Исследование возможностей целевого применения КС «Кондор-ФКА» для построения ЦММ методом радарной интерферометрии

Автор:
Шувайникова Татьяна Петровна,
НЦ ОМЗ АО “РКС”, МФТИ

Контакты:
shuvainikova.tp@phystech.edu

2026

Актуальность

Цифровая модель местности (ЦММ) — цифровая картографическая модель, содержащая данные об объектах местности и ее характеристиках [1].

Основные области использования:

- Мониторинг и управление изменениями, в т.ч. последствия чрезвычайных ситуаций
- Строительство и территориальное планирование
- Добывающая промышленность
- Сельское и лесное хозяйство
- Экология и расход ресурсов
- Землеустройство и кадастр
- Логистика и связь

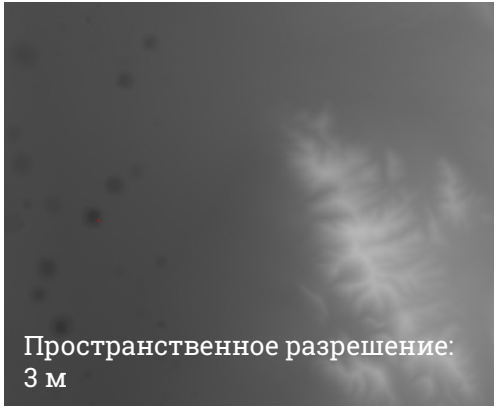


Рис. 1а ЦММ по данным КА Кондор-ФКА №2

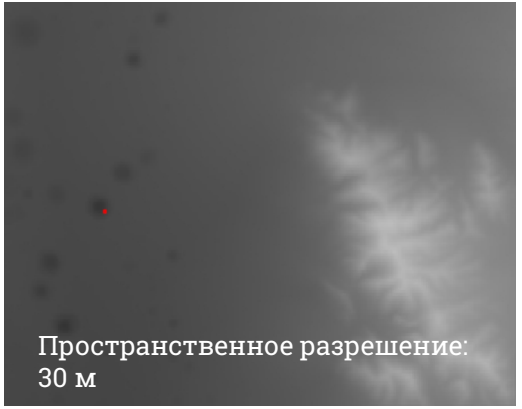


Рис. 1б ЦММ AW3D30 по данным КА ALOS-2

Метод получения ЦММ	↑Точность	↓Стоимость	Полнота
Использование глобальных ЦММ	5	1	1
Аэрофотосъёмка с БПЛА	2-3	4	4
Лазерное сканирование, лидарная съёмка	1	5	3
Радарная съёмка	4	3	2
Фотограмметрия	2-3	2	5

Интерес использования отечественных данных детального разрешения КС «Кондор-ФКА» для обширного класса задач потребителя растет

↓

Необходим анализ реализуемости получения ЦММ методом радарной интерферометрии согласно требованиям пользователя с учетом возможностей КС

Цель и задачи

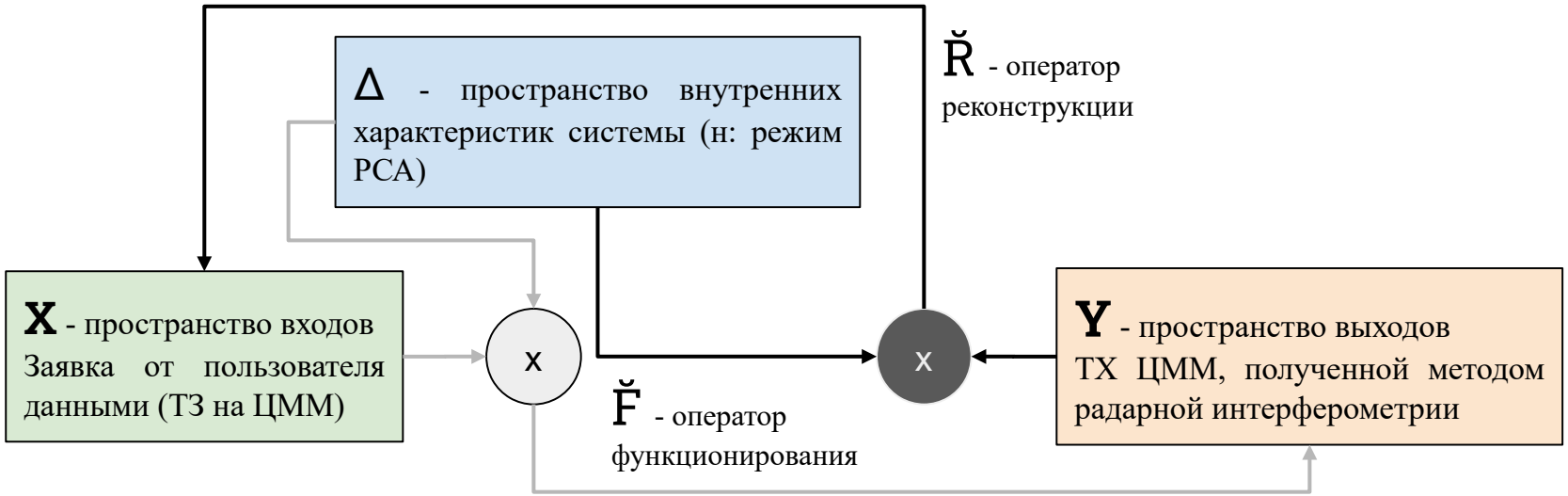
Цель: Системная операторная модель как основа методики оценки реализуемости получения ЦММ методом радарной интерферометрии соответственно требованиям потребителя с учетом возможностей КС

Объект исследования: Радарная интерферометрия.

Предмет исследования: Получение ЦММ методом классической радарной интерферометрии.

Прямая задача (задача функционирования): расчет возможности получения ЦММ с заданными параметрами точности и качества по заданию потребителя

Обратная задача (задача реконструкции): определение ошибок ЦММ и причин их возникновения, принятие решения соответствия характеристик готовой ЦММ техническому заданию



Характеристики цифровых моделей местности

Параметры ЦММ:
- пространственное разрешение,
- вертикальная точность,
- параметры геопривязки.

Показатели точности ЦММ:
- погрешности (ухудшение) пространственного разрешения
- относительная, абсолютная погрешность по высоте,
- ошибки геопривязки

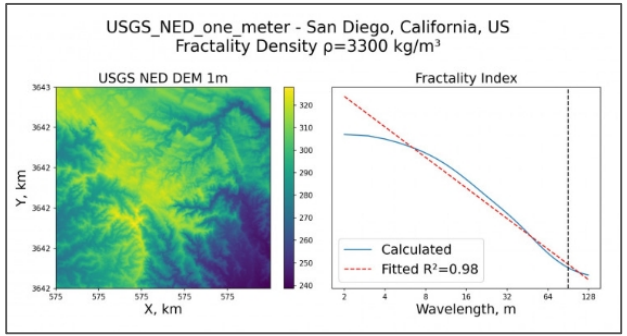


Рис. 2 Метод анализа пространственного спектра [2]

Методы оценки точности и качества ЦММ:
- Метод анализа пространственного спектра [пространственное разрешение]
- Метод вычитания двух ЦММ, сравнение с эталоном [вертикальная точность]
- Метод сравнения с эталоном [ошибки геопривязки]
- Статистические методы
- Качественные методы экспертизы

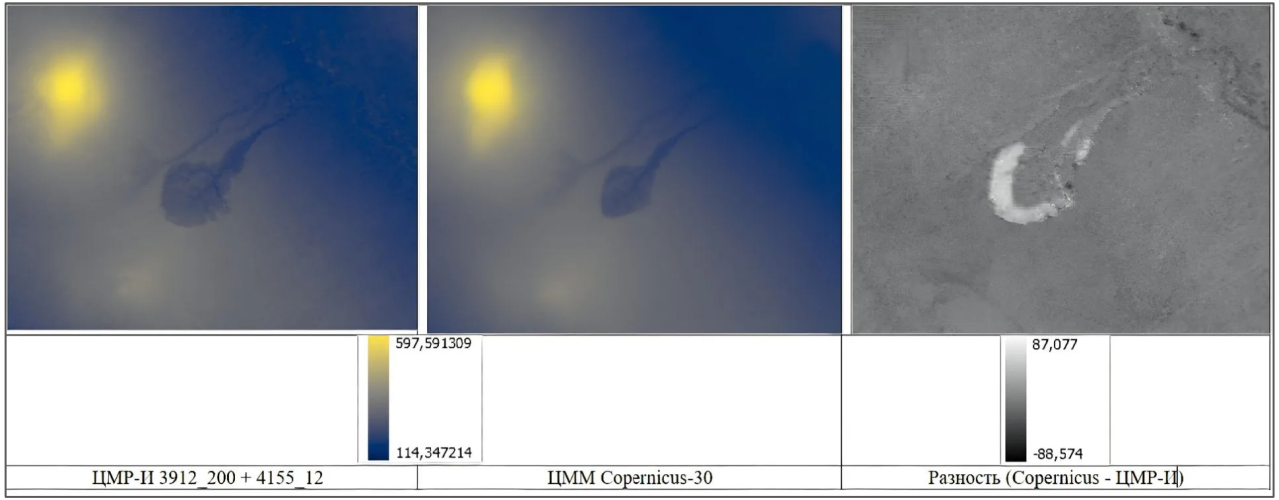


Рис. 3 Метод вычитания двух ЦММ [3]

Пространство входных параметров - заявка пользователя

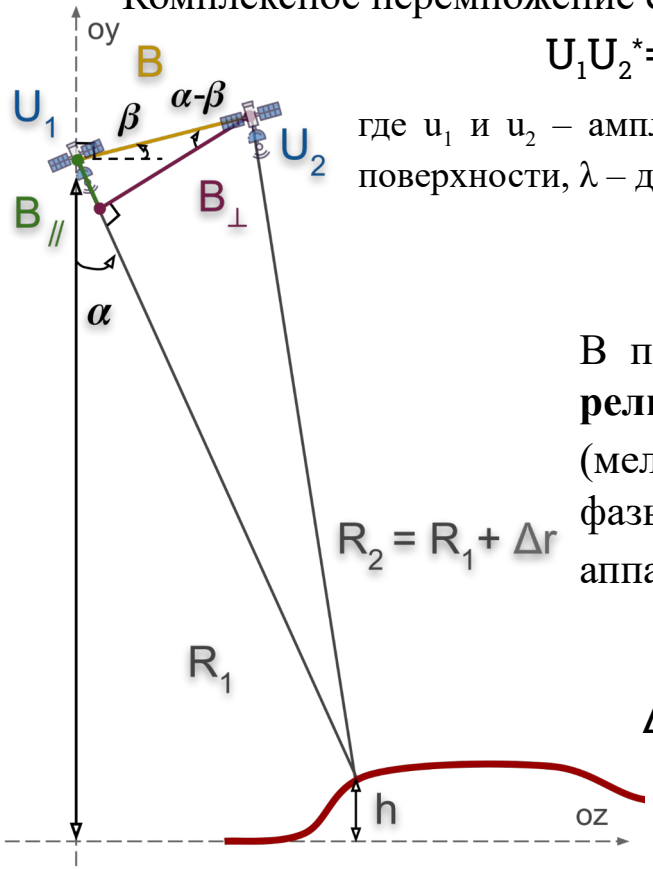
Таблица 1: Анализ требуемой точности и качества ЦММ для основных пользователей данных

Область применения	**Пространственное разрешение, м**	**Вертикальная точность (СКО), м**	**Точность геопривязки**
Мониторинг и управление изменениями, в т.ч. последствия чрезвычайных ситуаций [4]	➢Региональный контроль: 10-30 ➢Районный мониторинг: 0.5-5.0 ➢Детальное наблюдение: ≤ 1	➢Региональный контроль: 5-16 ➢Районный мониторинг: ≤ 1 ➢Детальное наблюдение: 0.05-0.5	Max ошибка ≤ 0.3 шага пикселя ЦММ СКО ≤ 0.1 шага пикселя ЦММ
Строительство и территориальное планирование [5]	Масштаб 1:5000 : 0.5-2.0 1:2000 : 0.2-0.5 1:1000 : 0.1-0.2 1:500 : 0.05-0.1	Масштаб 1:5000 : 0.5-1.0 1:2000 : 0.2-0.4 1:1000 : 0.1-0.2 1:500 : 0.05-0.1	Max ошибка взаимного положения ≤ 0.05 м СКО по масштабу, м 1:5000 : 1.0-2.5 1:2000 : 0.4-0.6 1:1000 : 0.2-0.3 1:500 : 0.1-0.15
Добывающая промышленность [6]	Масштаб 1:5000 : 0.2-0.5 1:2000 : 0.1-0.2 1:1000 : 0.05-0.1 1:500 : 0.02-0.05	Геотехнический мониторинг: 0.02-0.05 Съёмочное обоснование карьера: ~0.2	Max ошибка взаимного положения 0.4-0.7 м СКО по масштабу 1:1000 - 1:2000 : 0.4-0.8 м
Сельское хозяйство [7]	➢Региональный контроль: 2-10 ➢Районный мониторинг: 0.5-2 ➢Детальное наблюдение: 0.1–0.5	➢Региональный контроль: 0.1-0.3 ➢Районный мониторинг: 0.05-0.15 ➢Детальное наблюдение: 0.01-0.05	➢Региональный контроль: 0.1-0.5 м ➢Районный мониторинг: 0.03-0.15 м ➢Детальное наблюдение: 0.02–0.05 м

Физическая модель метода радарной интерферометрии

Комплексное перемножение сигналов двух прохождений КА над точкой земной поверхности:

$$U_1U_2^* = u_1u_2\exp[j(\varphi_1 - \varphi_2)] = u_1u_2\exp[-4\pi j\Delta r / \lambda]$$



где u_1 и u_2 – амплитуды сигналов, Δr – разность расстояний от точек съемки до элемента поверхности, λ – длина волны радара.

Интерферограмма – это разность фаз сигналов:

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = \Delta\varphi_t + \Delta\varphi_d + \Delta\varphi_a + \Delta\varphi_N$$

В первом приближении разность фаз $\Delta\varphi$ содержит информацию о **рельефе** $\Delta\varphi_t$ (топографическая фаза), **смещениях** $\Delta\varphi_d$ (мелкомасштабной динамике отражающей поверхности), флуктуациях фазы на трассе распространения сигнала $\Delta\varphi_a$, тепловых шумах аппаратуры и шумах обработки $\Delta\varphi_N$.

С учётом малости $\Delta\varphi_a$ и $\Delta\varphi_N$:

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_t + \Delta\varphi_d = [-4\pi B_\perp h / \lambda\, r_1 \sin(\alpha)] + [-4\pi\delta r_d / \lambda]$$

Рис. 4 Геометрия интерферометрической съёмки

Математическая модель метода радарной интерферометрии

Классическая интерферометрия

Выходной продукт: цифровая карта местности $||\mathbf{h}_{ij}||$

Числовой показатель чувствительности фазы рельефа $\Delta\varphi_t$:
Высота неоднозначности - перепад высоты рельефа между двумя точками на местности, при котором значения разности фаз на интерферограмме отличаются на 2π.

$$\mathbf{h_{am}} = \lambda H_1 tg(\alpha) / B_\perp$$

Выбор значения h_{am} напрямую влияет на возможность формирования интерферограммы с минимизацией искажений и достижения заданной точности создания ЦММ.

Относительная точность измерений

Выходной продукт: цифровая карта когерентности $||\square_{ij}||$

Оценка взаимной корреляции фазы двух отраженных сигналов от поверхности: степень когерентности отраженных сигналов двух радарных изображений U_1 и U_2.

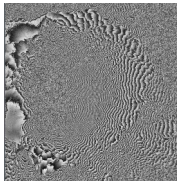
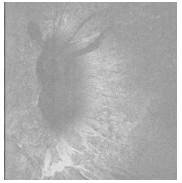
$$\square_{12} = E\{U_1 U_2^*\} / \sqrt{(E\{|U_1|^2\}E\{|U_2|^2\})}$$

$$\square = \square_N \square_{sp} \square_{td} \square_V$$

где $E\{x\}$ – операция взятия математического ожидания по пространственному ансамблю отсчетов с центром в текущем элементе изображения, декорреляция тепловых шумов γ_N, пространственная γ_{sp}, временная γ_{td}, слоистых покровов γ_V .

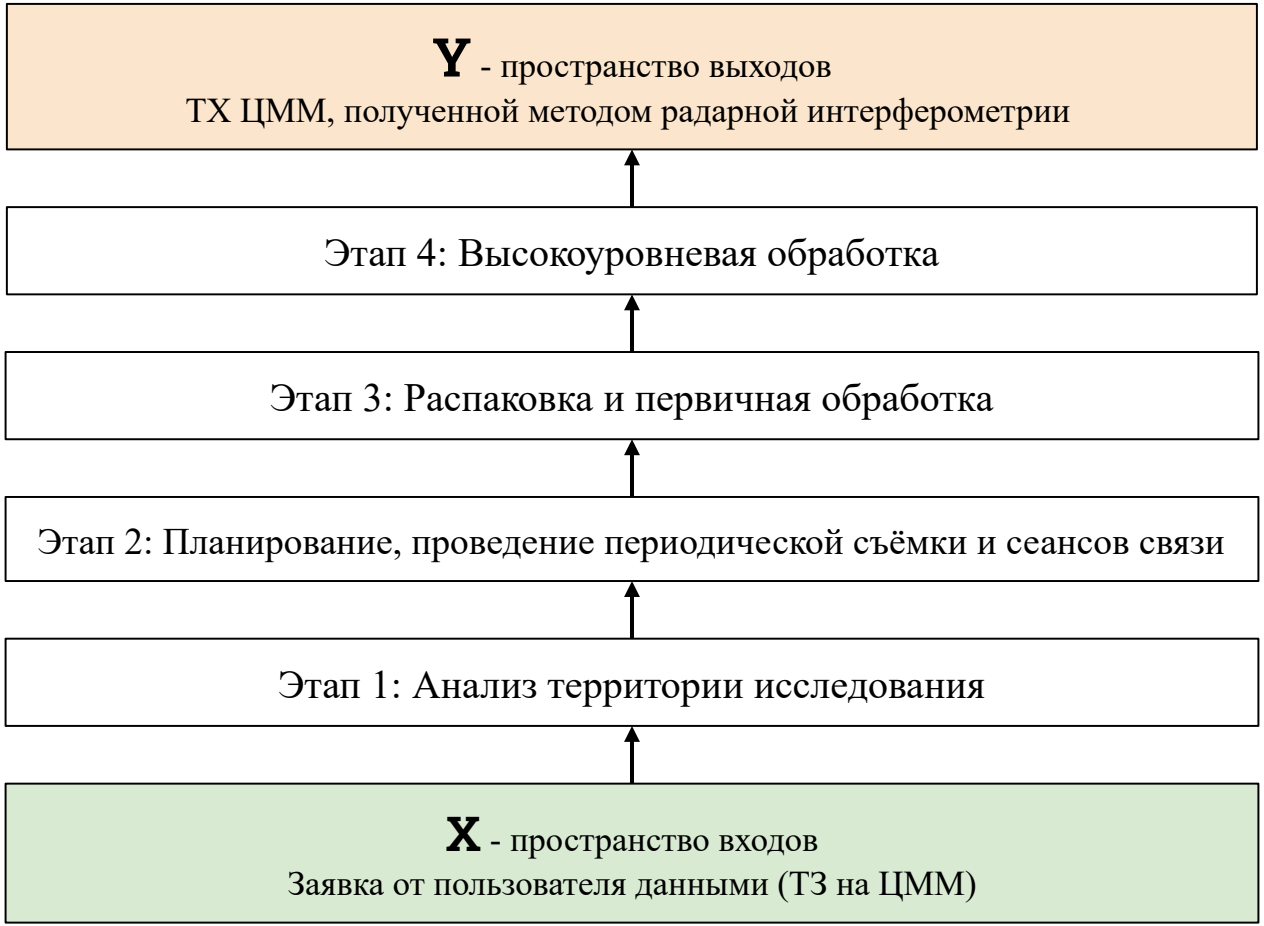
Информационная модель метода радарной интерферометрии

Таблица 2: ИП интерферометрии, получаемые космической системой «Кондор-ФКА» [8, 9]

Продукт	Описание	Хранение	Назначение	Пример
Интерферограмма продукт ЦКФ-И, код типа IPH	Промежуточный результат интерферометрической обработки. Цифровая матрица, содержащая значения разности фаз интерферометрической пары РЛИ.	real4 на отсчёт, GeoTIFF	Продукт для быстрой оценки рельефа местности и зон неоднозначности.	
Карта когерентности продукт ЦКК-И, код типа COH	Промежуточный результат интерферометрической обработки. Цифровая матрица, содержащая значения параметра когерентности интерферометрической пары РЛИ.	real4 на отсчёт, GeoTIFF	Оценка изменений на поверхности за время между съёмками. Используется в качестве дополнительного слоя при классификации изображений.	
Цифровая карта рельефа местности продукт ЦКР-И, код типа DTM	Цифровая матрица относительных или абсолютных высот рельефа, полученная в результате обработки интерферометрической пары РЛИ.	real4 на отсчёт, GeoTIFF	Основной слой, дающий информацию о высоте. На основе рельефа возможно построение 3D модели местности, изолиний на карте и профиля высоты.	

Пространство выходных параметров - технические характеристики ЦММ, которую можно получить по данным доступной КС, в нашем случае ИП ЦКР-И, сформированный по данным Кондор-ФКА №2 согласно технологической цепочке

Технологическая цепочка проведения интерферометрической съёмки и формирования ЦММ



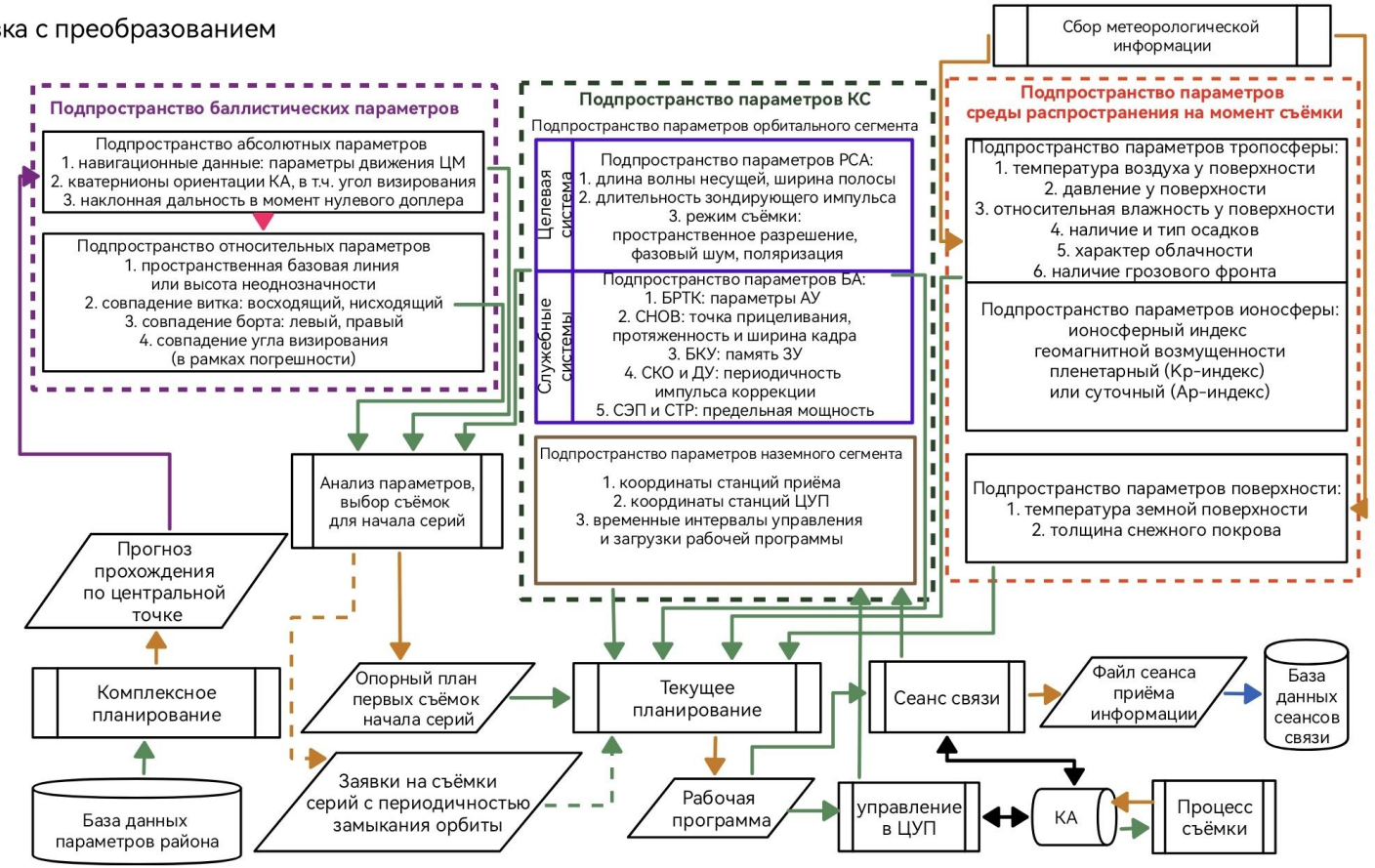
Этап 1: Анализ территории исследования



Этап 2: Планирование, съёмка, сеанс связи

Обозначения:

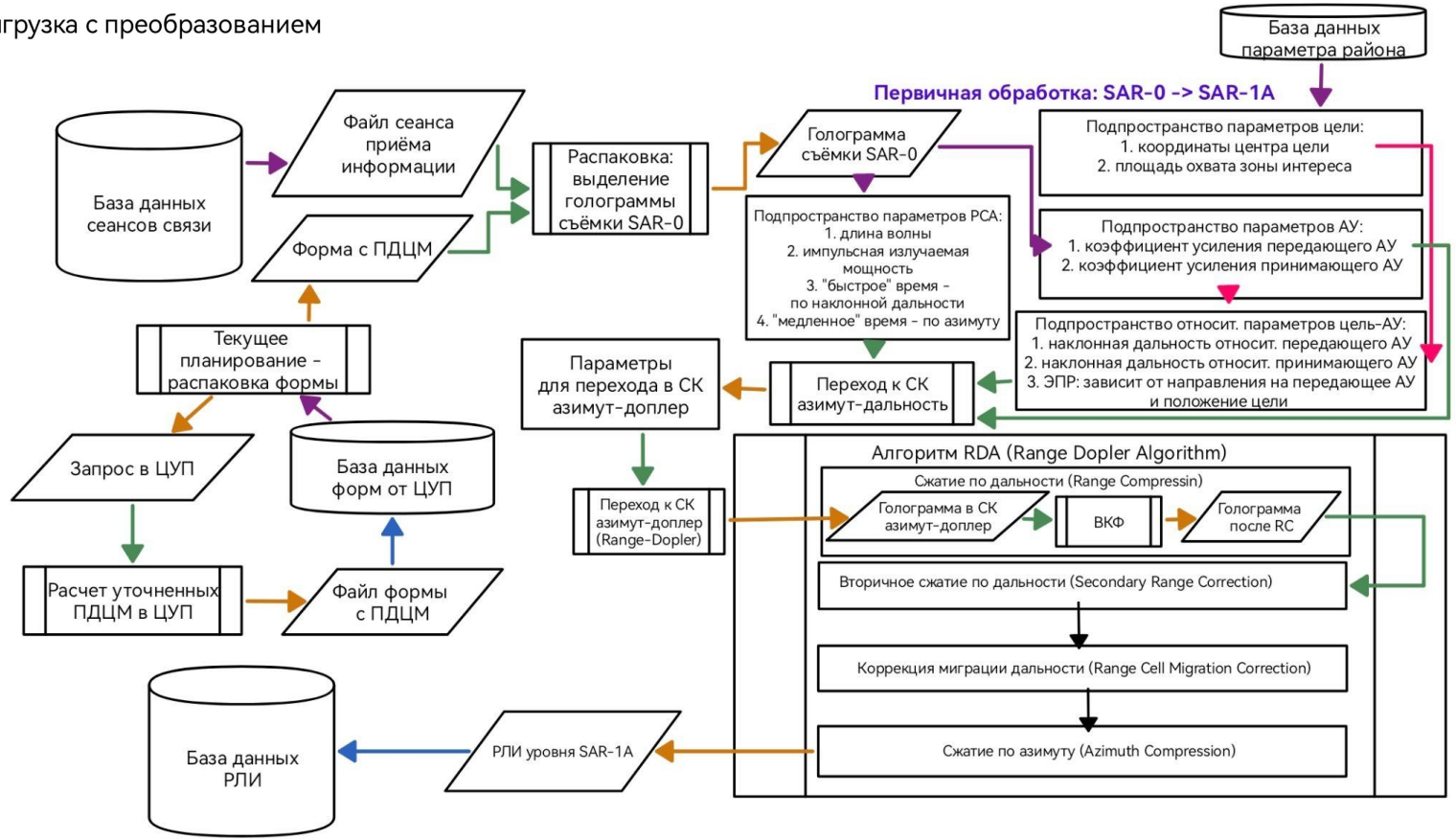
- выгрузка данных
- сохранение данных
- выгрузка с преобразованием
- вход процесса
- выход процесса
- база данных
- процесс
- пространство параметров
- структура данных



Этап 3: Распаковка и первичная обработка

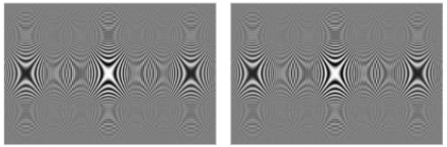
Обозначения:

- выгрузка данных
- сохранение данных
- выгрузка с преобразованием
- вход процесса
- выход процесса
- база данных
- процесс
- пространство параметров
- структура данных



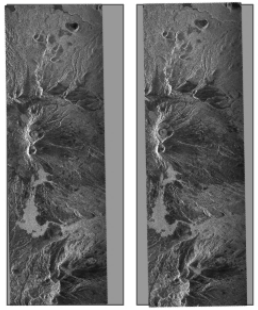
Этап 4: Высокоуровневая обработка

Два прохождения КА над зоной интересов:
две голограммы SAR-0



Синтез РЛИ, с приведением к среднему или нулевому значению доплеровской частоты

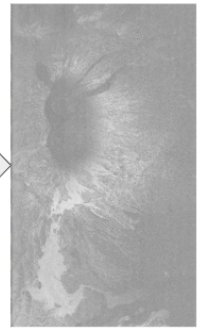
Два снимка SAR-1A

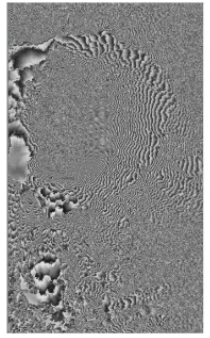


Первичная обработка

Совмещение изображений, выбор фрагмента, расчет интерферограммы и когерентности

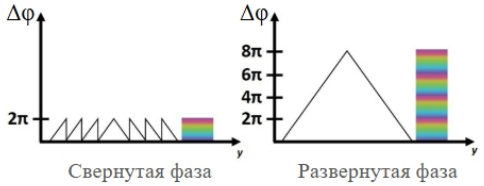
Карта когерентности





Интерферограмма

Фильтрация интерферограммы от импульсного шума, Развертывание фазы (исключение 2π неоднозначности)

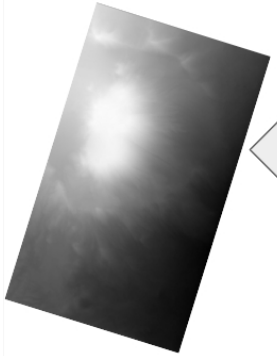


Развертка фазы



Пересчет разницы фаз в высоту, геокодирование

Цифровая модель местности



Внутренние характеристики системы

Целевая аппаратура: РСА
Частотный диапазон: S-диапазон (длина волны 10 см)
Эффективный диаметр зеркала антенны: 6 м
Диапазон углов визирования: 20°–55°
Станции приёма: ЕТРИС ДЗЗ
Минимальный угол приёма: 5°

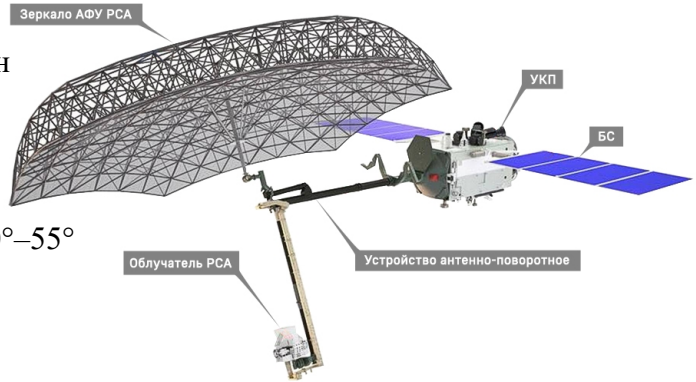


Рис. 5 Состав КА «Кондор-ФКА» [8]

Режимы целевой работы			Параметры режима		
			Разрешение	Полоса захвата х длина кадра	Поляризация
ДПР	детальный прожекторный		1-2 м	10x10 км	ГГ
ДНР	детальный непрерывный		2-3 м	10x500 км	ГГ или ВВ
ОР	ОР	Обзорный_усредненный	6-12 м	20-100x500 км	ВВ
	$ОР_р$	Обзорный_максимальное_разрешение	фиксированное значение из диапазона 6-12 м	фактическое значение х 500 км	ВВ
	$ОР_п$	Обзорный_максимальная полоса захвата	фактическое значение	фиксированное значение из диапазона 20-100 км х 500 км	ВВ

Таблица 3: Режимы целевой работы КА «Кондор-ФКА» [8]

Подпространство параметров КС

Подпространство параметров орбитального сегмента

Целевая система	Подпространство параметров РСА: 1. длина волны несущей, ширина полосы 2. длительность зондирующего импульса 3. режим съёмки: пространственное разрешение, фазовый шум, поляризация
Служебные системы	Подпространство параметров БА: 1. БРТК: параметры АУ 2. СНОВ: точка прицеливания, протяженность и ширина кадра 3. БКУ: память ЗУ 4. СКО и ДУ: периодичность импульса коррекции 5. СЭП и СТР: предельная мощность

Подпространство параметров наземного сегмента

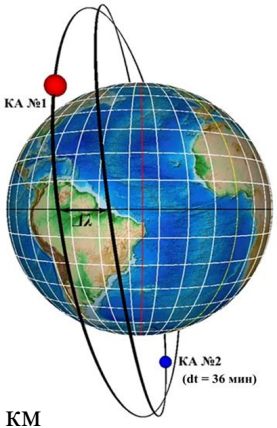
1. координаты станций приёма
2. координаты станций ЦУП
3. временные интервалы управления и загрузки рабочей программы



Рис. 6 Состав ЕТРИС ДЗЗ [10]

Внешние характеристики системы

Тип орбиты: околополярная солнечно-синхронная орбита
Высота орбиты: около 520 км.
Наклонение: 97,436º
Эксцентриситет: 0,00134
Аргумент перигея: 69,031º
Суточное смещение долготы: 4,444º
Период замыкания: 16 суток (243 витка)
Перп. компонента пространственной базовой линии: менее 1,5 км



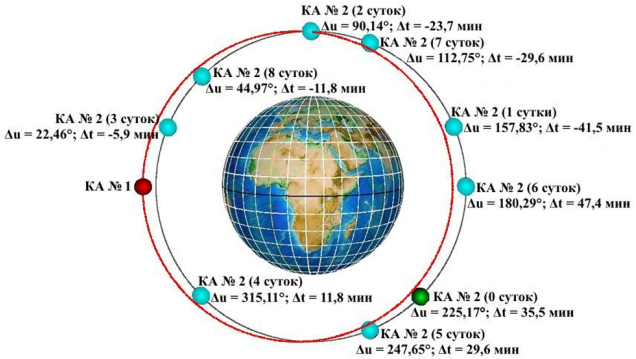


Рис. 7 Схема орбитальной группировки КС «Кондор-ФКА» [8]

Периодичность наблюдения:
при полной группировке средняя периодичность наблюдения произвольного объекта на широте 30° составляет не более 12–14 часов (с вероятностью 0,9) или не более 24–26 часов (с вероятностью 0,9) при обеспечении однопроходной интерферометрической съёмки двумя КА.

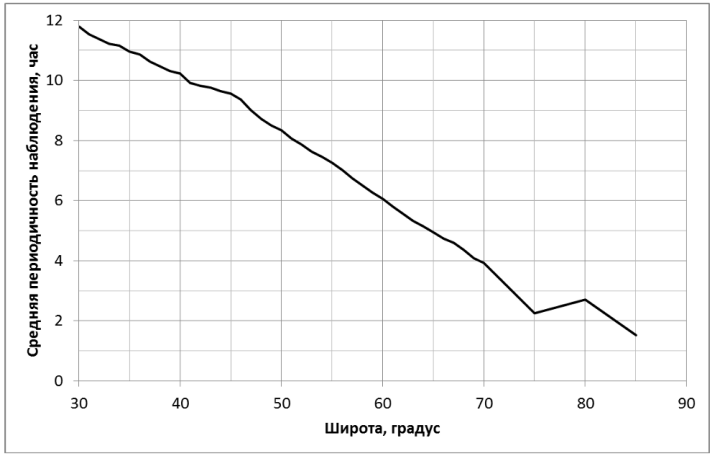
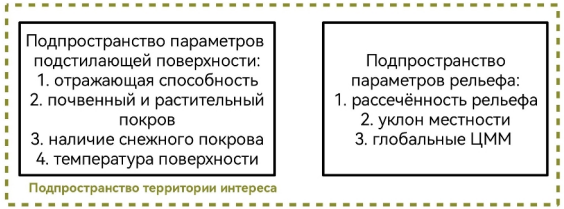
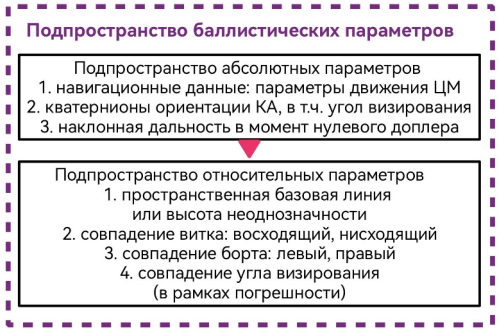
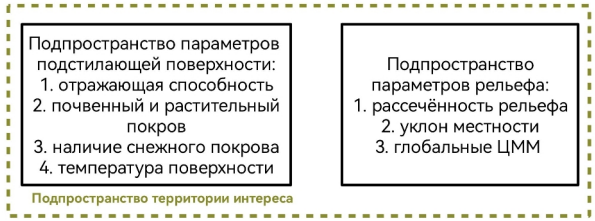


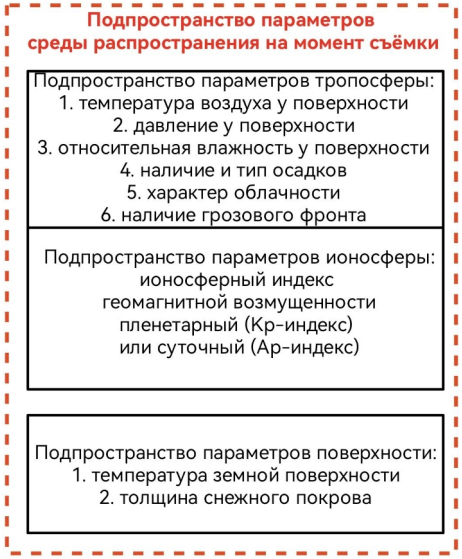
Рис. 7 Средняя периодичность наблюдения КС «Кондор-ФКА» [8]





Внешние характеристики системы





Глобальные и региональные прогностические модели (оперативные прогнозы):

- ECMWF IFS (включая HRES и ensemble EPS) — один из самых точных глобальных прогнозов; даёт поля температуры, ветра, влажности, осадков, облачности на сетке с шагом порядка 9–16 км (HRES).
- GFS (NOAA) — глобальный прогноз с разрешением ~13–28 км; очень популярен из-за открытости данных и большого горизонта прогноза (до 16 дней).
- ICON (DWD, Германия) — сильная регионально-глобальная система; есть версии с высоким разрешением для Европы (порядка 2–6 км).
- ARPEGE/AROME (Météo-France) — AROME даёт детализацию порядка 1–2 км для Европы; хорошо ловит конвекцию и локальные явления.
- UKMO (Met Office) — глобальные и региональные продукты, в том числе ансамбли; активно используются в авиации и морском прогнозировании.

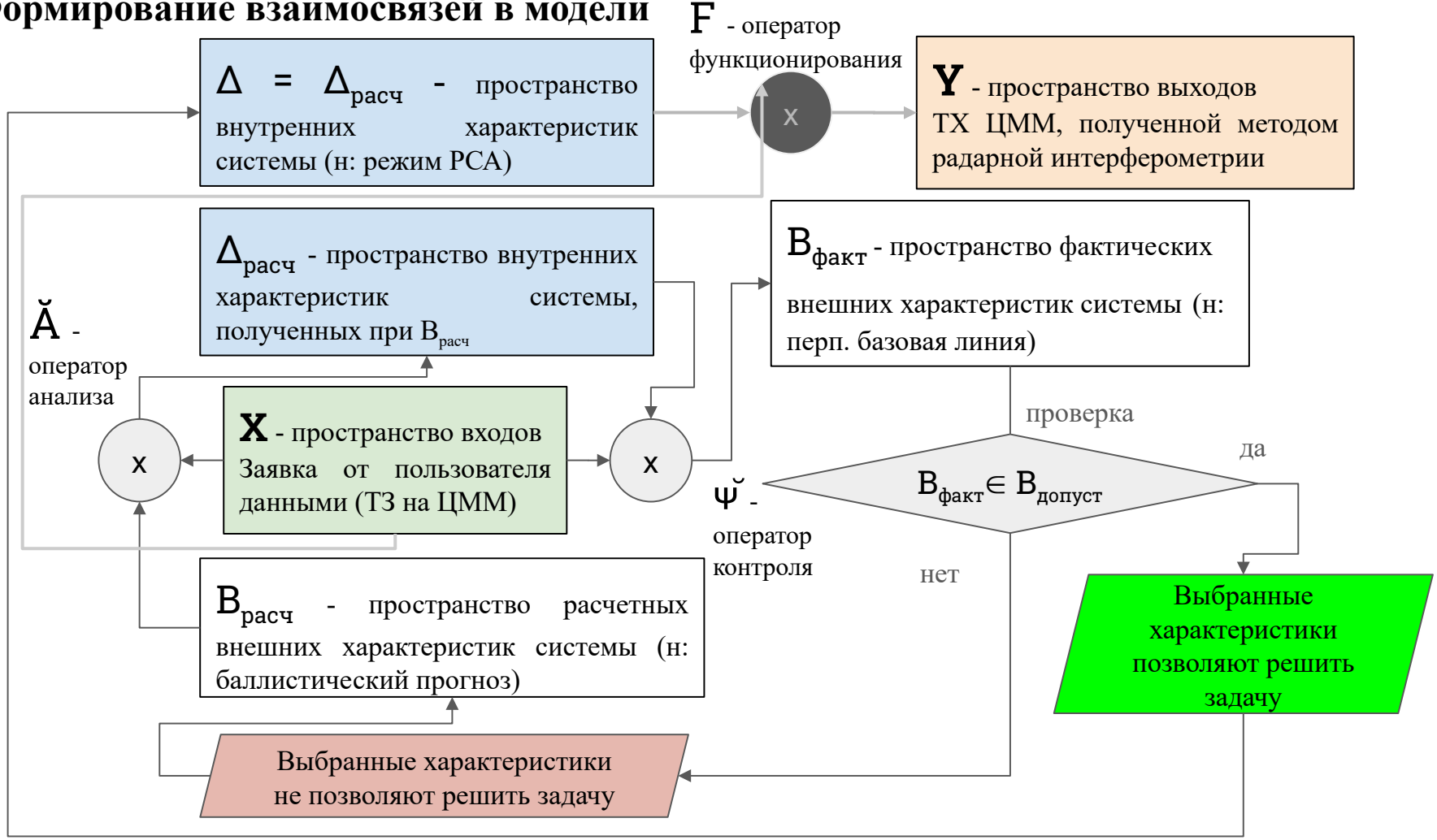
Климатические и реанализные данные:

- ERA5 (Copernicus/ECMWF) — самый популярный реанализ: часовые данные по множеству параметров на сетке ~31 км, доступен за десятилетия.
- MERRA-2 (NASA) — американский реанализ; удобен для климатических исследований и оценки повторяемости погодных условий.
- JRA-55 (JMA, Япония) — глобальный реанализ с хорошей временной полнотой.

Локальные и мезомасштабные модели (высокая детализация для небольших территорий):

- WRF (Weather Research and Forecasting) — открытая модель с разрешением до сотен метров
- COSMO (ранее COSMO-RU в России) — региональная модель с разрешением порядка 2–7 км

Формирование взаимосвязей в модели



Выводы

В данной работе **составлена модель системного подхода** для корректировки технологических процессов в процедуре планирования и проведения периодической съёмки космического аппарата (КА) «Кондор-ФКА №2» с формированием информационных продуктов уровня SAR-1A, пригодных для интерферометрической обработки, на основе которых проводится создание высокоуровневых продуктов: интерферограммы ЦКФ-И (INT), карты когерентности ЦКК-И (COH), цифровой карты рельефа местности ЦМР-И (DSM) в интересах разных задач пользователей данными.

- Сформулированы ключевые факторы и параметры, влияющие на качество ЦММ, формируемых под определенные задачи пользователя данных.
- Разработана модель, позволяющая оперативно решать прямую задачу синтеза этих параметров для определения возможности получения ЦММ по заданию потребителя с учетом ресурсов и ограничений существующих радиолокационных КА, а также производить обратную процедуру анализа точности и качества уже сформированных информационных продуктов для установления причин искажений и проверки соответствия техническому заданию.
- Полученные результаты способствуют оптимизации времени принятия решений в действующей процедуре технологии интерферометрии для КС «Кондор-ФКА».

Литература

1. ГОСТ 28441-99, Картография цифровая. Термины и определения //Информационная технология. Термины и определения: Сб. ГОСТов, — М: Стандартинформ, 2005. - С. 237-248.
2. Печников А. “Оценка открытых и коммерческих цифровых моделей рельефа” // Информационный ресурс. URL: https://habr.com/ru/articles/563496/.
3. Шувайникова Т.П, Ширшова В.Ю., Захаров А.И., Захарова Л.Н., Костюк Е.А. “Возможности целевого применения КС «Кондор-ФКА» с использованием технологии радарной интерферометрии ”, доклад 24-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва: ИКИ РАН, 2026
4. “Применение данных ДЗЗ для мониторинг паводков и наводнений” // Информационный ресурс агенства “Иннотер”. URL: https://innoter.com/articles/monitoring-pavodkov-i-navodneniy/.
5. СП 47.13330.2016, СП 317.1325800.2017, ГОСТ Р 52440-2005
6. Правила осуществления маркшейдерской деятельности (приказ Ростехнадзора № 186 от 19.05.2023) и РД 07-603-03 «Инструкция по производству маркшейдерских работ».
7. ГОСТ Р 70611-2022

1. Руководство пользователя данными дистанционного зондирования Земли, получаемыми космической системой «Кондор-ФКА» // Информационный портал Научного центра оперативного мониторинга Земли (АО «Российские космические системы»). URL: https://ntsomz.ru/kondor_fka_1/.
2. Ширшова В.Ю., Костюк Е.А., Шувайникова Т.П., Ширяев М.А., Захаров А.И., Зайцев Е.М. *«Наблюдение динамики покровов Камчатки по данным интерферометрической съемки космического аппарата «Кондор-ФКА» №2»* // Материалы 23-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва: ИКИ РАН, 2025, место издания ИКИ РАН Москва, тезисы, с. 128 DOI: 10.21046/23DZZconf-2025a
3. Единая территориально-распределенная информационная система дистанционного зондирования Земли (ЕТРИС ДЗЗ // Информационный портал Научного центра оперативного мониторинга Земли (АО «Российские космические системы»). URL: https://ntsomz.ru/etris-dzz/.

Спасибо за внимание!