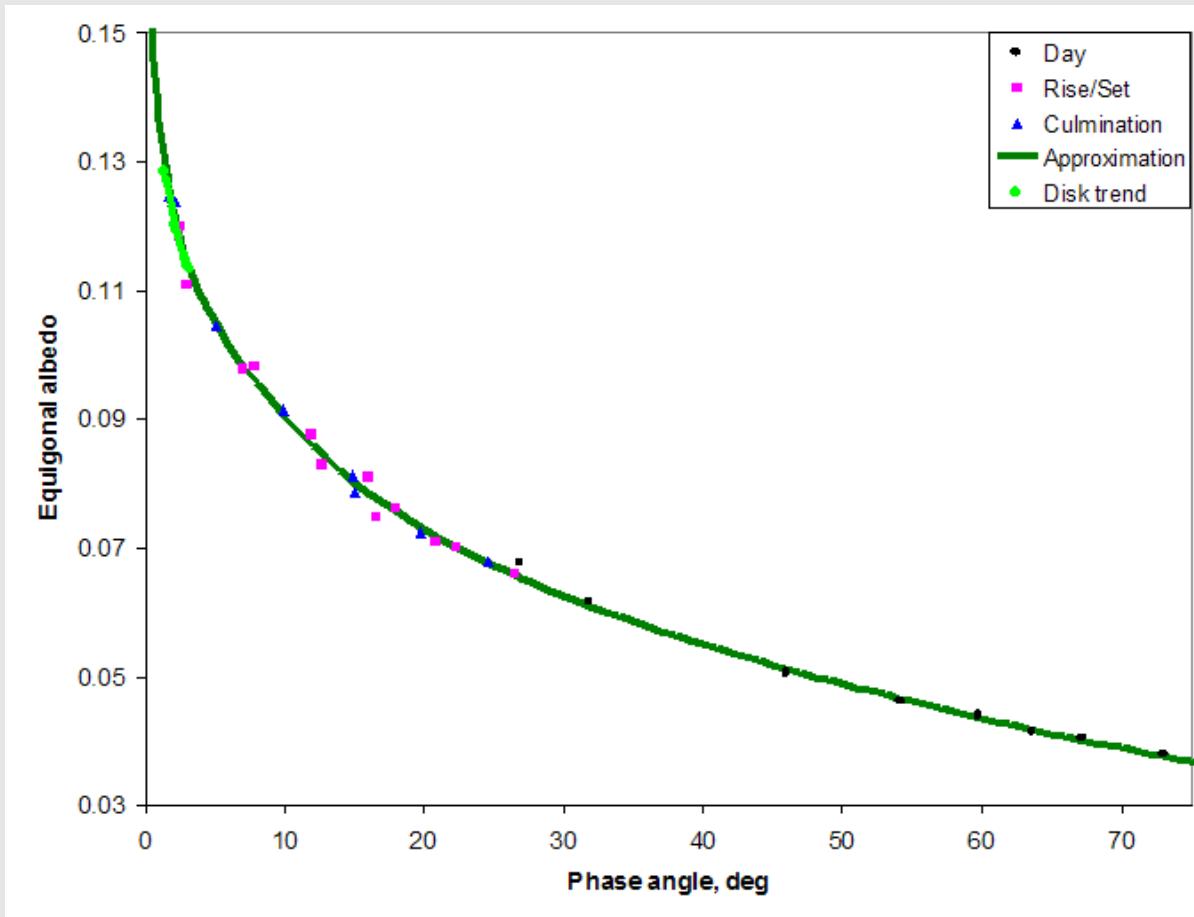
$f(\alpha)$  не залежить від  $i$  та  $e$  ( $\beta$  та  $\gamma$ ).

$f(\alpha)$  описує, як яскравість даного майданчика змінюється з кутом фази.

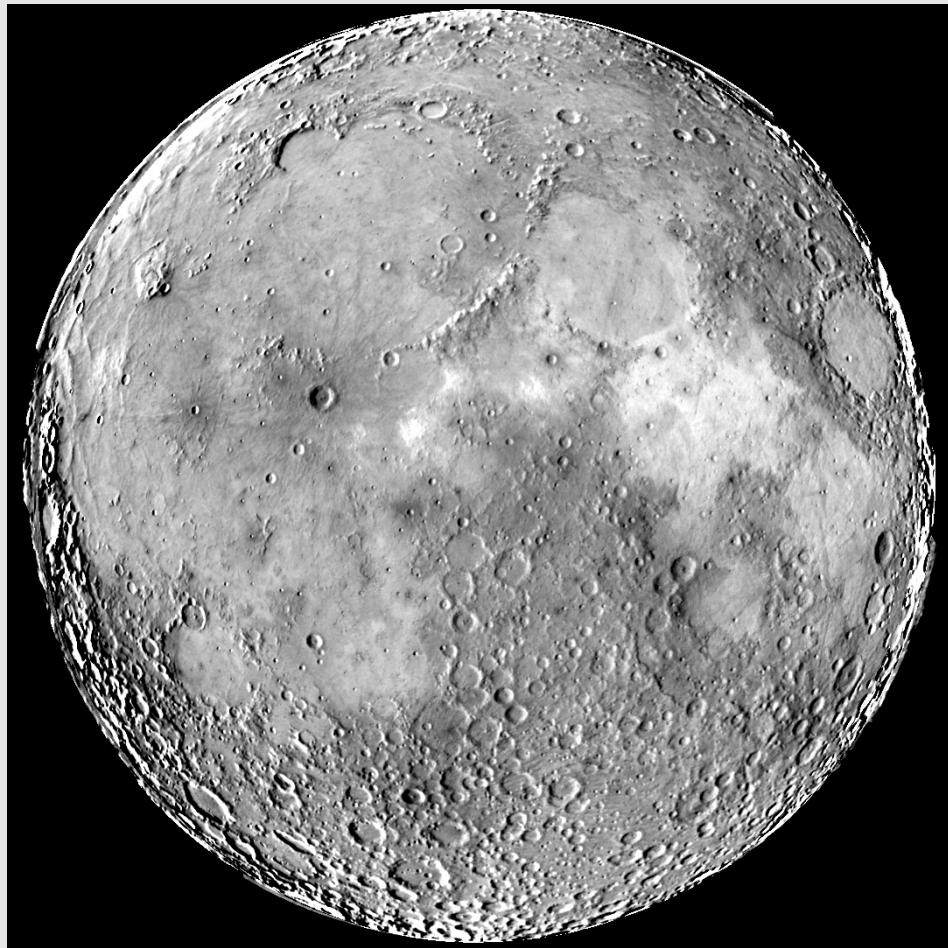
**Як показують спостереження, лабораторні вимірювання та теоретичне моделювання,  $f(\alpha)$  залежить від фізичних і оптичних властивостей поверхні.**

## Фазова функція яскравості місячної поверхні, отримана за наземними спостереженнями

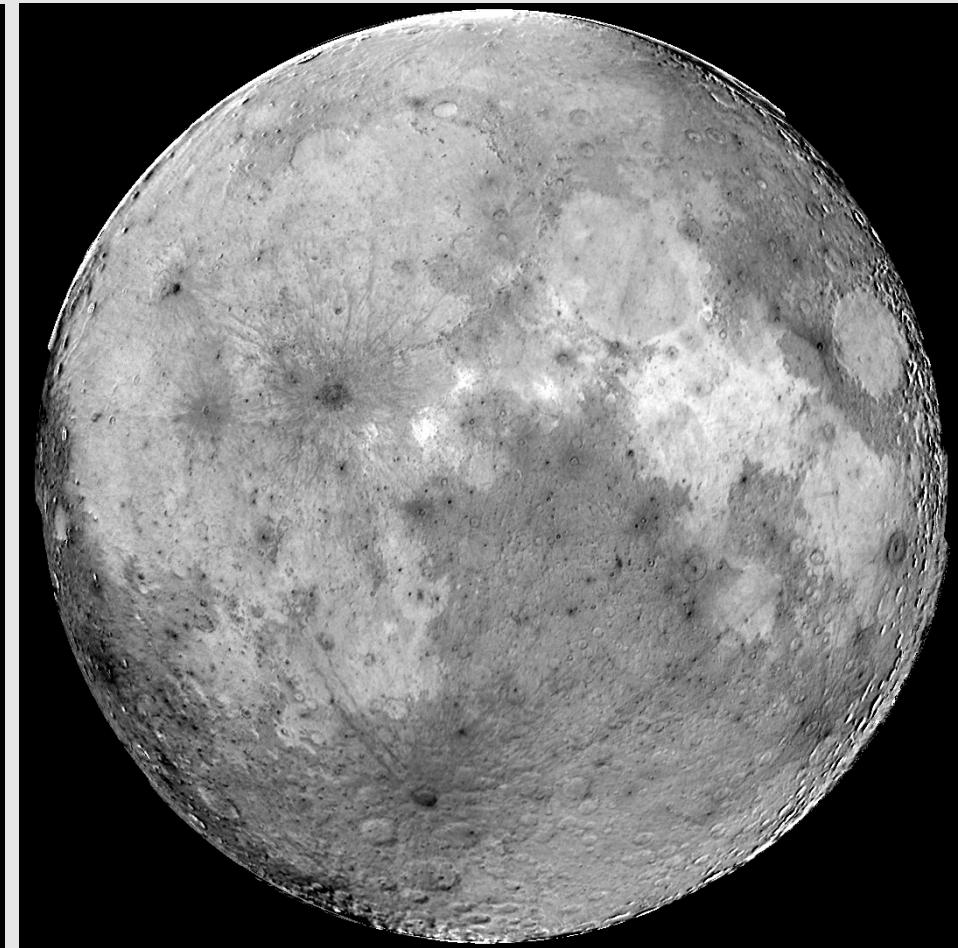
$$f(\alpha) = m_1 e^{-\mu_1 \alpha} + m_2 e^{-\mu_2 \alpha} + m_3 e^{-\mu_3 \alpha}, \quad (10)$$



## Картування параметрів фазової функції



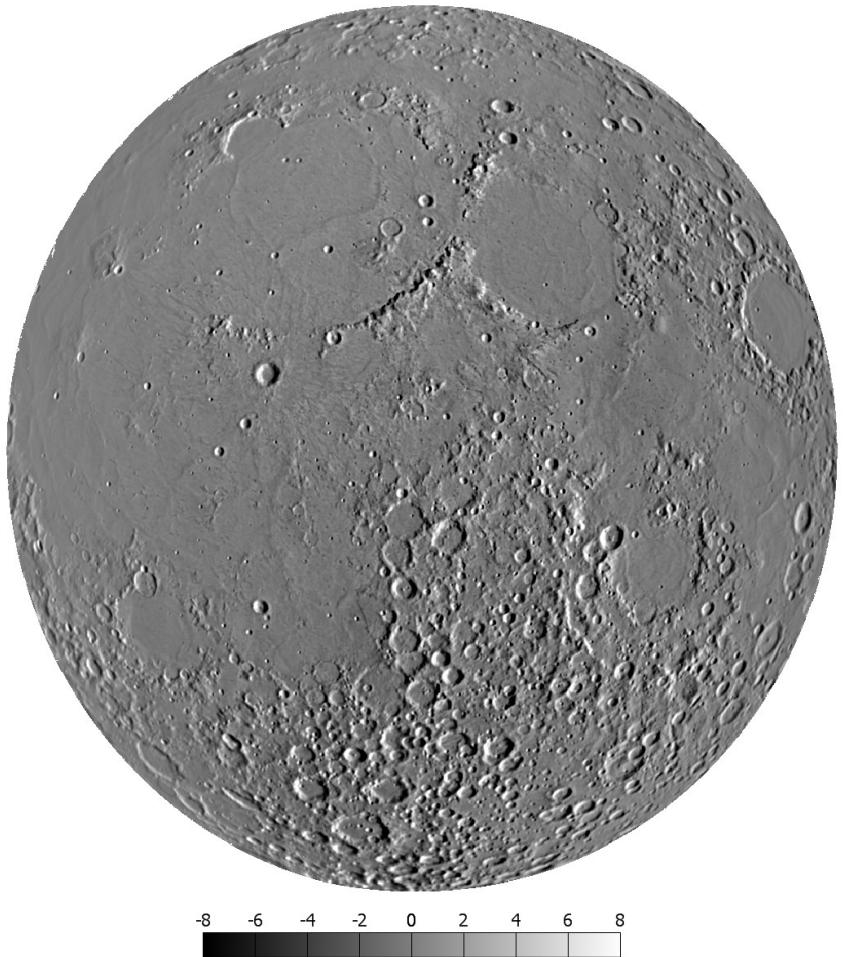
До урахування впливу рельєфу



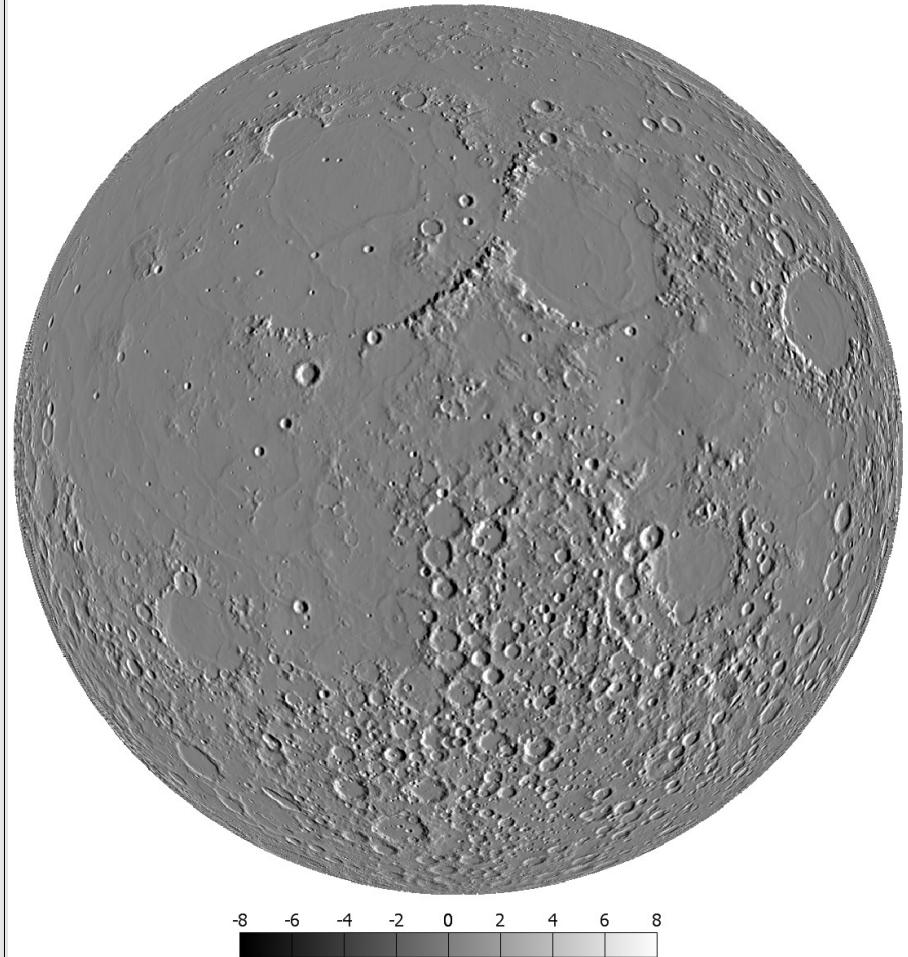
Після урахування

Параметр нахилу фазової функції  $\mu$

# Карта локальних нахилів поверхні

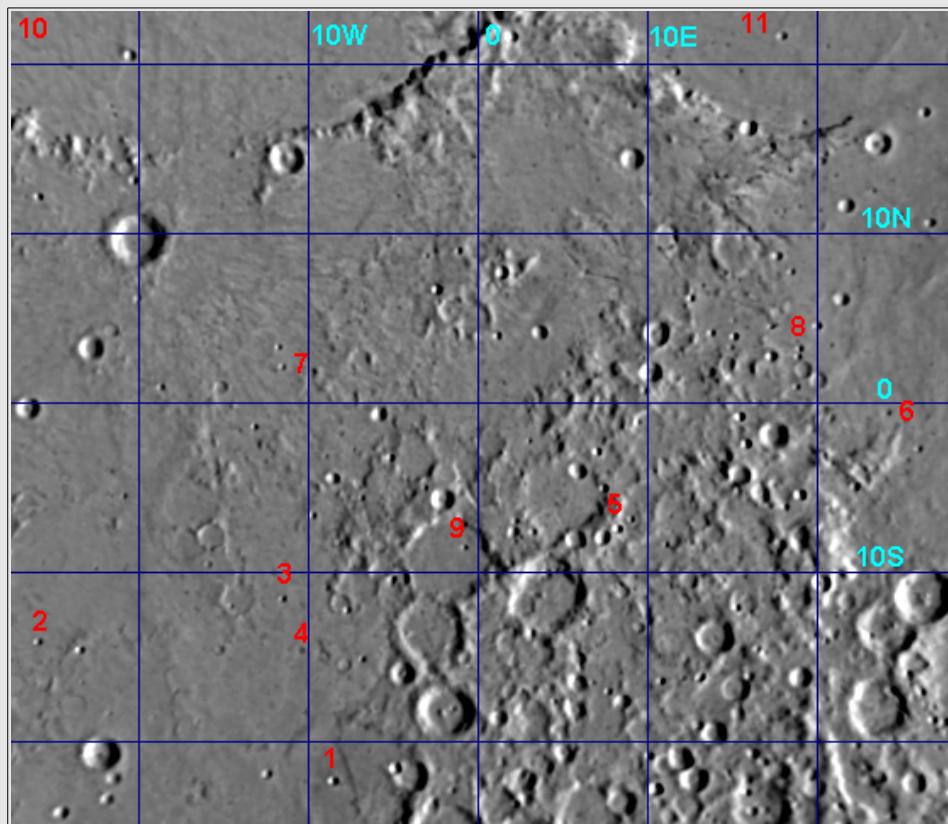


Наша карта  $r_l$  (фотоклінометрія)

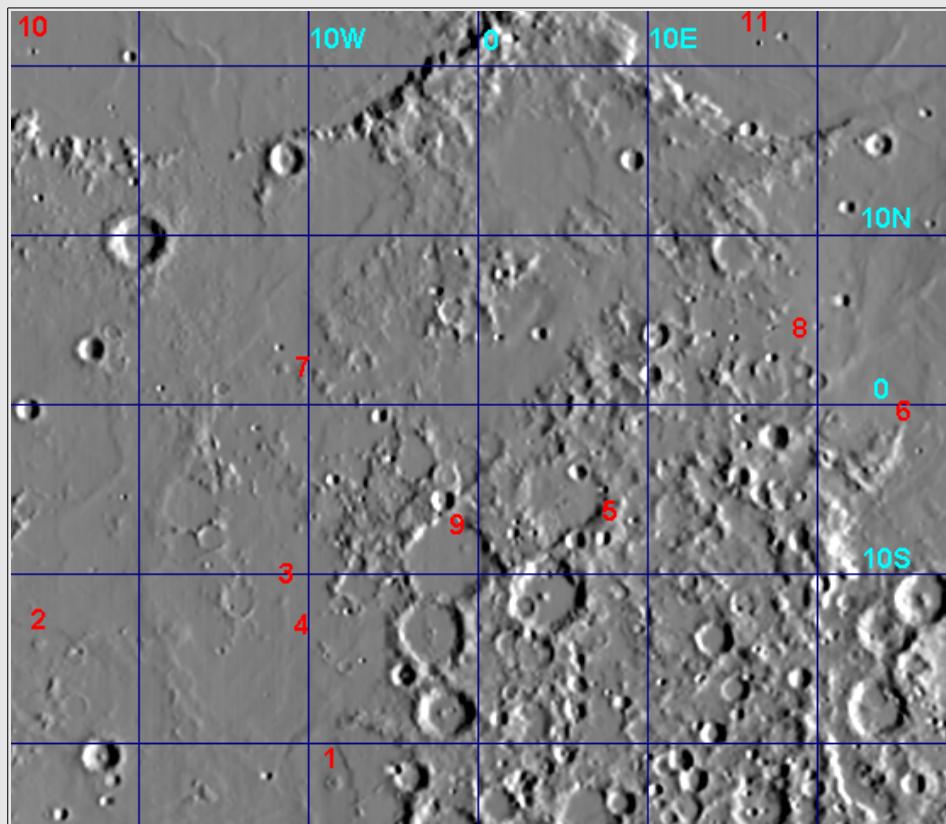


Карта  $r_l$  за даними SELENE LALT

# Карта локальних нахилів поверхні. Порівняння з космічними даними

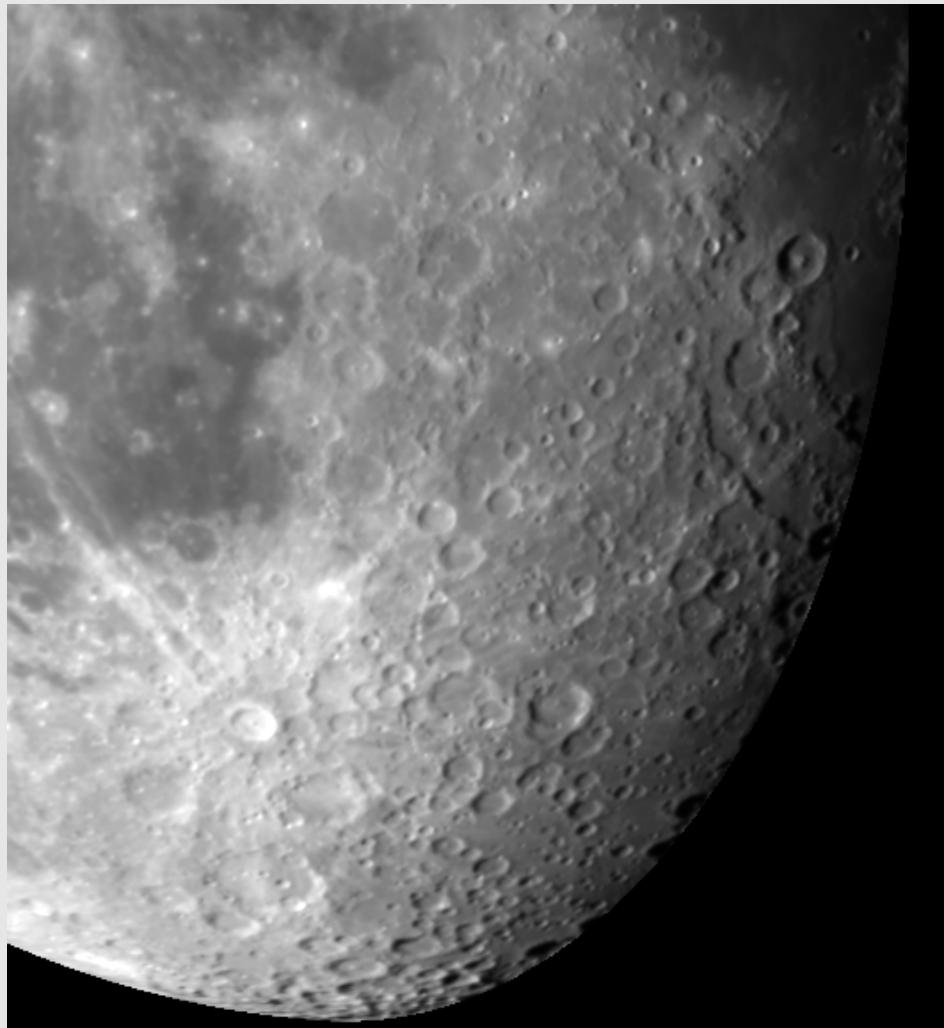


Наша карта  $r_l$  (фотоклінометрія)

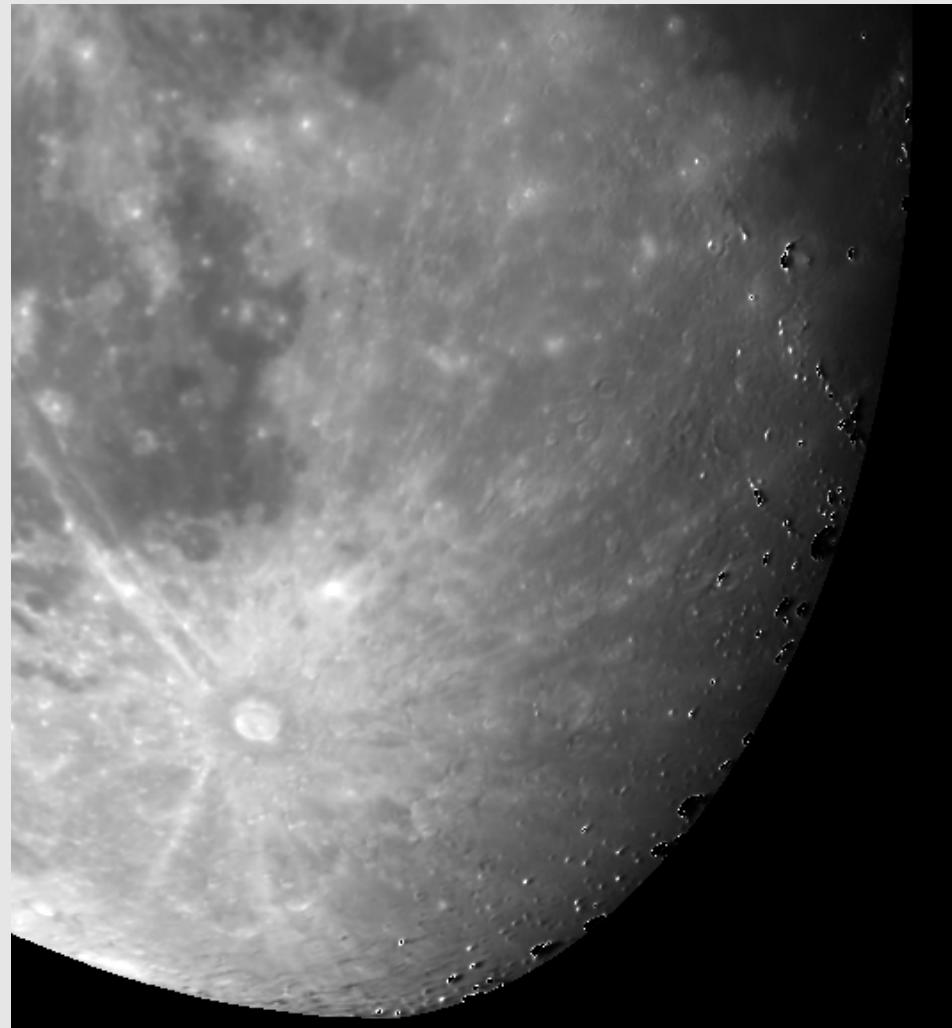


Карта  $r_l$  за даними SELENE LALT

## Вплив рельєфу на фотометричні дані



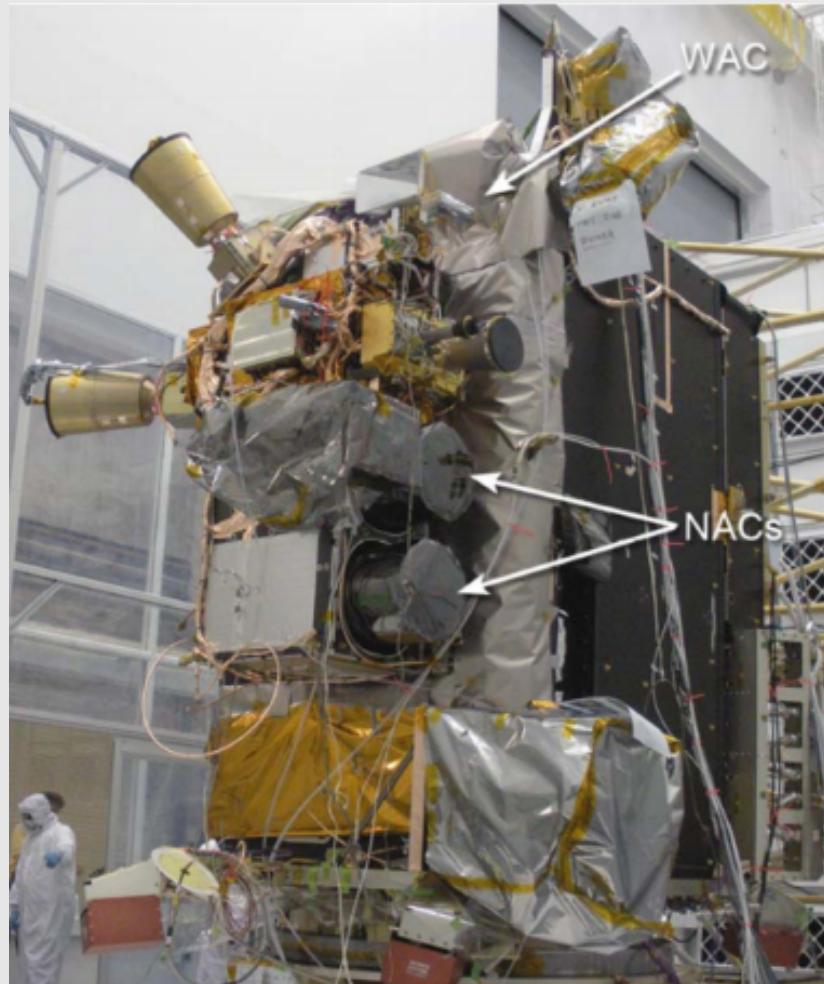
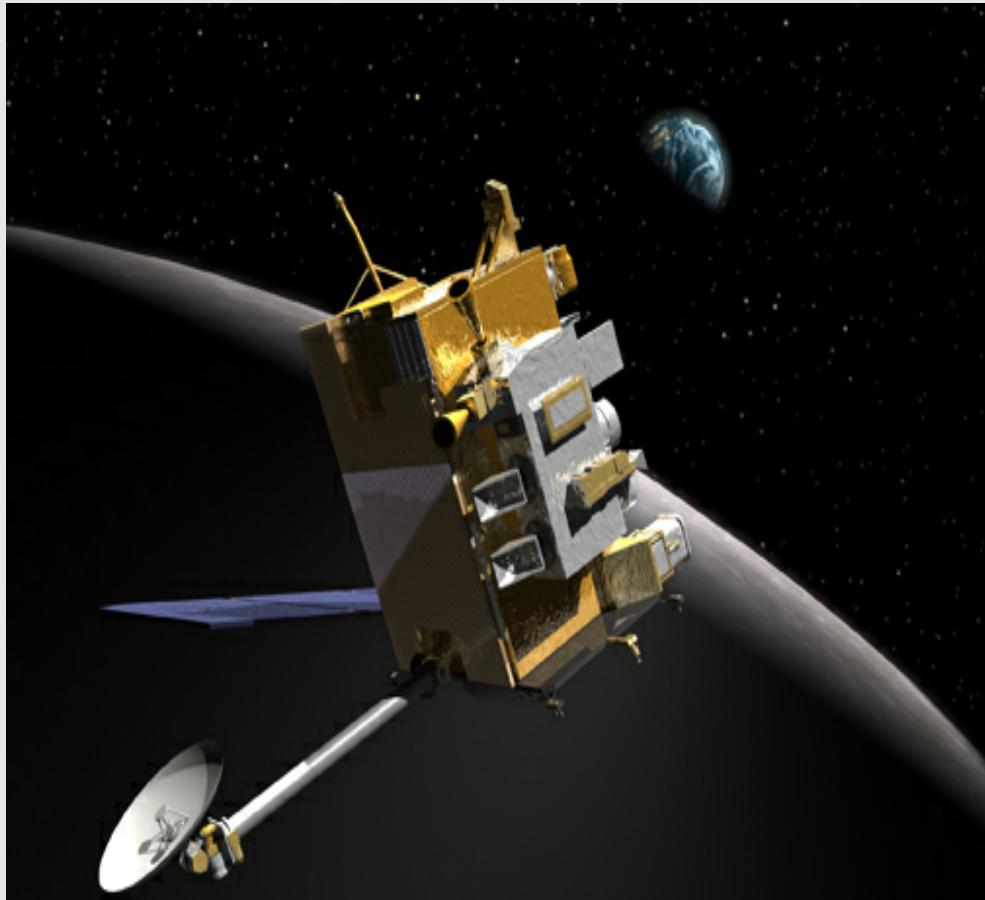
До урахування



Після урахування

# **NASA Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO)**

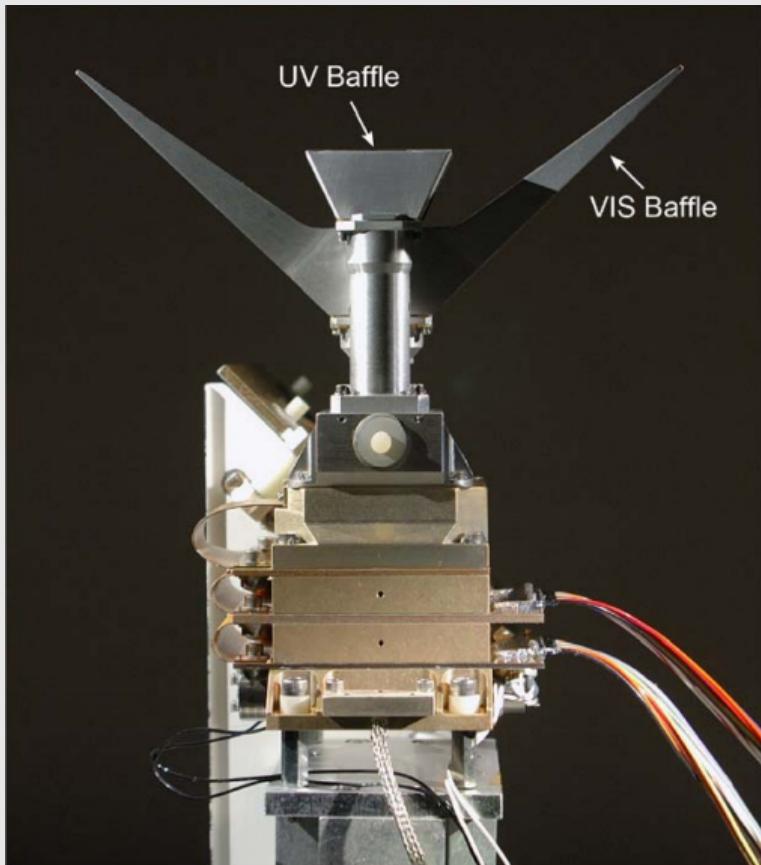
# NASA Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO)



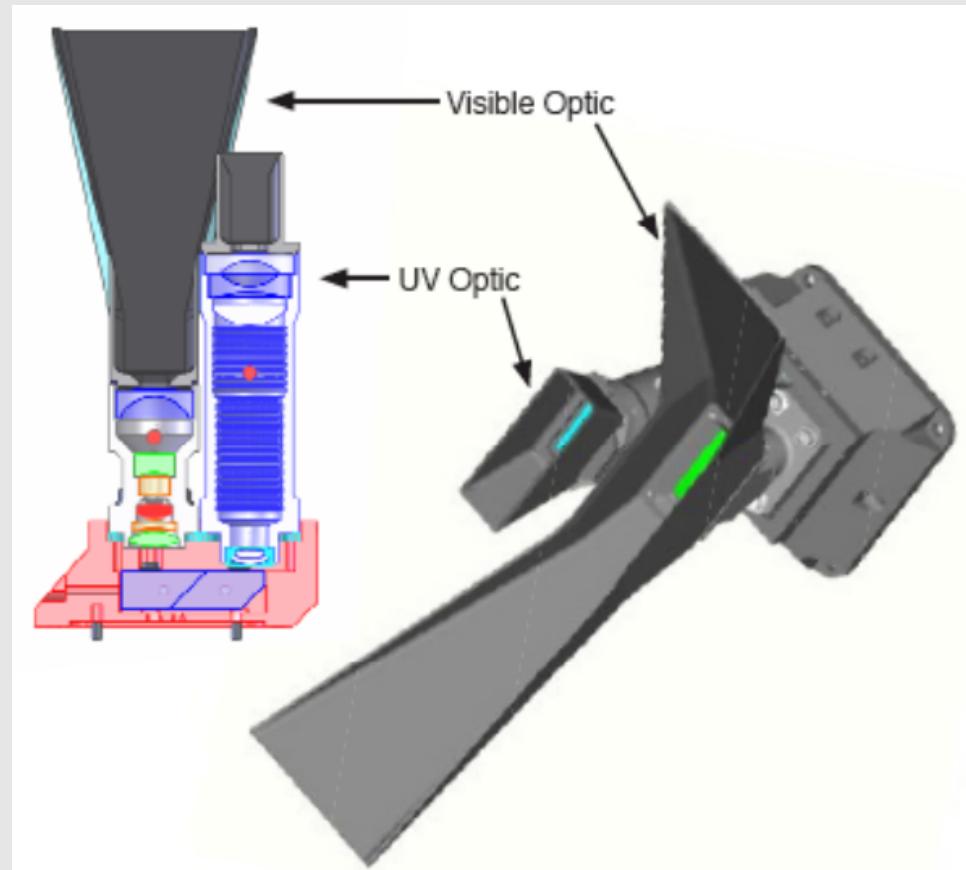
Запуск: 18 червня 2009 р Atlas V.

На даний час випущено 27 релізів EDR та CDR (09.09.2016)

# Wide Angle Camera (WAC)



Загальний вигляд WAC



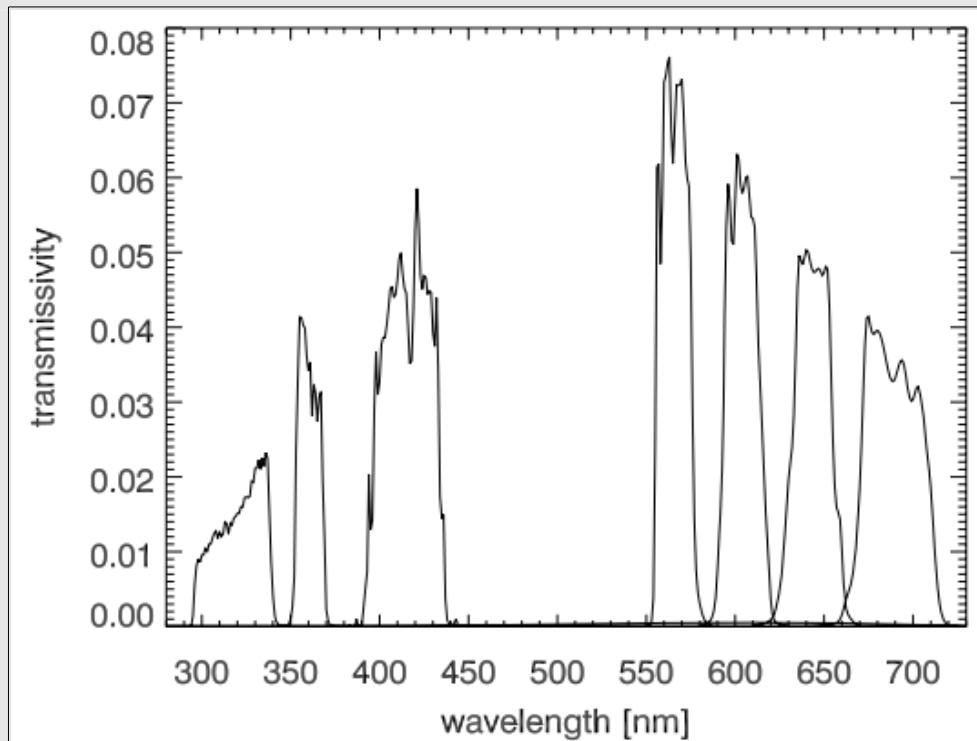
Оптика WAC

# Загальні характеристики камери WAC

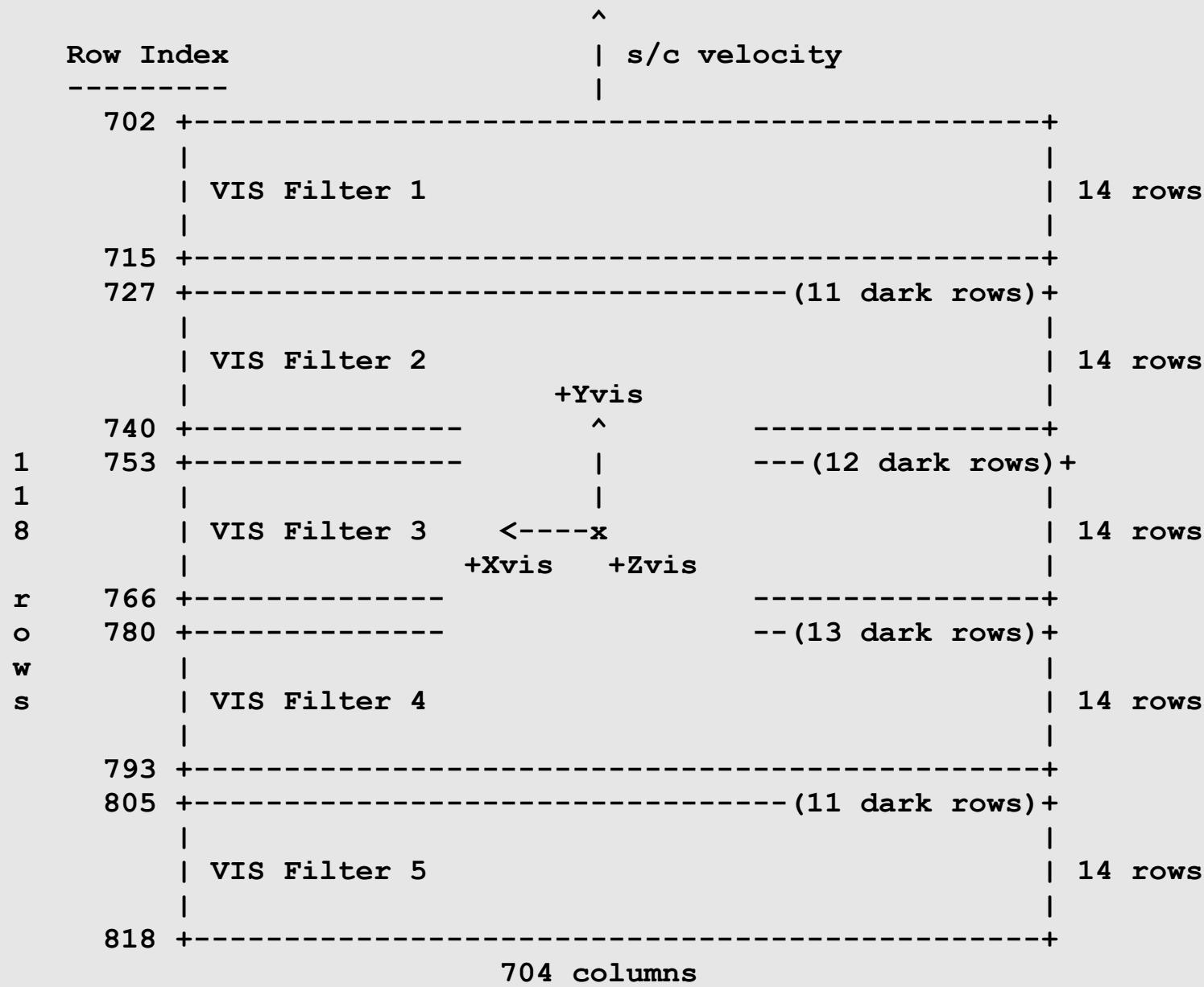
Parameter	Visible	UV
FOV (monochrome/color)	91.9°/61.4°	59.0°
IFOV (nadir)	1.498 mrad	7.672 mrad ( $4 \times 4$ binning)
image scale (nadir, 50-km altitude)	74.9 m/pixel	383.5 m/pixel
image frame width monochrome	104.6-km	—
image frame width 7-band color	59.6-km	56.8-km
image format monochrome	1024 samples $\times$ 14 lines	—
image format color (for each band)	704 samples $\times$ 14 lines	128 samples $\times$ 4 lines (binned)
f/#	5.052	5.65
focal length	6.013 mm	4.693 mm
system MTF (Nyquist)	0.37	
Gain	$25.9 \pm 0.7 \text{ e}^-/\text{DN}$	
detector noise	$66 \pm 4 \text{ e}^-$	
detector full-well	$46,100 \pm 3600 \text{ e}^-$	
SNR (at 1000 DN)	> 150	
radiometric accuracy*	1% relative, 10% absolute	
detector digitization	11 bit, encoded to 8 bit	
data link to SCS	RS422, 2.5 Mbps	
temperature sensors	1	
lossless compression ratio	1.7:1	
Voltage	$28 \pm 7 \text{ V DC}$	
peak power	2.7 W	
orbit average power	2.6 W	
Mass	0.9 kg	
volume (width $\times$ length $\times$ height)	15.8 cm $\times$ 23.2 cm $\times$ 32.3 cm (incl. radiator)	

# Фотометричні смуги

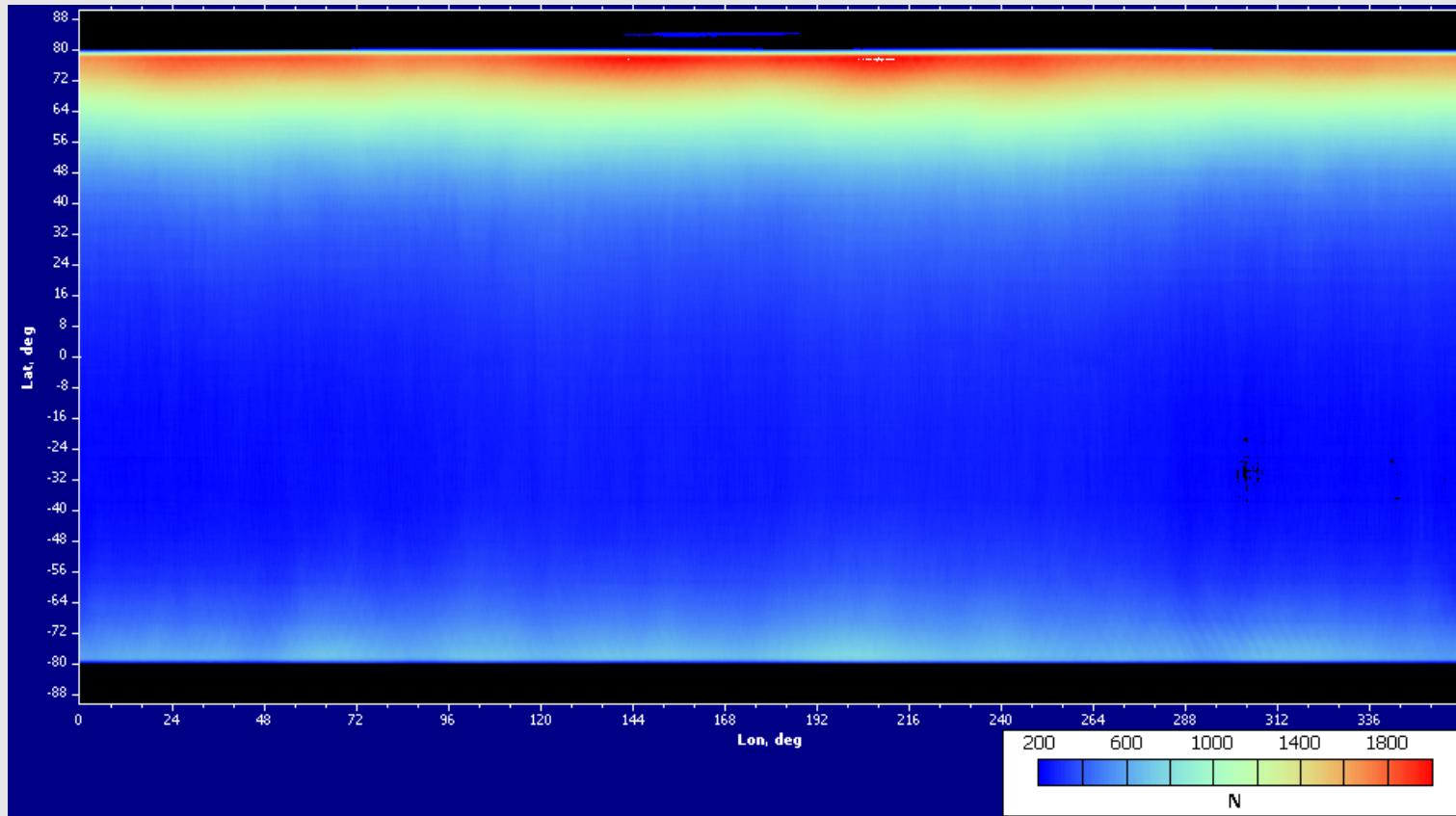
Band name	$\lambda_{eff}$ [nm]	FWHM [nm]	RC [(W/m <sup>3</sup> /sr)/(DN/s)]
320 nm	321	32	865
360 nm	360	15	918
415 nm	415	36	3727
565 nm	566	20	3310
605 nm	604	20	3377
645 nm	643	23	3273
690 nm	689	39	2612



# Розташування фільтрів на матриці



# Покриття поверхні Місяця спостереженнями камерою LROC WAC на кінець 2015 р.

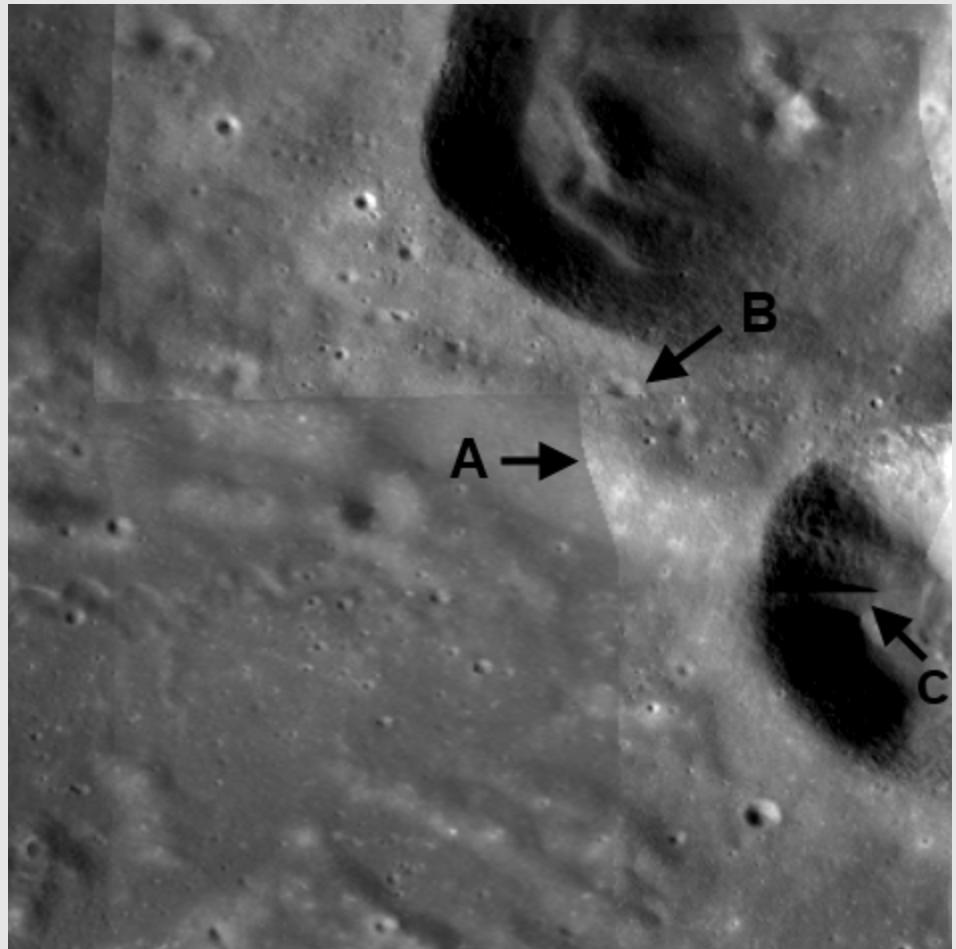


На даний час випущено 27 релізів EDR та CDR (09.09.2016)

Камера LROC WAC надає унікальний набір даних  
для вивчення фотометричної функції місячної поверхні  
та вирішення завдань дистанційного зондування Місяця.

## **Проблеми існуючих мозаїк, отриманих за даними LROC WAC**

# Проблеми існуючих мозаїк, отриманих за даними LROC WAC



Мозаїка LROC WAC RDR



Фазове відношення

Необхідно грамотно проводити фотометричну редукцію  
та орторектіфікацію даних LROC WAC!

# Проблеми існуючих мозаїк, отриманих за даними LROC WAC

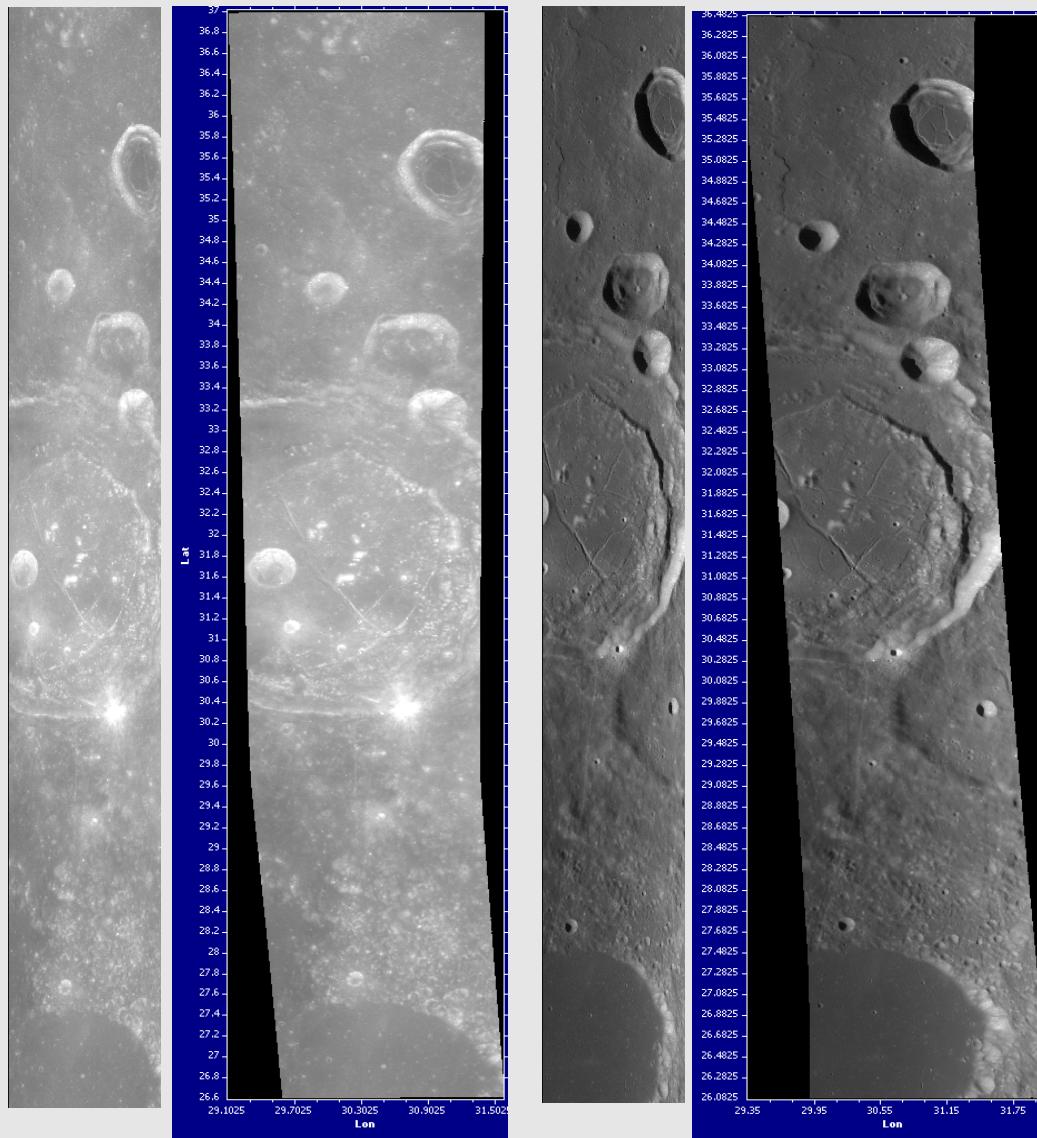


Нова версія мозаїки LROC WAC RDR

1. Присутність швів
2. Сильний вплив рельєфу

**Специфіка даних LROC WAC,  
яку треба враховувати при  
побудуванні безшовних мозаїк альбедо**

# Специфіка даних LROC WAC: зміна параметрів проекції в межах одного зображення



Перетворення проекції та зшивання під-кадрів LROC WAC

**Вихідна проекція:**

похила (коса) перспективна  
(Tilted Perspective projection).

**Результатуюча проекція:**

Циліндрична (equirectangular projection). Крок  $0.0025^\circ$ .

Використовується **Бібліотека Планетної Картографії xIRIS**.

Параметри проекції безперервно змінюються уздовж орбіти.

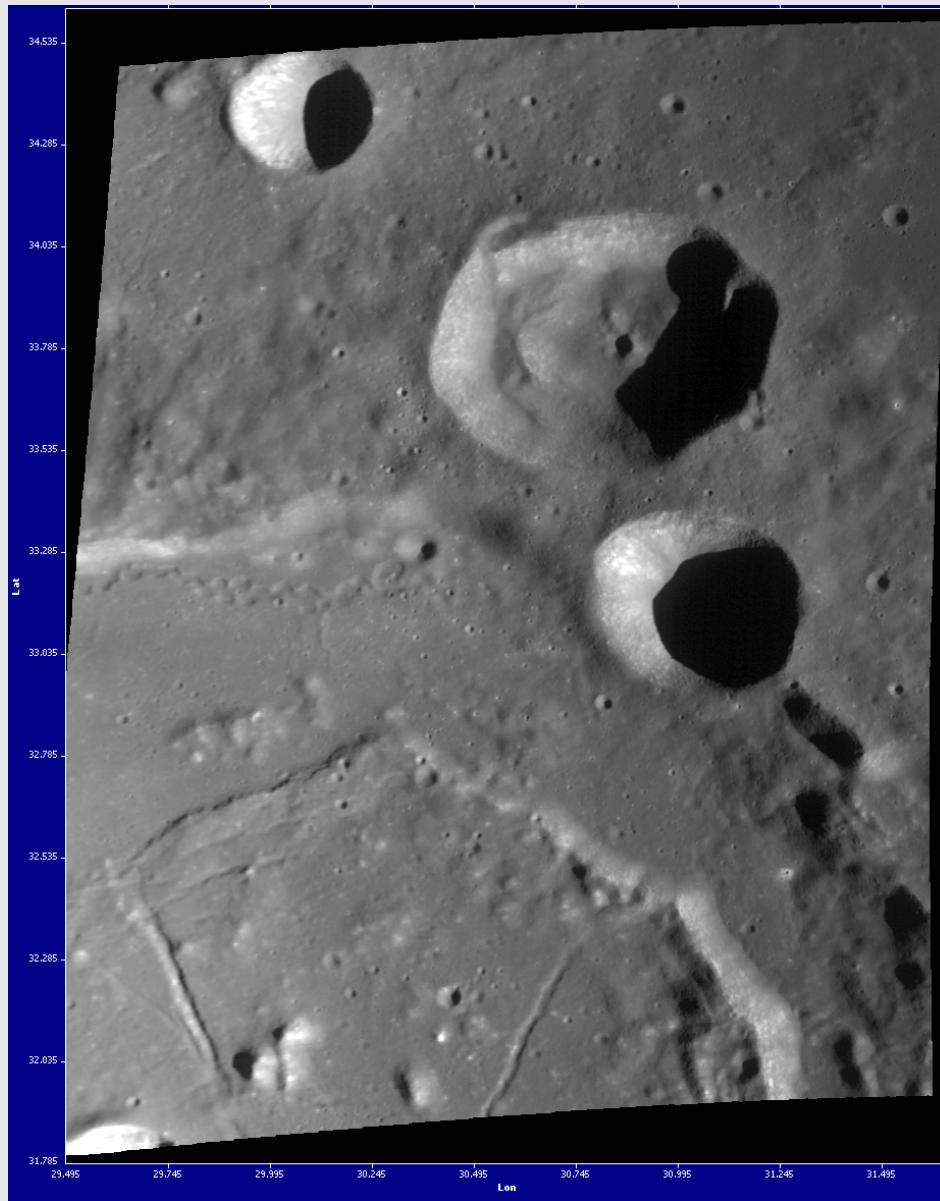
Ефемеридні дані з ядер **SPICE**.

Проекція приводиться до  
 $R_{\text{moon}} = 1737.400$  км

# Специфіка даних LROC WAC: сильна дисторсія оптики



Вихідні під-кадри в ЦП



Зшиті під-кадри в ЦП

# Специфіка даних LROC WAC: сильний вплив паралакса



689 нм

566 нм

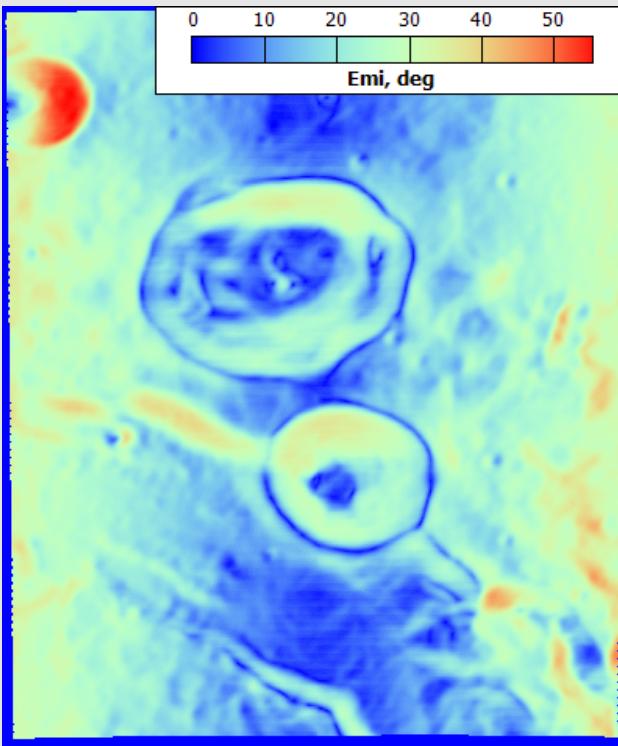


# Специфіка даних LROC WAC: сильне зміна фотометричних умов в межах кадру



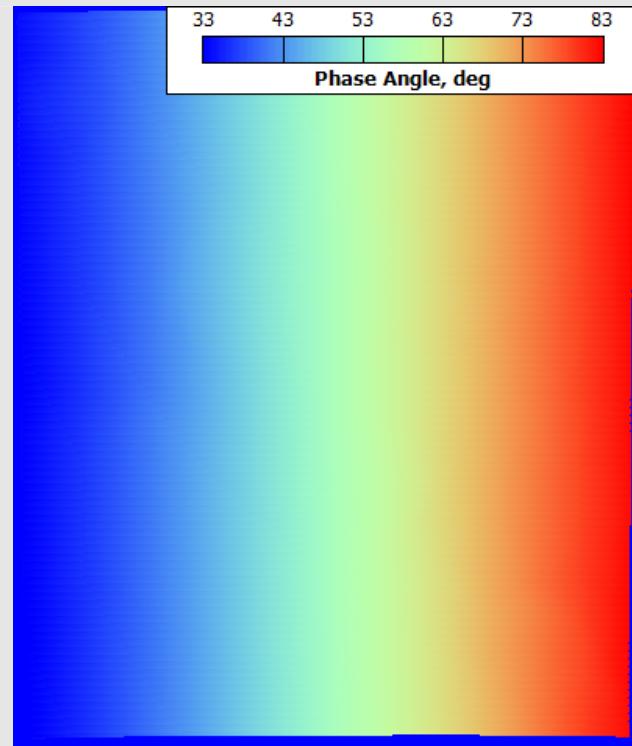
Альбедо

Урахування паралаксів



Кут відбиття  
 $\Delta e = 60^\circ!$

Дискова функція



Фазовий кут.  
 $\Delta \alpha = 60^\circ!$

Фазова функція

## **Постановка задачі**

**Розробити алгоритм побудування безшовних мозаїк за даними камери LROC WAC, який буде враховувати специфіку цих даних.**

## **Список джерел**

- 1. Robinson, M.S. et al., 2010.** Lunar Reconnaissance Orbiter (LROC) Instrument Overview, Space Sci Rev, 150, 81-124.
- 2. LROC EDR/CDR DATA PRODUCT SOFTWARE INTERFACE SPECIFICATION:**  
[http://lroc.sese.asu.edu/data/LRO-L-LROC-3-CDR-V1.0/LROLRC\\_1019/DOCUMENT/LROCSIS.PDF](http://lroc.sese.asu.edu/data/LRO-L-LROC-3-CDR-V1.0/LROLRC_1019/DOCUMENT/LROCSIS.PDF)
- 3. LROC EDR/CDR/RDR ARCHIVE VOLUME SOFTWARE INTERFACE SPECIFICATION:**  
[http://lroc.sese.asu.edu/data/LRO-L-LROC-3-CDR-V1.0/LROLRC\\_1019/DOCUMENT/ARCHSIS.PDF](http://lroc.sese.asu.edu/data/LRO-L-LROC-3-CDR-V1.0/LROLRC_1019/DOCUMENT/ARCHSIS.PDF)
- 4. E.V. Shalygin, Yu.I. Velikodsky, V.V. Korokhin, and O.S. Shalygina.** Formulas of the Perspective Cartographic Projection for Planets and Asteroids of Arbitrary Shape:  
<http://www.astron.kharkov.ua/dslpp/cartography/cartography.pdf>
- 5. E.V. Shalygin, Yu.I. Velikodsky, and V.V. Korokhin.** Formulas of the Perspective Cartographic Projection for Planets and Asteroids of Arbitrary Shape:  
<http://www.astron.kharkov.ua/dslpp/cartography/>

- 6. E.V. Shalygin, Yu.I. Velikodsky, and V.V. Korokhin.** Formulas of the Perspectice Cartographic Projection for Planets and Asteroids of Arbitrary Shape. // Lunar and Planet. Sci. 34-rd. Abstract #1946. 2003. LPI. Houston: <http://www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc2003/pdf/1946.pdf>
- 7. Korokhin, V.V., Velikodsky, Yu.I., Shalygin, E.V., Shkuratov, Yu.G., Kaydash, V.G., Gorden, V,** Retrieving lunar topography from multispectral LROC images. Planetary and Space Science, (2014), <http://dx.doi.org/10.1016/j.pss.2014.01.008>.
- 8. Korokhin, V., Shkuratov, Y., Kaydash, V., et al.,** 2016. Characterization of a photometric anomaly in lunar Mare Nubium. Planet. Space Sci. 122, 70–87. doi:10.1016/j.Pss.2016.01.011.

**To be continued ...**