



Филиал АО «РКЦ «Прогресс» - НПП «ОПТЭКС»



Абсолютная радиометрическая калибровка аппаратуры МКА АИСТ-2Д по лунным полигонам

А.А. Никитин, В.О. Прасолов, В.Е. Квитка, А.С. Забиякин

Радиометрическая калибровка



Полетная радиометрическая калибровка мультиспектральной оптико-электронной аппаратуры (ОЭА) ДЗЗ повышает точность информации в спектральных каналах при измерении излучения, отражённого от конкретной области Земли.

Цели работы:

- Поиск и отбор эталонных участков Луны на калибровочных снимках для проведения абсолютной радиометрической калибровки.
- Подтверждение возможности радиометрической калибровки аппаратуры ДЗЗ среднего и высокого разрешения по однородным участкам Луны.

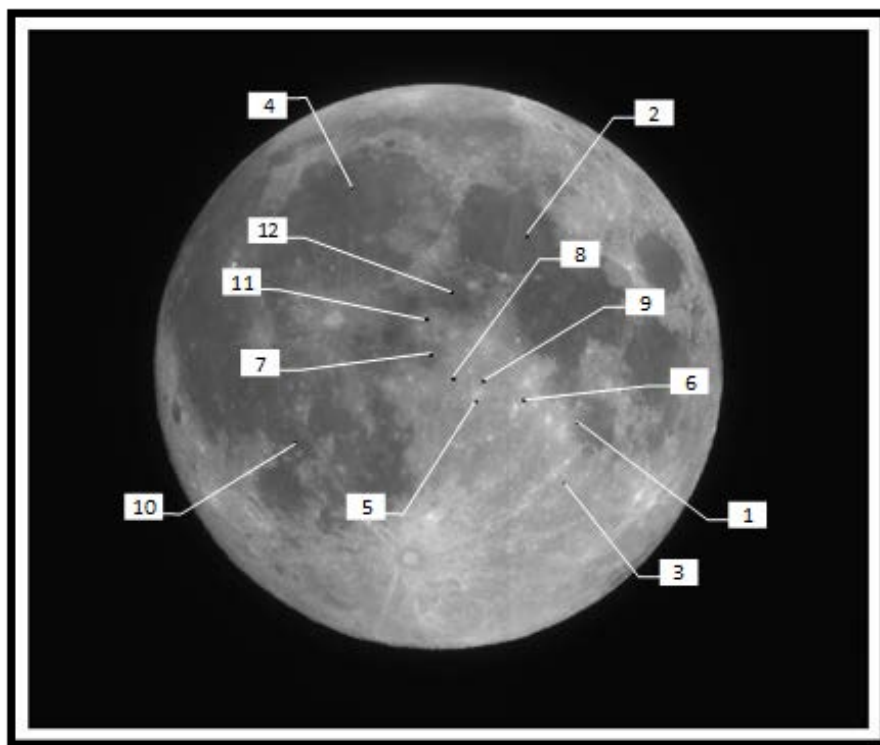
Радиометрическая калибровка



Задачи работы:

- Отбор однородных участков лунной поверхности (критерии и свойства);
- Разработка метода поиска эталонных участков на снимке с помощью опорных кратеров;
- Разработка алгоритма выбора пикселей внутри участка на изображении;
- Определение эффективной чувствительности аппаратуры на примере МКА «АИСТ-2Д» при разных фазовых условиях;
- Пересчёт спектральной плотности энергетической яркости при углах фазы в диапазоне от 2 до 20 градусов.

Объекты для проведения калибровки



Номер полигона	Широта, градусы	Долгота, градусы
1	14,8S	30,1E
2	24,2N	22,9E
3	27,8S	28,4E
4	39,6N	18,1W
5	9S	7,9E
6	9,5S	18E
7	1,3N	0,5W
8	4S	3,7E
9	4,9S	9,7E
10	14,5S	31,9W
11	8,5N	0,7W
12	13,6N	4,8E

- Пространственное разрешение на поверхности Луны аппаратом АИСТ-2Д : **3,5 км/пиксель**;
- Полигоны размер: **20 км на 20 км**;
- Темновой сигнал: **3% от максимального сигнала**.

Однородность полигонов



Номер полигона (СГСК)	Спектральный диапазон, мкм	Средний сигнал в ур. АЦП и СКО					
		Угол фазы от 2° до 7°		Угол фазы от 7° до 12°		Угол фазы от 12° до 40°	
		Уср	СКО	Уср	СКО	Уср	СКО
Полигон 2 (24,2N; 22,9E)	0,61-0,70	374	3	286	3	226	3
	0,53-0,60	436	3	320	3	243	3
	0,45-0,52	290	2	197	2	177	2
Полигон 3 (27,8S; 28,4E)	0,61-0,70	664	10	490	9	413	5
	0,53-0,60	778	13	540	10	440	8
	0,45-0,52	512	8	338	6	305	5
Полигон 7 (1,3N; 0,5W)	0,61-0,70	424	5	354	4	251	4
	0,53-0,60	479	6	397	5	278	5
	0,45-0,52	330	4	248	3	190	3

Критерий однородности: СКО не хуже 5% для любого фазового угла.

Метод поиска полигонов лунной поверхности

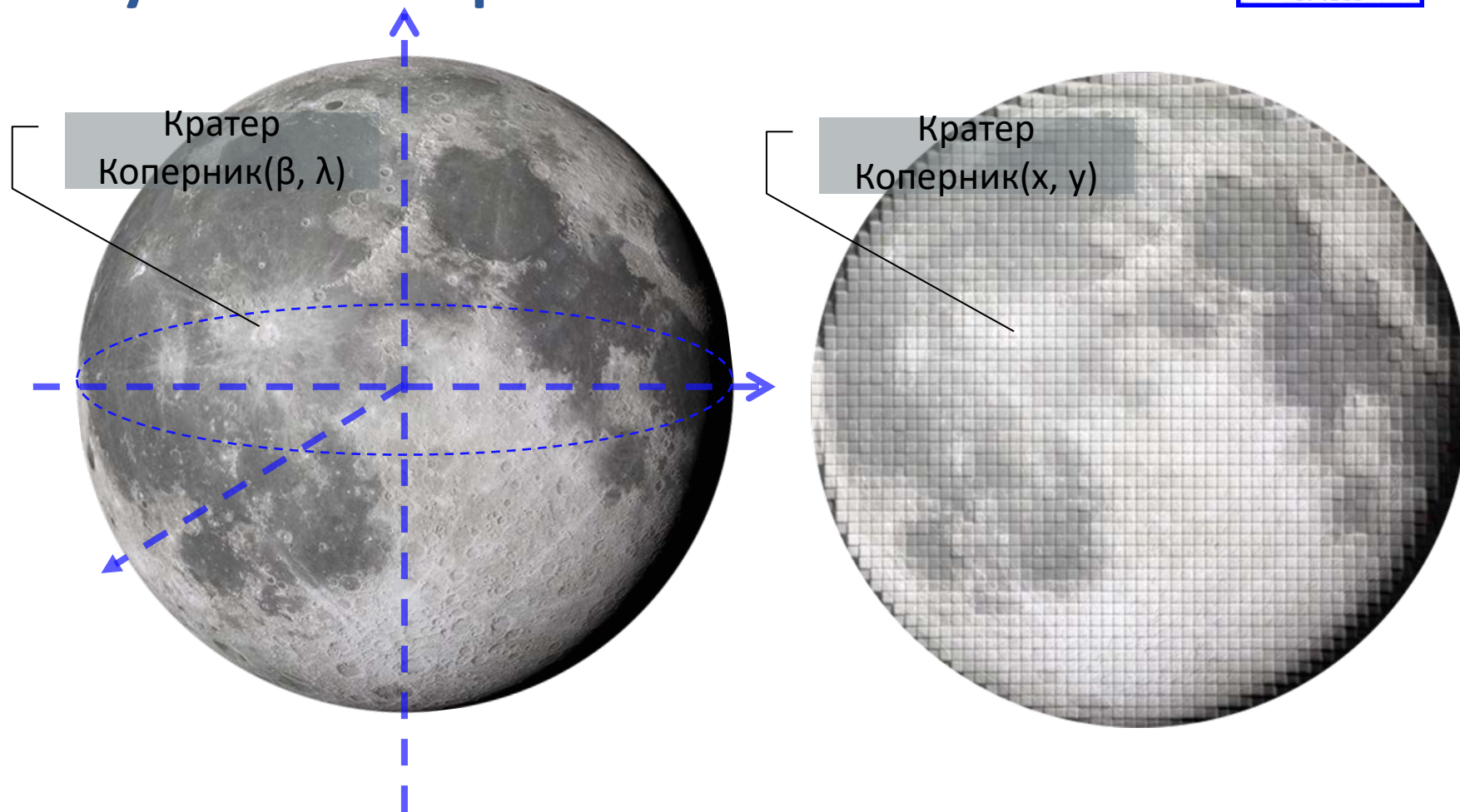


Шаг 1. Для расчёта координат центра полигона в пикселях, используется специальная информация о Луне, а именно: селенографическая долгота λ_c , широта β_c , расстояние «Луна – КА» R_c , радиус Луны R_{moon} и радиус Луны в пикселях R_{pixel} .

$$x = \frac{R_{pixel} \cdot \left(\frac{R_c}{R_{moon}} - 1 \right) \cdot (\cos\beta_c \sin\beta - \sin\beta_c \cos\beta \cos(\lambda - \lambda_c))}{\left(\frac{R_c}{R_{moon}} \right) - (\sin\beta_c \sin\beta + \cos\beta_c \cos\beta \cos(\lambda - \lambda_c))};$$

$$y = \frac{R_{pixel} \cdot \left(\frac{R_c}{R_{moon}} - 1 \right) \cdot \cos\beta \sin(\lambda - \lambda_c)}{\left(\frac{R_c}{R_{moon}} \right) - (\sin\beta_c \sin\beta + \cos\beta_c \cos\beta \cos(\lambda - \lambda_c))}.$$

Метод поиска полигонов лунной поверхности



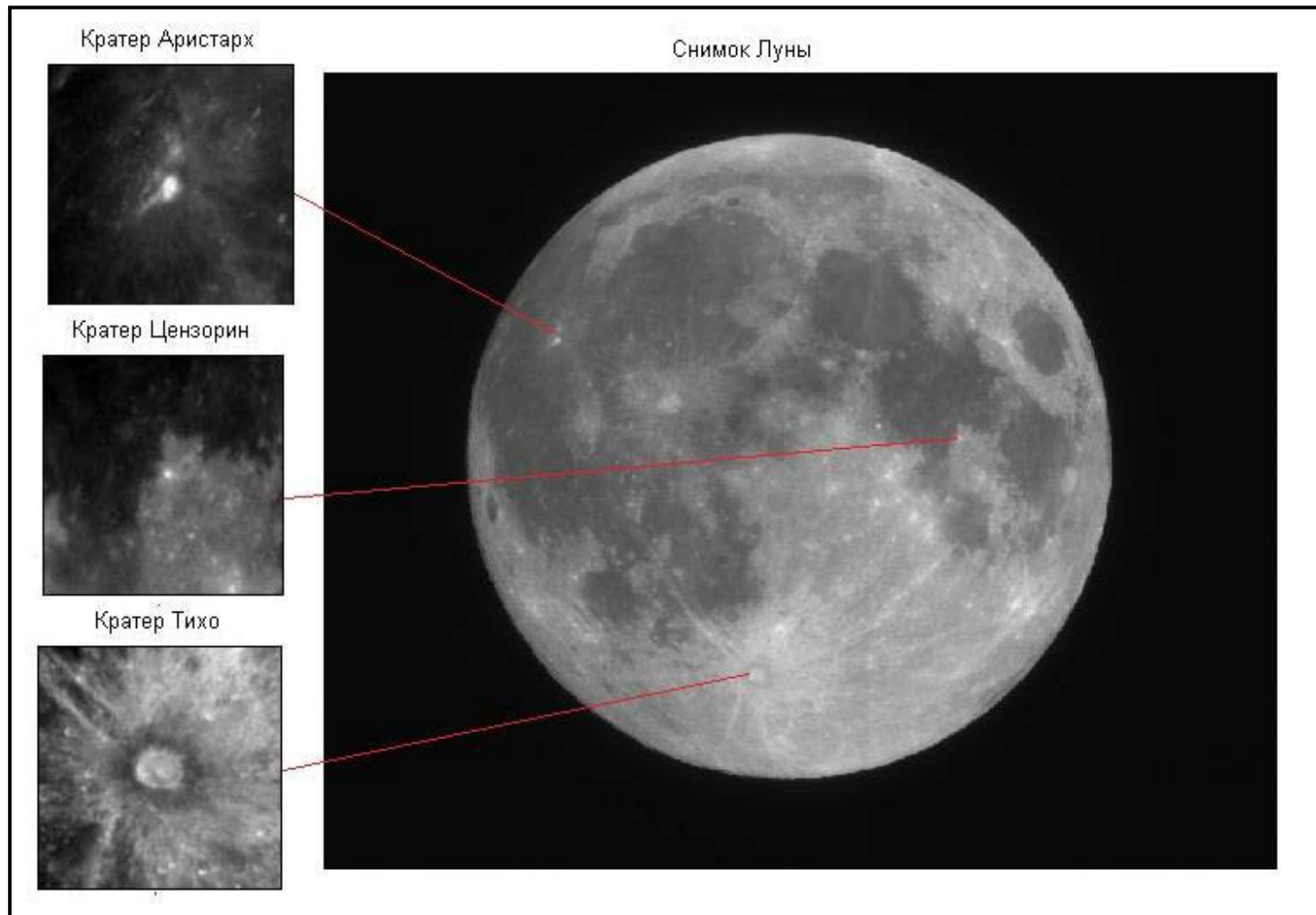
Метод поиска полигонов лунной поверхности



Шаг 2. Учтём поворот космического аппарата, повернув систему координат на позиционный угол (Θ) и сместим координаты относительно центра луны на изображении (X_c, Y_c). Для поиска данных параметров используются опорные кратеры.

$$\begin{aligned} X &= X_c + y * \cos\Theta - x * \sin\Theta; \\ Y &= Y_c - x * \cos\Theta - y * \sin\Theta. \end{aligned}$$

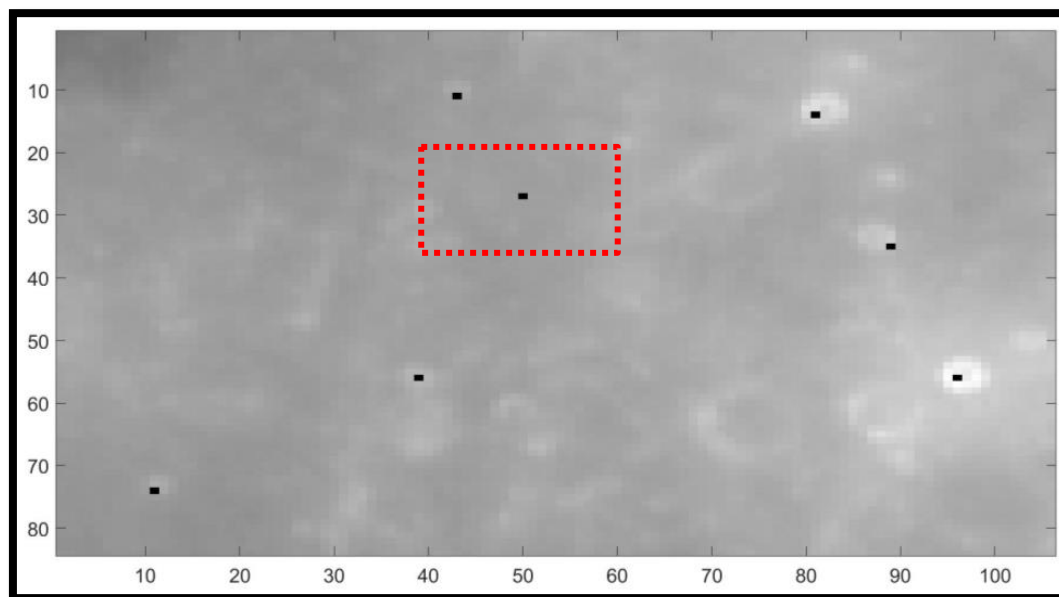
Метод поиска полигонов лунной поверхности



Метод поиска полигонов лунной поверхности

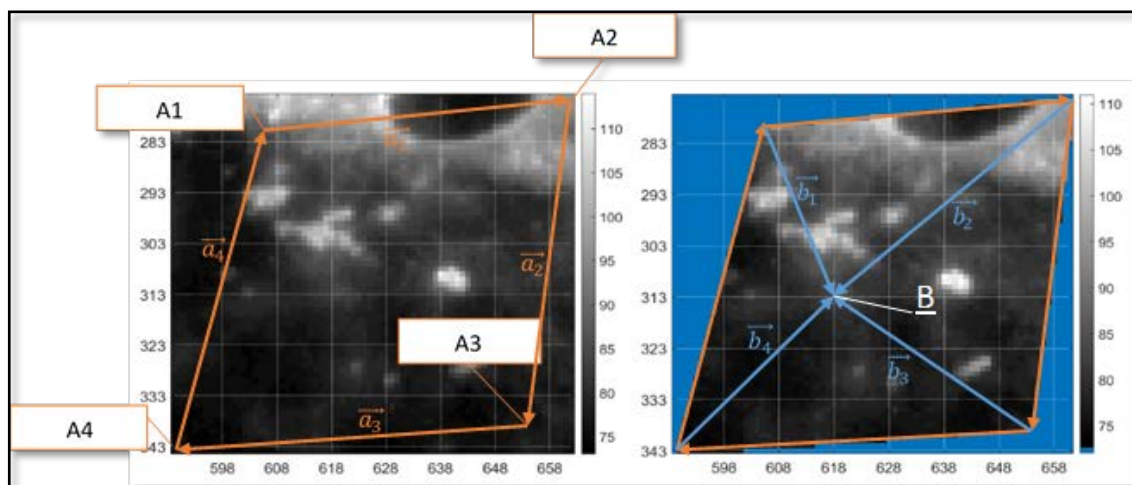


Шаг 3. Сравнение положения опорных кратеров для каждого полигона.



Опорные кратеры для уточнения
положения полигона №8

Алгоритм отсеивания пикселей внутри участка на изображении



Алгоритм отсеивания пикселей внутри участка на изображении:

$$\vec{a}_k = \begin{pmatrix} a_{xk} = A_{k+1,x} - A_{k,x} \\ a_{yk} = A_{k+1,y} - A_{k,y} \end{pmatrix};$$

$$\vec{b}_k = \begin{pmatrix} b_{xk} = B_x - A_{k,x} \\ b_{yk} = B_y - A_{k,x} \end{pmatrix};$$

$$(a_{xk}b_{yk} - a_{yk}b_{xk}) > 0 \text{ или}$$

$$(a_{xk}b_{yk} - a_{yk}b_{xk}) < 0,$$

$$\forall k \in [1; 4].$$

Полигон 4	Селенографические координаты, градусы		Координаты на изображении (X _k , Y _k)	
A1	44N	22,5W	604	279
A2	44N	13,7W	661	273
A3	35,2N	13,7W	653	338
A4	35,2N	22,5W	588	343

Эффективная чувствительность ОЭА

Определяемой при абсолютной радиометрической калибровке аппаратуры ДЗЗ является **эффективная чувствительность** [уровни АЦП·м²·ср/Дж].

$$S_{\text{эфф}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{T_{\text{нак}} \cdot L_{\text{эфф}}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{T_{\text{нак}} \cdot \int_0^{\infty} L(\lambda) \cdot s_{\text{отн}}(\lambda) d\lambda}$$

Где:

$U_{\text{вых}}$ – выходной сигнал изображения после вычитания темновой составляющей [уровни АЦП];

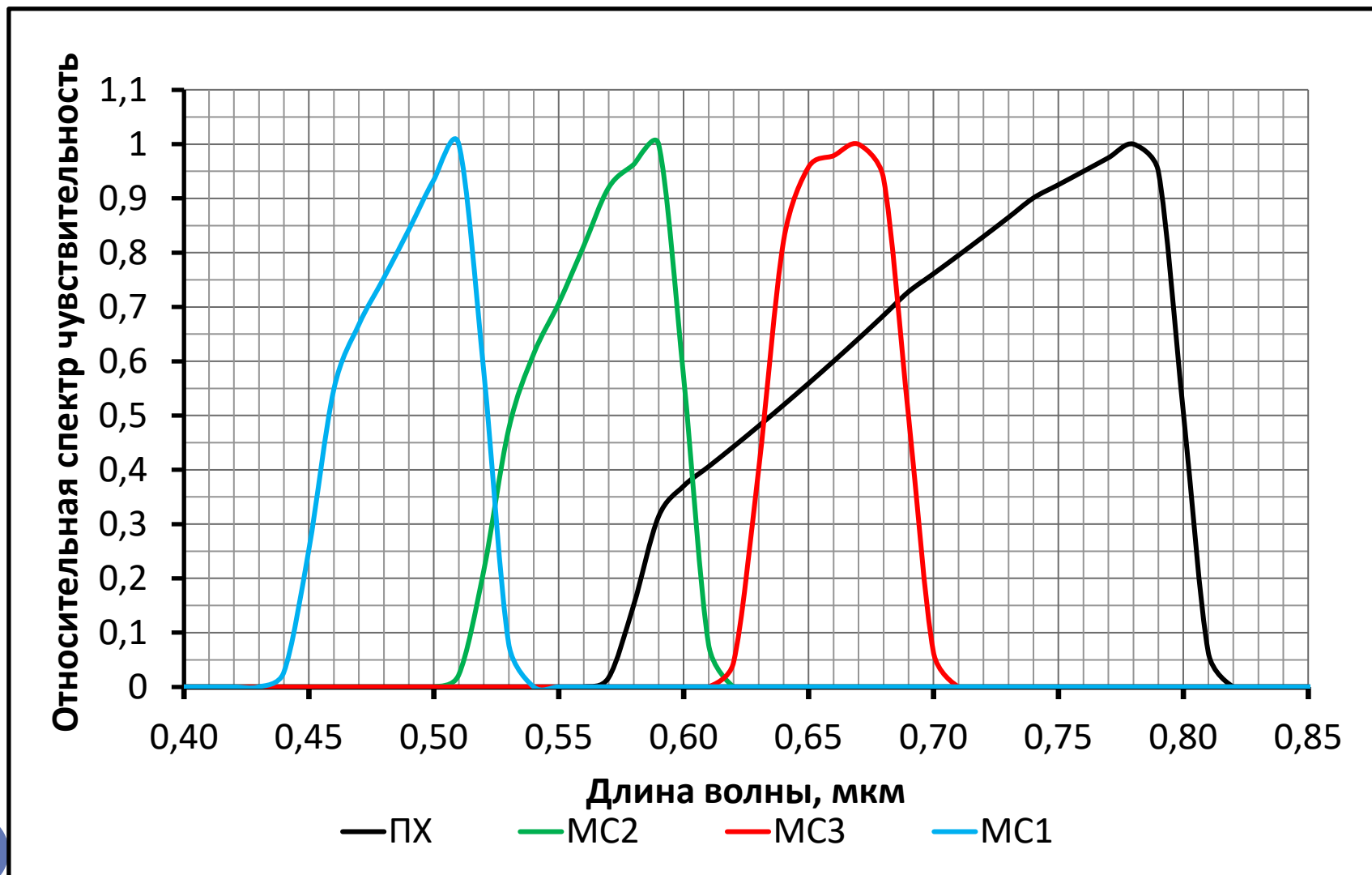
$T_{\text{нак}}$ – время накопления сигнала [с];

$L_{\text{эфф}}$ – эффективная энергетическая яркость (ЭЭЯ) [Вт/(м²·ср)];

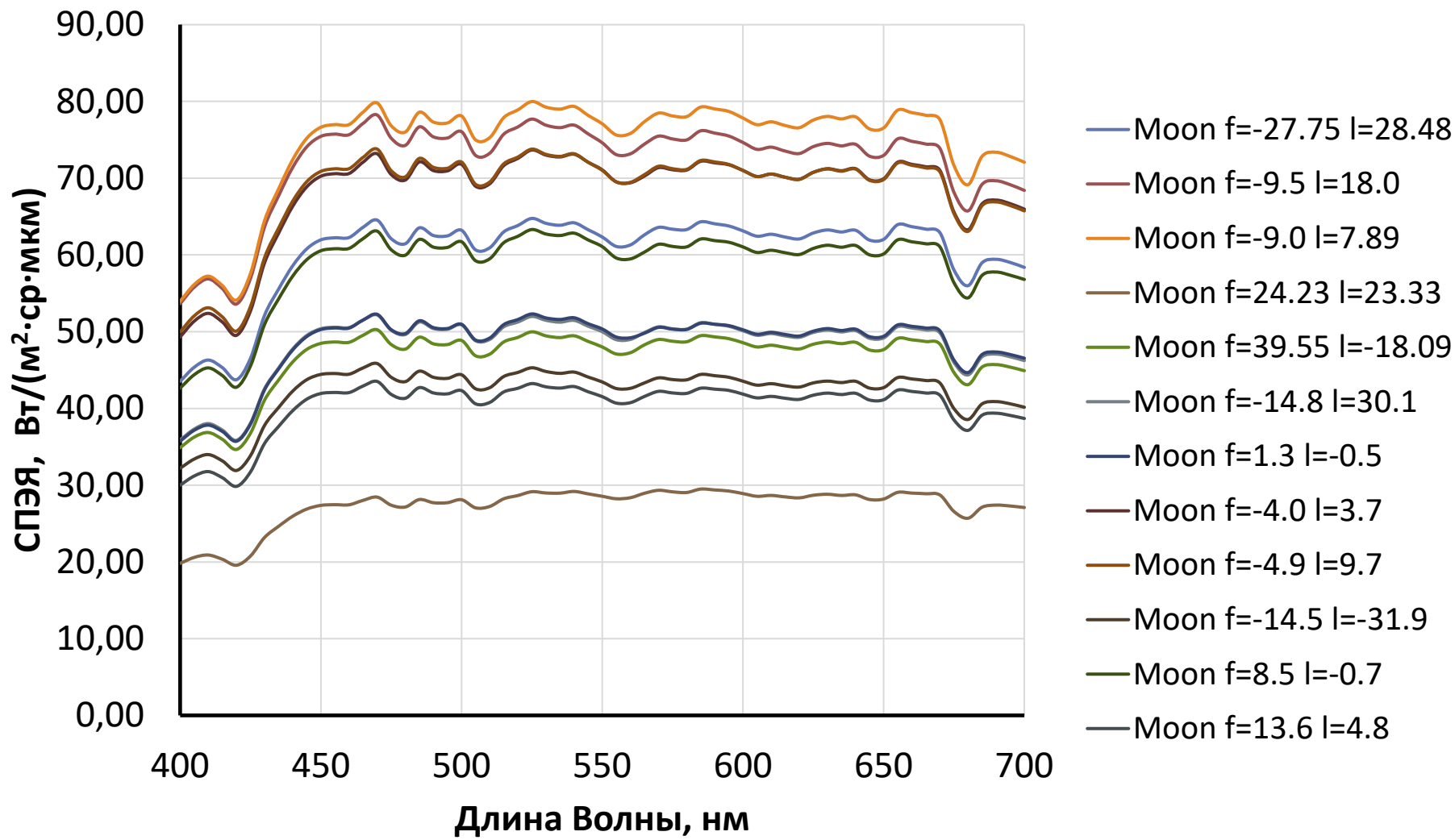
$L(\lambda)$ – СПЭЯ полигона [Вт/(м²·мкм·ср)];

$s_{\text{отн}}(\lambda)$ – относительная спектральная чувствительность (ОСЧ) ОЭА;

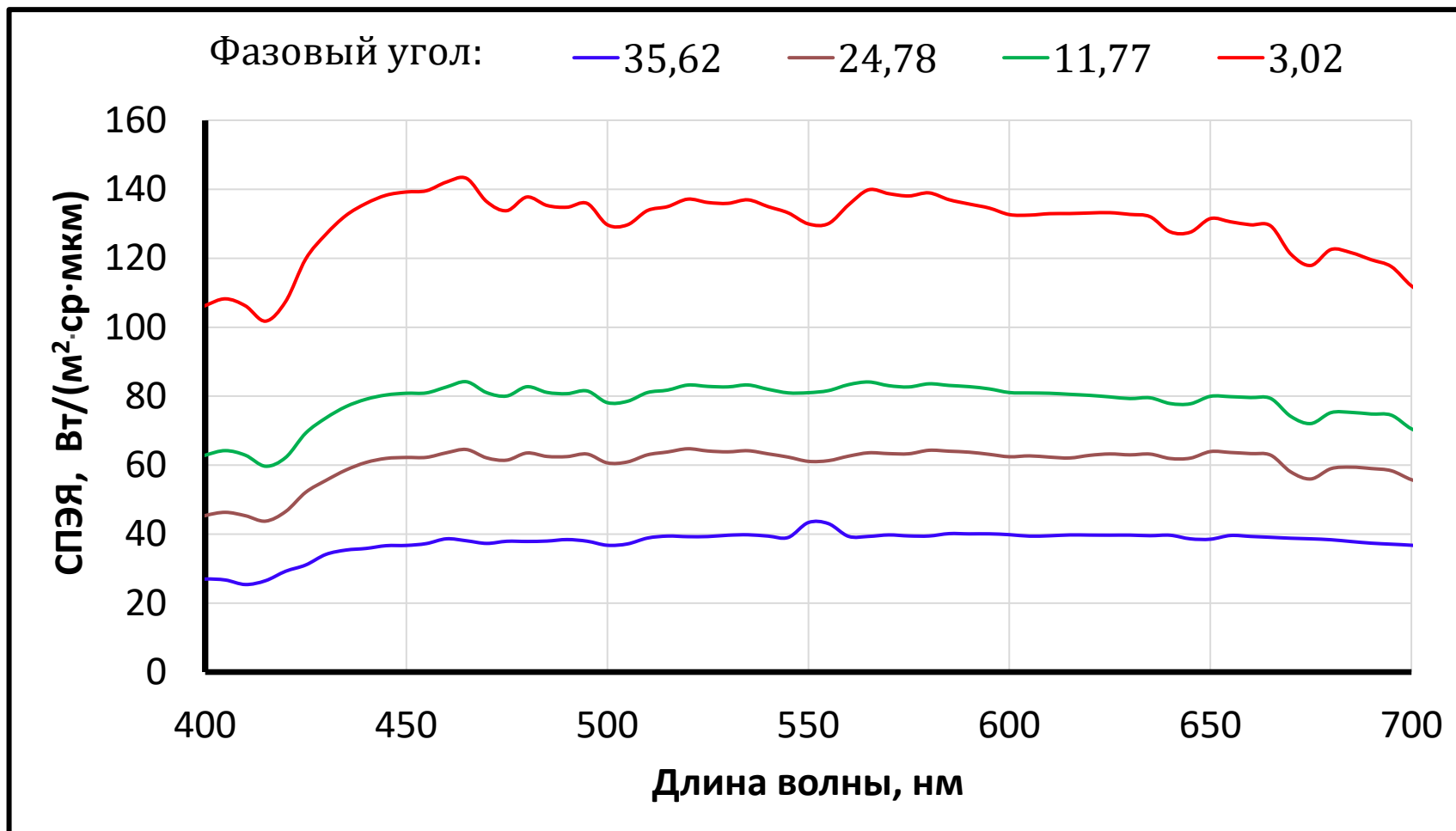
Относительная спектральная чувствительность МКА «АИСТ-2Д»



СПЭЯ исследуемых полигонов



Фазовая зависимость СПЭЯ



Итоговые значения эффективной чувствительности



Угол Фазы	$S_{\text{лун}}(\text{МС}),$ Ур. АЦП·м ² ·ср/Дж	$S_{\text{лун}}(\text{МС}),$ Ур. АЦП·м ² ·ср/Дж	$S_{\text{лун}}(\text{МС}),$ Ур. АЦП·м ² ·ср/Дж
	МС1	МС2	МС3
24,78°	2500	7400	6800
3,02°	2500	7600	6500

Пересчёт СПЭЯ участков лунной поверхности для разных значений углов фазы Луны

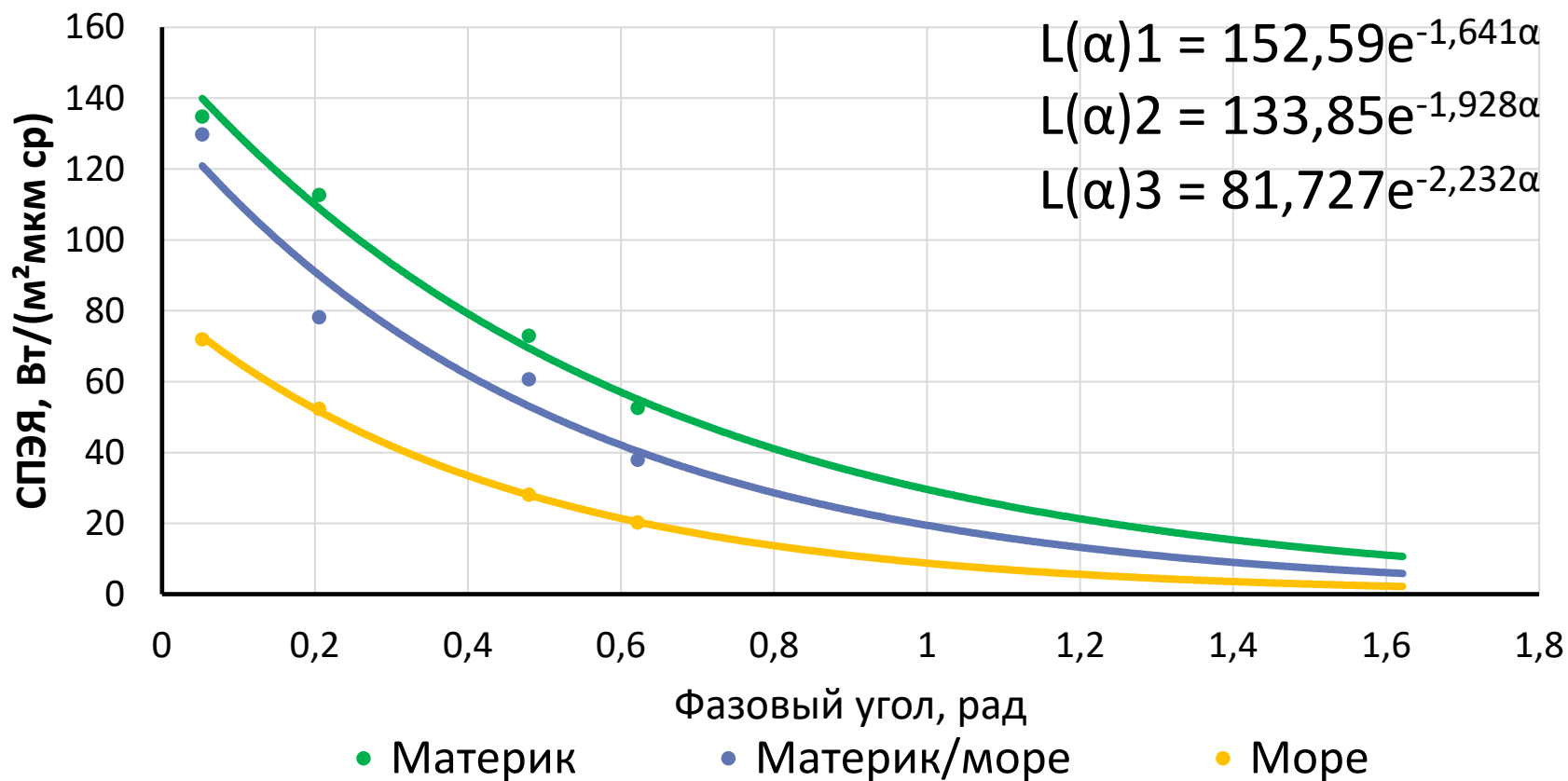


- $L(\alpha_{\text{иск}}, i, \varepsilon) = L(\alpha_{\text{табл}}, i, \varepsilon) \cdot \frac{\varphi(\alpha_{\text{иск}}) \cdot D(\alpha_{\text{иск}}, i, \varepsilon)}{\varphi(\alpha_{\text{табл}}) \cdot D(\alpha_{\text{табл}}, i, \varepsilon)}$,
- $D(\alpha, \beta, \gamma) = \frac{\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cos^q(\beta) (\cos^{q+1}\left(\gamma - \frac{\alpha}{2}\right) - \sin^{q+1}\left(\frac{\alpha}{2}\right))}{\cos(\gamma) (1 - \sin^{q+1}\left(\frac{\alpha}{2}\right))}$ (формула Акимова),
- $\varphi(\alpha) = m \cdot \exp(-\tau\alpha)$.

Типовые параметры представлены в таблице:

Параметры	Эмпирический параметр, q	Спектральное альbedo при 500нм, m	Эффективный коэффициент шероховатости, τ
Материк	$0,31\alpha$	0,17	0,70
Море	$0,16\alpha$	0,07	0,85
Материк/море	$0,25\alpha$	0,12	0,77

Зависимость СПЭЯ от фазы для различных типов поверхности



Заключение

- Отобраны 12 полигонов с различными типами лунной поверхности, соответствующие критерию однородности при углах фазы от 2 до 40 градусов;
- Разработан метод поиска эталонных участков на снимке с помощью методов линейной перспективы, а также поворота и смещения СК изображения;
- Реализован алгоритм отбора пикселей внутри полигона;
- Показана возможность проведения радиометрической калибровки ОЭА по лунным полигонам с погрешностью 8-10%;
- Формулы пересчета СПЭЯ позволяют проводить радиометрическую калибровку ОЭА для различных фаз Луны с погрешностью 12-15%;
- Необходима организация работ по получению СПЭЯ лунных полигонов в диапазоне спектра 400- 1100 нм.

Список литературы

- 1. Шовенгердт Р.А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. Техносфера, Москва, 2010 г., 560 с.
- 2. Панфилов А.С., Гаврилов В.Р., Саприцкий В.И. Условия подготовки и проведения абсолютных радиометрических измерений с помощью оптико-электронной аппаратуры наблюдения Земли //Исследование Земли из космоса, № 1, 2014, С. 85–91.
- 3. Шевченко В.В. Луна и ее наблюдения. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы,1983. 192 с.
- 4. Stone T. C., Kieffer H.H., and Becker K.J., Modeling the Radiance of the Moon for On-orbit Calibration // Proc. SPIE 5151, 2003. P.463-470
- 5. Шкуратов Ю.Г. Луна далекая и близкая // Харьков: ХНУ,2006,182 С.
- 6. Великодский Ю.И. Влияние альbedo и рельефа на закон распределения яркости по диску Луны // Харьков. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. 2002.

Спасибо за внимание!

Постановка задачи

Расчёт положения спутников ДЗЗ в селенографической системе координат:

- Алгоритм расчёта координат положения центра масс КА в селенографической системе координат;
- Алгоритм расчёта в селенографических координатах Солнца;
- Расчёт фазы Луны, угла падения и отражения от полигона на момент наблюдения КА.



Результаты (Модель SGP4)

- Входными параметрами для определения положения КА в данный момент эпохи является модель SGP4

AIST 2D

```
1 41465U 16026B 22161.63091388 .00008589 00000-0 20779-3 0 9993
2 41465 97.0572 38.2042 0010609 146.9922 297.2051 15.41300362342482
```

Формат двухстрочного набора элементов для МКА «АИСТ-2Д»

Год эпохи (последние две цифры)	22
Время эпохи (целая часть — номер дня в году, дробная — часть дня)(t)	161.63091388

Наклонение в градусах(i)	97.0572
Долгота восходящего узла в градусах(Ω)	38.2042
Эксцентриситет (подразумевается, что число начинается с десятичного разделителя)(e)	0010609
Аргумент перицентра в градусах(ω)	146.9922
Средняя аномалия в градусах(M)	297.2051
Частота обращения (оборотов в день) (среднее движение) [виток/день] (n)	15.41300362

Алгоритм расчёта координат положения центра масс КА в селенографической СК

Переход от прямоугольных геоцентрических экваториальных координат КА (в ИСК_t) к прямоугольным координатам X_c, Y_c, Z_c в СГСК выполняется по соотношениям:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} &= |P_{ij}| \begin{bmatrix} X - X_l \\ Y - Y_l \\ Z - Z_l \end{bmatrix} \\ |P_{ij}| &= \begin{bmatrix} \cos\varphi \cos\Omega' - \sin\varphi \sin\Omega' \cos i & \cos\varphi \cos\Omega' + \sin\varphi \cos\Omega' \cos i & \sin\varphi \sin i \\ -\sin\varphi \cos\Omega' - \cos\varphi \sin\Omega' \cos i & -\cos\varphi \sin\Omega' + \cos\varphi \cos\Omega' \cos i & \cos\varphi \sin i; \\ \sin\Omega' \sin i & -\cos\Omega' \sin i & \cos i \end{bmatrix} \\ \varphi &= L_l - \Omega_l + \Delta. \end{aligned}$$

Селенографическая долгота λ_c , широта β_c и расстояние «Луна – КА» R_c вычисляются по формулам:

$$\begin{aligned} \sin \beta_c &= \frac{Z_c}{R_c}, & \cos \beta_c &= \frac{R_{1c}}{R_c}, \\ \sin \lambda_c &= \frac{Y_c}{R_c}, & \cos \lambda_c &= \frac{X_c}{R_{1c}}, \end{aligned}$$

где $R_c = \sqrt{X_c^2 + Y_c^2 + Z_c^2}$, $R_{1c} = \sqrt{X_c^2 + Y_c^2}$.

Алгоритм расчёта координат положения Солнца в селенографической СК

Селенографическая долгота λ_s , широта β_s и расстояние «Луна – Солнце» R_s вычисляются по формулам:

$$\sin \beta_s = \frac{Z_s}{R_s}, \quad \cos \beta_s = \frac{R_{1s}}{R_s},$$
$$\sin \lambda_c = \frac{Y_s}{R_s}, \quad \cos \lambda_c = \frac{X_s}{R_{1s}},$$

где $R_s = \sqrt{X_s^2 + Y_s^2 + Z_s^2}$, $R_{1s} = \sqrt{X_s^2 + Y_s^2}$.

Составляющие вектора положения Солнца в ИСКт определяются так:

$$X_s = R_s \cos \delta \cos \alpha;$$
$$Y_s = R_s \cos \delta \sin \alpha;$$
$$Z_s = R_s \sin \delta.$$

Расчёт истинной фазы, угла падения и отражения:

$$\cos(g)$$
$$= \sin(\beta_c) \sin(\beta_s) + \cos(\beta_c) \cos(\beta_s) \cos(\lambda_s - \lambda_c);$$
$$\cos i = \sin \beta_s \sin \varphi + \cos \beta_s \cos \varphi \cos(\lambda - \lambda_s)$$
$$\cos \varepsilon_c = \sin \beta_c \sin \varphi + \cos \beta_c \cos \varphi \cos(\lambda - \lambda_c)$$
$$\varepsilon = \varepsilon_c + P$$

где φ, λ - селенографические координаты точки центра полигона;
 β_s, λ_s - селенографические координаты подсолнечной точки на момент наблюдения,
 β_c, λ_c - селенографические координаты подаппаратной точки на момент наблюдения,
 ε_c - селеноцентрический угол отражения,
 P - параллактический угол.