



**Двадцать четвёртая международная конференция
«Современные проблемы дистанционного
зондирования Земли из космоса»**

**Первичная автоматическая оценка радиометрических
качеств спутниковых изображений Земли на борту КА
многоспутниковой космической системы**

Докладчик: Крейнин Р.Г.

Авторы:

Геча В.Я., зам. ген. директора

Жиленев М.Ю., ст. научный сотрудник

Крейнин Р.Г., инженер

Новосёлов С.А., научный сотрудник

09-13 ноября 2026 г.
гор. Москва



Рисунок 1 — Все 3 снимка одной и той же местности с одинаковым геометрическим разрешением (GSD) 0.5м, но с различными «смазами» и др. искажениями изображения [19]



Рисунок 2 — снимки одного и того же места 2-мя разными объективами триплета PRIZM КА ALOS-2 с GSD (2.5 м) с одного участка орбиты имеют разные резкость и очень разный SNR [Apollo]

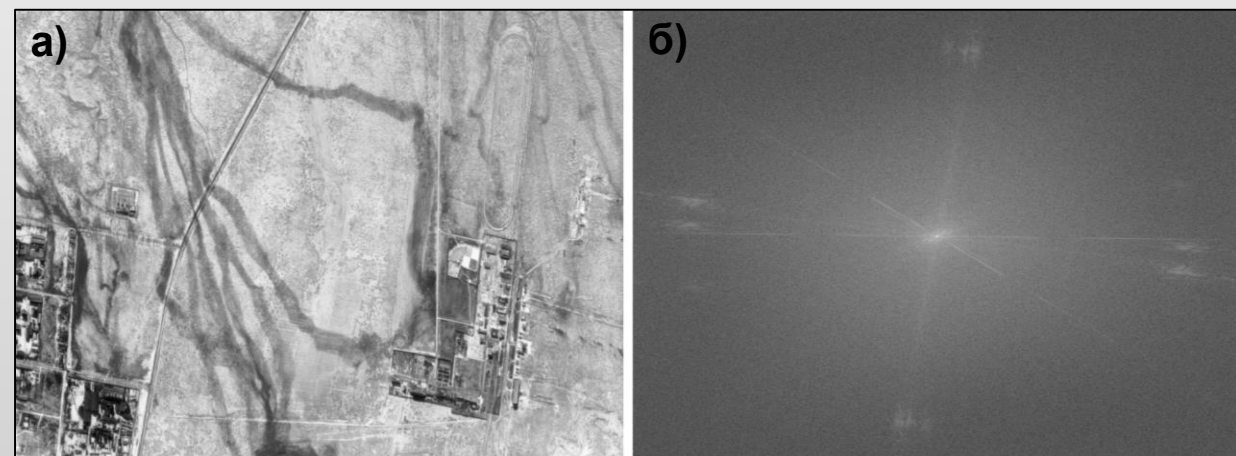


Рисунок 3 — А) Снимок с КА «Канопус-В», номинальное разрешение 2,1м (GSD) при физической дефокусировке панхроматической ОЭА; Б) пространственно-частотный спектр (ПЧС) изображения



Рисунок 4 — Сильная зашумленность, в частности, из-за недостаточного времени накопления на ФПУ [3].

Ситуации в рамках МСКС при её ЛИ и эксплуатации

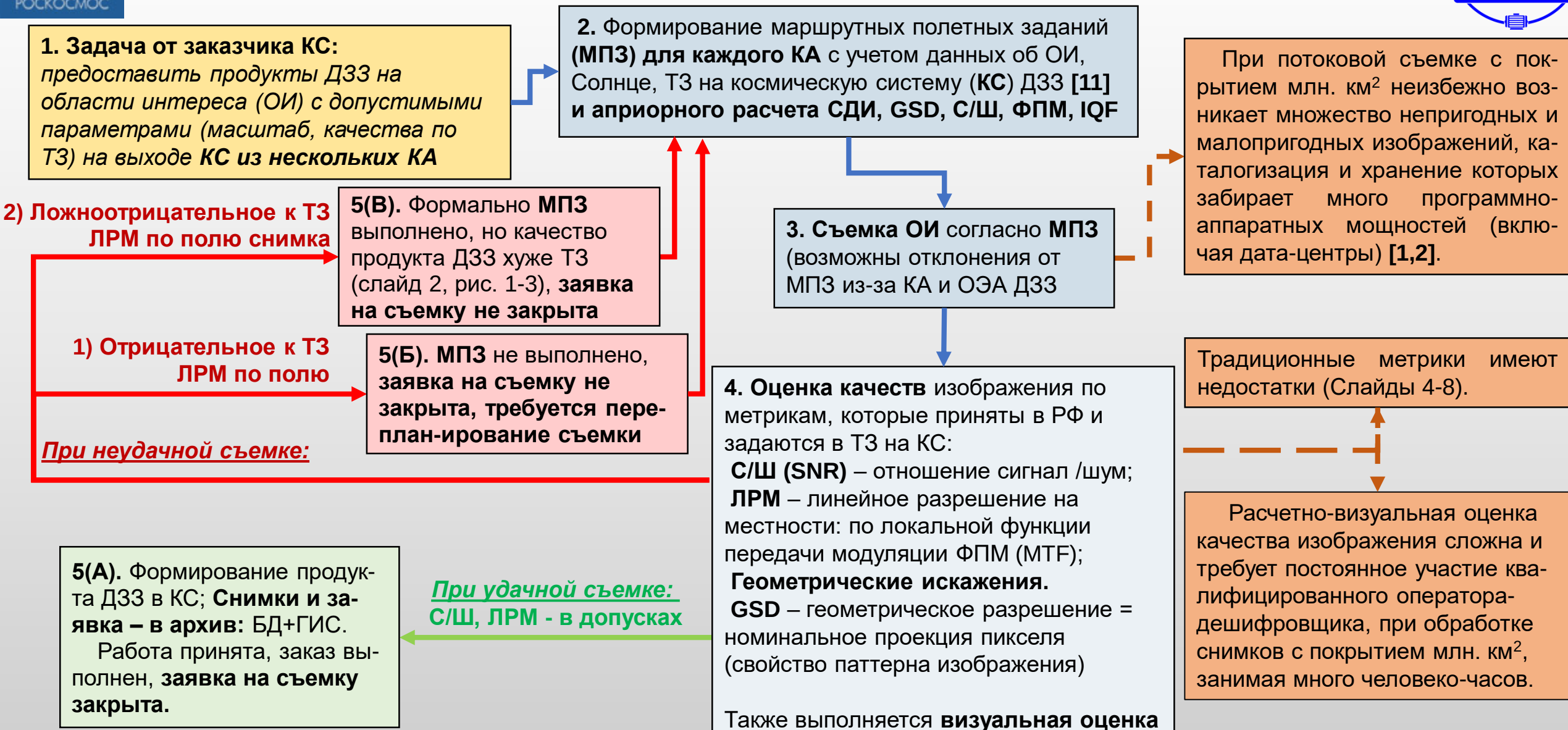


Рисунок 5 — Схема выполнения заявок на съёмку заданной области интереса с КА, входящих в КС ДЗЗ

Стандартные метрики качества спутникового изображения в РФ (1)

Апостериорная величина **линейного разрешения на местности** [5] сводит влияние суммы процессов формирования изображения к одному неустойчивому к условиям интегральному числу (v_{px}) и зависит от:

- 1) локальной **ФПМ (MTF)** и выбора пороговой функции [25] для нее на разных пространственных частотах, что показано в формуле [5]:

$$LPM \approx \frac{1}{2v_{px} \cos(\gamma)} \cdot \frac{D_H}{f_{OЭА}} d, \quad (1)$$

где: v_{px} – пространственная частота на изображении (лин/пикс); ограничена эффективной длиной волны, $\lambda_{эфф}$, не равна частоте дискретизации МПИ из-за сэмпинга паттерна при влиянии кривизны поверхности и вращения Земли, изменения реального масштаба изображения по полю снимка и т.д. (рис. 5, 6);

D_H – текущая дальность от КА до места съёмки (м); $f_{OЭА}$ – фокусное расстояние спутниковой ОЭА (м); d – размер пикселя МПИ; γ – угол визирования; D_H , $f_{OЭА}$, d , γ – всегда расчетные (не фактические), берутся в расчет с теми или другими допущениями и соответствующими погрешностями их знания;

- 2) Расчетных, а не фактических дальности (не учитываются: отклонения положения КА на орбите и в $R_{зем}$ от принятых в расчет, рефракция атмосферы при больших углах визирования и т.д.) и фокуса ОЭА $f_{OЭА}$ при том, что:

$$D_H = (R_{зем} + H_{КА}) \cos(\gamma) - \sqrt{(R_{зем} + H_{КА})^2 \cos^2(\gamma) - 2R_{зем}H_{КА} - H_{КА}^2}$$

В результате неизбежных и значимых допущений и их влияния (рис. 5, 6) значение **LPM** в пределах одного снимка по опытам может отличаться на **порядок и более**, а также оно может быть ложноположительным, когда объекты с большим светотражением (альбедо) на малоинтенсивном фоне создают большой сигнал (светотражающие стекло, металлоконструкции, и т.п.) или ложноотрицательным относительно фактического при неверном пороге.

Рисунок 5 — Связь величины **GSD** с орбитальной геометрией углами и ракурсом съемки (в статике) [7].

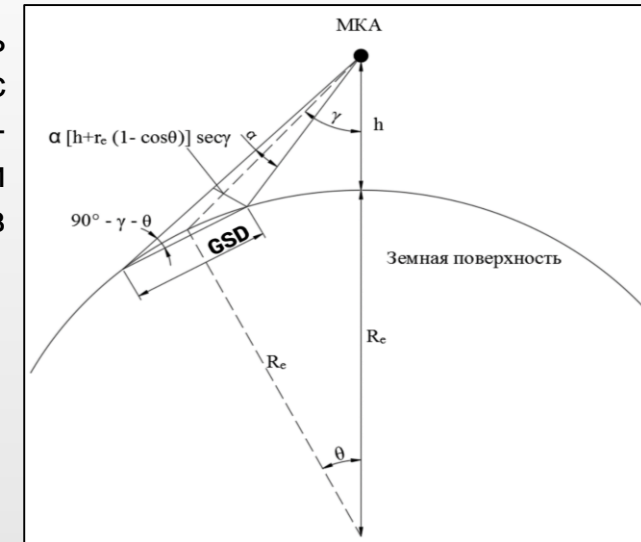
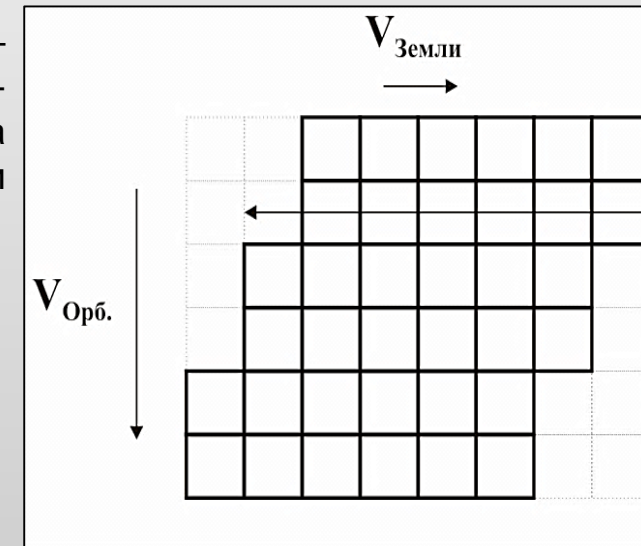


Рисунок 6 — Проекция строк фотоприемника (матрица **GSD**) на Земле при **солнечно-синхронной орбите** [40].



ЛРМ не подразумевает учет:

1. фактического **геометрического разрешения (GSD)** по полю снимка из-за орбитальной геометрии (ракурса в статике, (рис. 5, слайд 4) и кинематики съемки (рис. 6 слайд 4);
2. порогового значения **ФПМ**, так как может быть использован, например: 0,1 или 0,5 или 0,5Р, (рис. 7) или функция чувствительности глаза человека и др. – нет ГОСТа;
3. формы **ФПМ** (рис. 8) – показатель: площадь под кривой до выбранного порога, показывающая способность системы сохранять контраст и различать детали на разных пространственных частотах [6];
4. изменение масштаба $M_{\text{изобр}} = \frac{f_{\text{оэд}}}{D_H \cos(\gamma)}$ (рис. 8) (производные от $M_{\text{изобр}}$ по D_H и D_H по $\Delta t_{\text{кадр}}$ – времени формирования кадра), величины «смаза» изображения из-за кинематики формирования изображения (см. снимки, рис. 9);
5. повышение яркостной неоднородности тех или иных областей изображения, где **резко растут ошибки** оценки дисперсии шума, порога и падает вероятность распознавания.

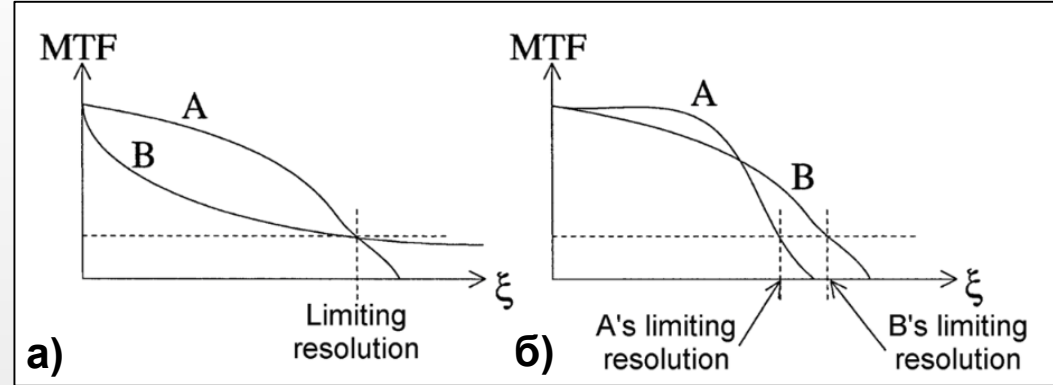


Рисунок 7 — Влияние формы ФПМ [6]: а) сенсор **A** имеет ФПМ лучше, чем сенсор **B**, но на одинаковом пороговом значении они практически равны; б) сенсоры **A** и **B** показывают разное снижение модуляции (контраста) и рост размытия («смаза») изображения на высоких пространственных частотах.



Рисунок 8 — Сравнение двух цветосинтезированных изображений с одинаковым **GSD**: с WorldView-2 с фокусом $f_{WV} = 13.3\text{м}$ но и с Pleiades-1A с фокусом $f_{Plei} = 12.5\text{м}$ и с разными радиометрическими качествами [8].



Рисунок 9 — Все 6 снимков одной и той же местности с одинаковым геометрическим разрешением (**GSD**) 0.5 м, но с разными другими качествами изображения [3].

Стандартные метрики качества спутникового изображения в РФ (3)

ЛРМ практически не учитывает:

6. упрощенные зависимости уровня **ФПМ** (2) [9] и **сигнал/шума (SNR)** (3) [10] (*рис. 10*) от скорости движения изображения (СДИ) V , (*рис. 11*) и времени накопления сигнала ($\tau_{\text{нак}}$) (*рис. 12*).

$$MTF(v) = \text{sinc}(V\tau_{\text{нак}}vs), \quad (2)$$

где: v – пространственная частота,
 s – масштабный коэффициент.

$$SNR = \frac{N_e(\tau_{\text{нак}})}{\sqrt{N_e(\tau_{\text{нак}}) + N_0^2}}, \quad (3)$$

где $N_0(\tau_{\text{нак}})$ – суммарный шум аппаратуры, включая накапливаемый за время экспозиции (эл.);
 N_e – величина сигнала, накопленного МПИ (эл.).

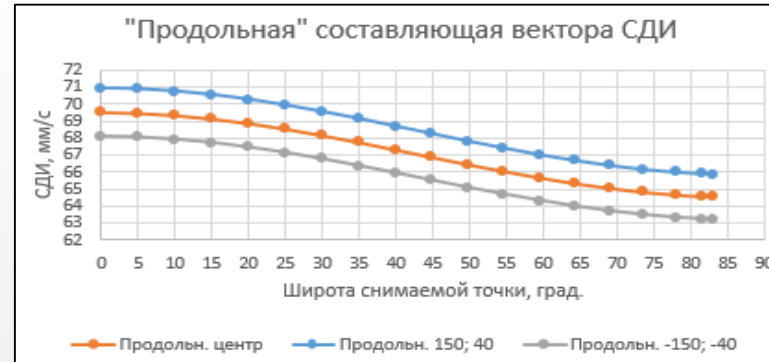


Рисунок 11 — Продольная Составляющая вектора скорости движения изображения в спутниковой оптико-электронной аппаратуре: от экватора до самой северной точки трассы КА (можно экстраполировать на виток орбиты с высокой точностью для прогноза «смаза» изображения) [40].

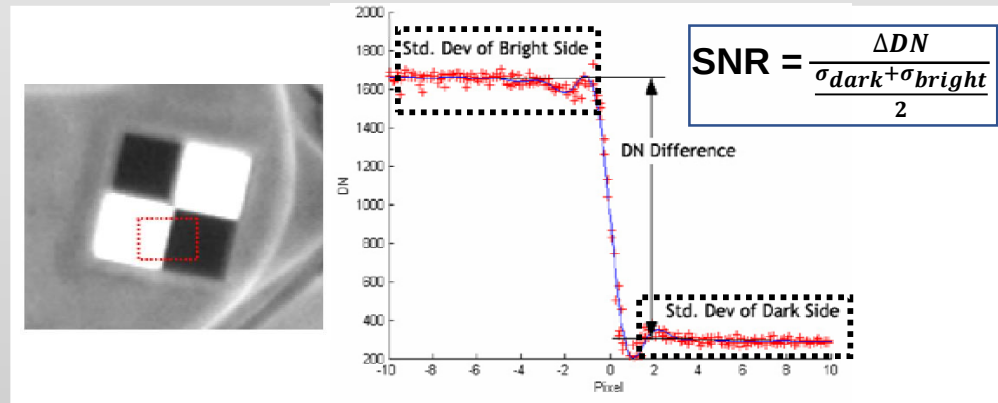


Рисунок 10 — Оценка сигнал/шума (SNR) по функции рассеяния края (ESF) [10].

Стандартные метрики качества спутникового изображения в РФ (3)

ЛРМ практически не учитывает:

6. упрощенные зависимости уровня **ФПМ** (2) [9] и **сигнал/шума (SNR)** (3) [10] (*рис. 10*) от скорости движения изображения (СДИ) V , (*рис. 11*) и времени накопления сигнала ($\tau_{\text{нак}}$) (*рис. 12*).

$$MTF(v) = \text{sinc}(V\tau_{\text{нак}}vs), \quad (2)$$

где: v – пространственная частота,
 s – масштабный коэффициент.

$$SNR = \frac{N_e(\tau_{\text{нак}})}{\sqrt{N_e(\tau_{\text{нак}}) + N_0^2}}, \quad (3)$$

где $N_0(\tau_{\text{нак}})$ – суммарный шум аппаратуры, включая накапливаемый за время экспозиции (эл.);
 N_e – величина сигнала, накопленного МПИ (эл.).

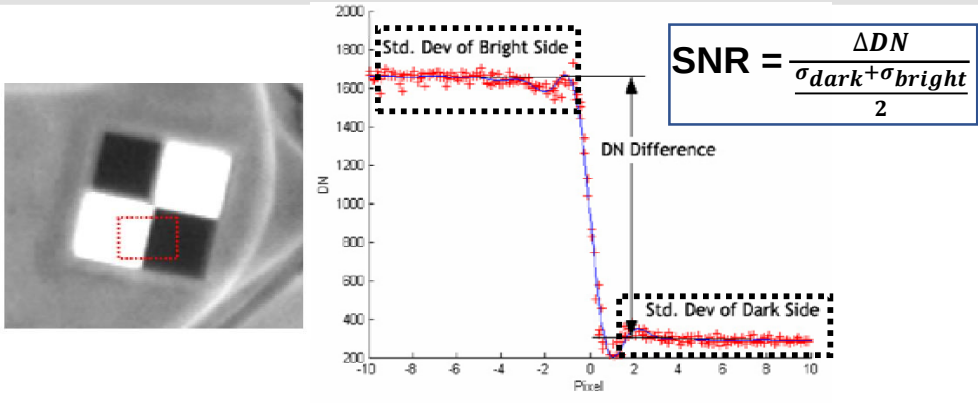


Рисунок 10 — Оценка сигнал/шума (SNR) по функции рассеяния края (ESF) [10].

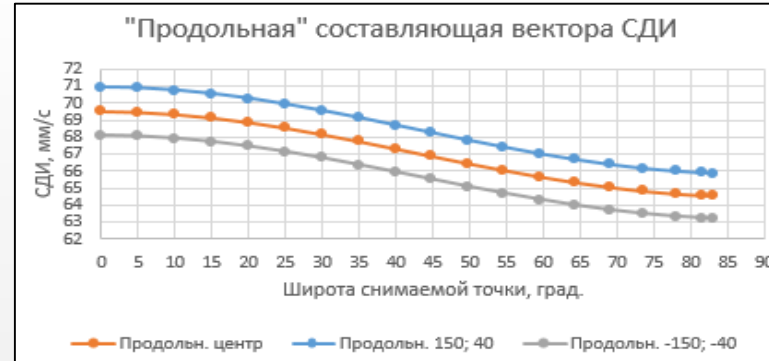
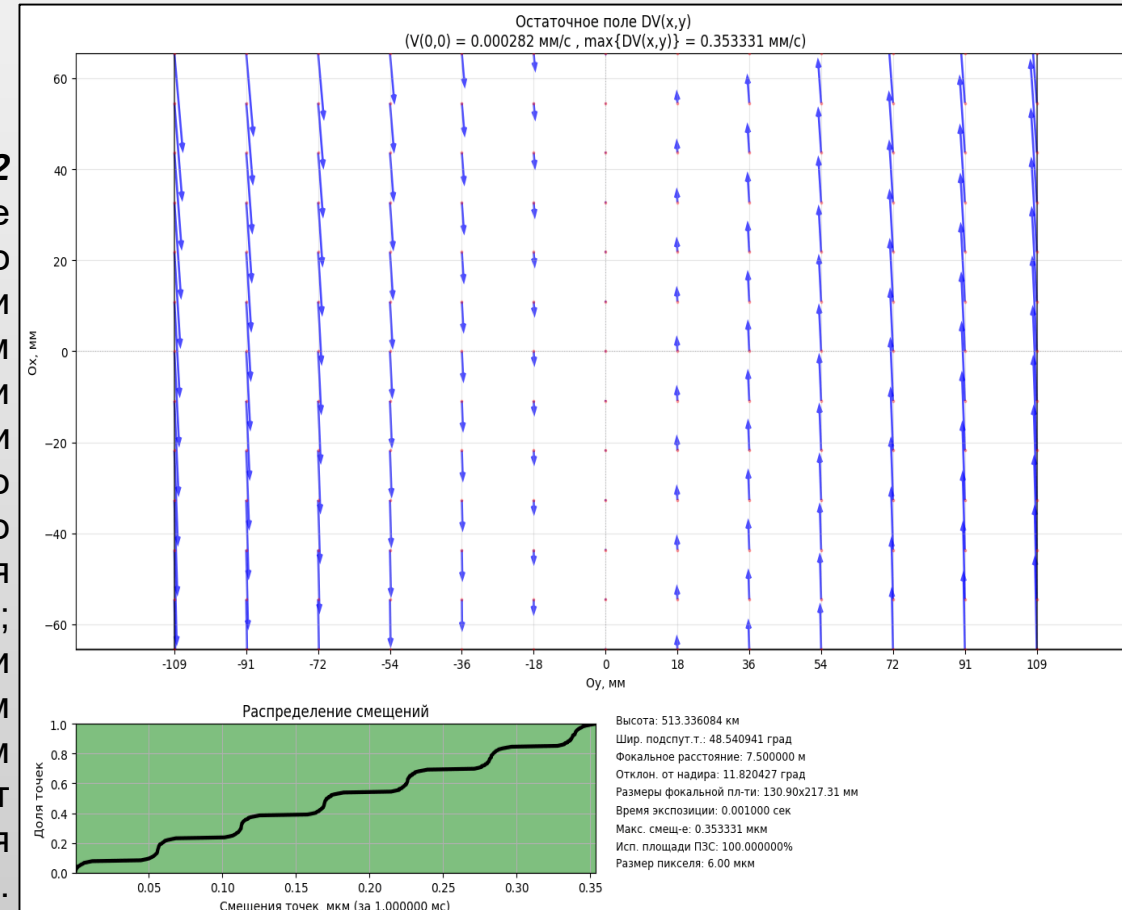


Рисунок 11 — Продольная составляющая вектора скорости движения изображения в спутниковой оптико-электронной аппаратуре: от экватора до самой северной точки трассы КА (можно экстраполировать на виток орбиты с высокой точностью для прогноза «смаза» изображения) [40].

Рисунок 12
а) Распределение векторов **СДИ** по фокальной плоскости БОЭА с выделением ее эффективной части между красными линиями – по критерию допустимого смещения изображения за время;
б) изменение доли точек с допустимым смещением (1/4 пикс = 1.5 мкм) от времени накопления сигнала изображения.



На восприятие изображения человеком влияет факторов, искажающих финальную оценку качества изображения [7, 11- 15, 18]:

- **Особенности растрового изображения** — изображения наклонных (*рис. 13*) и криволинейных линий, например, контуров теней соответствующих объектов отображаются еще сложнее с применением разного рода аппроксимаций геометрии, яркостей и т.д., и порождаемыми неизбежными методическими погрешностями, результирующими наложениями, артефактами, искажениями и их коррекциями;
- **Параметры дисплея** — яркость, контрастность, гамма-кривая, межстро-чный интервал экрана, изображение линий на нем, а на ЖК-экране — эффект Хейдингера) - значимо меняют восприятие изображения;
- **Особенности зрения человека** — зрение каждого человека индивидуально: цвето-, облуминорефракция, усталость глаз, различная аккомодация, возраст, освещенность; кроме того, чувствительность у камер выше, чем у глаза человека (*рис. 14*), а **ФПМ** глаз человека много ниже, чем у ОЭА (глаз «вырезает» площадь под **ФПМ**, см. *рис. 15*);
- **Психофизические эффекты** — эффект «Helmholtz–Kohlrausch» состоит в том, что если технически уровни освещённости одинаковы, восприятие снимка может отличаться: субъективные контрастное окружение, адаптация глаз, усталость; эффект «Мак-Адама» и другие.
- **Средства просмотра** — визуальные методики требуют дорогого, хорошо калиброванного видеоборудования и его периодических калибровок.

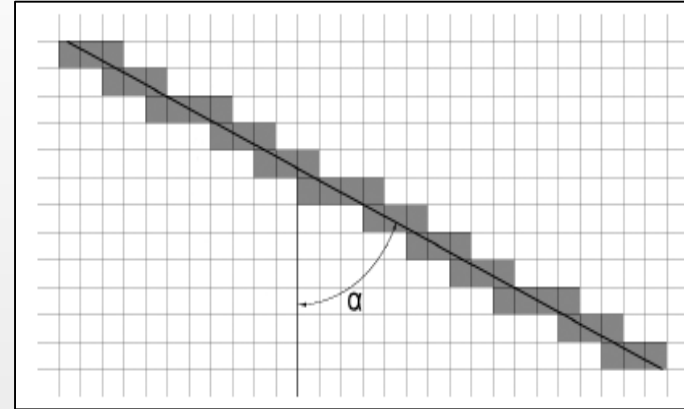


Рисунок 13 — вид изображения прямой линии (дороги) под углом α к растру на цифровом снимке [37].

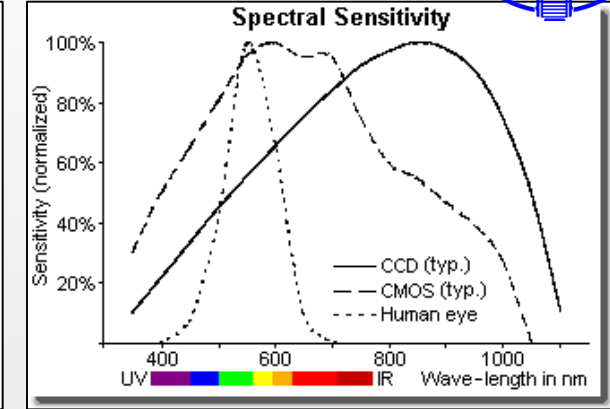
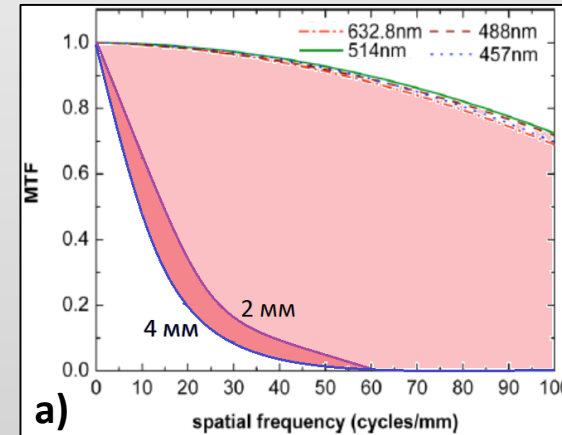
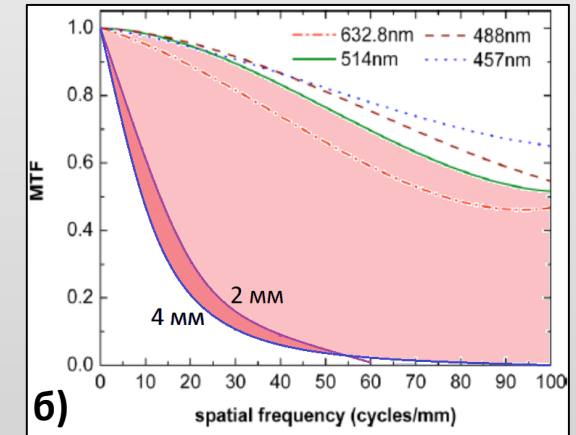


Рисунок 14 — разница в чувствительности глаза человека и ФПУ: ФПЗС(CCD), КМОП(CMOS) [12].



а)



б)

Рисунок 15 — **ФПМ** детектора: а)ПЗС (CCD), б)КМОП (CMOS) в зависимости от частот в видимом спектре [13], с наложением **ФПМ** (MTF) глаза человека, в зависимости от диаметра его зрачка [13, 14].

Решение ситуаций в рамках МСКС при её ЛИ и эксплуатации

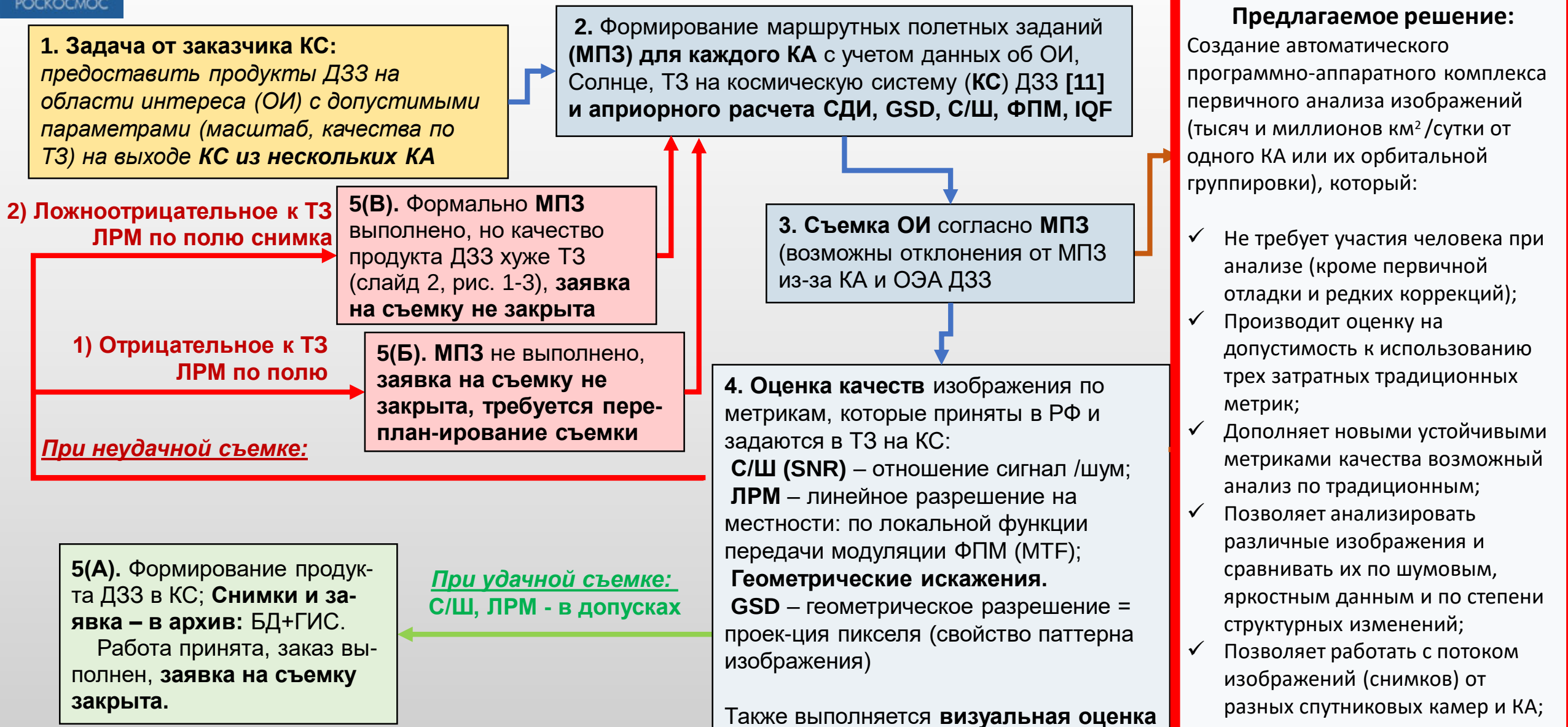
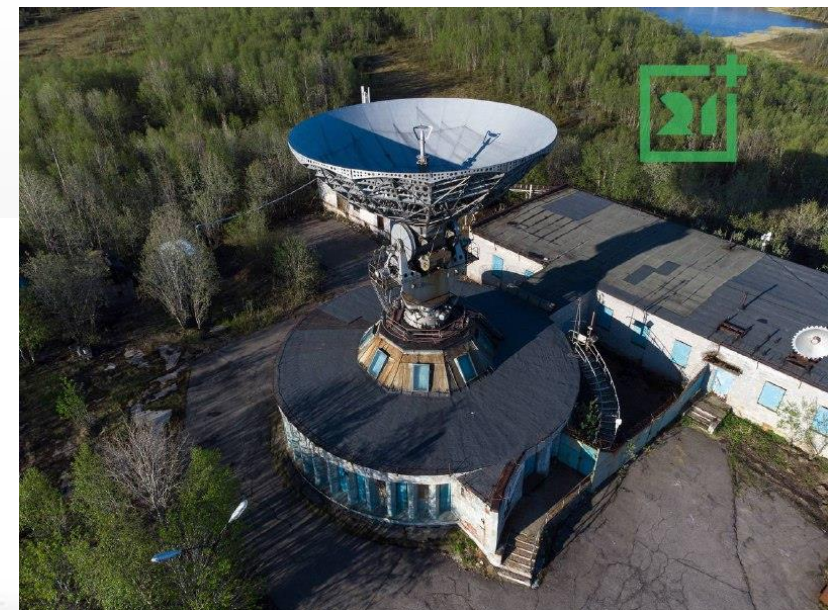


Рисунок 5 — Схема выполнения заявок на съёмку заданной области интереса с КА, входящих в КС ДЗЗ

Разработка методов повышения производительности и эффективности многоспутниковой космической системы



Станции НКПОР Роскосмоса и Росгидромета (антенны 7-9 м.) для приема ЦИ ДЗЗ



НКПОР г. Мурманск



НКПОР г. Анадырь

Условия приема целевой информации с КА орбитальной группировки

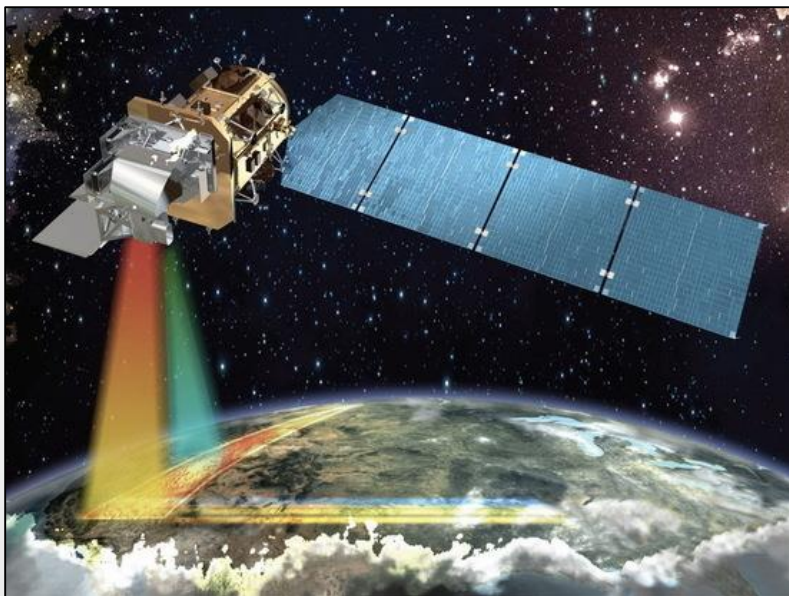


Приняв из НКУ маршрутное задание, и проведя съемку, КА сможет оказаться в зоне приема НКПОР (чтобы отправить ЦИ) только через **часы или дни**, а повторить съемку (при неудачной съемке) через **еще большее время**. Это влияет на производительность КС и время доставки продукта (ЦИ) ДЗЗ

Витки солнечно-синхронной орбиты КА

Зона покрытия станций связи НКПОР, через которую спутник ДЗЗ **должен** пролететь для сброса ЦИ

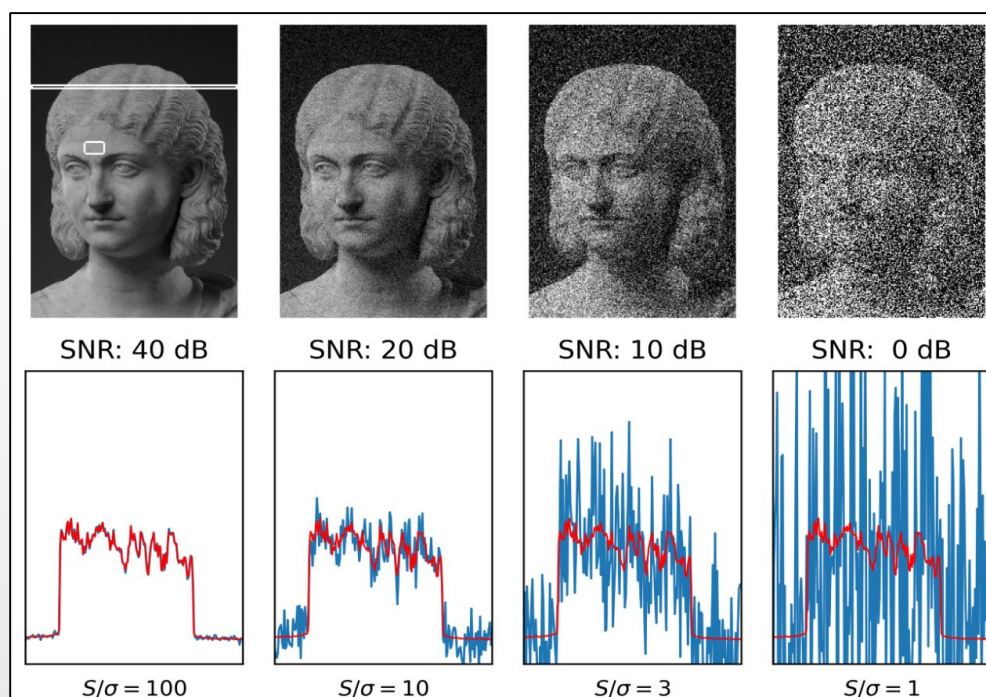
Разработки методов автоматической оценки на борту КА



КА Д33

Чтобы знать результаты съемки до сброса с КА **гигабайт ЦИ** на большие антенны НКПОР, разрабатывается система автоматической оценки качества изображения (ПАОКИ) на борту.

Она позволит сбрасывать **мегабайтные оценки** на малые наземные антенны или на КА-ретрансляторы и знать результат съемки оперативнее.



Пример рассчитываемой на борту численной **оценки** качества изображения: метрика **С/Ш**



НЦ ОМЗ г. Москва



Малая антенна **1.7 - 4 м.** (Унискан)
(Есть в каждом субъекте РФ)



Ретрансляторы:
«Луч» и «Рассвет»

Предварительный анализ одиночного изображения (этап 1)

Гистограммы изображения получаются из преобразования матрицы интенсивности (яркости) серого (*рис. 20*).
Первичный анализ изображения производится с помощью оценки самого изображения и его гистограммы (*рис 21*), которые можно использовать, например, для анализа первичного радиометрического качества изображения (*рис. 22*) и резкого края объекта на нем (*рис. 23*).

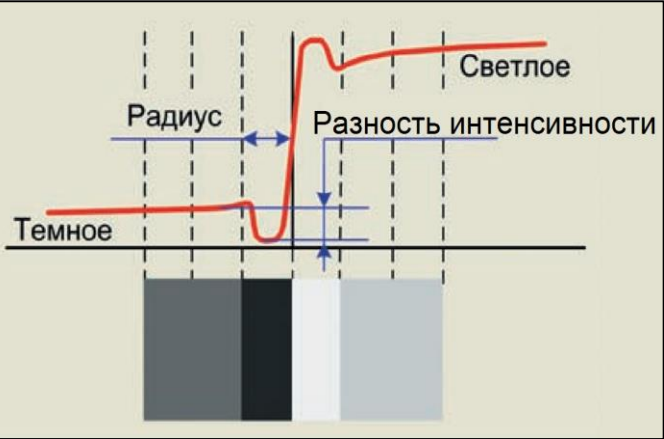


Рисунок 23 — Вид и локальная гистограмма резкого края [18].

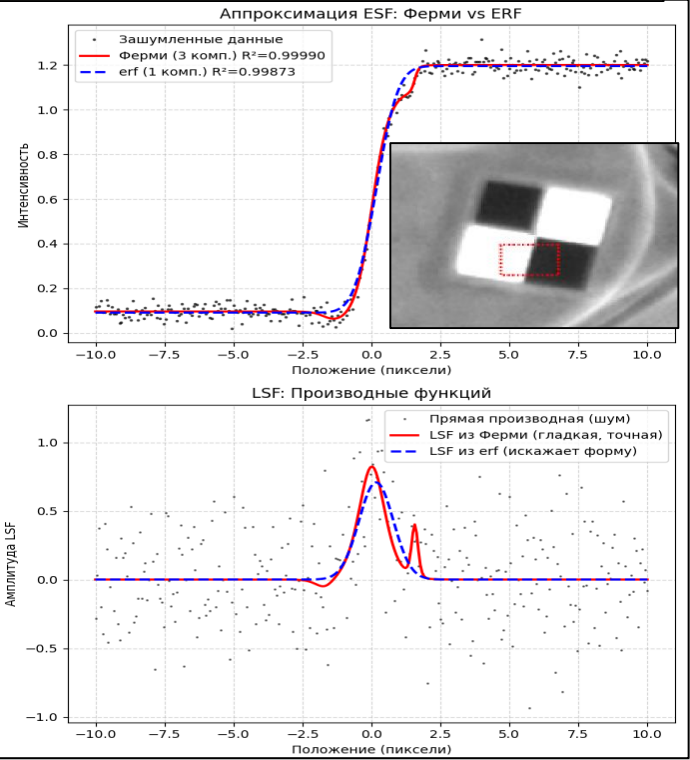
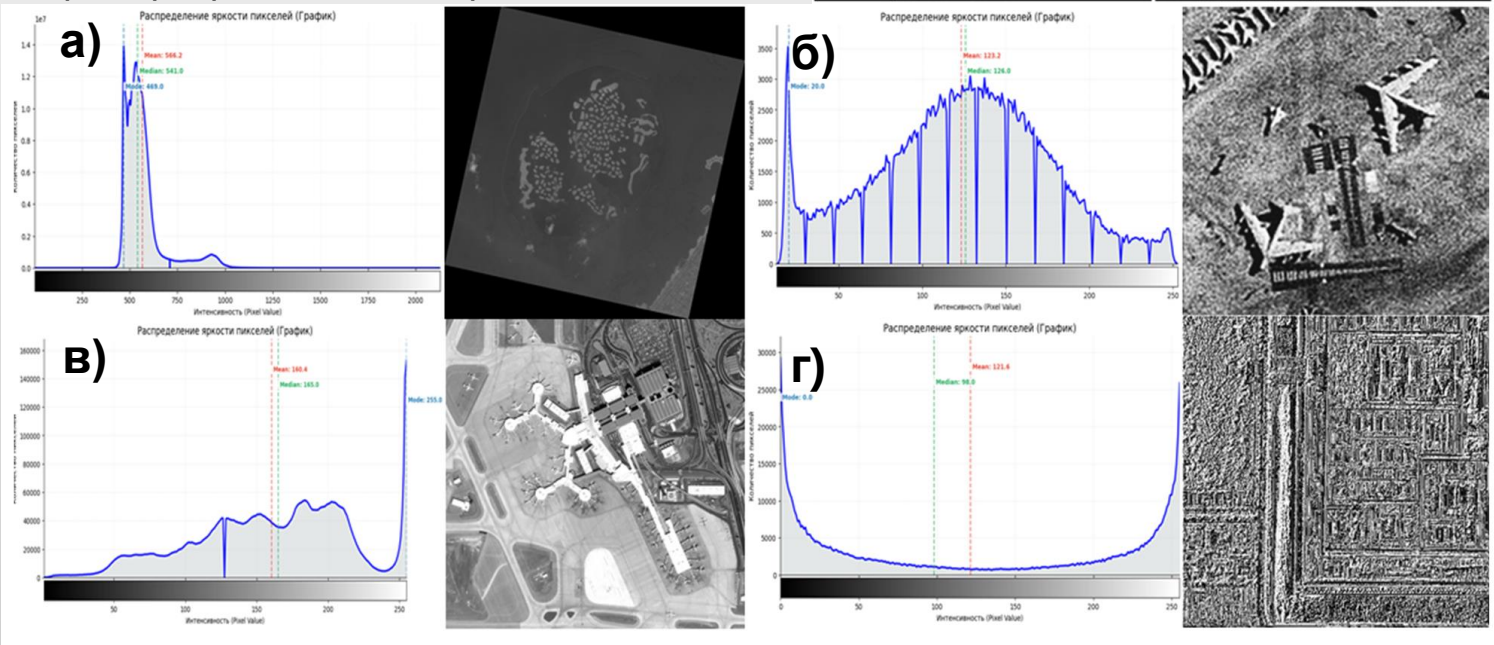
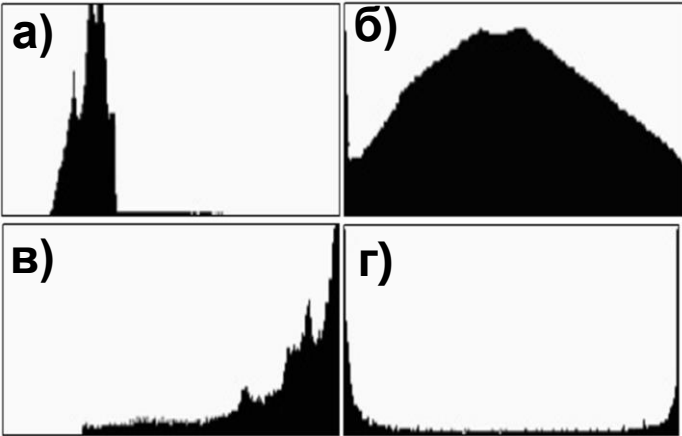


Рисунок 27 — аппроксимация ESF а) и LSF б) с помощью функции Ферми [49] и ERF.

Рисунок 22 — примерные гистограммы изображений и реальные примеры: а)тёмного неконтрастного; б)светлого; в)сбалансированного; г)высококонтрастного, и примеры реальных изображений



Предварительный анализ одиночного изображения (этап 2)

Используя различные методы для анализа гистограммы и матрицы яркостей серого (*рис. 24-26*), можно автоматизировать первичный анализ изображений для отсеивания малопригодных изображений области интереса, их сортировки с оценкой (см. *Таблица 1*) для разных целей

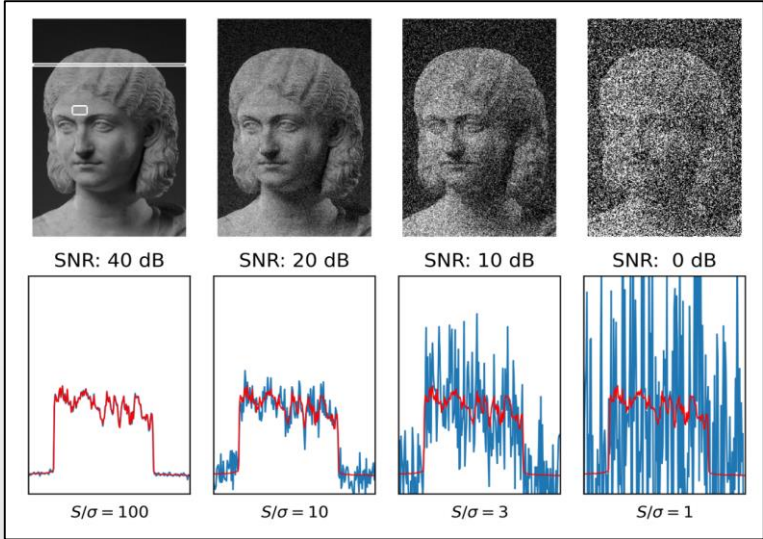


Рисунок 24 — Изображение с различным отношением сигнал/шум (SNR). Значения SNR приведены для прямоугольной области на фото лба скульптуры. Графики внизу показывают яркость серого в указанной строке изображения (красный – исходное изображение, синий – с шумом σ).

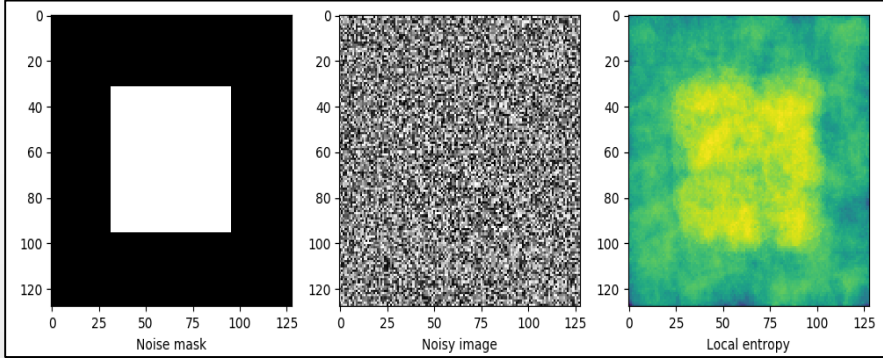


Рисунок 25 — На правом изображении изображена карта локальной энтропии для наложения правого и центральных изображений друг на друга.

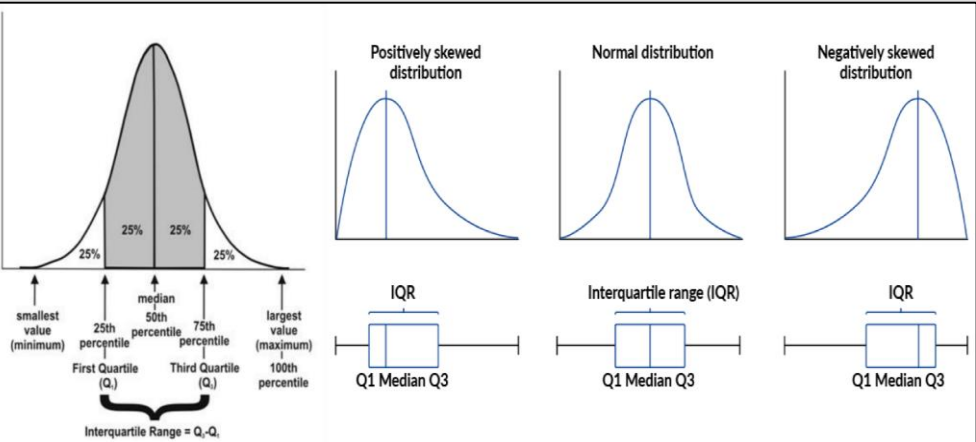


Рисунок 26 — а) Теоретический пример, на котором слева изображен график нормального распределения и выделена область, показывающая интерквартильный размах [19].

б) Смещение интерквартильного размаха и медианы в зависимости от коэффициента асимметрии.

Таблица 1 — список величин, вычисляемых при предварительном анализе изображения [2, 7, 10, 19-22].

1	Уровни квантования на пиксель (<i>quantization levels</i>)	9	Мода (<i>mode</i>)
2	Максимальное значение уровня интенсивности пикселя (<i>max level</i>)	10	Медиана (<i>median</i>)
3	Математическое ожидание (<i>mean</i>)	11	Дисперсия (<i>variance</i>)
4	Минимальное значение уровня интенсивности пикселя (<i>min level</i>)	12	Коэфф-т асимметрии (<i>skewness</i>)
5	Коэффициент вариации (<i>coefficient of variation</i> или <i>CoV</i>)	13	Экссесс (<i>kurtosis</i>)
6	Стандартное отклонение (<i>std dev</i> или σ)	14	Энтропия (<i>entropy</i>)
7	Межквартильный размах (<i>IQR</i>)	15	Энергия (<i>energy</i>)
8	Отношение сигнал/шум (<i>SNR</i> — <i>signal-to-noise ratio</i>)	16	Контраст (<i>contrast</i>)

Традиционный и дополнительный, относительный анализ качества

Традиционные 3 метрики выгодно дополнить величинами промежуточных для них функций (*таблица 2, строки 4-6*). Можно использовать комплексы из части этих метрик, сочетающие абсолютные и референчные величины, что позволяет точнее оценивать изображение. Эти комплексы IQF (Image Quality factor - фактор качества изображения) и RQI (Relative Quality Index - относительный индекс качества) имеют вид:

$$IQF = SNR \times MTF [8], \quad RQI = \frac{SNR}{SNR_{ref}} \times \frac{MTF}{MTF_{ref}} \times \frac{GSD_{ref}}{GSD} [25],$$

Таблица 2 — список величин, рассчитываемых при стандартном, традиционном (темные тона) и дополнительном (светлые тона) анализе изображения [2, 5-9, 16, 24-25].

Параметр	Назначение	Анализируемый параметр
GSD	Сэмплирование раstra изображения	Паттерн (сетка) раstra ландшафта
SNR (с/ш)	Отношение сигнала к шуму	≥ 100 (40 дБ) для панхроматич. снимков
ЛРМ	Оценка разрешения	Количество линий на пиксель
ESF (ФПК)	Мера крутизны перепада яркости	Сигмоида изменения локального С/Ш (SNR)
LSF (ФРЛ)	Мера размытости («смаза»)	FWHM — ширина ФРЛ на полувысоте
MTF (ФПМ)	Передача контраста по частотам	Площадь под кривой ФПМ до частоты Найквиста
IQF	Оценка параметра резкой яркости	Резкая, яркая контурность (<i>рис. 27</i>)
RQI _{raw/prod}	Комплексная метрика оценки пикселя: от качеств изображения на выходе ОЭА до продукта из него после стандартных коррекций	Характеристика отношений пространственно-энергетического качества пикселя изображения

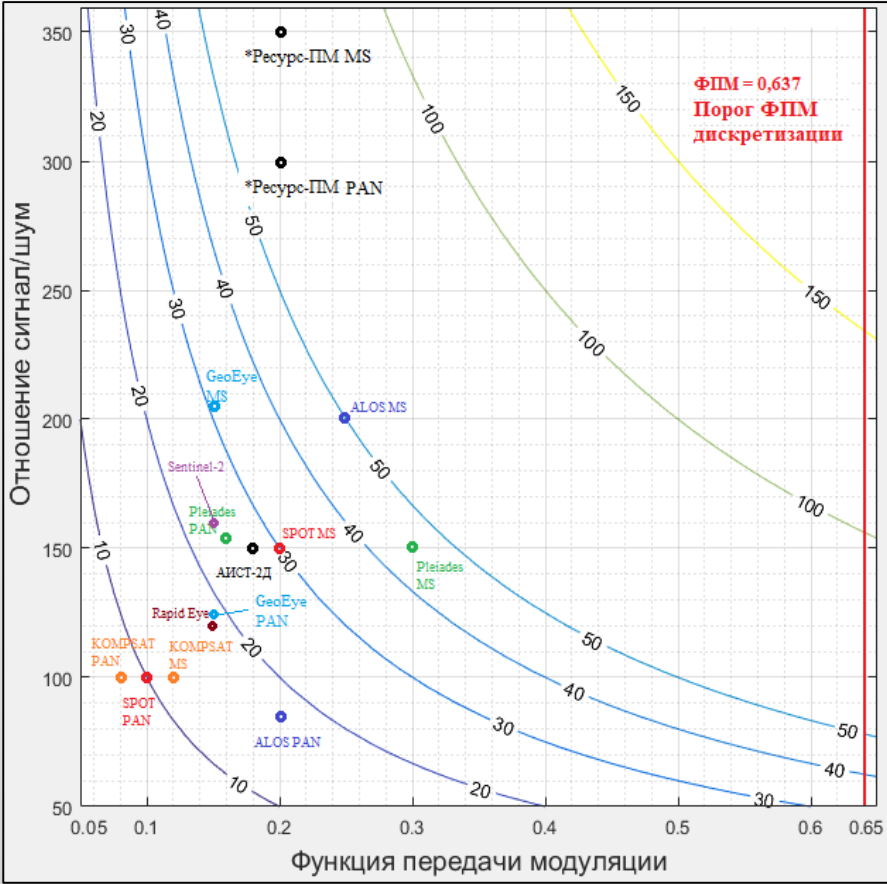


Рисунок 27 — Уровни показателя IQF в осях С/Ш и ФПМ для различных КА ДЗЗ [24].

Необходимость сравнения спутниковых изображений. I

На примере КА **Канопус-В** (рис. 16), КА **ALOS** (рис. 17) и других видно, что **многоэлементные приемники излучения (МПИ) формируют перекрытие** растровых изображений одной и той же местности. Во время их «сшивки» в одно изображение, например, в кадр, вблизи места наложения двух перекрывающихся фрагментов этих изображений возможны искажения, артефакты и участки разрушения растра (рис. 18).

Анализ и сравнение мест «сшивки» фрагментов изображений от МПИ, которые имеют разные шумы и чувствительность, позволяет определить пригодность имеющихся растров для «сшивки». Сравнение изображений после сжатия или снятых разными спутниками позволяет определить лучшие и использовать их в различных целях (рис. 19).

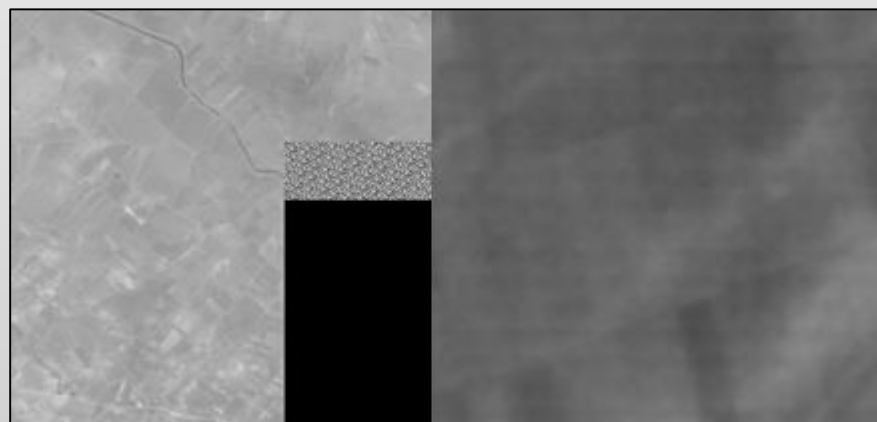


Рисунок 18 — примеры артефактов, искажений, возможных в следствие «сшивки» изображений [23].

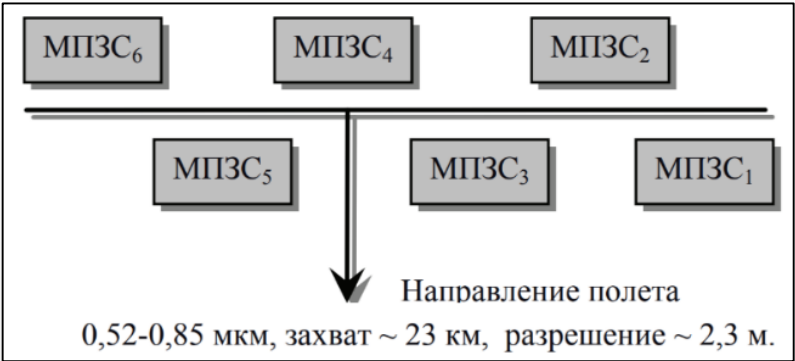


Рисунок 16 — топология фокальной плоскости аппаратуры MCC КА «Канопус-В»: каждая матрица ПЗС (МПЗС) дает свои ФПМ, С/Ш и геометрические искажения изображения [36].



Рисунок 19 — Изображения одного и того же места, снятые различными КА, имеют разное качество в зависимости от параметров движения данных КА со съемочной ОЭА и самой этой ОЭА [17].

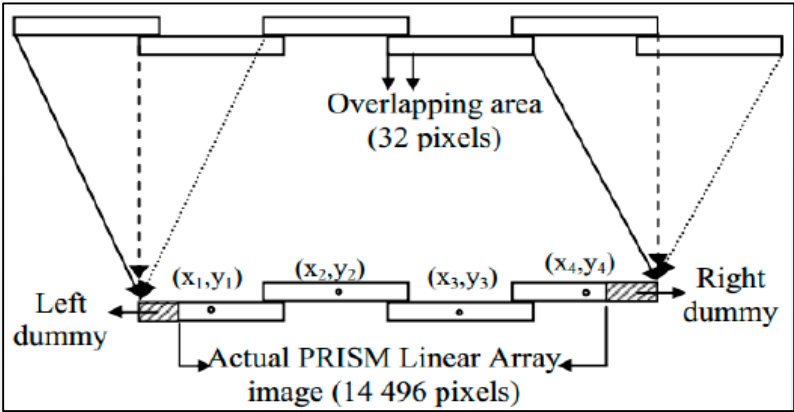


Рисунок 17 — топология фокальной плоскости надирной камеры КА ALOS (использ. линейки ПЗС с перекрытием): [16].



Необходимость сравнения спутниковых изображений. II.

Сравнение изображений необходимо, например, при сравнении спутников (*рис. 28*) или при оценке качеств после сжатия, или преобразований изображения (*рис. 29-30*).

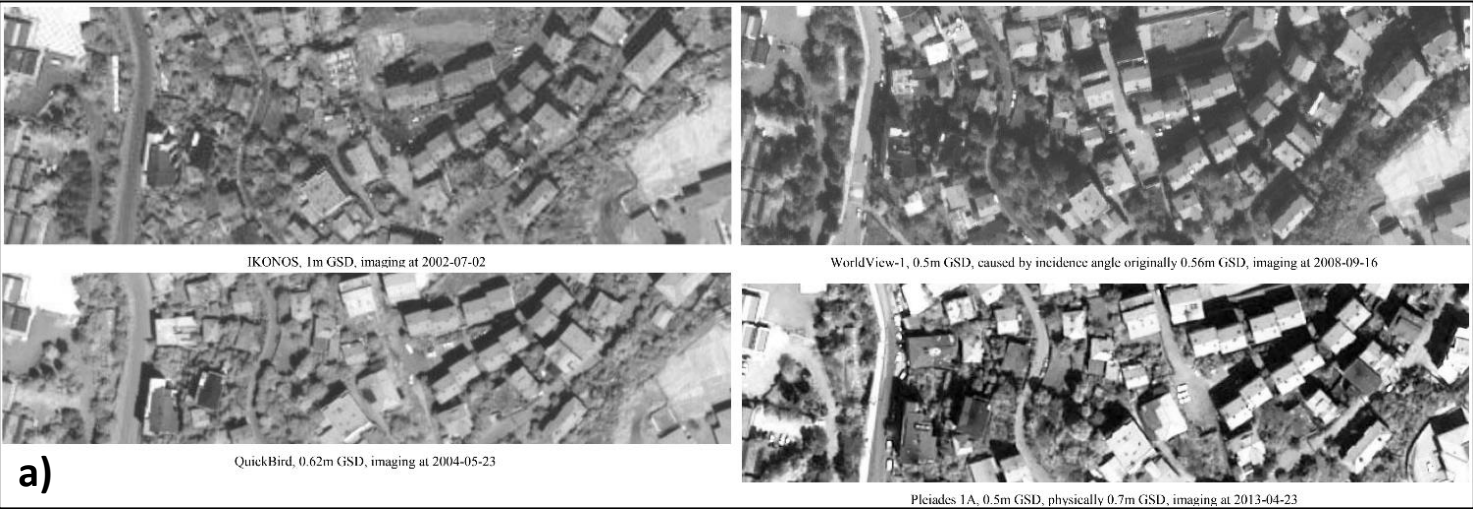


Рисунок 28 — а)Изображения одного и того же места, снятые различными спутниками; б)гистограммы интенсивности этих изображений, которые используются для предварительного анализа [17].

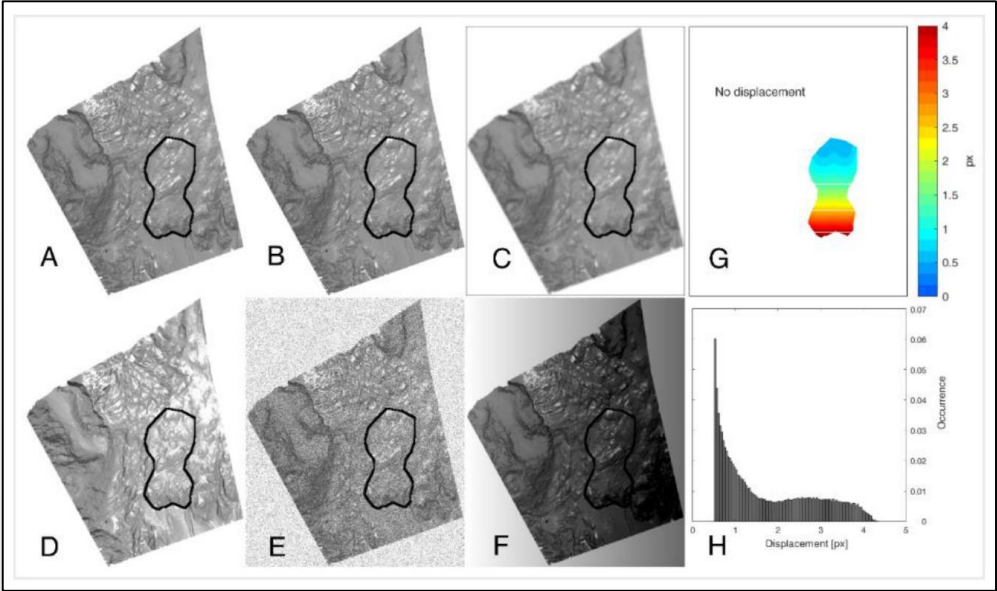


Рисунок 29 — (A) Оригинальное изображение, (B – F) преобразованные изображения; черным выделена ОИ; (G) карта и (H) гистограмма смещений ОИ [26].

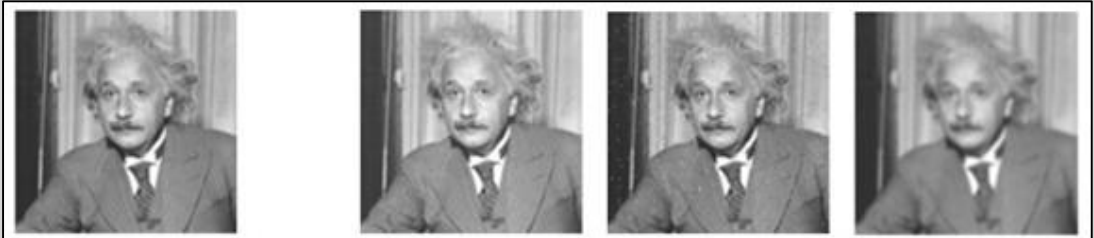


Рисунок 30 — постепенная деградация качества изображения при разной степени размытия («смаза»).

Сравнение изображений, этап 1

Используя различные методы (**Таблица 3** и нормированные величины из **таблицы 1**)возможно автоматизировать сравнение изображений (**Рис. 31-32**), что позволяет находить зоны различий или определять степень изменений, например, вследствие преобразований и т.д.

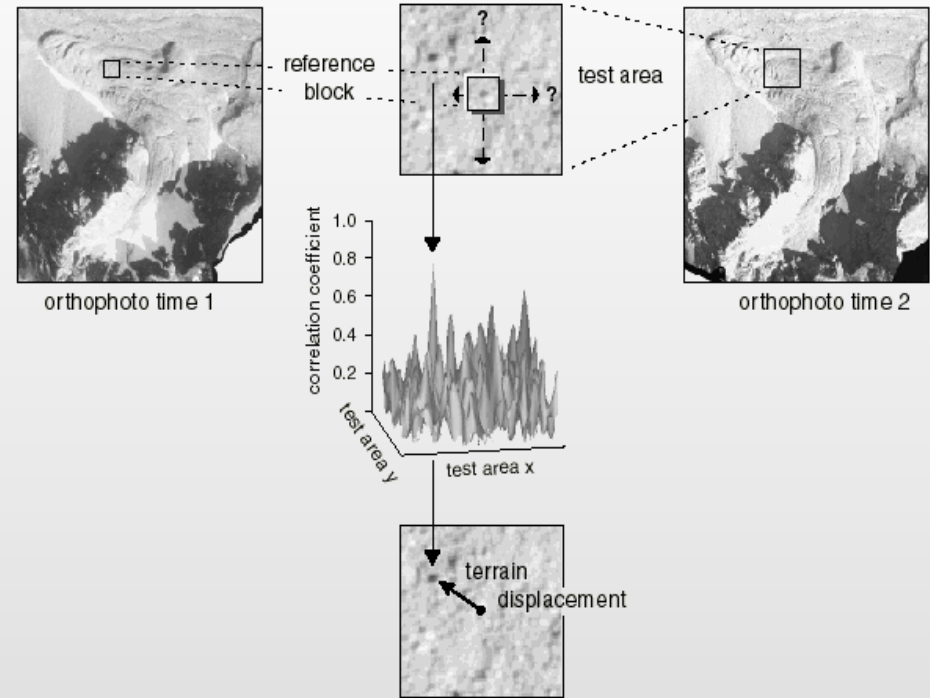


Рисунок 31 — Коэффициент корреляции показывает, появление нового объекта, например, при сравнении двух ортопланов, созданных на моменты t_1 и t_2 , то есть на интервале времени t_2-t_1 [27].

Вывод: следует все больше переходить от визуальной к автоматической оценке снимков, в том числе, без адаптации изображений от ФПУ к зрению человека (см. **рис. 14**), которую реализовать с помощью устойчивых числовых методик и соответствующих масштабируемых программно-аппаратных средств.

Таблица 3 — Результаты сравнения двух изображений [4, 7, 28-34]

Средняя квадратическое отклонение (MSE — mean squared error)
Пиковое отношение сигнала к шуму ($PSNR$ — Peak Signal-to-Noise Ratio)
Ковариация ($covariaton$)
Универсальный индекс качества изображения (Q_{WB} — Universal Image Quality Index)
Индекс структурного подобия (сходства) ($SSIM$ — <i>Structural Similarity Index</i>)
Мультимасштабный индекс структурного подобия ($MS - SSIM$)
Разница энтропий ($\Delta entropy$)
Коэффициент корреляции Пирсона (pcc — Pearson correlation coefficient)
Коэффициент корреляции Спирмена ($srcc$ — Spearman rank correlation coefficient)
Показатель стабильности резких границ (ES — <i>Edge Stability</i>)

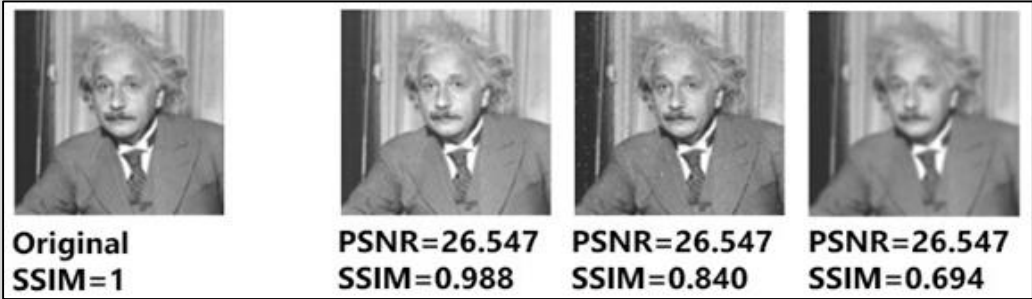


Рисунок 32 — параметры PSNR с SSIM указывают степень искажений.

Заключение

Для получения изображений требуемого или допустимого качества, можно использовать традиционные метрики, которые, однако, неточны, неустойчивы по полю снимка и требуют значительных затрат человеко-часов (до 20 дешифровщиков) и компьютерных ресурсов [1].

Представленный выше материал показывает, что следует все больше *переходить от визуальной к автоматической оценке снимков, в том числе, без адаптации изображений от ФПУ ОЭА ДЗЗ к зрению человека, с помощью устойчивых числовых методик и соответствующих программно-аппаратных средств.* При этом, использование большего количества **устойчивых статистических характеристик и сравнительных абсолютных и сравнительных метрик** позволяет: 1) реализовать более точные способы оценки качеств изображения, независимые от человеческого фактора, 2) эффективнее их сортировать для принятия по ним решений для разных применений, включая более точное обучение нейросетей.

Предлагаемое решение для автоматической оценки

Создание методик и программно-технических средств для автоматического решения для анализа и оценок спутниковых изображений, позволяющего:

- 1) отсеивать неподходящие изображения до использования трудоемких и очень точечных выборочных оценок основных метрик;
- 2) дополнить традиционные метрики новыми;
- 3) сравнивать и группировать изображения, в том числе, при использовании снимков, полученных от разных космических систем, в частности, для более качественного и быстрого картографирования значительных территорий;
- 4) обучить нейросеть, для возможного создания нового, сверхсовременного и качественного продукта по анализу и оценке (например, дискриминирующих функций, классификаторов и других).

Результаты выполнения предлагаемого решения

Поставленные задачи были решены с помощью программного модуля, который написан на языке Python для использования в качестве действующего макета программного обеспечения, которое позволяет производить автоматическую предварительную оценку спутниковых снимков Земли для определения их качеств и выявления изображений, которые пригодны для тех или других видов использования. Разработанный модуль также проводит комплексную оценку радиометрического качества изображения с использование 3-х традиционных и двух расширенных метрик (IQF и RQI) в качестве дополнительных.

Кроме того, с помощью разработанного модуля с использованием сравнительны показателей: сигнальные, шумовые, так и структурные — возможно не только определить конкретные области изображения, где имеются дефекты и аномалии или определить проблемы с конкретным фотоприемником спутника, но и сравнить изображения разных МПИ в ОЭА, результаты сжатия изображения, а также качество изображений, получаемых с различных КА КС.

Список источников (1)

[1] — **А.С. Молчанов, Е.В. Чаусов.** Методика оценивания линейного разрешения авиационных цифровых оптико-электронных систем в процессе летных испытаний / Известия ТулГУ. Технические науки. — 2019. — Вып. 2. — С. 301–304 (про средние оценки ЛРМ с помощью 20 дешифровщиков).

[2] — **Jensen, J. R.** Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective / J. R. Jensen. — 4th ed. — Glenview : Pearson Education, 2015. — 656 p.

[3] — **Robert D. Fiete, Theodore Tantalo.** Comparison of SNR image quality metrics for remote sensing systems. Optical Engineering, Vol. 40 No. 4, April 2001. P.p 574–585.

[4] — **Трекин, А.Н.** Методы математического моделирования и алгоритмы автоматической обработки аэрокосмических изображений при распознавании природных и антропогенных объектов : дис. канд. техн. наук / А. Н. Трекин. МФТИ — Москва, 2015. — 180 с.

[5] — **Батраков А.С., Анатольев А.Ю.** // Математическая модель для прогнозирования линейного разрешения космических оптико-электронных систем дистанционного зондирования // Оптический журнал. 2000. т. 67, No 7. С. 92–97.

[6] — **G.D. Boreman.** Modulation Transfer Function in Optical and Electro-Optical Systems. Tutorial Texts Series Related Titles. 2-nd Edition. SPIE Press, Bellingham, Washington USA. 2021. 140p.

[7] — **Шовенгердт Р.А.** Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений : пер. с англ. / Р. А. Шовенгердт. — Москва : Техносфера, 2010. — 560 с.

[8] — **Pléiades Imagery User Guide** [Электронный ресурс] : руководство пользователя : отчет № USRPHR-DT-125-SPOT-2.0 / сост. L. Coeurdevey, C. Gabriel-Robez ; Astrium GEO-Information Services, Centre National d'Études Spatiales (CNES). — Toulouse : Astrium GEO-Information Services, 2012. — 118 с. — Режим доступа: https://content.satimagingcorp.com/media/pdf/User_Guide_Pleiades.pdf (дата обращения: 16.03.2026).

[9] — **Crisp N.H., Roberts P.C. E., Livadiotti S.** D5.2 – Literature Review of the Benefits and Applications of Very Low Earth Orbits for Earth Observation. European Commission, 2018. 32 p. URL: https://discoverer.space/wp-content/uploads/2020/05/D5_2_Literature_Review.pdf (дата обращения: 07.04.2026).

[10] — **ISO 12233:2017.** [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:12233:ed-3:v1:en> (дата обращения: 16.03.2026)

[11] — **Божко А.Н., Жук Д.М., Маничев В.Б.** Компьютерная графика: Учеб. пособие для вузов. — М: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. — 392 с: ил. — (Информатика в техническом университете.)

[12] — **Bandara R.** A Music Keyboard with Gesture Controlled Effects Based on Computer Vision [Electronic resource] / R. Bandara ; advisor G. S. Makalanda. — University of Sri Jayewardenepura, 2011.

[13] — **Alicia Fernández-Oliveras, Antonio M. Pozo and Manuel Rubiño.** Analysis of the Modulation Transfer Function Spectral Variation in Different Detector Arrays by Means of Speckle Patterns. Journal of Imaging Science and Technology® 53(3): 031101–031101-6, 2009.

[14] — **Andrew B. Watson.** A formula for the mean human optical modulation transfer function as a function of pupil size. Journal of Vision (2013) 13(6):18, 1–11.

[15] — **Л.Б. Кочин.** Методы и средства отображения цветовой информации. / Балт. гос. техн. ун-т. – СПб., 2012. 268 с;

[16] — **Rodrigues, T.L.** Accuracy Improvements in the Orientation of ALOS PRISM Images Using IOP Estimation and UCL Kepler Platform Model / T. L. Rodrigues, E. Mitishita, L. Ferreira, A. M. G. Tommaselli // Remote Sensing. — 2017. — Vol. 9, № 7. — Art. 634. — DOI: 10.3390/rs9070634.

[17] — **Jacobsen K.** Radiometric and Geometric Characteristics of Pleiades Images / K. Jacobsen // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. — 2014. — Vol. XL-1. — P. 595–601. — ISPRS Technical Commission I Symposium. — URL: <https://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-info-sci.net/XL-1/595/2014/> (дата обращения: 16.03.2026).

Список источников (2)

[18] — **Гонта, А.** Резкость изображения и оборудование CCTV / А. Гонта, Е. Седов // Алгоритм безопасности. — 2012. — № 4. — С. 74–77.

[19] — **Zwillinger, D.** CRC Standard Probability and Statistics Tables and Formulae / D. Zwillinger, S. Kokoska. — New York : Chapman & Hall, 2000. — 554 p.

[20] — **Kudela R.M.** Expanded Signal to Noise Ratio Estimates for Validating Next-Generation Satellite Sensors in Oceanic, Coastal, & Inland Waters / R. M. Kudela, S. B. Hooker, L. S. Guild [и др.] // Remote Sensing. — 2017. — Vol. 9, № 7. — Art. 634.

[21] — **Tisse C.-L.** Does resolution really increase image quality? / C.-L. Tisse, F. Guichard, F. Cao // DxO Labs White Paper. — 2004. — 12 p.

[22] — **Liang Q.** Communications, Signal Processing, and Systems: Proceedings of the 2018 CSPA / Q. Liang, X. Liu. — Vol. II: Signal Processing. — Singapore : Springer, 2019. — 1020 p.

[23] — **Винтаев В.Н., Жиленев М.Ю., Ушакова Н.Н.** Учет текущего прогноза снижения апертуры функции рассеяния точки на изображениях, формируемых бортовой оптико-электронной аппаратурой космического аппарата. Доклад. IX Всероссийская Открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов», Институт космических исследований РАН. 12–16 ноября 2011 года. Москва. 2011.

[24] — **В.Я. Геча, М.Ю. Жиленев, С.А. Новоселов.** Обзор средств оценки составляющих качества изображения на выходе спутниковой оптико-электронной аппаратуры дистанционного зондирования Земли в целях обеспечения бортовой обработки снимков на борту космического аппарата. Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. Т.185, №6, 2021. С. 38-48;

[25] — **Wertz J.R.** Space Mission Analysis and Design / W.J. Larson, J.R.Wertz – 3rd ed. — El Segundo: Microcosm Press; Boston: Kulwer Academic Publishers, 1999. — 994p/ - (Thee Space Technology Library).

[26] — **Dematteis, N.** Comparison of Digital Image Correlation Methods and the Impact of Noise in Geoscience Applications / N. Dematteis, D. Giordan // Remote Sensing. — 2021. — Vol. 13, № 2. — P. 327. — DOI 10.3390/rs13020327.

[27] — **Kääb, A.** Surface Geometry, Thickness Changes and Flow Fields on Creeping Mountain Permafrost: Automatic Extraction by Digital Image Analysis / A. Kääb, M. Vollmer // Permafrost and Periglacial Processes. — 2000. — Vol. 11, № 4. — P. 315–326. — DOI 10.1002/1099-1530(200012)11:4<315::AID-PPP365>3.0.CO;2-J.

[28] — **Jawak, S.D.** A Comprehensive Evaluation of PAN-Sharpening Algorithms Coupled with Resampling Methods for Image Synthesis of Very High Resolution Remotely Sensed Satellite Data / S. D. Jawak, A. J. Luis. — [S. l. : s. n.], 2014. — 336 p.

[29] — **Huang, F.** Meteorological Satellite Images Prediction Based on Deep Multi-scales Extrapolation Fusion / F. Huang, W. Cheng, P. Wang [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2018. — Vol. 394, № 4. — P. 042079.

[30] — **Wang, Z.** A Universal Image Quality Index / Z. Wang, A. C. Bovik // IEEE Transactions on Image Processing. — 2002. — Vol. 11, № 4. — P. 625–629.

[31] — **Pearson, K.** Notes on regression and inheritance in the case of two parents / K. Pearson // Proceedings of the Royal Society of London. — 1895. — Vol. 58. — P. 240–242.

[32] — **Kendall, M.G.** The Advanced Theory of Statistics. Volume 2: Inference and Relationship / M. G. Kendall, A. Stuart. — London : Griffin, 1973. — 723 p.

[33] — **Spearman, C.** The Proof and Measurement of Association between Two Things / C. Spearman // The American Journal of Psychology. — 1904. — Vol. 15, № 1. — P. 72–101.

[34] — **Chan, J. C.-W.** A comparison of superresolution reconstruction methods for multiangle CHRIS/Proba images / J. C.-W. Chan // Proc. of SPIE. — 2008. — Vol. 7109 : Image and Signal Processing for Remote Sensing XIV. — P. 710904-1–710904-11. — DOI: 10.1117/12.800267.

[35] — **Кузнецов А.Е., Пресняков О.А.** Организация процесса формирования мозаичных изображений земной поверхности // Цифровая обработка сигналов. 2011. № 3. С. 47-52.

[36] — **Кузнецов А.Е., Побаруев В.И., Пошехонов, О.А. Пресняков.** Программный комплекс обработки информации от сканерно-кадровых съемочных систем КА «Канопус-В» и «БКА». Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 1. С. 287-300

[37] — **И.А. Бессмертный.** Основы компьютерной графики. Санкт-Петербург 2010.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ.