

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

«Московский авиационный институт  
(национальный исследовательский университет)»

на правах рукописи



**Чо Хюнчжэ**

**Методика комплексного анализа характеристик перспективных  
космических аппаратов мониторинга природной среды**

**Диссертация на соискание ученой степени**

**кандидат технических наук**

**по специальности 05.07.02**

**«Проектирование, конструкция и производство  
летательных аппаратов»**

**Научный руководитель**

**Профессор, д.т.н.**

**Матвеев Ю.А.**

## Содержание

	стр
<b>Список сокращений</b> .....	4
<b>Введение</b> .....	5
1 Развитие средств космического мониторинга природной среды на высокой орбите. Постановка задачи прогнозирования характеристик перспективных КА .....	14
1.1 Средства космического мониторинга природной среды на высоких орбитах. Опыт создания и перспективы развития .....	14
1.2 Вопросы (постановка задачи) прогнозирования характеристик перспективных КА регионального мониторинга .....	39
Заключение к главе 1 .....	46
2 Модели и методы прогнозирования характеристик перспективных КА мониторинга природной среды .....	48
2.1 Методы прогнозирования характеристик перспективных КА мониторинга природной среды .....	48
2.2 Методика идентификации динамических статистических моделей и прогнозирования характеристик КА мониторинга .....	52
2.3 Динамические статистические модели оценки характеристик перспективных КА мониторинга .....	63
Заключение к главе 2 .....	75
3 Методика конструктивного прогнозирования технико-экономических характеристик перспективной КА мониторинга природной среды при наличии ограничений .....	77
3.1 Задача прогнозирования характеристик перспективных КА мониторинга природной среды при наличии ограничений .....	77
3.2 Методика (алгоритм) оценки характеристик перспективных КА мониторинга природной среды при наличии ограничений .....	81

3.3	Математические (проектные) модели для определения характеристик КАМ в составе КСМ.....	84
3.4	Модели определения технико-экономических характеристик перспективных КА мониторинга .....	95
	Заключение к главе3.....	102
4	Комплексный анализ характеристик перспективных КА мониторинга природной среды с учетом технико-экономических ограничений.....	104
4.1	Прогнозная оценка характеристик перспективных КА мониторинга природной среды при наличии ограничений .....	104
4.2	Прогнозный анализ характеристик перспективных КАМ с учетом неопределенностей.....	126
4.3	Исследование влияния фактора времени на характеристики перспективных КА мониторинга .....	132
	Заключение к главе4.....	134
	<b>Заключение</b> .....	136
	<b>Список используемых источников</b> .....	138

## Перечень сокращений

БКУ	- бортовой комплекс управления
БУСИ	- бортовое устройство считывания информации
ВБР	- вероятность безотказной работы
ГСО	- геостационарная орбита
ДУ	- двигательная установка
ИК	- инфракрасный
КА	- космический аппарат
КА ДЗЗ	- космический аппарат дистанционных зондирования Земли
КАМ	- космический аппарат мониторинга
Кон	- конструкция
КОУ	- комплекс обработки информации и управления
КС	- космическая система
КС ДЗЗ	- космическая система дистанционных зондирования Земли
КСМ	- космическая система мониторинга
МЦА	- модуль целевой аппаратуры
НКПИ	- наземный комплекс приема информации
НКПОР	- наземный комплекс приема, обработки и распространения
НКУ	- наземный комплекс управления
РКПИ	- радиокomплекс передачи информации
САС	- срок активного существования
ССПИ	- система сбора и передачи информации
СТР	- система терморегулирования
СУДН	- система управления движением и навигации
СЭП	- система энергопитания
УКП	- универсальная космическая платформа
ЦА	- целевая аппаратура
ЦСС	- целевая съемочная система

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время многие страны, в том числе и т.н. «малые», участвуют в международных космических программах по мониторингу природной среды. Такие работы позволяют быстро осваивать новые наукоемкие технологии, что объективно способствует научно-техническому и социально-экономическому развитию стран участниц проектов.

Чтобы обеспечить эффективную организацию и управление при выполнении таких работ, необходимы прогнозные исследования перспектив развития техники и технологии космического мониторинга природной среды. В связи с этим **актуальными являются задачи** совершенствования методов прогнозного анализа и оценки технико-экономических характеристик перспективных космических систем мониторинга, проведение исследований направлении развития техники и определение рациональных параметров КАМ природной среды при наличии ограничений. Особенностью таких задач является необходимость учета фактора времени при анализе перспективных проектных решений и динамики функциональных связи. Известный опыт показывает, что вопроса прогнозирования характеристик КАМ на высоких орбитах и ГСО разработана недостаточно.

### **Опыт исследования**

Оценка перспектив развития космической средств мониторинга природной среды проводится на базовых предприятиях отрасли. Результаты исследований обычно привязаны к конкретным разработкам и используются при формировании программ создания техники на перспективу до 2020 г. и дальше. В ряде опубликованных научных работ представлены данные методического плана, в частности, рассмотрена методика исследования перспективных космических систем дистанционных зондирования Земли (КС ДЗЗ) с учетом модернизации КС в планируемом период и создания модификаций космических аппаратов мониторинга (КАМ)[1,2,3,4,5,6]. В работах[10,12] приводится методика прогнозирования низкоорбитальных КА

ДЗЗ с учетом унификации и комплексирования целевой аппаратуры. Проведено исследование влияния неопределенности условия применения на функциональную эффективность КС ДЗЗ.

В то же время, как показывает анализ, вопросы прогнозирования развития КАМ на высоких орбитах, обобщение опыта создания таких систем, вопросы создания математических моделей и методического обеспечения конструктивного прогнозирования характеристик перспективной техники при наличии технико-экономических ограничений не нашли еще должного освещения. В связи с этим сформулирована цель диссертационной работы.

**Целью диссертационной работы** является разработка математических моделей и методики комплексного анализа характеристик перспективных КА мониторинга природной среды на высокой орбите, проведение прогнозных исследований характеристик перспективных КА мониторинга при наличии технических и экономических ограничений, оценки влияния срока реализации проекта на массовые и стоимостные характеристики перспективных КАМ.

**Предметом исследования** являются опытные данные по КА мониторинга природной среды, опубликованные в известной литературе, модели и методы исследования динамики и прогнозирования характеристик перспективных КА, методика комплексного анализа характеристик перспективных КА мониторинга природной среды, закономерности развития перспективных КА при наличии технико-экономических ограничений.

**Объектом исследования** являются КА мониторинга природной среды, используемые на высоких орбитах, а также на геостационарной орбите, с большим разрешением на местности.

**Научная новизна работы:**

1. Обобщен опыт создания КАМ на высоких орбитах за последние 30 лет. Анализ показывает, что развитие средств ДЗЗ на высоких орбитах связано с разработкой модификации базовых КАМ с использованием

унифицированных служебных модулей (УКП), с обеспечением высокого разрешения (R/H) за счет совершенствования аппаратура МЦА.

2. Разработана методика построения динамических статистических моделей прогнозирования характеристик КАМ природной среда при ограниченном объеме эмпирических (опытных) данных. Получены многофакторные динамические статистические модели для оценки массовых и стоимостных характеристик перспективных КА мониторинга на высоких орбитах при изменении (увеличении) относительного линейного разрешения и времени реализации проекта.

3. Разработана методика конструктивного прогнозирования характеристик перспективных КАМ к определённому моменту времени при наличии технико-экономических ограничений, которая позволяет учесть динамику связей внутренних и внешних, оптимизировать параметры перспективных КАМ.

4. Проведены исследования характеристик перспективных КА мониторинга при наличии технико-экономических ограничений. Реализация многокритериального анализа позволяет найти рациональные характеристики перспективных МЦА и КАМ, оценить влияние срока реализации проекта, ограничения по массе и информационной производительности на характеристики перспективных КАМ.

### **Практическая ценность работы**

В работе сформирована методика прогнозирования технико-экономических характеристик перспективных КАМ в составе КСМ на высоких орбитах, которая позволяет проводить выбор рациональных проектных решений при наличии технико-экономических ограничений, оценить влияние  $t_{np}$  на характеристики перспективных КАМ. Используемые математические модели могут быть адаптированы при изменении состава модулей целевой аппаратуры. Таким образом, могут быть расширены возможности методики.

Результат проведенных исследований технико-экономических

характеристик перспективных КАМ и полученные математические модели оценки технико-экономических показателей можно использовать при формировании технических заданий на разработку перспективных КАМ на высоких орбитах в составе КСМ.

### **Достоверность полученных результатов**

В основу разработанных математических моделей и методики прогнозирования характеристик перспективных КАМ в составе КСМ был положен опыт реализации проектных разработок, приемы формирования статистических моделей, и, в том числе, регрессионный метод, и метод формирования динамических статистических моделей. Оценка адекватности соответствующих проектных моделей проводится путем сравнения с опытными данными, а также с результатами исследований, изложенных в научной литературе.

Достоверность разработанных методик, моделей и алгоритмов подтверждена при выполнении численных расчетов и сравнительных оценок параметров КАМ на высоких с характеристиками, реализованными на практике, а также при исследовании закономерностей создания перспективных модификаций КАМ.

### **На защиту выносятся:**

- динамические статистические модели прогнозирования характеристик перспективных КАМ на высоких орбитах,
- методика комплексного анализа и конструктивного прогнозирования характеристик перспективных КАМ при наличии ограничений,
- результаты исследования закономерностей развития перспективных КАМ при наличии технико-экономических ограничений.

### **Объем и структура работы**

Диссертация состоит из введения, 4-х основных глав, заключения и списка использованных источников. Общий объем диссертации 142 листов, 17 таблиц, 42 рисунка. Список использованных источников содержит 46 наименований.

## **Апробация результатов работы**

Материалы диссертационной работы были доложены и обсуждались на Научных чтениях, посвященных памяти К.Э. Циолковского в 2015, 2016 и 2017 годах, на Академических научных чтениях, посвященных С.П. Королеву и другим пионерам космонавтики в 2016, 2017 и 2018г., а также на Корейко-российском космическом форуме в МАИ.

## **Публикации**

По основным результатам выполненных в диссертации исследований опубликованы 3 печатные работы. В том числе 3 опубликованы в журналах, включенных в список ВАК.

## **Содержание работы**

**Во введении** приводится общая характеристика работы, определены цель и основные задачи диссертации, ее структура, основные научные и практические результаты, проведена оценка достоверности результатов исследования. Приводятся также данные от апробации результатов исследования.

**В первой главе** «Развитие средств космического мониторинга природной среды на высокой орбите» рассматриваются опытные данные развития средств КАМ на высокой орбите.

Предметом исследования диссертационной работы являются технические системы мониторинга природной среды, а именно средства космического наблюдения. Последние включают космический сегмент – космические аппараты дистанционное зондирование Земли (КА ДЗЗ).

Рассмотрены требования, которые предъявляются к космическим аппаратам ДЗЗ на современном этапе развития техники и технологий. Проведем краткий анализ КА ДЗЗ, которые используются на высоких орбитах или на геостационарной орбите (ГСО), рассмотрены перспективы развития таких аппаратов.

Проводится анализ опытных данных характеристик КАМ на высоких орбитах за 30 лет. Определяются основные закономерности изменения

относительной величины линейного разрешения( $R/H$ ), массы космических аппаратов мониторинга( $m_{КАМ}$ ), функциональной эффективности( $W_{КАМ}$ ) от времени реализации проекта. Основным фактором, влияющим на повышение характеристик КАМ, являются совершенствование базовых подсистем УКП и МЦА.

Формулируется основная задача проектирования перспективной КАМ в составе КСМ. Задача проектирования перспективной КАМ записана как многокритериальная, многопараметрическая, динамическая и детерминированная.

При таком подходе к прогнозному анализу перспективных КАМ необходимо создание соответствующей проектной модели – математических зависимостей, определяющих целевую эффективность, стоимость разработки и производства при реализации проекта, трудоемкость работ, а также разработка алгоритма поиска рационального решения. Важную задачу представляет в таком случае поиск рациональных параметров перспективных КАМ, исследования влияния динамических связи внешних и внутренних на решение. Вопросы формирования соответствующих приемов, моделей и методов подробно рассматриваются в главах 2 и 3 диссертации.

**Во второй главе** «Модели и методы прогнозирования характеристик перспективных КАМ природной среды» рассматриваются методы прогнозирования характеристик перспективных КАМ природной среды. С целью проведения многофакторного анализа характеристик перспективных КАМ разработан метод формирования динамических статистических моделей и алгоритм формирования динамических статистических моделей. Алгоритм включает последовательное решение следующих задач:

- Определение рациональных значений длительности временного интервала и количество временных интервалов  $k$ .
- Формирование регрессионных зависимости для  $k$ -х временных интервалов. Определения временных рядов коэффициентов регрессионной зависимости.

- Определение регрессионных зависимостей, определяющих динамику изменения коэффициентов регрессионной зависимости. Формирование динамических статистических моделей.

- Проведение прогнозных оценок характеристик перспективных КАМ к моменту  $t_{np}$ . Оценку точности прогнозных оценок.

Приведены результаты практического применения метода формирования динамических статистических моделей оценки массовых и стоимостных характеристик КАМ на высоких орбитах. Получены динамические статистические модели позволяют вести многофакторный анализ характеристик перспективных КАМ при наличии ограниченного объема статистической выборки.

**В третьей главе** «Методика конструктивного прогнозирования технико-экономических характеристик перспективной КАМ природной среды при наличии ограничений» представлена постановка задачи конструктивного прогнозирования характеристик перспективных КАМ при наличии ограничений (задачи проектирования перспективного КАМ в составе космической системы мониторинга к моменту  $t_{np}$ ). Разработана методика её решения, которая включает последовательное решение двух главных задач: 1) - прогнозирования динамических (определяющих) параметров (это коэффициенты массовых и стоимостных зависимостей) к моменту реализации проекта и 2) - оптимизацию параметров перспективных КАМ при наличии ограничений.

Формирование соответствующих проектных зависимостей для оценки массовых и стоимостных характеристик, надежности и функциональной эффективности проводится на основе опытных данных.

С помощью полученных зависимостей (проектных моделей) исследовано влияние фактора времени на характеристики перспективных КАМ. Анализ показывает, что при реализации проекта к моменту  $t_{np}$  может быть обеспечен необходимый уровень пространственного разрешения и

масса МЦА уменьшается. Одновременно, однако, происходит увеличение затрат на производство первого образца МЦА и на реализацию проекта.

**В четвертой главе** «Комплексный анализ характеристик перспективных космических аппаратов мониторинга природной среды с учетом технико-экономических ограничений» проводится: 1) оценка технико-экономических характеристик перспективных КАМ при наличии ограничений (динамики связей внешних и внутренних), 2) прогнозный анализ характеристик перспективных КАМ при наличии неопределенностей, проводится исследование влияния фактора времени на характеристики перспективных средств, оценка влияния  $t_{np}$  на точность решения.

Как показывает анализ, при проектировании современных КСМ и модификаций КАМ обычно используется УКП. Такой подход дает возможность сократить сроки и затраты на разработку и производство КАМ в составе КСМ. Одновременно такой подход позволяет повысить надежность и снизить риск реализации проекта, способствует международной кооперации, устойчивости научно-технического прогресса при развитии космических технологий.

С помощью разработанной методики прогнозирования характеристик перспективных космических аппаратов мониторинга проведена оценка технико-экономических характеристик перспективных КАМ (модификации КАМ) при наличии ограничений (динамики связей внешних и внутренних). Многокритериальный сравнительный анализ модификации КАМ мониторинга позволяет выбрать рациональное решение при наличии технико-экономических ограничений.

Проведена оценка влияния точности прогнозирования определяющих параметров (коэффициентов стоимостных уравнений) на оценку стоимостных характеристик перспективных МЦА и КАМ. Исследовано влияние фактора времени на выбор характеристики перспективных КАМ. При учете неопределенности критерием поиска рационального решения является среднее значение затрат на производство первого образца МЦА.

Проведено численное моделирование оценки характеристик перспективных КАМ при наличии неопределенностей.

Показано, что при числе статистических испытаний больше 500 ( $N \geq 500$ ) величина математического ожидания затрат на производство первого образца не зависит от числа статистических испытаний. Увеличение  $t_{np}$  приводит, к тому что затраты на производство первого образца растут и масса МЦА уменьшается.

**Результаты работы** могут быть использованы при формировании программ создания перспективных КА мониторинга природной среды, при определении ключевых технологий, разработка которых позволит существенно повлиять на технико-экономические характеристики таких КА.

Автор признателен кафедре 601, МАИ за предоставленную возможность выполнить диссертационную работу и провести необходимую апробацию результатов работы.

# **1 РАЗВИТИЕ СРЕДСТВ КОСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ НА ВЫСОКОЙ ОРБИТЕ.**

## **1.1 Средства космического мониторинга природной среды на высоких орбитах. Опыт создания и перспективы развития**

При исследовании природных явлений в регионах и в мире, при решении вопросов безопасности и предупреждения естественных и искусственных неблагоприятных и катастрофических событий необходим мониторинг природной среды.

Для проведения исследования природной среды могут использоваться различные технические средства. Это системы наземного наблюдения, авиационного и космического. В настоящее время для решения задач мониторинга природной среды все больше применяются космические системы наблюдения. Анализ показывает, что такие системы имеют ряд преимуществ, поэтому во многих странах реализуются программы создания собственных средств мониторинга на основе доступных технологий.

Предметом исследования диссертационной работы являются технические системы мониторинга природной среды, а именно средства космического наблюдения. Последние включают космический сегмент – космические аппараты дистанционного зондирования Земли (КА ДЗЗ), и наземный сегмент – наземный комплекс приема и обработки информации и наземный комплекс управления.

Рассмотрим в данной главе требования, которые предъявляются к космическим аппаратам ДЗЗ на современном этапе развития технологий. Проведем краткий анализ КА ДЗЗ, которые используются на высоких орбитах или на геостационарной орбите (ГСО) и перспективы развития таких аппаратов.

### **Анализ требований к КА ДЗЗ на высокой орбите или на ГСО.**

Современные КАМ имеют различные параметры и характеристики, однако целый ряд требований, которые предъявляются к таким КА, являются

общими. С учетом этого можно определить требования, которые должны удовлетворять перспективные КАМ.

### **1. Требование к сроку активного существования.**

Срок активного существования (САС) перспективных КА ДЗЗ на высоких орбитах или на ГСО должен быть не менее 10 лет, что обусловлено, в основном значительными затратами на выведения таких КА на орбиту и большой стоимостью производство таких КА.

### **2. Требование к пространственному разрешению.**

Основные требования к тактико-техническим характеристикам КА ДЗЗ определяются, соответственно, целевым назначением перспективных КА.

### **3. Требование к спектральным характеристикам целевой аппаратуры.**

Требования к спектральному диапазону наблюдения эквивалентны требованиям к типу аппаратуры (видео, инфракрасная, радиолокационная и другая аппаратура). Имеется ряд задач, для решения которых необходимо наблюдение в нескольких диапазонах, причем одновременно или раздельно. В связи с этим необходима уточняющая информация о том, какова степень (доля, процент) решения задачи (подзадачи) при наблюдении в одном или нескольких диапазонах.

### **4. Требование к периодичности наблюдения**

В общем случае периодичность наблюдения — неоднозначная функция, которая меняется во времени от точки к точке района наблюдения. Поэтому ее задание можно осуществлять целым набором характеристик, например, используя:

- среднее время между очередными наблюдениями района,
- наименьшее (или наибольшее) время между очередными наблюдениями района,
- вероятность наблюдения заданного района с требуемой периодичностью.

Оценки периодичности наблюдения КА зависят от орбитальных характеристик, в частности от количества КА, обреты наблюдения, высоты полета, от характеристик оптических систем. При оценке периодичности наблюдения КА на ГСО учитываются только характеристика МЦА. У современных МЦА периодичность съемки и представления информации составляет 4 часа в случае, если проводится съемка полного диска Земли.

#### **5. Требование к орбитальным характеристикам**

Обеспечение функций целевой аппаратуры ставит достаточно серьезные требования к системе ориентации и стабилизации. Это касается наведения и стабилизации осей ЦА на объект съёмки. Требуемая точность наведения современных КА ДЗЗ составляет 2–5 угловых минут, а погрешность стабилизации КА в орбитальной системе координат составляют ( $3\sigma$ ): по углу крена  $-0.33^\circ$ ; по углу тангажа -  $0.066^\circ$ . [8,24,26]

#### **6. Требование к информационной производительности КА ДЗЗ.**

Процесс наблюдения, передачи и получения информации зависит от многих факторов, является случайным и потому количество достоверной информации и требование к ней оценивается статистическими характеристиками. Очевидно, что требование к количеству достоверной информации может задаваться либо в форме ограничения снизу, либо в форме требования максимума.

В ряде случаев, например, для КС непрерывного наблюдения, можно рассчитать проектную производительность системы. Тогда снижение производительности КС по сравнению с проектной будет происходить только за счет потерь в качестве информации. В таких случаях можно говорить о едином требовании к полноте (т.е. количеству) и достоверности (качеству) информации.

С учетом случайного характера процесса наблюдения полноту и качество информации следует оценивать статистическими характеристиками, например, вероятностью получения полной и достоверной информации. Эта вероятность должна быть либо не ниже заданной, либо максимально

возможной, т. е. требование к полноте и достоверности информации должно быть отнесено к требованиям эффективности КС.

### **7. Требование к координатам района наблюдения (объекта).**

Обычно, координаты района наблюдения целесообразно задавать в виде географических границ: северная, южная, восточная, западная. Для КС на ГСО координаты района наблюдения имеют полный диск Земли, координаты, в которых наблюдаются состояние океана, тайфуны, ураганы, движение облаков.

### **8. Требование к оперативности доставки информации**

Требование к оперативности обусловлено динамическими характеристиками объектов наблюдения и целями наблюдения. Особенно высокой должна быть оперативность при наблюдении быстроразвивающихся процессов, требующих быстрой реакции потребителя. К ним можно отнести, например, метеорологические процессы.

Очень часто происходит смещение понятий "периодичность наблюдения" и "оперативность передачи (доставки) информации системой". Система с высокой периодичностью не обязательно должна иметь высокую оперативность, и наоборот. Так, наблюдение за высоко-динамическими процессами без необходимости быстрого оперативного вмешательства в этот или связанные с ним процессы может потребовать высокой периодичности наблюдения без предъявления особых требований к оперативности. Например, научное изучение таких процессов, как интенсивное таяние льда в горах весной или извержение вулкана, должно проводиться при очень высокой периодичности наблюдения, почти при непрерывном наблюдении, в то время как доставка этой информации потребителю может быть осуществлена практически в любое планируемое время, если эти процессы не являются опасными, т. е.  $\tau_{оп} \gg t_{пер}$ . Для высоко-оперативных систем, как правило, выполняется условие  $\tau_{оп} \ll t_{пер}$ . Для квазинепрерывных систем может иметь место другой крайний случай:  $\tau_{оп} \gg t_{пер}$ , так как  $\tau_{пер} \approx 0$ . Естественно требование, чтобы время  $\tau_{оп}$  было минимально или не

превышало заданного предела, так как оперативность существенно связана с деятельностью потребителя.

### **9. Требование к стоимости.**

Стоимость КС определяется затратами на ее создание и эксплуатацию. Обычно ставится задача, чтобы стоимость была ограничена или минимальна.

Стоимость реализации проекта зависит от массы КА, срока реализации проекта и новых технологий и т.д.

### **10. Требование к экономической эффективности**

Требование к экономической эффективности КС — основное, так как именно по ней можно судить о том вкладе, который вносит КС в решение социально-экономических задач, и о целесообразности ее создания. Экономическая эффективность непосредственно связана с тем доходом, который дает системе использование КС, с одной стороны, и с затратами на реализацию проекта — с другой.

К требованиям, определяющим функциональную эффективность КС в целом, целесообразно отнести требование к ее экономической эффективности, которому подчинены непосредственно требования к полноте и достоверности, оперативности информации, времени функционирования и стоимости КС.

Таким образом, при проведении проектной разработки перспективной системы приходится решать многокритериальную проектную задачу. Вопросы постановки такой задачи и вопросы создания математических моделей прогнозирования характеристик КАМ в составе КСМ рассматриваются ниже.

### **Анализ развития КА ДЗЗ на высокой орбите**

Данные по ряду существовавших, существующих и перспективных космических систем мониторинга представлены в ряде работ [13,14,15,21]. Проведем анализ развития КА, на основе данных по прототипам КА, используемых в метеорологических космических технологиях.

Погода оказывает большое влияние на жизнь людей. При

использовании метеорологических КА для оценки и прогноза погоды необходимо обеспечить высокую точность и высокую информационную производительность КАМ. Поэтому при разработке метеорологической КА предъявляются требования высокого разрешения в видимом, ИК диапазоне. В СССР и США эксплуатируются метеорологические КА с 1960 г. В настоящее время целью метеорологической космической технологии является получение точной информации о окружающей среде (например, состояние океана, тайфуны, ураганы, движение облаков и т.д.), для зондирования заданных регионов. Современное развитие технических систем регионального мониторинга характеризуется ростом числа решаемых задач, увеличением числа КА, расширением номенклатуры и информационных возможностей съемочной аппаратуры, пересмотром концепций перспективных систем и др.

Классификация КСМ приведена на рис 1.1

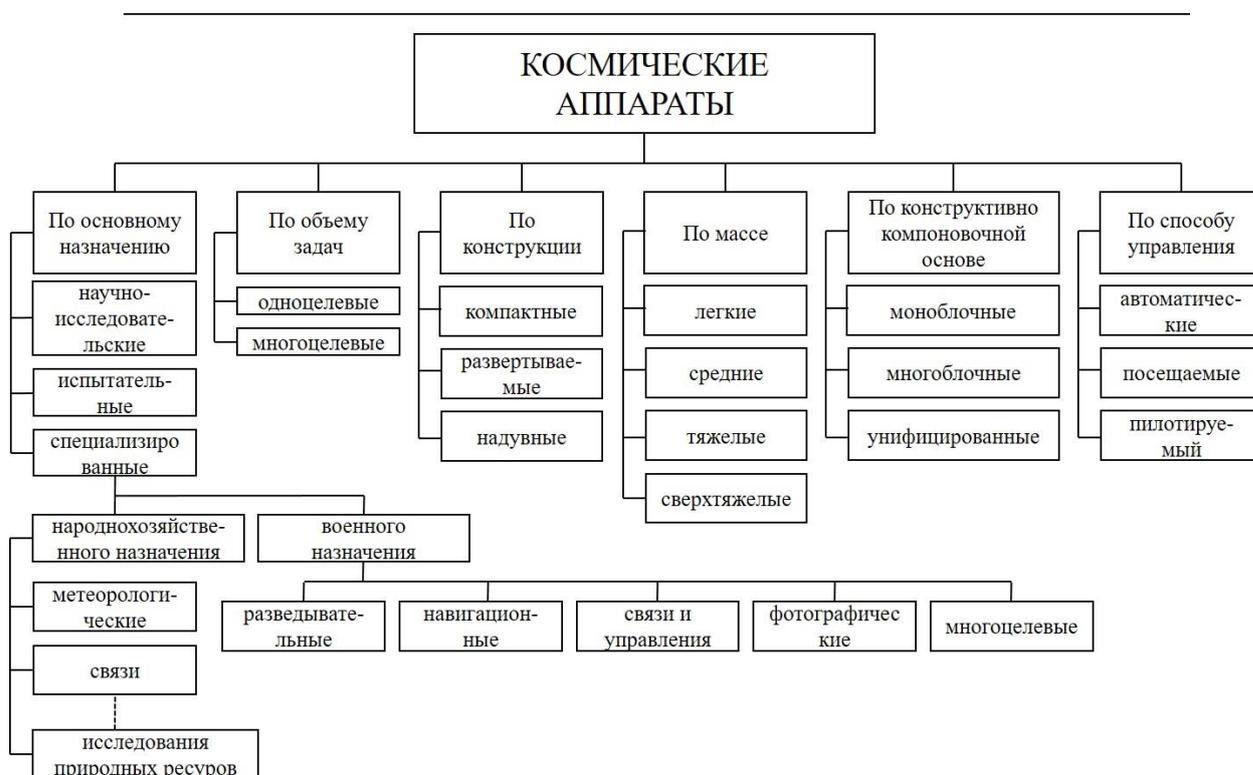


Рисунок 1.1 – Классификация КА

## **Космические технологии видовой съемки**

Метеорологи почти сразу после запуска первых спутников заинтересовались возможностью наблюдать за атмосферой Земли из космоса. В США уже в апреле 1960 года был запущен аппарат «ТИРОС-1», передавший первое в мире изображение Земли из космоса, тем самым доказавший пригодность спутников для наблюдения за погодой. В СССР были запущены следующие космические аппараты:

① Аппараты первого поколения Метеор-2, Ресурс-О1, интеркосмос-Болгария-1300,Астрофизика

② К аппаратам второго поколения Метор-3, Метеор-3М. Это многоцелевой КА

③ В последние время на геостационарную орбиту был запущен КА Электро-Л (НПО им. Лавочкина)

В США реализована серия Tiros,Nimbus, NOAA, ATS, GOES и т.д.

Реализованы программа создания КА метеонаблюдения китайскими аппаратами серии FY, Meteosat, GMS, Insat. Основные космические системы видовой съемки на высоких орбитах представлены в табл.1.1.

В начале 1960-х годов в СССР проводились лётно-конструкторские испытания для отработки и проверки служебных и целевых систем метеоспутников. На спутнике первой советской метеорологической космической системы «Космос-122» отрабатывались комплексы приборов для телевизионных, актинометрических и инфракрасных измерений. В 1967 году начала функционировать первая советская метеорологическая спутниковая система «Метеор». С 1974 года создавались КА серии «Метеор-природа» (модернизация «Метеор»). Одновременно разрабатывался новый КА серии «Метеор-2» на оригинальной спутниковой платформе СП-1. В 1982 году Государственная метеорологическая космическая система (ГМКС) «Метеор-2» была принята в эксплуатацию.

Таблица 1.1 – Основные космические системы.

№ п/п	Наименование системы	страна	Дата первого запуска	Назначение
1	Nimbus	США	28.08.1964	Метеорологический, исследовательский
2.	Метеор-2	СССР	10.1975	Метеорологический
3	GOES-1G	США	16.10.1975	Метеорологический
4	GMS	Япония	14.07.1977	Метеорологический, мониторинг окружающей среды
5	Meteosat-1g	ЕС	23.11.1977	Метеорологический
6	Метеор-3	СССР	11.1984	Метеорологический
7	Ресурс-О1	СССР	3.10.1985	Метеорологический, мониторинг окружающей среды
8	Insat-2	Индия	9.7.1992	Многоцелевой
9	GOES-2G	США	13.4.1994	Метеорологический
10	Электро-1	Россия	31.10.1994	Метеорологический
11	FY-2	Китай	10.6.1997	Метеорологический
12	Meteosat-2g	ЕС	8.10.2002	Метеорологический
13	Insat-3	индия	9.4.2003	Многоцелевой
14	GOES-2G мод.	США	24.5.2006	Метеорологический
15	COMS	Р.Корея	26.06.2010	Многоцелевой
16	Электро-Л	Россия	20.01.2011	Метеорологический
17	FY-3	Китай	23.9.2013	Полярно-орбитальные метеорологический
18	Himawari-8,9	Япония	8.2014	Метеорологический,
19	GOES-3G	США	План 2016г.	Метеорологический
20	Meteosat-3g	ЕС	План 2019г	Метеорологический

На базе спутниковой платформы СП-1 были созданы космические системы и комплексы различного назначения:

- ГМКС «Метеор-2» (22 КА, 1975—1995 гг.)
- Космические комплексы для исследования природных ресурсов Земли и оперативного экологического мониторинга «Ресурс-О1» (6 КА, 1980—2000 гг.)
  - Космический комплекс «Интеркосмос-Болгария-1300» для геофизических исследований ионосферы, магнитосферы Земли и околоземного космоса (1981—1983 гг.)
  - Экспериментальный космический комплекс «Астрофизика» для обнаружения и точного определения координат при земных ядерных взрывах (1978—1979 гг.)

На борту Метеор-2 установлена съемочная аппаратура с видимым разрешением порядка 1 км в видимом диапазоне. На борту Метеор-2, который был запущен 31.08.1993 г., установлены специальные системы лазерных уголкового отражателей для лазерной локации КА. На серии Метеор-2 установлены мультиспектральные камеры с низкой разрешением и с нормальной разрешением и т.д.

На КА серии Ресурс-О1 используется такая платформа, как на аппаратах серии Метеор.

Во второй половине 80-х годов была создана унифицированная космическая платформа второго поколения СП-II («Ресурс-УКП»). На её базе были созданы 4 типа КА:

Метеорологический и геогелиофизический КА «Метеор-3» (7 КА, 1985—1997 гг.)

- Многоцелевой КА «Ресурс-О1» (1998 г.)
- Многоцелевой КА «Метеор-3М» (2001 г.)

В 1994 году был запущен первый в России геостационарный гидрометеорологический КА «Электро». В 1995 году в России используются два эшелона метеорологических спутников: стационарные и низкоорбитальные. К первой группе относится один аппарат «Электро». В группу низкоорбитальных метеоспутников на тот момент входили «Метеор-

2» и «Метеор-3». Также для получения данных о метеообстановке использовался спутник «Ресурс-01» хотя он и не дает такой детальной информации, как «Метеоры».

По состоянию на конец сентября 1995 в российскую низкоорбитальную спутниковую метеосистему входили пять аппаратов: два «Метеора-2», два «Метеора-3» и один «Ресурс-01».

«Метеор-2» №26 давали 30% метеоинформации. «Метеор-2» №25 уже превысил свой гарантийный ресурс. Остальные 60% метеоинформации приходились на «Метеоры-3» №5, №7 и «Ресурс-01» №3[21,22].

В 2011 запущен КА «Электро-Л» на геостационарную орбиту.

В США на базе аппаратов «Тирос» в феврале 1966 года была развернута глобальная спутниковая система «Тирос». С КА «Tiros-1» впервые в мире было получено изображение Земли из космоса. В США применялись в разные годы спутники серий «Тирос», «Нимбус», «NOAA» и «GOES».

Тирос - американский метеорологический спутник. Первый в мире успешно работающий метеорологический спутник. Разработан для проверки возможности получения и использования фотографий облачного покрова со спутников. КА «Тирос» имел цилиндрическую форму с 18 уплощенных сторон для установки солнечных батарей питания. Спутник имел диаметр примерно 1.07 м, высоту- 0.56м (в том числе выступающей телевизионной камеры линзы), и имел стартовую массу около 128.4кг, включая топливо для малых твердотопливных ракет, используемы для контроля спина спутника с течением времени. Для сравнения NOAA-15, спутник последнего поколения имел 1.88м в диаметре и высоту-165 дюймов (4,2 м) в "сложенной" стартовой конфигурации и весил 2231.7кг на взлете.

КА серии GOES : Это серия спутников находящихся в ведении американской национальной информационной службы спутниковых данных об окружающей среде (NESDIS), обеспечивающих прогнозирование погоды, отслеживание штормов и метеорологические исследования. Спутники и наземная инфраструктура системы обеспечивают непрерывный поток

данных об окружающей среде. КА GOES-1 был запущен в 16.10.1975г. Масса спутника 293 кг.

Программа GOES предоставляет метеоинформацию таким потребителям, как национальная служба погоды (NWS). Программа GOES требует использоваться для успешного зондирования работы двух метеорологических спутников, находящихся на геостационарной орбите. Каждый из этих космических аппаратов наблюдает почти треть поверхности Земли: один зондирует Северную и Южную Америку, и большую часть Атлантического океана, Северную Америку и бассейн Тихого океана. GOES-Восток, номинально расположен на  $75^\circ$  западной долготы, а GOES-Запад номинально расположен на  $135^\circ$  западной долготы. Два космических аппарата функционируют совместно для того, чтобы обеспечить географическое наблюдение Земли днем и ночью. Покрываемое распространяется примерно с  $20^\circ$  западной долготы и  $165^\circ$  восточной долготы. GOES состоит из космического сегмента и наземного сегмента.

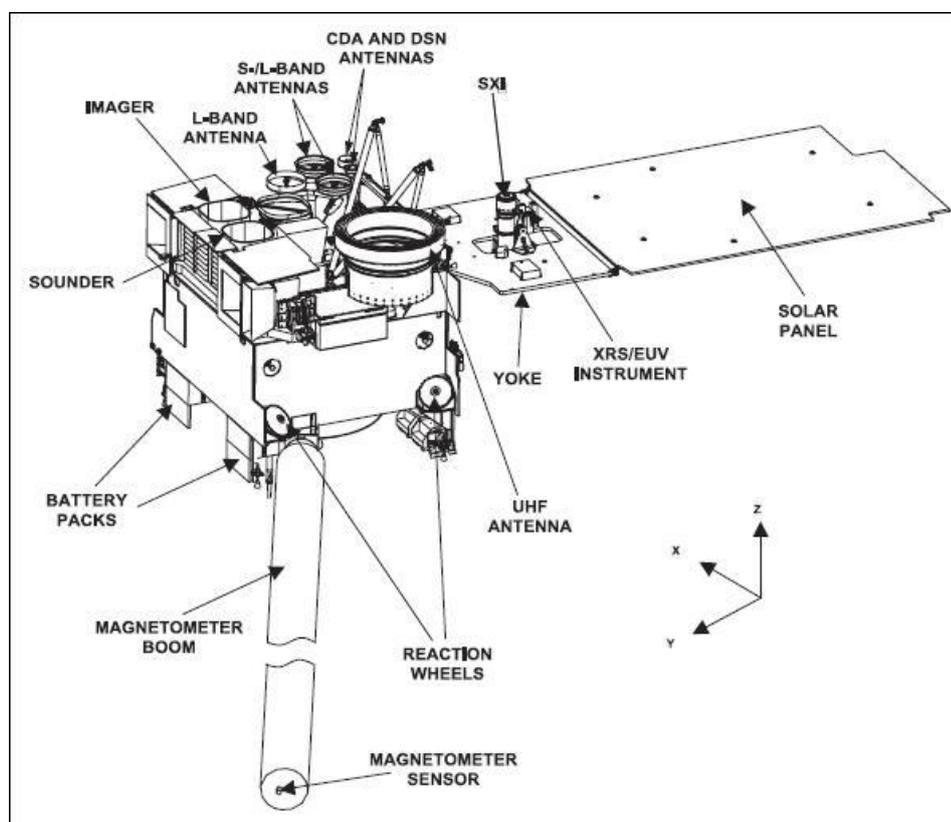


Рисунок - 1.2Конструкция КА GOES [21]

КА Meteosat был запущен по Европейской метеорологической программе на ГЕО, которая была начата в 1972 году ESR(European Space Research Organization). Метеосат-1 был первым Европейским метеорологическим геосинхронным спутником, запущенным 23 ноября 1977 года, почти 10 лет до существования EUMETSAT (the European agency for meteorological satellite operational services - по аналогии с NOAA в США). Общая цель системы Meteosat – получение эффективной спутниковой информации и связанных с ними услуг, чтобы поддерживать требования государств-членов EUMETSAT. Все полученные данные от КА по заказу EUMETSAT ориентированы на поддержку прогнозирования погоды. Масса КА равна 696 кг, диаметр КА -2.1м, система электропитания 200 Вт. Его разрешение имеет 2.5 км на видимом диапазоне. В инфракрасном диапазоне 5км.

КА Meteosat 2-ого поколения был запущен 28 августа 2002 года, его срок существования более 16 лет в ГСО. Масса КА имеет 2040 кг, диаметр КА -3.2м, система электропитания 600 Вт. Его пространственные разрешение имеет 1 км на видимом диапазоне. На инфракрасном диапазоне 3км.

В Республике Корея был запущен COMS-1 в 26 июня 2010 года. Это многоцелевой КА наблюдения. При метеорологическом зондировании необходимо выполнить 3 условия:

- ① Непрерывный мониторинг окружающей среды с ГСО и извлечение метеорологической информации.
- ② Ранняя диагностика суровых погодных явлений.
- ③ Мониторинг долгосрочных изменений облаков.

Метеорологическая миссия будет дополнять существующую сеть геостационарных спутников, обеспечивая улучшенные входные данные для численных моделей прогнозирования погоды и мониторинга климатических изменений; изображения будут доступны для внутреннего и международного сообщества в режиме реального времени или близком к реальному масштабу

времени через прямое вещание или наземных линий. Масса КА имеет 2460 кг, электропитания 2.5кВт. И его пространственные разрешение имеет от 0.5 до 1 км в видимом диапазоне. На инфракрасном диапазоне 4км. COMS-1 имеет достаточно большую массу, потому что КА COMS-1 является не только метеорологический КА, но и многоцелевой КА.

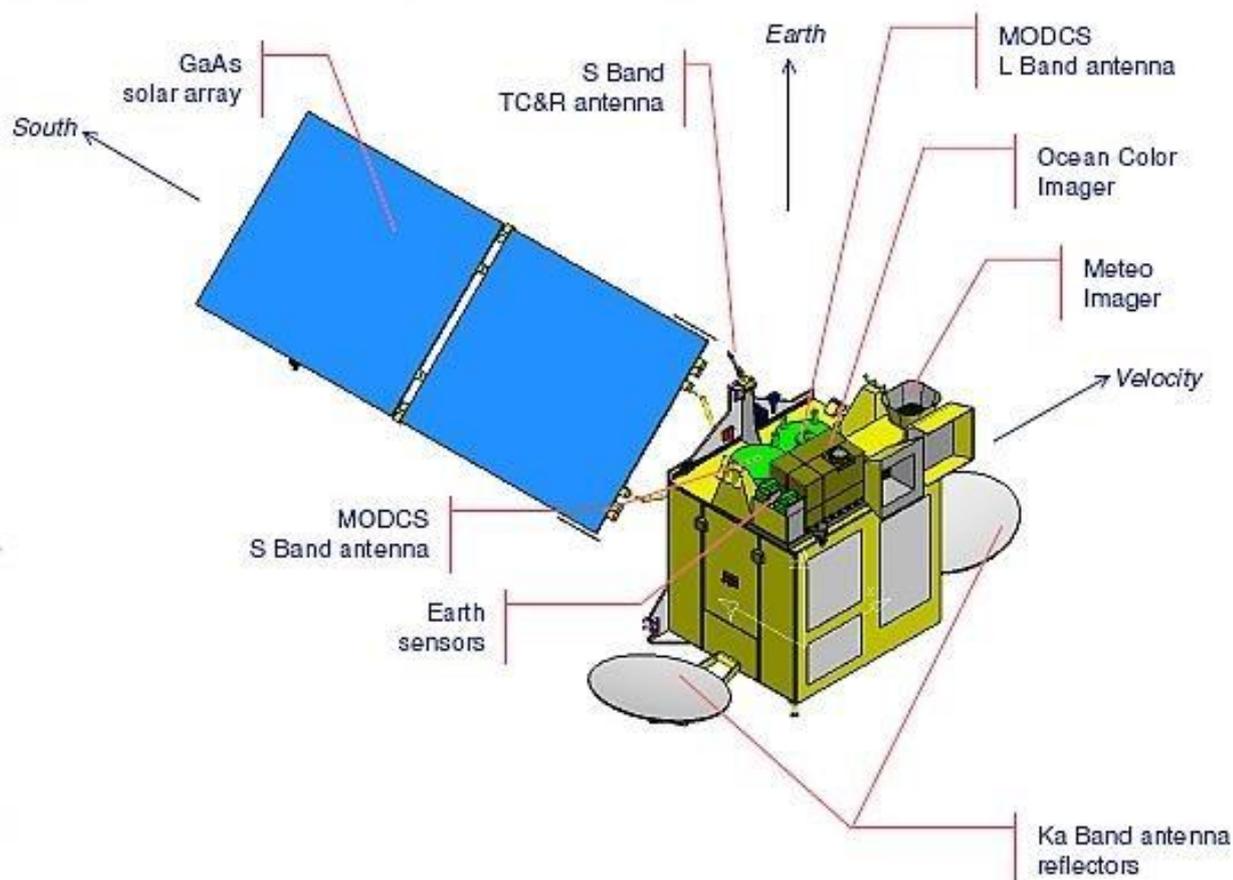


Рисунок 1.3 - Конструкция КА COMS-1 [21]

В рисунках 1.4, 1.5, 1.6 приведены зависимости относительной величины R/H, массы КА и энергопотребления КАМ от даты запуска метеорологических КА. Зависимости показывают тенденция изменения характеристики по течению времени.

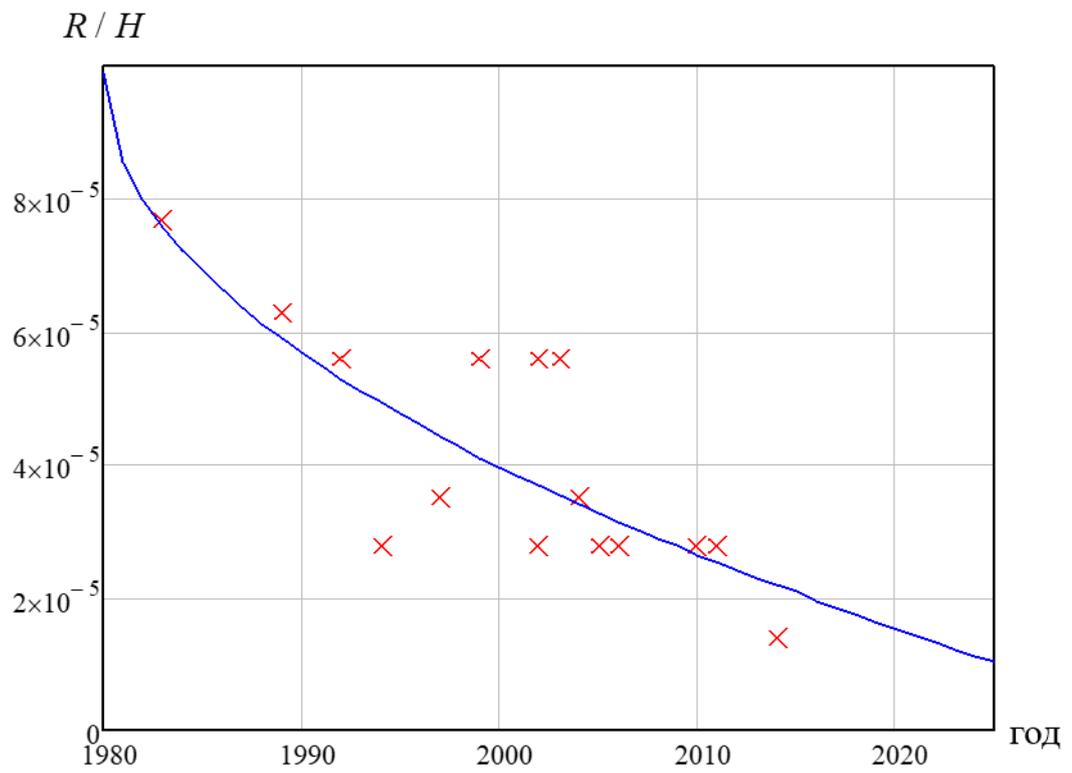


Рисунок 1.4 - Зависимость  $R/H$  от даты запуска метеорологических КА

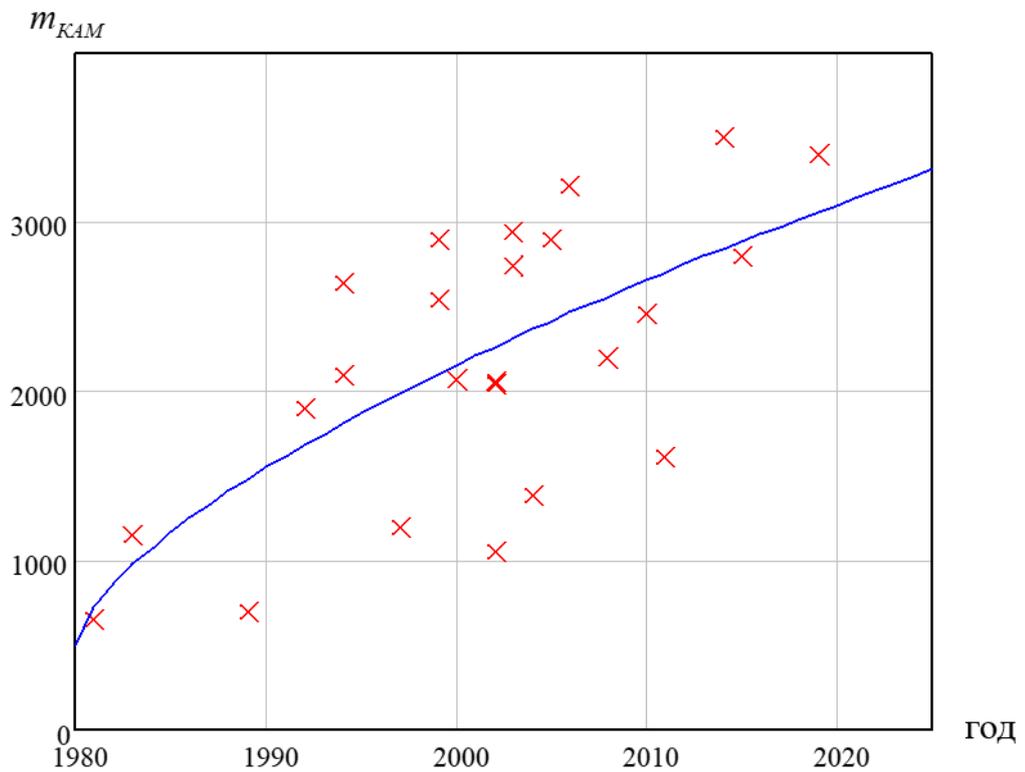


Рисунок 1.5 - Зависимость масса КАМ от даты запуска метеорологических КА

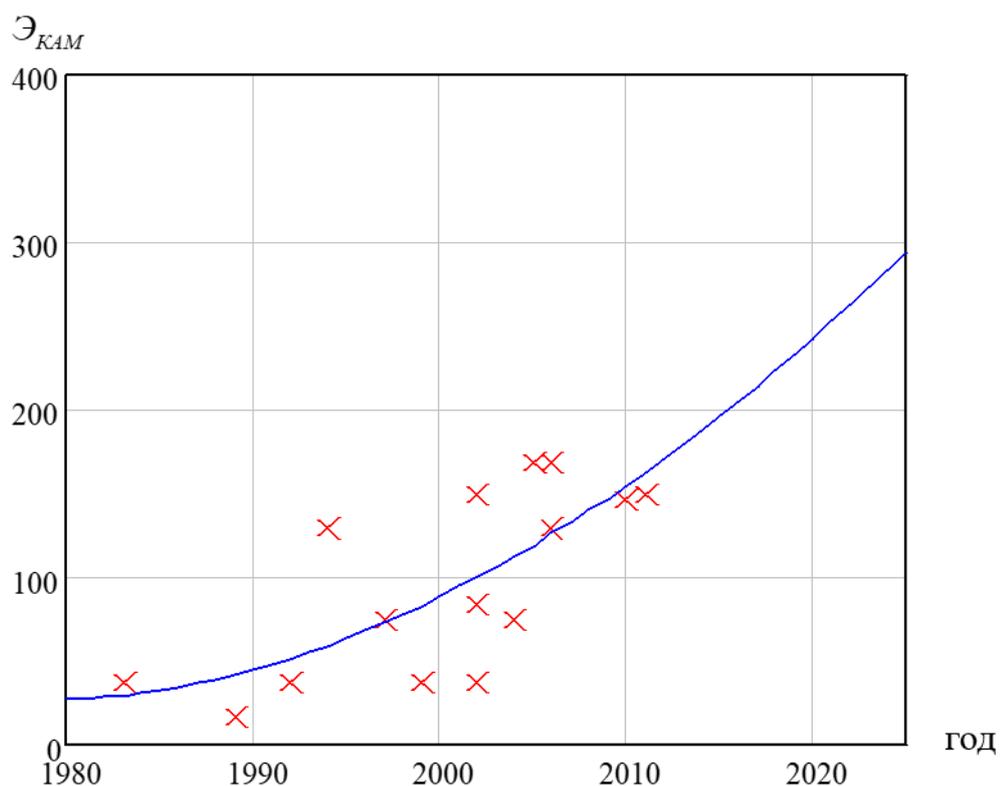


Рисунок 1.6 - Зависимость энергопотребление КАМ от даты запуска метеорологических КА

Основные характеристики (параметры орбит, массы и срок активного существования (САС)) современных метеорологических КА видовой съемки с использованием данных, приведенных в [14], представлены в таблице 1.2

Почти все современные основные метеорологические КА расположены на ГСО и имеют разрешение в видимом диапазоне 1км. Метеорологические КА проводят наблюдение движения облаков и изменения температуры на широком диапазоне. Наряду с базовыми метеорологическими КА в настоящее время многие страны ведут разработку модифицированных метеорологических КА. В России запускали Электро-Л в 2011 году. В США запускали модифицированный GOES второго поколения в 2006 году и планируют запускать GOES третьего поколения в 2015 году. Европа, Индия, Китай, Япония тоже эксплуатируют модифицированные метеорологические КА.

Таблица 1.2 – Основные характеристики современных метеорологической КА на высокой орбите

№ п/п	Наименование системы	Срок активного существования	Космическая платформа	Орбита (км)	Масса (Кг)	Разрешение (в видимой)
1	GOES-2G	3 года	-	35786	2105	1км
2.	GOES-2G мод.	5 лет	BSS601	35786	3210	1 км
3.	COMS-1	10 лет	Eurostar-3000	35786	2460	0.75 км
4.	Meteosat-2G	7 лет	-	35786	626	1 км
5.	FY-2	3 года	-	35786	1380	1.44 км
6	FY-3	3 года	Hexagedron	35786	2200	1.1 км
7	MTSAT-1r	5 лет	FS 1300(SS/L)	35786	2900	0.5 км
8	Insat-2	10 лет	Insat-2/-3	35786	1160	2 км
9	Insat-3	10 лет	Insat-2/-3	35786	2950	2 км
10	Электро-1	6 лет	-	35786	2650	1.25 км

Основные технические характеристики современных метеорологических спутников Электро-Л, GOES-3G, Meteosat-3G, Himawari-8 и COMS-1 приведены в табл.1.3

Таблица 1.3 – Основные технические характеристики современных метеорологической КА на высокой орбите

№ п/п	Наименование системы	Срок активного существования	Космическая платформа	Орбита (км)	Масса (Кг)	Разрешение (в видимой)
1	Электро-Л	10 лет	навигатор	35786	1620	1 км
2.	GOES-3G	14 лет	A2100	35786	>2800	1 км
3.	Meteosat-2G	10лет	-	35786	626	1 км
4.	COMS-1	10 лет	Eurostar-3000	35786	2460	0.75 км
5.	Himawari-8	8 лет	DS-2000	35786	3500	0.75 км

Ниже остановимся подробнее на характеристиках перспективных КА мониторинга представляют спутники Электро-Л, Himawari-8, COMS-1.

КА Электро-Л базируется на унифицированной космической платформе «Навигатор» [25]. Характеристики платформы: сухая масса платформы – 900кг, максимальная масса ПН – 2600кг, система

электроснабжения имеет от 600вт до 1500вт. Электронная аппаратура размещается на термостабилизированных основаниях – трехслойных сотопанелях совстроенными управляемыми тепловыми трубами, с помощью которых от приборов отводится избыточное тепло. Аппаратура наблюдения (сканеры), датчики ориентации, устанавливаются на термостабилизированной платформе в целях обеспечения точности их привязки к единой системе координат. Этим достигается высокая точность наведения датчиков и стабилизации.

Состав полезной нагрузки Электро-Л :

- Многозональное сканирующее устройство гидрометеорологического обеспечения (МСУ-ГС), работающее в видимом и инфракрасном диапазоне.
- Гелиогеофизический аппаратный комплекс (ГГАК-Э), состоящих из 7 различных специализированных сенсоров.
- Бортовой радиотехнический комплекс, служит для передачи на Землю изображений (7.5 ГГц на частоте и скорость передачи данных до 30.72 Мбит/с) и данных ГГАК-Э. Производит ретрансляцию и обмен метеоинформацией, сбор и передачу на Землю данных, а также ретрансляцию сигналов аварийных буев системы Коспас-Сарсат.

Основная конструкция КА Электро-Л приведен на рис 1.7

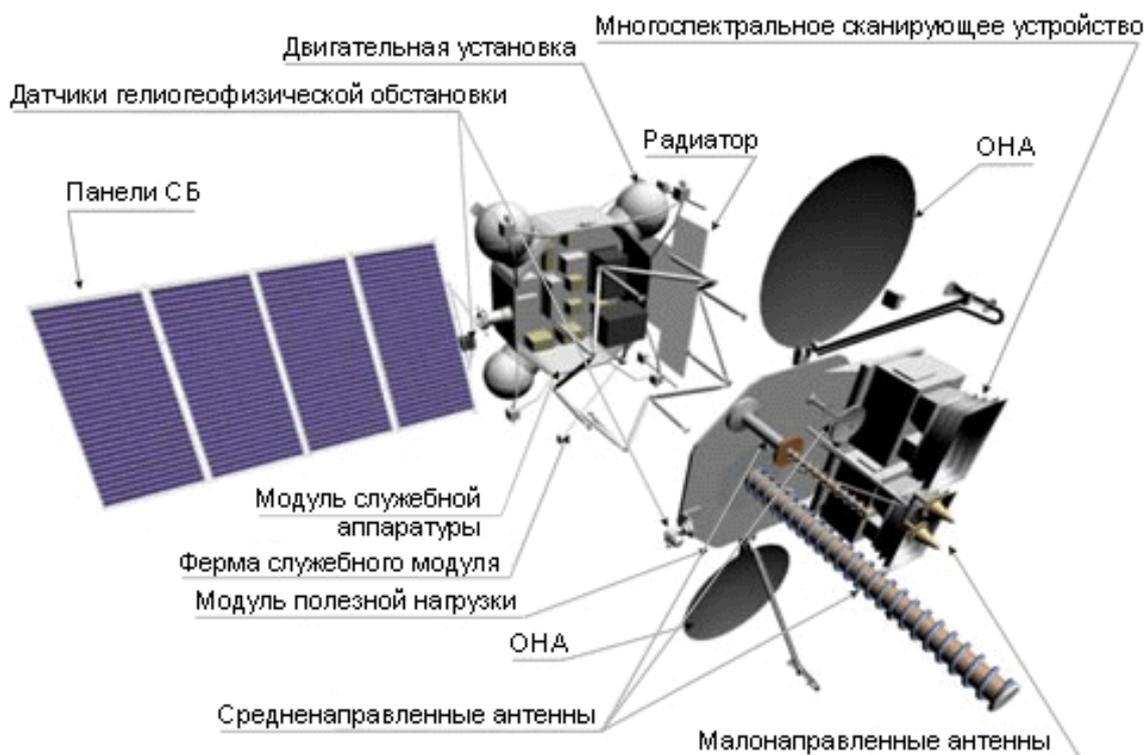


Рисунок 1.7 Основная конструкция КА Электро-Л

КА GOES-3G базируется на космической платформе серии «A2100» [21,22]. Семейство платформ A2100 разработаны компанией Lockheed Martin Space Systems в 1990 – 2010 годах и используется для производства средних и больших геостационарных телекоммуникационных спутников связи и военных разведывательных спутников. Конструкции платформ, запускаемых на геостационарные орбиты, имеют различные конфигурации в зависимости от телекоммуникационных требований, включающих широкополосный доступ в Ka-диапазоне, услуги фиксированной связи в C- и Ku-диапазоне, услуги мощного прямого вещания в Ku-диапазоне, а также возможности мобильной связи с использованием полезных нагрузок UHF, L- и S-диапазона. Модульный подход при разработке платформ A2100 позволил уменьшить число структурных элементов, упростить конструкцию, повысить надежность работы спутников на орбите, уменьшить массу и сократить расходы на запуск и эксплуатацию. Платформы A2100 полностью изготавливаются из композитных материалов, которые делают их более

легкими и прочными. Композитная конструкция также защищает платформу от тепловых искажений.

#### Состав полезной нагрузки GOES-R

- С помощью модуля "Расширенный базовый тепловизор" (ABI (Advanced Baseline Imager)) проводится наблюдение движения урагана. Пространственное разрешение равно 0.5 км на видимом диапазоне, и 1 км на ИК диапазоне. Периодичность наблюдения - 15 минут или 5 минут.
- Датчик экстремального ультрафиолетового излучения (EXIS (Extreme UltraViolet and X-ray Irradiance Sensor)). Это система для предупреждения влияния солнечных вспышек на системы связи и навигации.
- Датчик солнечных ультрафиолетовых лучей (SUVI (Solar UltraViolet Imager)). Это система для прогнозов при отключении электропитания из-за солнечных вспышек.
- Геостационарный картограф Молний (GLM (Geostationary Lightning Mapper)). Это система для предупреждения торнадо и грозы для планирования маршрута полета самолетов.
- Комплекс датчиков мониторинга окружающей среды (SEISS (Space Environmental In-Situ Suite)). Это специальные датчики для мониторинга электронов и протонов, представляющих опасность для спутника.

Основная конструкция КА GOES-R приведен на рис 1.8

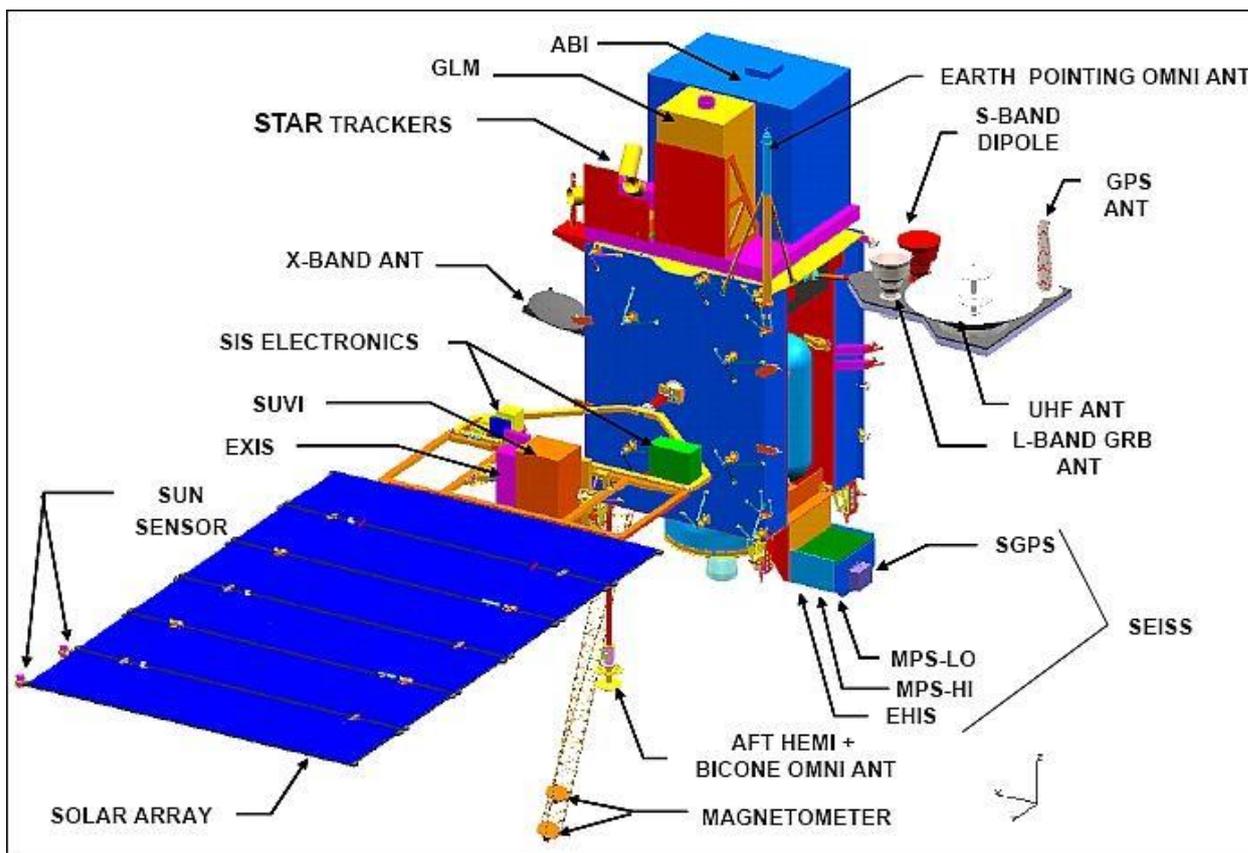


Рисунок 1.8 Основная конструкция КА GOES-R [21,22]

Meteosat-2G (2-ие поколение) не базируется на космической платформе[21]. Конструкция КА Meteosat-2G - цилиндрической конфигурации. Первый КА Meteosat 2-ого поколения запускали в 2002 году. И последний КА планируют запускать в 2015 году.

Основная конструкция КА Meteosat-2G приведена на рис 1.9

Состав КА Meteosat-2G

- SEVIRI (Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager) проводит зондирования поверхности Земли с высоким пространственным разрешением по сравнению пространственным разрешением Meteosat 1-ого поколения в видимом диапазоне до 1 км, в ИК диапазоне до 3 км.
- GERB (Geostationary Earth Radiation Budget). Это абсолютный радиометр повышенной точности измерений, используемый с целью мониторинга земной радиации и измерения в верхней атмосферы, в частности, отраженной коротковолновой и излучаемой длинноволновой областях спектра, что нужно измерять для понимания баланса климата Земли.

- DCS (DataCollectionSystem). Это бортовая система сбора информации. Текущие данные, передаются от КА, со скоростью 100 бит/с для каждой платформы сбора данных на Земле.
- GEOS&R (GeostationarySearchandRescue). Это коммуникационная полезная нагрузка в системе Коспас-Саргат.

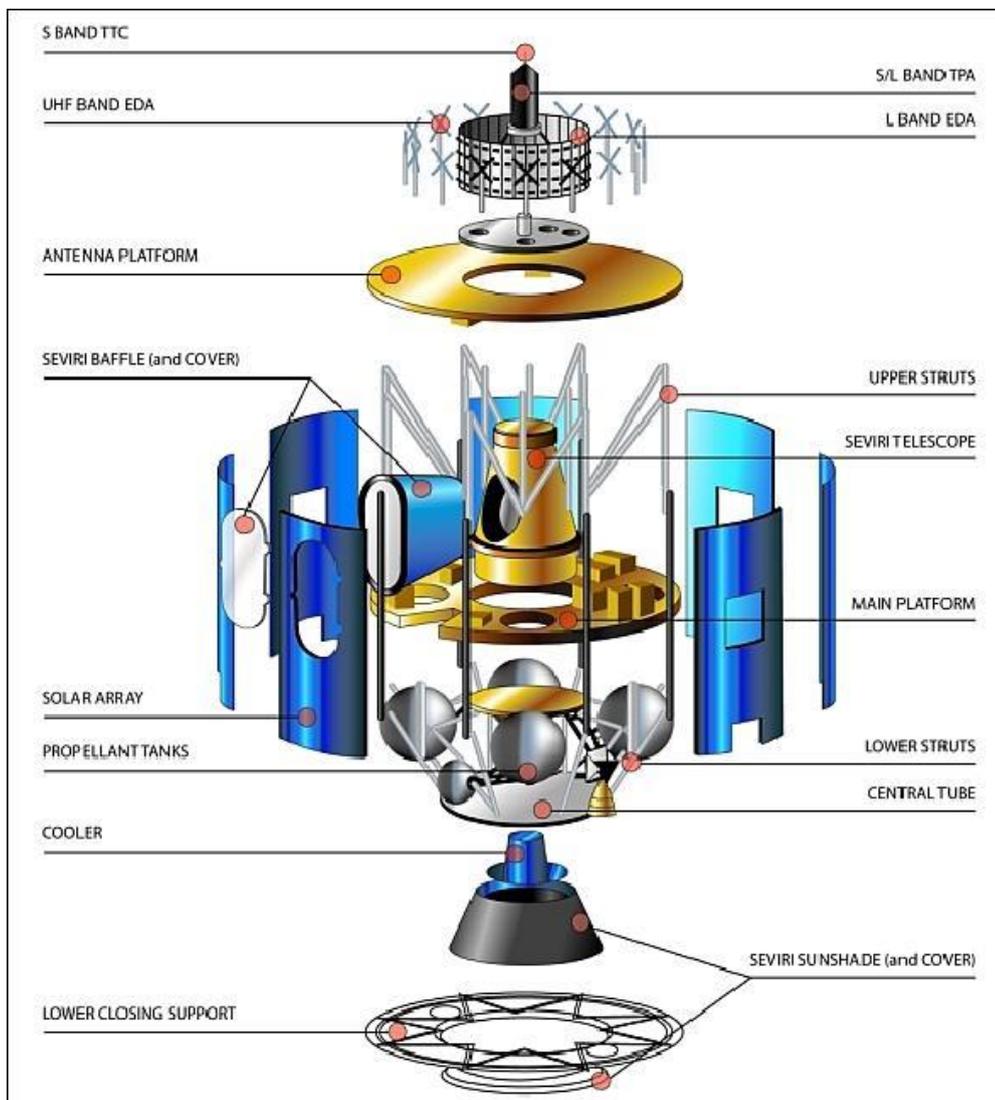


Рисунок 1.9 - Конструкция КА Meteorat-2G [21]

Корейский многоцелевой КА[21]. КА базируется на космической платформе «Eurostar-3000». Съёмочная аппаратура и антенна MODCS расположены в нижней части КА. Особенностью космической платформы является то, что у платформы имеется только одна солнечная батарея. Площадь одной солнечной батареей (GaAs) составляет  $10.6\text{ м}^2$ . Стартовая масса всего КА 2460 кг. Мощность системы электропитания 2.5 кВт.

#### Состав полезной нагрузки КА COMS-1

- GOCI(Geostationary Ocean Color Imager). GOCI является первым геостационарным КА с океанографическим сканирующим устройством. Это первое устройство с целью предоставления мультиспектральных (8-канальных) видимой и ИК данных.GOCI обеспечивает возможность отображения зоны, явлений, изменяющихся на небольшом пространстве. Устройство обеспечивает несколько изображения во многих местах при фиксированной области в течение одного дня.

- MI (Meteorological Imager). Это радиометр дает возможность зондирования энергию земной поверхности и атмосферы в видимом и ИК диапазоне. Целью MI являются наблюдения для обеспечения непрерывного мониторинга в реальном времени с высоким разрешением метеорологических продуктов. Разрешение имеет 0.75 км в видимом и 4 км в ИК диапазоне.

Японский метеорологический КА Himawari-8 [21]. Himawari-8 базируется на космической платформе DS2000. DS2000 является спутниковой платформой для геостационарных спутников и производится Mitsubishi Electric.КА Himawari-8 выполняет как метеорологические, так и аэронавигационные функции, включая сообщения об управлении воздушным транспортом и информацию о местоположении, Himawari -8 и -9 будут иметь специальную метеорологическую миссию. Японская компания Mitsubishi Electric уже создала модификацию для малых размеров КА - DS2000S и для больших размеров КА - DS2000L. Электропитание обеспечивает максимальную мощность 12 кВт. Масса КА равна 3500кг, сухая масса 1300 кг.

#### Состав полезной нагрузки Himawari-8 [21]

- АИИ (Advanced Himawari Imager), АИИ обеспечивает следующие характеристики: 16 каналов, работающих на видимом, ИК и SWIR, MWIR и TIR диапазоне. Пространственное разрешение в видимом диапазоне имеет от 0.5 до 1 км, в ИК диапазоне 2км.

- SEDA (SpaceEnvironmentDataAcquisitionMonitor) измеряет радиацию на своих геостационарных орбитах. Конструкция в основном аналогична разработанной для европейской спутниковой навигационной системы Galileo. Диапазон измерений, для протонов составляет от 15 МэВ до 100 МэВ и для электронов от 0.2 МэВ до 5 МэВ.

В последнее время США и ЕСА разрабатывают новые метеорологические КА GOES-R и Meteosat -3G. Основные характеристики КА GOES-R и Meteosat -3G представлены в табл. 1.4

Таблица 1.4 - Основные технические характеристики КА GOES-R и Meteosat-3G (MTG)

№ п/п	Характеристики	КА			
		GOES-R		Meteosat-3G	
1	Планируемая дата запуска	19.11 2016г.		Конец 2019 г.	
2	Масса КА, кг	2800		3400	
3	Высота орбиты, км	35786		35786	
4	Наклонение орбиты, град	0		0	
5	Тип данных	VIS	NIR/IR	VIS	NIR/IR
6	Пространственное разрешение, м	0.5	1	1	1, 2
7	Количество каналов	3	13	5	11
8	Спектральный диапазон, мкм	0.47 -0.86	1.37-13.6	0,44-0,914	1.38 -13.3
9	Ширина полосы захвата, км	-		180	
10	Отклонение от вертикали, град	17.66		-	
11	Скорость передачи данных, мбит/с	75		167	
12	Информационная производительность, км <sup>2</sup> /сутки	1.666·10 <sup>10</sup>		-	
13	Срок активного существования, годы	14		10.7	
14	Периодичность наблюдения, часа (полный диск Земли)	4		4	

Благодаря новым технологиям, заимствованным, в том числе, у современных КА, функциональные возможности КА GOES-R по сравнению GOES 2-ого поколения значительно расширены :

- Повышено пространственное разрешение на видимом диапазоне до 0.5 км, в ИК диапазоне до 1км.

- Повышен периодичность наблюдения полного диска до 15мин. (GOES 2-ого поколение имеет 26мин.)
- Повышена информационная производительность до 75 Мбит/с. (почти в 28.8 раз больше по сравнению со GOES 2-ого поколения), и количество спектральных каналов повышено до 16 (количество спектральных каналов GOES-2-ого поколения имеет 5 каналов).

КА GOES-R– наиболее эффективный из всех существующих метеорологических КА с пространственным разрешением 0.5 км, 1 км, способный производить съемку в видимом режиме в ИК режиме. Он способен каждые 15 минут наблюдать поверхность Земли. В отличие от GOES-I/M и GOES-N/P, серии GOES-R (третье поколение) на космических аппаратах не установлен "sounder". Устройства "sounder", которые установлены на КА второго поколения получены на основе данных ABI через GS (Ground System). - Вместо этого, GLM (Geostationary Lightning Mapper) позволит значительно улучшить идентификацию опасностей штормов и увеличить заблаговременное предупреждение как днем, так и ночью, обеспечивая непрерывный мониторинг грозовой активности. Кроме того, спутник будет содержать более мощный, набор оборудования для мониторинга солнечных ультрафиолетовых изображений и космической погоды по сравнению с предыдущим спутниками GOES.

Радиочастота связи :

- HRIT (передача информации с высокой скоростью).
- LRIT (передача информации с низкой скоростью). Система LRIT развивается из текущей системы WEFAX, которая обеспечивает широкое распространение изображений GOES и других данных при относительно низкой скорости передачи 128 кбит/с. LRIT требует обновления скорости пользовательской информации до 256 кбит/с.
- EMWIN (Информационная сеть погоды для менеджеров по чрезвычайным ситуациям). EMWIN - это набор методов доступа к данным, которые предоставляют доступный поток данных о погоде и другую важную

информацию для местных менеджеров по чрезвычайным ситуациям и Федерального агентства по чрезвычайным ситуациям.

Основная конструкция GOES-R приведена на рис 1.10.

MTG можно разделить на 2 виде:

1. Версия MTG-I

Значительно более высокие характеристики, чем MSG, похожие на GOES R. работыв ИК диапазоне требуетохлаждениядо 55 К. Основные технические задачи: измерениеположений КА и стабильности наведения.

2. Версия MTG-S

Многие технические задачи решаются на MTG-I. Огромная информационная производительность (3 Гбайт/с на выходе прибора) / реального времени сбора и обработки информации. Стабильность наведения более 10 сек. Более высокое разрешение изображений: от 0,5 до 2 км вместо 1 км до 3 км; 16 спектральных каналов вместо 12 каналов. Повторение цикла наблюдения - 10 минут, а не 15 минут.

Функциональные возможности КА MTG по сравнению со своим предшественником MSG значительно расширены [21]:

- Повышено пространственное разрешение на ИК диапазоне 2км.
- Повышена информационная производительность до 60 Мбит/с.

(почти в 20 раз больше по сравнению со своим предшественником MSG), и количество спектральных каналов повышено до 16 (количество спектральных каналов MSG-2-ого поколения равно 1. На рис 1.10 показан общий вид двух MTG.

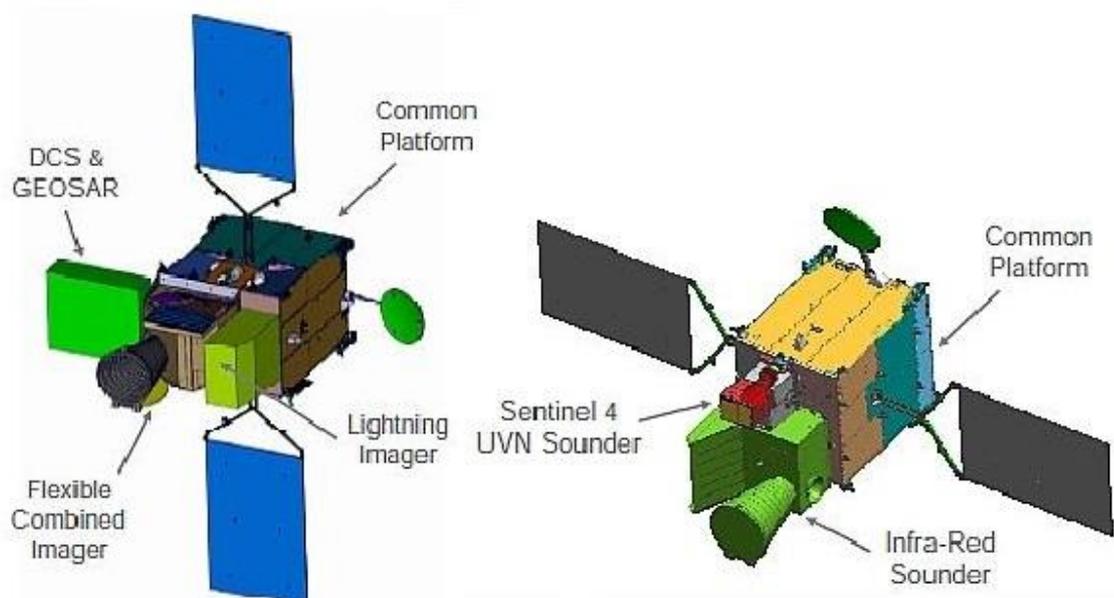


Рисунок 1.10 Общий вид MTG-I(верхний вид) и MTG-S(нежный вид)

Таким образом при создании модификации перспективных КАМ значительно улучшены функциональные характеристики за счет улучшения характеристик комплектующих подсистем.

## 1.2 Вопросы (постановка задачи) прогнозирования характеристик перспективных КА регионального мониторинга

На рисунке 1.11 показана космическая система мониторинга (КСМ), которая включает основные подсистемы (см. рисунок 1.12):

- космические аппараты мониторинга природной среды (КАМ);
- наземный комплекс управления (НКУ);
- наземный комплекс приема, обработки и распространения (НКПОР).

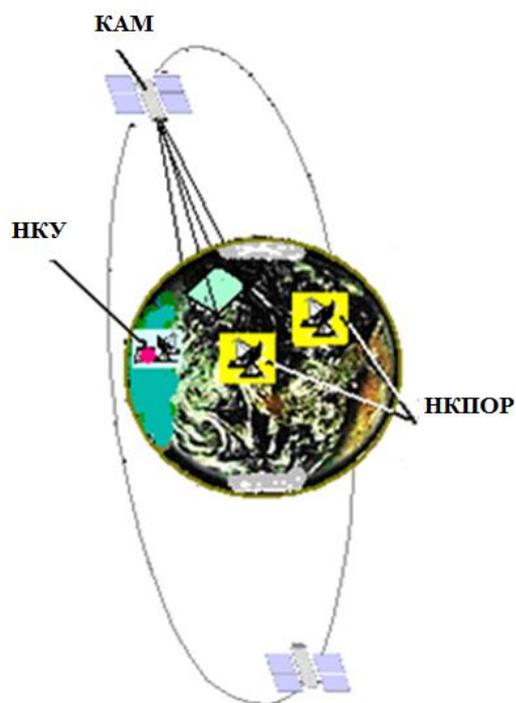


Рисунок 1.11– Космическая система мониторинга

Эффективность работы КСМ зависит от функциональных возможностей (функциональной эффективности) входящих подсистем и от согласованности их работы. Следует также отметить, что во многих случаях эффективность КАМ является определяющей при оценке эффективности КСМ.

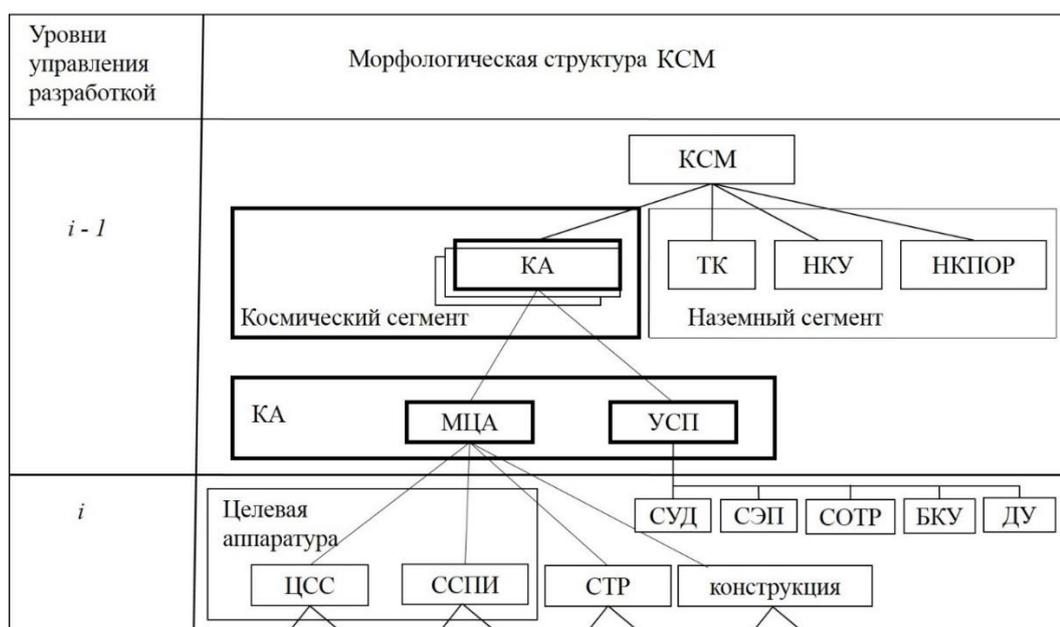


Рисунок 1.12 - Многоуровневая схема проектных исследований (управление проектной разработкой)

## Постановка основной задачи проектирования перспективной КА мониторинга

Облик КСМ зависит от характера функциональных задач, решаемых целевых нагрузкой на КСМ в рассматриваемый период – Ц(t). Целевая нагрузка в свою очередь зависит от типа объектов наблюдения (районов наблюдения), длительности наблюдения, состава решаемых задач.

В работе рассматривается КСМ на высоких орбитах для метеонаблюдения. В общем случае основные требования проектирования перспективных КСМ можно записать следующим образом:

$B_{HP} = B_{HP}^{zd}$  - параметры наблюдаемых районов (объектов) – количество объектов, координаты, размеры объектов наблюдения, время наблюдения.

Эффективность КСМ ( $W$ ) определяют показатели [1,3,10,15]:

$T_{наб} \leq T_{наб}^{zd}$  - периодичность наблюдения;

$N_{кан} \geq N_{кан}^{zd}$  - количество спектральных каналов;

$S_{об} \geq S_{об}^{zd}$  - обзорность;

$R_{КАМ_i} \leq R_{КАМ_i}^{zd}$  - пространственное разрешение;

$P_{КАМ} \geq P_{КАМ}^{zd}$  - надежность функционирования;

$I_{КАМ_i} \geq I_{КАМ_i}^{zd}$  - информационная производительность;

$\tau_{КАМ_i} \geq \tau_{КАМ_i}^{zd}$  - срок активного существования;

$m_{КАМ_i} \leq m_{КАМ_i}^{zd}$  - масса.

При определении облика космических аппаратов мониторинга выбираются количество КА в КСМ, параметры орбиты (Н,i), величина пространственного разрешения, количество передаваемой информации, надежность КА ДЗЗ, срок активного существования. В диссертации будем определять облик КАМ на геостационарной орбите, поэтому можно не учитывать ограничения обзорности и параметры орбиты.

Тогда задача оптимизации параметров перспективных КСМ

формулируется следующим образом.

при заданной целевой нагрузке ( $B_{HP} = B_{HP}^{30}$ ) определить параметры

$${}^{i-1}P_{KA} = (N, I_{KA}, P_{KA}, t_{САСКА}, M_{KA} \dots),$$

$${}^{i-1}P_{HKY}(t),$$

${}^{i-1}P_{HKПОР}(t)$ , - при которых выполняются требования по функциональной эффективности КСМ и трудоемкости создания такой системы и суммарные затраты на проект минимальны.

Задача прогнозирования характеристик КСМ может быть записана в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} C_{\Sigma KC}({}^{i-1}P_{КАМ}, {}^{i-1}P_{HKY}(t_{np}), {}^{i-1}P_{HKПОР}(t_{np}), \beta(t_{np})) &\rightarrow \min; \\ W({}^{i-1}P_{КА}, {}^{i-1}P_{HKY}(t_{np}), {}^{i-1}P_{HKПОР}(t_{np}), \beta(t_{np})) &\geq W^{30}(t); \\ T_P({}^{i-1}P_{KC}, \dots) &\leq T_P^{3a}(t); \\ {}^{i-1}P_{KC} &\in G_{зад}(t_{np}); \\ t_{np} &\in \langle T \rangle; \end{aligned} \right\} (1.1)$$

где  $W(\cdot)$  - целевая функциональная эффективность космической системы;

$C_{\Sigma KC}(\cdot)$  - суммарные затраты на реализацию проекта в планируемый период;

$T_P(\cdot)$  - функция, определяющая трудоемкость работ, длительность разработки и создания КСМ;

$t_{np} \in \langle T \rangle$  - планируемый период (период времени реализации проекта);

$G_{зад}(t_{np})$  - область допустимого выбора, проектных параметров.

${}^{i-1}P_{HKПИ}(t), {}^{i-1}P_{КОУ}(t)$  - параметры наземного комплекса приема информации и комплекса обработки информации и управления,

$\beta(t_{np})$  - определяющие параметры - коэффициенты, массовых, стоимостных зависимостей и соотношений для определения функциональной

эффективности и надежности КАМ, которые находятся на основе опытных данных.

Если параметры  ${}^{i-1} \Pi_{HKPII}(t)$ ,  ${}^{i-1} \Pi_{KOY}(t)$  заданы, то задача (1.1) – может быть записана как, задача оптимизации параметров КАМ в составе КСМ. В качестве критерия в этом случае будут суммарные затраты на проект создания КАМ (при  $n_{КАМ} = n_{КАМ}^{зад}$ ,  $P_{КАМ} = P_{КАМ}^{зад}$ ).

Задачи проектирования КАМ в составе КСМ записывается следующим образом:

$$\left. \begin{aligned}
 & C_{\Sigma КАМ}({}^{i-1} \Pi_{КА}, \beta(t_{np})) \rightarrow \min ; \\
 & W(R_{КАМ}, T_{наб}, N_{кан}, S_{об}, P_{КАМ}, I_{КАМ}, \tau_{КАМ}, m_{КАМ}, \beta(t_{np})) \geq W^{30}(t); \\
 & {}^{i-1} \Pi_{КА} \in G_{зад}(t_{np}); \\
 & t_{np} \in \langle T \rangle; \\
 & G_{зад}(t_{np}) = \{ {}^{i-1} \Pi_{КА} : f_i({}^{i-1} \Pi_{КА}, \beta(t_{np})) \geq f_i^{зад} \} \\
 & {}^{i-1} \Pi_{HKY}(t_{np}), {}^{i-1} \Pi_{HKПОР}(t_{np}) - \text{ задана} \\
 & {}^{i-1} \Pi_{КА} - \text{ определяет состав подсистем и параметра КА.}
 \end{aligned} \right\} \quad (1.2)$$

где  $C_{\Sigma КАМ}(\cdot)$  - суммарные затраты КАМ на реализацию проекта в планируемый период;

$W(\cdot)$  - целевая функциональная эффективность КАМ;

$R_{КАМ}$  - пространственное разрешение КАМ,

$T_{наб}$  - периодичность наблюдения КАМ,

$N_{кан}$  - количество спектральных каналов,

$S_{об}$  - обзорность КАМ,

$P_{КАМ}$  - надежность функционирования КАМ,

$I_{КАМ}$  - объем и качество передаваемой информации,

$\tau_{КАМ}$  - срок активного существования КАМ,

$m_{КАМ}$  - масса КАМ,

$t_{np} \in \langle T \rangle$  - планируемый период (период времени реализации проекта);

$G_{зад}(t_{np})$  - область допустимого выбора проектных параметров. Эта область задается функциональными и параметрическими соотношениями, определяющими внешние и внутренние функциональные связи. (Кроме выделяемых ограничений по массе, надежности и функциональной эффективности).

${}^{i-1}P_{НКПИ}(t), {}^{i-1}P_{КОУ}(t)$  - параметры наземного комплекса приема информации и комплекса обработки информации и управления,

$\beta(t_{np})$  - вектор определяющих параметров. Это коэффициенты массовых, стоимостных зависимостей, соотношений для определения функциональной эффективности и надежности КАМ, значения которых обычно определяются при анализе опытных данных по прототипам.

Нетрудно видеть, что решение задачи проектирования перспективной КАМ позволяет прогнозировать характеристики космического аппарата мониторинга к моменту реализации проекта. Действительно, при постановке задачи учитывается фактор времени реализации проекта. От времени реализации проекта зависят  $G_{зад}(t_{np})$  - область допустимых решений, требования к эффективности КС  $W(\cdot)$ , а также значения определяющих (динамических) параметров  $\beta(t_{np})$ .

В диссертационной работе, приводится разработка математических моделей и метода решения такой задачи. При решении задачи перспективного проектирования и прогнозирования характеристик КАМ в составе КСМ используется методический прием, так называемый метод временных сечений. В этом случае задача (1.2) решается в два этапа. На первом этапе проводится прогнозирование определяющих параметров, целевой нагрузки к моменту реализации проекта. Затем, на втором этапе проводится решение задачи перспективного проектирования (1.2), определяются технико-экономические характеристики перспективной системы при реализации

проекта к моменту прогноза. Реализация такого подхода позволяет проводить конструктивное прогнозирование характеристик перспективных КАМ, учитывать влияние технико-экономических ограничений на решение (в частности, влияния динамики развития подсистем КСМ на характеристики перспективных КАМ).

Отметим особенности задачи перспективного проектирования КАМ (конструктивного прогнозирования характеристик КАМ) :

1. Задача перспективного проектирования КАМ является многокритериальной. Основными показателями качества являются суммарные приведенные затраты на реализацию проекта, показатели функциональной эффективности  $W$  и показатели, определяющие время разработки и создания КАМ (трудоемкость работ).

При поиске решения многокритериальной задачи проектирования КАМ, используется метод ограничений. Основным показателем являются суммарные затраты на проект, на другие показатели качества КАМ наложены ограничения типа равенства и неравенства.

2. Задача (1.2) является многопараметрической. Вектор проектных параметров (параметров управления или варьируемых параметров) содержит целочисленные показатели, определяющие состав и тип основных подсистем КАМ, а также непрерывные -  $m_i$  и  $p_i$  - масса и надежность  $i$ -х подсистем КАМ. В этом случае  $m_i$  – интегральный параметр, задающий свойства выделяемых подсистем.

3. Задача перспективного проектирования (1.2) является динамической. Учитывается время прогноза (время реализации проекта). При решении такой динамической задачи используется метод временных сечений. В этом случае проводится декомпозиция задачи на 2 главных. Первая задача прогнозирования (определения значений динамических показателей к моменту  $t_{np}$ ). Это определяющие параметры –  $\beta(t_{np})$  и функциональные ограничения  $R_{КАМ}^{зад}(t_{np}), N_{КАМ}^{зад}(t_{np}), P_{КАМ}^{зад}(t_{np}), T_{КАМ}^{зад}(t_{np}), I_{КАМ}^{зад}(t_{np}), \tau_{КАМ}^{зад}(t_{np})$  ,

коэффициент  $\beta(t_{np})$ .

Вторая задача – собственно задача перспективного проектирования КАМ при полученных значениях динамических показателей. Проводится определение рациональных (оптимальных)  $P_{КА}$ , при которых выполняются требования к функциональной эффективности и трудоемкости работ и суммарные затраты на проект минимальные.

4. Задача (1.2) записана как детерминированная. В общем случае при исследовании характеристик перспективных КАМ необходимо учесть факторы неопределенности  $(\beta(t_{np}), \dots)$ , которые могут влиять на точность решения.

Проводится формирование соответствующей проектной модели – математических зависимостей, определяющих целевую эффективность, стоимость разработки и производство при реализации проекта, трудоемкость работ, а также разрабатывается алгоритм поиска рационального решения. В дальнейшем проводится поиск рациональных параметров перспективных КАМ, исследования влияния на решение динамических внешних и внутренних связей.

Ниже, в следующей главе приводятся математические модели и методы решения задачи перспективного проектирования КАМ в составе КСМ.

Заключение к главе 1:

1. Проведены анализ опытных данных характеристик КАМ на высоких орбитах за 30 лет. Анализ развития КАМ показывает, что реализуются базовые технологии на основе унифицированных космических платформ, с целью улучшения характеристик создаются модификации КАМ.

Определены основные закономерности изменения  $R/H$ ,  $m_{КАМ}$ ,  $W_{КАМ}$  от времени реализации проекта. Основным фактором, влияющим на повышение характеристик КАМ, является совершенствование базовых подсистем УКП и МЦА.

2. Сформулирована основная задача проектирования

перспективной КАМ в составе КСМ. При использовании метода конструктивного прогнозирования характеристик КАМ при решении основной задачи проектирования с учетом динамики определяющих параметров можно получить оценки характеристик перспективных КАМ при наличии технико-экономических ограничений (особенностей реализации проекта). Модели и методы решения задачи прогнозирования определяющих (динамических) параметров рассматриваются в главе 2.

## **2 МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ПРОГНОИЗРОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕРСПЕКТИВНЫХ КА МОНИТОРИНГА ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ**

### **2.1 Методы прогнозирования характеристик перспективных КА мониторинга природной среды**

При исследовании характеристик перспективных КАМ используются различные методы. Наиболее надёжный результат получается при моделировании процесса развития КАМ, что связано с построением дифференциальных зависимостей. Но из-за сложности и недостаточной изученности процесса формирования систем КАМ в настоящее время нет возможности воспользоваться такими моделями. [1,2,5]

Другой путь исследования, так называемый «метод временных сечений», предполагает построение недифференциальных моделей рассматриваемого явления. Здесь можно использовать статистические модели (эмпирические, полуэмпирические и комбинированные). Динамический характер задачи учитывается в этом случае зависимостью коэффициентов модели от момента реализации проекта ( $t_{np}$ ).

Метод временных сечений используется при исследовании программы развития перспективной КАМ. Построение динамических моделей и прогнозирование определяющих параметров проводится с помощью статистических методов.

Метод временных сечений позволяет использовать известные приемы оптимизации параметров КСМ. При использовании этого метода в проектной модели выделяются определяющие параметры, которые прогнозируются к сроку реализации проекта. От точности прогнозирования определяющих параметров зависит надежность прогнозирования характеристик всей системы.

В главе 3 приводится разработка конструкторского метода прогнозирования характеристик перспективных КА, в основе которого используется метод временных сечений. Конструкторский метод

прогнозирования позволяет учесть влияние технико-экономических ограничений, которых могут влиять на характеристики перспективных образцов. Ниже рассмотрим возможности метода прямой экстраполяции при оценке характеристик перспективных КА.

При определении характеристик перспективных КАМ на начальном этапе ведения проектных работ (КАМ) используется метод экстраполяции, используется динамика выделенных характеристик, определяются зависимости. В этом случае используются опытные данные по прототипом и оцениваются  $m_{КА} = f(P, \alpha(t))$ , где  $m_{КА}$  - выделенная характеристика,

$t$  - время, которое рассматривается как фактор, от которого зависят значения выделенных характеристик,

$P$  - вектор параметров (факторов),

$\alpha$  - вектор параметров статистических моделей.

В том случае, когда рассматриваются статистические зависимости (модели) вида

$$m_{КА} = f(P, \alpha(t)),$$

то есть, когда учитывается зависимость параметров модели от фактора времени  $t$ , то  $\alpha(t)$  называют динамическими параметрами или определяющими параметрами, а зависимости  $m_{КА} = f(P, \alpha(t))$  - динамическими статистическими моделями.

Остановимся ниже на особенностях построения таких моделей.

### **Метод формирования динамических статистических моделей.**

При построении динамических статистических моделей используются данные по прототипам. Характеристики систем прототипов (масса, стоимость, надежность, время разработки и др.) зависят от технических параметров систем и целого ряда общих причин – от наличия технической и технологической базы, финансового обеспечения и пр. При построении статистических моделей для исследования перспективной техники в таком случае используется прием рандомизации. В соответствующей

математической модели выделяют главные факторы, которые влияют на характеристики объекта. Действие общих причин в какой-то мере учитывают с помощью фактора времени  $t$ .

При исследовании перспективных систем используются динамические статистические модели вида:

1.  $y_1 = y_1(\bar{x}, t, \alpha)$
2.  $y_2 = y_2(\bar{x}, \alpha(t))$

Здесь  $y_1, y_2$  - выделенные характеристики технических устройств,  $\bar{x}$  - векторы главных факторов, которые влияют на характеристики объекта,  $t$  - время реализации техники,  $\alpha$  - статистические коэффициент,  $\alpha(t)$  - функции, определяющие зависимость коэффициентов модели от времени реализации проекта.

В первом случае фактор – время входит в модель наряду с главными факторами  $\bar{x}$ , определяющими характеристики КА и систем, другими словами - определяющими функцию отклика  $y$ . Но при малом объеме статистической выборки точность таких моделей может быть невелика. В ряде случаев, если вид связи (функции)  $y = y(\bar{x})$  известен, то при учете динамики от времени более удобными являются зависимости второго типа. Коэффициенты  $\alpha$  в таких моделях выступают в роли определяющих параметров и зависят от времени реализации проекта:  $\alpha = \alpha(t)$ . Рассмотрим модели второго типа подробнее.

При построении динамических статистических моделей будем полагать, что в распоряжении исследователя имеются статистические данные по прототипам за предысторию  $T_{пред} = \max_k t_k - \min_k t_k$  вида :

$$\{y^k, x_l^k, t^k : k = \overline{1, N}, l = 1, 2, \dots\}$$

Здесь под  $y$  понимается некоторая исследуемая характеристика – масса, надежность, затраты;  $x_l^k, l = 1, 2, \dots$  - проектные параметры (главные факторы, аргументы);  $t^k$  – момент времени, к которому относится реализация

прототипа;  $k$  – номер прототипа,  $N$  – объем статистической выборки (число отобранных прототипов). В простейшем случае при  $l = 1$  возможно графическое представление исходной информации (см. рис.2.1). Такую статистическую выборку принято называть случайным полем.

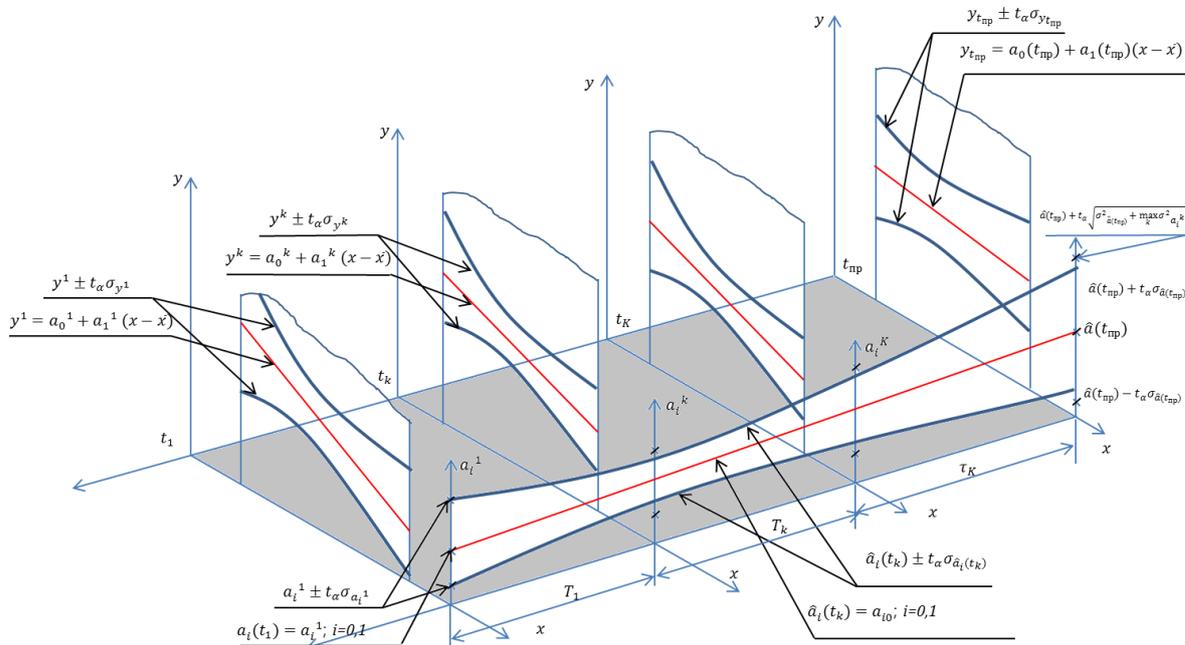


Рисунок 2.1 - Схема построения динамических статистических моделей

В общем случае учесть действие всех факторов на исследуемые характеристики не всегда возможно из-за недостаточной изученности рассматриваемых явлений. Задача усложняется еще тем, что действие многих факторов случайно по своему характеру. Тогда полученные из опыта значения  $\{y^k, (x_l^k), k = \overline{1, N}, l = 1, 2, \dots\}$  считают случайными реализациями некоторого стохастического процесса и исследования проводят, используя методы теории вероятностей и математической статистики.

Такой подход соответствует определенному этапу процесса перспективных исследований развития системы КА, когда еще недостаточно известен механизм процесса, не выявлены все действующие факторы, но уже накоплен в достаточном объеме эмпирический материал по реализованным прототипам. Это позволяет установить некоторые статистические закономерности.

На рисунке 2.2 приводится алгоритм формирования динамических

статистических моделей.

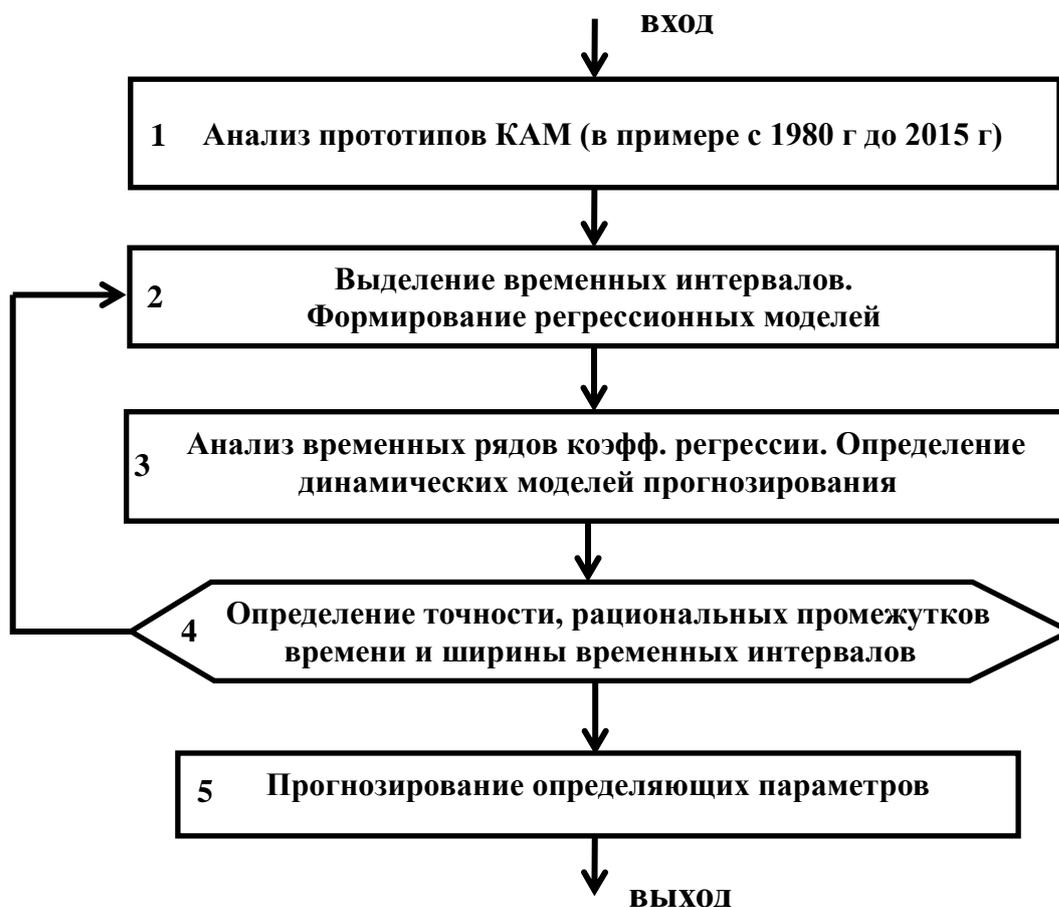


Рисунок 2.2 - Алгоритм формирования динамических статистических моделей

Ниже остановимся на особенностях решения задачи прогнозирования характеристика перспективных КАМ с помощью динамических статистических моделей.

## 2.2 Методика идентификации динамических статистических моделей и прогнозирования характеристик КАМ

Существующие методы прогнозирования характеристик технической системы условно разделяются на три группы: экстраполяционные методы, методы экспертных оценок и комбинированные методы [1].

Выбор того или иного метода при прогнозировании характеристик системы определяются сроками прогноза и имеющейся исходной информацией. В зависимости от сроков различают следующие виды прогноза: краткосрочный (на 1-5 лет), среднесрочный (на 6-10 лет) и долгосрочный (на

11-25 лет). В связи с неопределенностью долгосрочного и тривиальностью краткосрочного прогноза для оценки характеристик перспективной системы наибольшее практическое значение имеет среднесрочное прогнозирование [1].

В данной главе рассматриваются вопросы среднесрочного прогнозирования, связанные с решением второй задачи - с прогнозированием значений характеристик перспективных КА мониторинга (КАМ): пространственного разрешения целевой (съёмочной) аппаратуры, массы и стоимости создания КАМ, САС, информационной производительности и надёжность КАМ.

При прогнозировании характеристик КАМ используются экстраполяционные методы на основе обработки статистических данных по прототипам. С помощью методов корреляционного и регрессионного анализа на основе апостериорной (статистической) информации, данных по прототипам, за прошлые года формируются зависимости, отражающие изменение выделенных характеристик от времени и технических параметров (факторов). Например,  $R / H = f(t, m_{МЦА})$ ,  $m_{КАМ} = \varphi(t, m_{МЦА})$  и др. Эти зависимости определяют процесс развития характеристик КАМ во времени. Прогнозирование осуществляется экстраполяцией в будущее закономерностей, выявленных в процессе исследования до настоящего момента.

Для реализации данного метода используется алгоритм поиска, включающий блоки: оценка исходных данных, формирования аппроксимационной зависимости, экстраполяционного прогнозирования характеристик КАМ. Блок экстраполяционного прогнозирования формируется на основе одного из вариантов экстраполяционного метода, а именно, прямой экстраполяции. Метод прямой экстраполяции основан на обработке статистических данных по исследуемой характеристике. При этом полагается, что реализация такой характеристики является случайной функцией времени. Получение зависимости, отражающие имеющуюся

закономерность (тенденцию) изменения характеристики КАМ по данной случайной реализации, представляет значительную проблему. В данной главе рассматриваются формирование однофакторных моделей для прогнозирования характеристик КАМ.

При определении форм связи используется регрессионный метод. В таком случае среди ограниченного числа форм связи выбирают ту, которой соответствует минимальное среднеквадратическое отклонение, т.е. ищут  $f^*(t)$ , при которой

$$\sum_{i=1}^{n_k} (\Pi_i - f^*(t_i))^2 = \min_k \sum_{i=1}^{n_k} (\Pi_i - f_k(t_i))^2,$$

где  $k \in [1, M]$ ,

$M$  – количество рассматриваемых форм связи

При определении форм связи используются различные функции  $f(t)$ : линейные -  $f(t) = a + bt$ , экспоненциальные -  $f(t) = ae^{bt}$ , показательные -  $f(t) = ab^t$  и другие ( $a$  и  $b$  - коэффициенты,  $t$  - время прогноза).

В качестве примера рассмотрим случай линейной зависимости  $f(t) = a + bt$ . Ниже  $f(t) = \Pi(t)$ ,  $\Pi(t)$  - функция изменения по времени рассматриваемого показателя.

Значения коэффициентов  $a$  и  $b$  определяются из условия минимума

среднеквадратического отклонения  $S = \sum_{i=1}^m (\Pi_i - (a + bt_i))^2$

$$\min S = \min_{a,b} \sum_{i=1}^m (\Pi_i - (a + bt_i))^2;$$

$$\frac{\partial S}{\partial a} = 0, \frac{\partial S}{\partial b} = 0.$$

Формируется система двух уравнений и определяется коэффициенты  $a$  и  $b$  в виде:

$$a = \frac{1}{nS_t^2} \sum_{i=1}^n \Pi_i (\bar{z} - t_i \bar{t}); \quad (2.1)$$

$$b = \frac{1}{nS_t^2} \sum_{i=1}^n \Pi_i (t_i - \bar{t}); \quad (2.2)$$

$$\text{где } S_t^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2; \quad \bar{t} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i; \quad \bar{z} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i^2.$$

Среднеквадратическая ошибка случайных отклонений  $\sigma\varepsilon$

$$\sigma\varepsilon = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Pi_i - a - bt_i)^2}.$$

Оценим точность метода наименьших квадратов. Пусть опытные значения  $t_i$  являются точными, а значения  $\Pi_i$  имеет случайные ошибки с одинаковой дисперсией  $\sigma^2$  для любого  $i$ .

Тогда

$$\sigma^2 \Pi = \sigma^2 (a + bt) = M(a + bt)^2 = \sigma^2 a + t^2 \sigma^2 b + 2tMab. \quad (2.3)$$

Дисперсии  $\sigma^2 a, \sigma^2 b$  и корреляционный момент  $Kab$  определяются в виде:

$$\sigma^2 a = \sigma^2 \left( \frac{1}{nS_t^2} \sum_{i=1}^n \Pi_i (\bar{z} - t_i \bar{t}) \right) = \frac{\sigma^2 \varepsilon \bar{z}}{nS_t^2};$$

$$\sigma^2 b = \sigma^2 \left( \frac{1}{nS_t^2} \sum_{i=1}^n \Pi_i (t_i - \bar{t}) \right) = \frac{\sigma^2 \varepsilon}{nS_t^2};$$

$$Kab = Mab = -\frac{\sigma^2 \varepsilon \bar{t}}{nS_t^2};$$

$$\sigma^2 x = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}, \quad \bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}.$$

Используя (2.3), найдём оценку ошибки, которую дает уравнение  $\Pi = a + bt$  в произвольной точке  $t$ , если коэффициенты  $a$  и  $b$  найдены по формулам (2.1) и (2.2):

$$\sigma^2 \Pi = \frac{\sigma^2 \varepsilon}{n S_i^2} \left( (t_i - \bar{t})^2 + S_i^2 \right); \quad (2.4)$$

$$\sigma^2 \Pi^* = \sigma^2 \Pi + \sigma^2 \varepsilon \quad (2.5)$$

Необходимо отметить, что точность коэффициентов  $a$  и  $b$  тем выше, чем больше  $S_i$ , то есть, чем больше расстояние опытных точек на оси  $\bar{t}$ . Наименьшая среднеквадратическая ошибка имеет место в точке  $t = \bar{t}$ , т.е. в центре группирования опытных данных и наибольшая в точках, где величина  $|t_i - \bar{t}|$  имеет наибольшее значение. Аналогичные результаты получаются при показательных, экспоненциальных и других формах связи.

Прогнозирование показателя (характеристики)  $\Pi$  осуществляется экстраполяцией  $\Pi(t)$  к моменту  $t_{np}$ , определяется  $\Pi(t_{np})$ . Недостатком такого прогноза является то, что он не учитывает различную степень влияния предыстории на будущее. Несмотря на это, в силу простоты, метод прямой экстраполяции используется наиболее часто.

Дальше рассмотрим прогнозирование характеристик МЦА КАМ с многозональной съемочной аппаратурой.

В последнее время приоритетными задачами при разработке модуля целевой аппаратуры МЦА КАМ на высоких орбитах является в следующем:

- создание многозональной аппаратуры получения изображения в различных спектральных диапазонах с необходимыми пространственными разрешениями (по требованию заказчика);
- создание модулей целевой аппаратуры, с длительностью работы больше 10 лет;
- возможность получения данных видеосъемки полного диска Земли и данных отдельных наблюдаемых районов (например, в КАМ GOES-R(США) наблюдается полный диск Земли и территория США) и передачи информации в режиме сжатия по радиолинии на наземный комплекс приема, обработки и распространения информации (НКПОР).

МЦА обеспечивается решение следующих основных задачи КАМ:

- съемки полного диска Земли и заданных объектов;
- получение данных от съемочной аппаратуры, хранение и передачи информации по радиолинии на НКПОР;

Состав перспективных МЦА включает следующие основные подсистем:

- целевую съемочную систему (ЦСС),
- систему сбора и передачи информации (ССПИ, включает бортовой устройство считывания информации (БУСИ) и радиокomплекс передачи информации (РКПИ)),
- система терморегулирования(СТР),
- прочие элементы (устройство для калибровки, кабельную сеть, вторичный источник питания и т. д.),
- конструкцию.

Анализ ранее разработанных и разрабатываемых в настоящее время МЦА показал, что в ряде случаев ЦСС и БУСИ выполняются в виде функционально моноблоков.

Масса МЦА в соответствии с её составом представляется в виде суммы масс отдельных подсистем:

$$m_{\text{МЦА}} = m_{\text{ЦСС}} + m_{\text{ССПИ}} + m_{\text{СТР}} + m_{\text{Кон}} + m_{\text{Проч}}, \quad (2.6)$$

где  $m_{\text{МЦА}}, m_{\text{ЦСС}}, m_{\text{ССПИ}}, m_{\text{СТР}}, m_{\text{Кон}}, m_{\text{Проч}}$  - соответственно массы МЦА, ЦСС, ССПИ, СТР, конструкции и прочных элементов МЦА.

В настоящее время при проектировании ЦСС для метеонаблюдения (метеорологические сканирующее устройство) основными требованиями являются обеспечения многозональности и многоканальности съемочной аппаратуры.

Используя опытные данные проведем анализ характеристик МЦА КАМ. Алгоритм поиска включает следующие основные блоки: анализа исходных данных, формирования аппроксимационных зависимостей  $\Pi = \Pi(t)$ , экстраполяционного прогнозирования и оценку характеристик

перспективных МЦА.

Основные характеристики многозональных ЦСС всех стран, которые эксплуатируют метеорологические космические аппараты, представлены в табл. 2.1[13,14,24,22]

Таблица 2.1 – Основные характеристики многозональных ЦСС

	наименование аппаратуры	страна	КА	год запуска	пространственное разрешение, км (видимое)
1	VHRR	Индия	Insat-1	1983	2.75
2	MVIRI	Европа	Meteosat -1G	1989	2.25
3	VHRR	Индия	Insat-2	1992	2
4	GOES Imager	США	GOES 2G	1994	1
5	S-VISSR	Китай	FY-2A,B	1997	1.25
6	VHRR/2	Индия	Insat-2E	1999	2
7	SEVIRI	Европа	Meteosat -2G	2002	1
8	VHRR/2	Индия	Kalpana-1	2002	2
9	Imager	Индия	Insat-3D	2002	1
10	VHRR/2	Индия	Insat-3A	2003	2
11	-	Китай	FY-2C	2004	1.25
12	JAMI	Япония	MTSAT-1r	2005	1
13	GOES Imager	США	модифицированные GOES-2G	2006	1
14	Imager	Япония	MTSAT-2	2006	1
15	MI	Ю.Корея	COMS	2010	1
16	MSU-GS	Россия	Электро- л	2011	1
17	АHI	Япония	Himawari-8	2014	0.5
18	ABI	США	GOES-R	2015	0.5
19	FCI	Европа	Meteosat-3G	2019	0.5

(продолжение таблицы 2.1)

№	наименование аппаратуры	пространственное разрешение, км (инфракрасные)	количество каналов	масса ЦСС, кг	Электропотребление, Вт
1	VHRR	11	3	60	37
2	MVIRI	5	3	65	17
3	VHRR	8	3	60	37
4	GOES Imager	8	5	140	-
5	S-VISSR	5	3	82	75
6	VHRR/2	8	3	60	37
7	SEVIRI	3	12	270	123
8	VHRR/2	8	3	60	-
9	Imager	4	5	131	85
10	VHRR/2	8	3	60	-
11	-	5	5	82	75
12	JAMI	4	5	166.3	169
13	GOES Imager	4	5	140	130
14	Imager	-	5	163.7	-
15	MI	4	5	139	195
16	MSU-GS	4	10	106	150
17	АHI	2	16	125	-
18	АBI	2	16	338	256
19	FCI	2	16	394	495

Одним из проектных параметров, характеризующим изменение пространственного разрешения  $R$  от высоты орбиты  $H$ , является отношение –  $R/H$  (В данном случае все прототипы КАМ находятся на ГСО, поэтому  $H$  имеет 35781км). Тенденция изменения относительной величины  $R/H$  по годам разработки представлена на рис 1.4.

Используется экстраполяционная функция прогнозирования относительной величины  $R/H$  от времени разработки (года запуска КАМ):

$$R / H(t_{np}) = -1.353 \cdot 10^{-5} \cdot \Delta t_{np}^{0.494} + 9.908 \cdot 10^{-5} \quad (2.7)$$

при ограничении  $1980 \leq t_{np} \leq 2017$

где  $\Delta t_{np} = t_{np} - t^*$ ,  $t^*$  - исходные время является 1980,  $t_{np}$  - время прогнозирования.

На основе опытных данных (таблице 2.1) проводится оценка тенденции изменения массы многозональных ЦСС от относительной величины  $R/H$  (см. на рис 2.3).

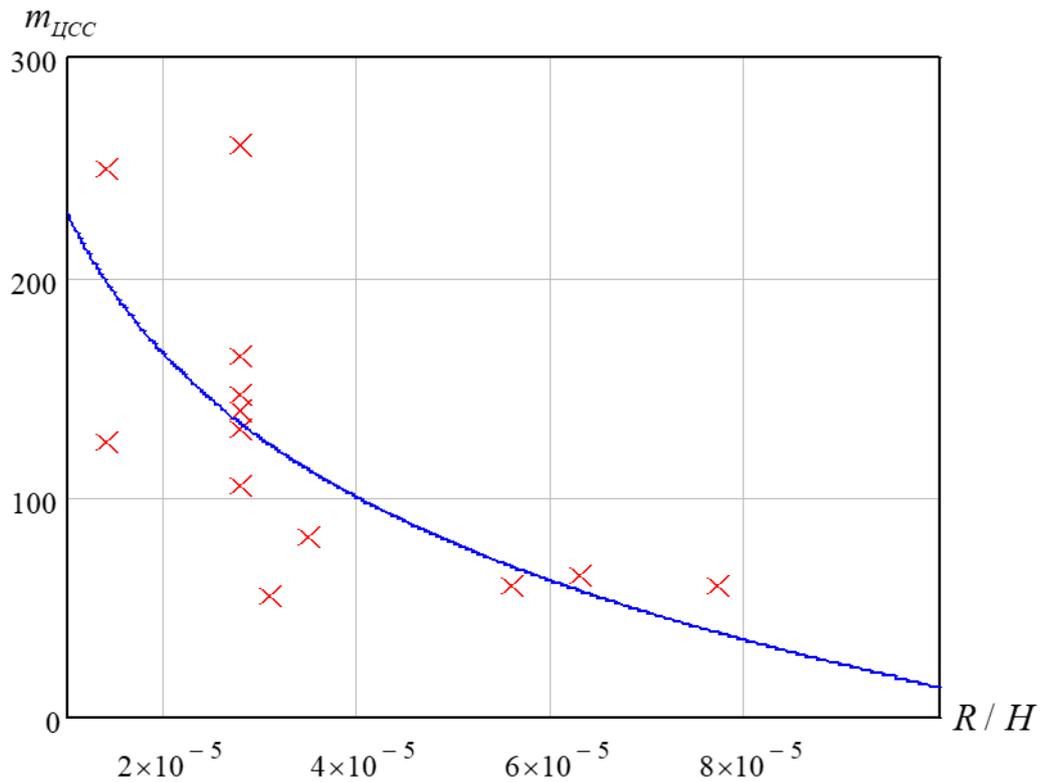


Рисунок 2.3 –Изменения массы ЦСС от величины  $R/H$

Форма связи массы многозональных ЦСС  $M_{ЦСС}$  (кг) от относительной величины  $R/H$  представляется в виде:

$$m_{ЦСС} = -94.04 \cdot \ln(R / H) - 852.437 \quad (2.8)$$

при ограничении  $1.397 \cdot 10^{-5} \leq R / H \leq 8.3831 \cdot 10^{-5}$

Зависимость стоимости КАМ от массы КАМ (в кг) представляется в таком виде:

$$C_{КА}(m_{КА}) = 0.987 \cdot e^{1.948 \cdot m_{КА}} + 116.375 \quad (2.9)$$

при  $660 \leq m_{КА} \leq 3500$ .

На рисунке 2.4 приведена зависимость стоимости КАМ от массы КАМ.

Зависимость показывает, что если масса КАМ увеличивается, то одновременно будет увеличиваться стоимость КА.

Используя соотношения (2.7 – 2.9) можно получить оценку характеристик перспективных КАМ ( $R/H, m_{МЦА}, m_{КАМ}, C_{КАМ}$ ) к моменту прогноза  $t_{np}$  действительно:

$$R/H = R/H(t_{np}), \text{ (см. 2.7),}$$

$$m_{МЦА} = m_{МЦА}(R/H), \text{ (см. 2.8),}$$

$$m_{КАМ} = k_{МЦА} \cdot m_{МЦА},$$

$$C_{КАМ} = C_{КАМ}(m_{МЦА}), \text{ (см. 2.9),}$$

где  $k_{МЦА}$  - статистический коэффициент.

Анализ показывает, однако, что точность такого прогноза не велика, т.к.

$$\sigma C_{КАМ} = f(\sigma m_{МЦА}, \sigma b_i),$$

$$\sigma m_{КАМ} = \varphi(\sigma k_{МЦА}, \sigma m_{МЦА}),$$

$$\sigma m_{МЦА} = \psi(\sigma R/H, \sigma a_i),$$

$$\sigma(R/H) = \gamma(\sigma c_i, t),$$

где  $\sigma b_i, \sigma k_{МЦА}, \sigma a_i, \sigma c_i$  - средние квадратические отклонения значений коэффициентов (параметров) статистических однофакторных моделей.

Т.е. имеет место по существу, сложение средних квадратических отклонений выделенных характеристик. (Это можно показать аналитически, если используются линейные зависимости), либо с помощью численного моделирования [1,3,13,23,24]).

Формирование многофакторных зависимости для прогнозирования характеристик КАМ вида

$$m_{КАМ} = m_{КАМ}(R/H, t, \alpha),$$

возможно при наличии достаточного объема однородной статистической выборки (т.е. применения одинаковых технологии для КАМ) за время

предыстории  $T_{пред} = t_0 - t_n$ . На практике такое условие обычно не выполняется. Относительно одинаковые технологии производства КАМ используются на ограниченных временных интервалах.

В таком случае при проведении прогнозных исследований используются динамические статистические модели вида  $m_{КАМ} = m_{КАМ}(R/H, \alpha(t))$ .

Ниже в главе 2.3. приводится методика идентификации динамических статистических моделей и прогнозирования характеристик перспективных КАМ. С помощью методики идентификации динамических статистических моделей можно проводить многофакторные прогнозные оценки, формировать зависимости характеристик КАМ от времени прогноза и проектных параметров при ограниченном объеме статистической выборки.

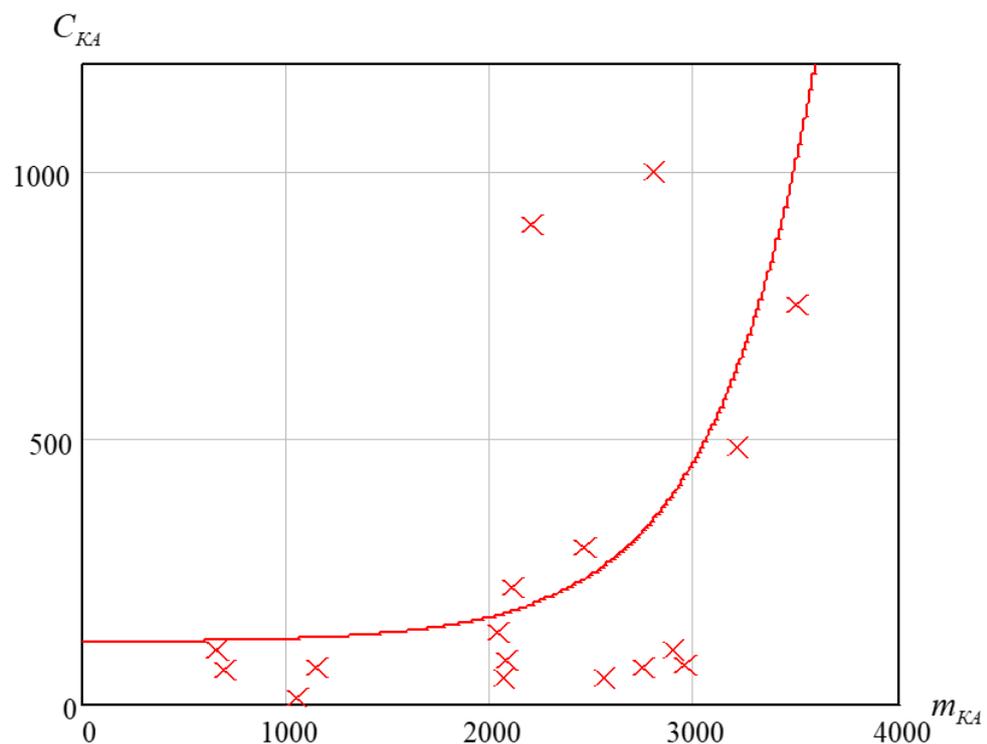


Рисунок 2.4 –Изменения стоимости КА от массы КА

## **2.3 Динамические статистические модели оценки характеристик перспективных КА мониторинга**

Построение динамических статистических моделей распадается на ряд этапов. На первом этапе проводится сбор и обработка статистической информации по подпроцессам-аналогам. Однородность выборки обеспечивается тщательным инженерным анализом статистики по прототипам.

Вопросы получения и обработки статистической информации являются достаточно сложными, требующими при решении значительных затрат труда и времени. Кроме чисто методических трудностей, связанных с определением зависимостей характеристик от параметров КАМ при малом объеме статистической информации, значительных усилий требует получение информации от организаций, проводящих в настоящее время работы по сбору, обработке и систематизации статистики по технико-экономическим характеристикам созданных и разрабатываемых изделий.

Процесс прогнозирования носит итерационный характер и требует постоянного пополнения исходной информации. Проблема, очевидно, будет решена полностью лишь при создании специальной информационной подсистемы в автоматизированной системе управления предприятием. На этой базе значительно увеличиваются возможности использования разрабатываемого метода прогнозирования динамических параметров при проектировании перспективных изделий.

Заметим здесь же, что разработка методов и моделей для решения задачи перспективного проектирования и планирования развития КАМ позволит выявить необходимую исходную информацию и положительно устранить отмеченный недостаток.

Вопросы определения характеристик при малом объеме статистической выборки обсуждаются в многих работ [1,13,14,23,24].

Первичная обработка полученной статистической информации сводится к оценке представительности выборки. При недостатке информации

необходимы дополнительные усилия для получения исходных данных. В ряде случаев проведение детализации рассматриваемых объектов, исследование аналогов элементов системы дает возможность увеличить объем статистики по прототипам. Возможно использование также специальных методов, работоспособных при недостатке статистики.

Если объем статистики достаточно, проводится определение числа временных интервалов,  $T_K, K$ . Вопросы, связанные с определением рациональной ширины интервалов  $T_K$ , рассматриваются ниже.

На втором этапе проводится анализ статистических данных, принадлежащих каждому  $K$ -му временному интервалу с помощью методов корреляционно-регрессионного анализа, определяются коэффициенты исследуемых моделей  $y(\bar{x}, t) = y(\bar{x}, \bar{\alpha}(t))$ . Далее, на третьем этапе, проводится сглаживание временных рядов коэффициентов и прогнозирование их значений к моменту реализации проекта -  $t_{np}$ , а также оценка точности прогнозирования коэффициентов. На четвертом этапе строятся динамические модели определения массы и затрат и решается вопрос оценки точности прогнозирования характеристик.

В связи со спецификой рассматриваемой задачи прогнозирования определяющих параметров, необходимостью построения универсального алгоритма прогнозирования, задачи последних трех этапов нуждаются в подробном рассмотрении. В настоящем пункте займемся определением коэффициентов функциональных зависимостей по статистическим данным,

принадлежащим  $K$ -му временному интервалу  $K = \overline{1, K}$ ,  $K = \left[ \frac{T_{пред} - T}{\Delta T} \right] + 1$ .

Воспользуемся методами корреляционного и регрессионного анализа.

Во многих случаях основу математической модели составляют показательные, степенные и линейные зависимости. Несложными преобразованиями (с помощью логарифмирования) показательные и степенные могут быть приведены к линейным зависимостям (2.10, 2.11).

$$y = \alpha_0^1 + \alpha_1 \cdot x_1 + \alpha_2 \cdot x_2, \quad (2.10)$$

или

$$y = \alpha_0^1 + \alpha_1 \cdot x \quad (2.11)$$

Соотношения (2.10, 2.11) – первого порядка, линейные относительно коэффициентов являются моделью, используемой в регрессионном анализе. Приведем зависимости для оценки коэффициентов  $\alpha_i, i = 0, 1, 2$  модели (2.10) по данным статистической выборки.

Методы регрессионного анализа наиболее полно разработаны в теории статистики. Как в всякий математический аппарат, эти методы оказываются содержательными и корректными лишь в определенных ситуациях, при соблюдении некоторого набора требований, накладываемых на статистическую выборку. Основные условия, обеспечивающие исчерпывающую теоретическую обоснованность методов регрессионного анализа и, в первую очередь, метода наименьших квадратов (МНК) заключается в следующем. Должна быть статистическая независимость результатов наблюдений, выполняются требования к условным дисперсиям -  $D(y, x) = \sigma^2 = const$  и должна быть справедлива исходная посылка о нормальности распределения  $y(x)$  при любом фиксированном  $x$ .

Возможна проверка выполнения перечисленных требований с помощью статистических методов.

Положим, что выборка  $K$ -го временного интервала удовлетворяет указанным требованиям. Используя данные статистической выборки  $\{y_\nu, x_{l\nu} : l = 1, 2; \nu = \overline{1, N^k}\}$ , найдем оценку коэффициентов следующей многомерной регрессионной модели

$$y^k = \alpha_0^k + \alpha_1^k \cdot (x_1^k - \bar{x}_1^k) + \alpha_2^k \cdot (x_2^k - \bar{x}_2^k) + \varepsilon, \quad (2.12)$$

$$\text{где } \bar{x}_i^k = \sum_i^{N_k} x_i / N^k;$$

$k$  – номер временного интервала,  $k=1, 2, \dots, K$ ;

$\varepsilon$  - случайная ошибка, имеющая обычно нормальное распределение с математическим ожиданием, равным нулю и дисперсией  $\sigma_\varepsilon^2$ .

Переход от модели (2.10) к (2.12) вызван тем, что, во-первых, упрощается получение оценок  $\alpha_i^k, i=0,1,2$ , так как не приходится решать систему связанных уравнений и, во-вторых, оценки  $\alpha_0^k, \alpha_1^k, \alpha_2^k$  статистически независимы, что не справедливо для оценок  $\alpha_0^{1k}, \alpha_1^k, \alpha_2^k$ . Модели в форме (2.12) дают лучше обусловленные матрицы. Переход к исходной модели (2.10) прост  $\alpha_0^{1k} = \alpha_0^k - \alpha_1^k \cdot \bar{x}_1^k - \alpha_2^k \cdot \bar{x}_2^k$ .

Оценки параметров получим, используя МНК, минимизируя функцию

$$\Phi = \sum_{i=1}^{N_k} (y(x_i) - \hat{y}(x_i))^2 = \sum_{i=1}^{N_k} \left( y(x_i) - \alpha_0^k - \alpha_1^k \cdot (x_1^k - \bar{x}_1^k) - \alpha_2^k \cdot (x_2^k - \bar{x}_2^k) \right)^2 \rightarrow \min$$

В некотором смысле МНК представляет собой просто некоторый способ решения переопределенной системы уравнений в пространстве параметров  $\alpha_i^k$ .

При минимизации  $\Phi$  определяются частные производные по каждому из параметров  $\alpha_i$  и полученные выражения приравниваются нулю.

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \alpha_0} = -2 \sum_{i=1}^{N_k} \left( y(x_i) - \alpha_0^k - \alpha_1^k \cdot (x_1^k - \bar{x}_1^k) - \alpha_2^k \cdot (x_2^k - \bar{x}_2^k) \right) = 0;$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \alpha_i} = -2 \sum_{i=1}^{N_k} \left( y(x_i) - \alpha_0^k - \alpha_1^k \cdot (x_1^k - \bar{x}_1^k) - \alpha_2^k \cdot (x_2^k - \bar{x}_2^k) \right) \cdot (x_{il}^k - \bar{x}_l^k) = 0;$$

$$l = 1, 2$$

Перенося в правую часть члены, не содержащие параметров, получим совместную систему нормальных уравнений

$$\alpha_0^k + \alpha_1^k \cdot \sum_{i=1}^{N_k} (x_1^k - \bar{x}_1^k) + \alpha_2^k \cdot \sum_{i=1}^{N_k} (x_2^k - \bar{x}_2^k) = \sum_{i=1}^{N_k} y(x_i);$$

$$\alpha_0^k \cdot \sum_{i=1}^{N_k} (x_{il}^k - \bar{x}_l^k) + \alpha_1^k \cdot \sum_{i=1}^{N_k} (x_{il}^k - \bar{x}_l^k) + \alpha_{l+1}^k \cdot \sum_{i=1}^{N_k} (x_{i1}^k - \bar{x}_1^k) (x_{i2}^k - \bar{x}_2^k) =$$

$$= \sum_{i=1}^{N_k} y(x_{il}^k - \bar{x}_l^k), \quad l = 1, 2; \quad \alpha_3^k = \alpha_1^k$$

В силу тождества  $\sum (x_{ip}^k - \bar{x}_p^k) = 0$ ,  $p=1,2$  из первого уравнения сразу получаем

$$\hat{\alpha}_0^k = \alpha_0^k = \frac{\sum y_i}{N^k} = \bar{y}^k.$$

Оценки других коэффициентов получим, решая линейную систему. Для системы второго порядка просто получить конечные выражения

$$\alpha_i = \frac{L_i}{L}, \quad i = 1, 2;$$

$$L = \begin{vmatrix} l_{11} & l_{12} \\ l_{21} & l_{22} \end{vmatrix};$$

$$l_{rr} = \frac{1}{N^k} \sum_{i=1}^{N_k} (x_{ir}^k - \bar{x}_r^k)^2;$$

$$l_{rs} = \frac{1}{N^k} \sum_{i=1}^{N_k} (x_{ir}^k - \bar{x}_r^k)(x_{is}^k - \bar{x}_s^k), \quad r = 1, 2, \quad s = 1, 2, \quad r \leq s;$$

$$\bar{x}_r = \frac{1}{N^k} \sum_{i=1}^{N_k} x_{ir};$$

$L_i$  - определитель, получаемый из  $L$  заменой  $S$ -го столбца  $(l_{1s}, l_{2s})$  столбцом из членов  $l_{01}, l_{02}$

$$l_{0s} = \frac{1}{N^k} \sum_{i=1}^{N_k} (y_{ir}^k - \bar{y}^k)(x_{si}^k - \bar{x}_s^k).$$

Нетрудно получить также  $(100 - \alpha)\%$  доверительные границы оценок коэффициентов  $\alpha_0, \alpha_1$  и  $\alpha_2$

$$\alpha_0 \pm t_{\alpha, N^k - p - 1} \cdot \frac{\sigma_{\hat{y}_k}}{\sqrt{N^k - p - 1}};$$

$$\alpha_1 \pm t_{\alpha, N^k - p - 1} \cdot \frac{\sigma_{\hat{y}_k}}{\sqrt{N^k - p - 1}} \sqrt{\frac{l_{22}}{L}};$$

$$\alpha_2 \pm t_{\alpha, N^k - p - 1} \cdot \frac{\sigma_{\hat{y}_k}}{\sqrt{N^k - p - 1}} \sqrt{\frac{l_{11}}{L}};$$

где  $t_{\alpha, N^k - p - 1}$  - квантиль распределения Стьюдента с доверительными

вероятностями  $\alpha$  при  $N^k$  исходных данных и  $p$  – факторах (в данном случае  $p=2$ )

$\sigma_{\hat{y}_k}$  - оценка среднеквадратичной ошибки,

$$\sigma_{\hat{y}_k} = \sqrt{\frac{1}{N^k} \sum_{i=1}^{N^k} \left( y_i - \alpha_0 - \alpha_1 \cdot (x_1 - \bar{x}_1) - \alpha_2 \cdot (x_2 - \bar{x}_2) \right)^2}.$$

Надо заметить, что в некоторых случаях, при малом объеме выборки, получаемые таким образом коэффициенты могут иметь знаки, не отвечающие физике явления.

Значение коэффициентов регрессии определяются для каждого  $K$ -го временного интервала, что дает возможность построить статистический ряд  $\{\alpha_i^k, t^k : k = 1, 2, \dots, K; i = 0, 1, 2\}$ .

Прогнозирование характеристик ЦСС с многозональной съемочной аппаратурой с использованием метода формирования динамических статистических моделей.

Используя опытные данные, которые представлены в таблице 2.1 сформируем математические модели для определения массы целевой аппаратуры и затрат на реализацию проекта КА наблюдения в зависимости, в первом случае, от пространственных разрешений целевой аппаратуры в видимом диапазоне, и во втором случае, от массы КА и времени реализации техники.

Соответствующие математические модели для прогнозных исследований запишем в виде:

$$m_{\text{ЦСС}} = f_1\left(\frac{R}{H}, t\right) = a_0(t) + a_1(t) \cdot \left(\frac{R}{H} - \frac{\bar{R}}{H}\right)$$

$$C_{\Sigma} = f_2(m_{\text{КА}}, t) = a_3(t) + a_4(t) \cdot (m_{\text{КА}} - \bar{m}_{\text{КА}})$$

Приведем результаты.

1. Математическая модель для определения массы модуля целевой аппаратуры в зависимости от относительного разрешения и времени реализации проекта

На основе опытных данных (см. таблица 2.1) проводились расчеты в соответствии с алгоритмом рис. 2.2. Проведен анализ статистической информации и определены (заданы)  $k$ -е временные интервалы. С помощью приемов регрессионного анализа построены соответствующие зависимости  $m_{цсс} = f_1\left(\frac{R}{H}\right)$  на  $k$ -ых временных интервалах и функции изменения определяющих параметров (коэффициентов  $a_0(t)$ ,  $a_1(t)$ ). В результате получена динамическая статистическая модель для определения массы целевой аппаратуры КА наблюдения в виде:

$$m_{цсс}\left(\frac{R}{H}, t\right) = \left(7.208 \cdot 10^3 - 3.508 \cdot t\right) + \left(2.452 \cdot 10^8 - 1.215 \cdot 10^5 \cdot t\right) \cdot \left(\frac{R}{H} - \frac{\bar{R}}{H}\right) \quad (2.13)$$

Здесь  $a_0(t) = 7.208 \cdot 10^3 - 3.508 \cdot t$ ,

$a_1(t) = 2.452 \cdot 10^8 - 1.215 \cdot 10^5 \cdot t$ ,

$1990 \leq t \leq 2016$ ,

$\frac{\bar{R}}{H} = 3.586 \cdot 10^{-5}$  - среднее значение пространственных разрешении

На рисунке 2.5 и 2.6 приведены графики зависимости коэффициентов  $a_0, a_1$  от времени реализации проекта. Кроме этого приведены кривые возможных отклонений из-за стохастического характера моделей [2].

Полученные зависимости (и графики) используются для оценки значения массы целевой аппаратуры перспективных КА к моменту прогноза. Так при прогнозе характеристик перспективных КА наблюдения (массы целевой аппаратуры) к  $t = 2020$  г. имеем  $a_0(t) = 120.813$ ,  $a_1(t) = 2.106 \cdot 10^5$ .

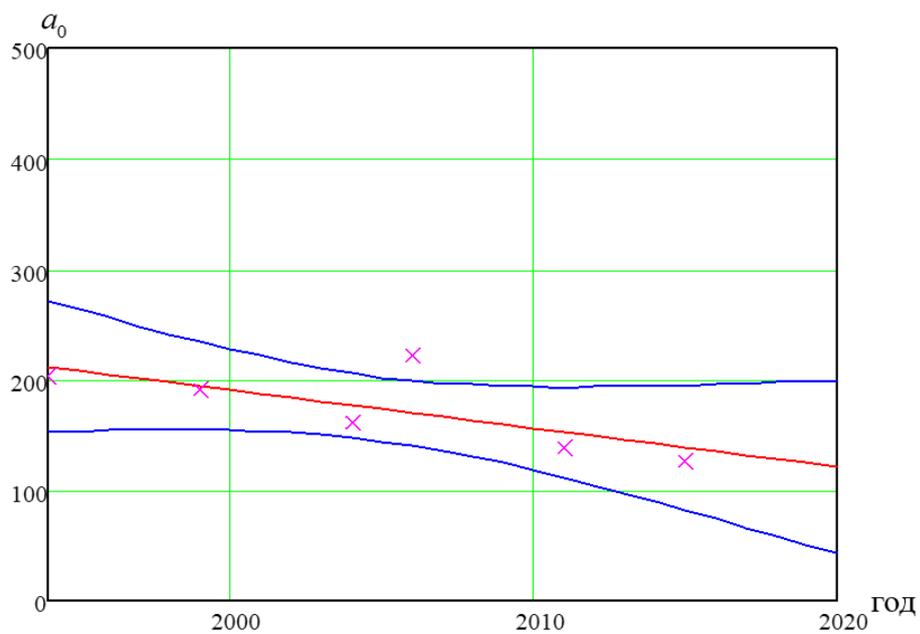


Рисунок 2.5 - Зависимость коэффициента  $\alpha_0$  от времени для определения массы целевой аппаратуры к моменту прогноза

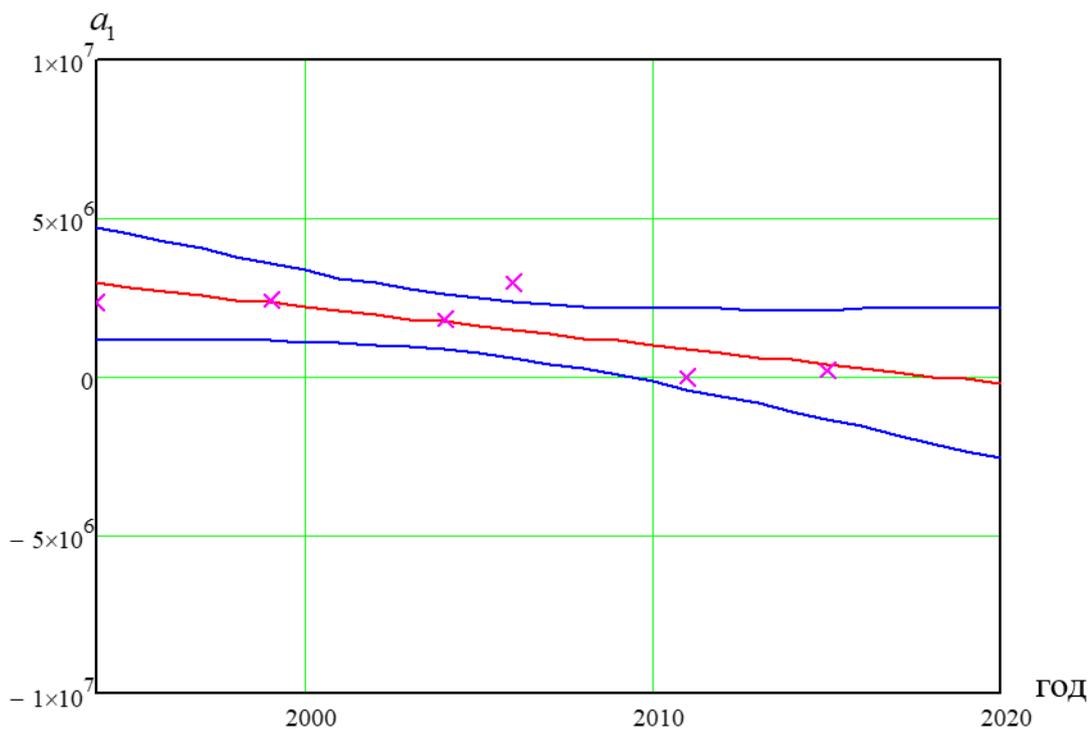


Рисунок 2.6 - Зависимость коэффициента  $\alpha_1$  от времени для определения массы целевой аппаратуры к моменту прогноза

Отсюда согласно (2.13) получены

$$m_{\text{ЦСС}}\left(\frac{R}{H}, 2020\right) = 120.813 - 2.106 \cdot 10^5 \cdot \left(\frac{R}{H} - \frac{\bar{R}}{H}\right)$$

Зависимость  $m_{\text{ЦСС}} = f_1\left(\frac{R}{H}, t\right)$  для определения массы ЦСС к моменту прогноза  $t = 2020$  приведена на рисунке 2.7. На рисунке также показана кривая возможных отклонений массы целевой аппаратуры из-за стохастического характера модели:

$$\bar{m}_{\text{ЦСС}}\left(\frac{R}{H}, t\right) = m_{\text{ЦСС}}\left(\frac{R}{H}, t\right) + \sigma m_{\text{ЦСС}}\left(\frac{R}{H}, t\right), \quad t = 2020$$

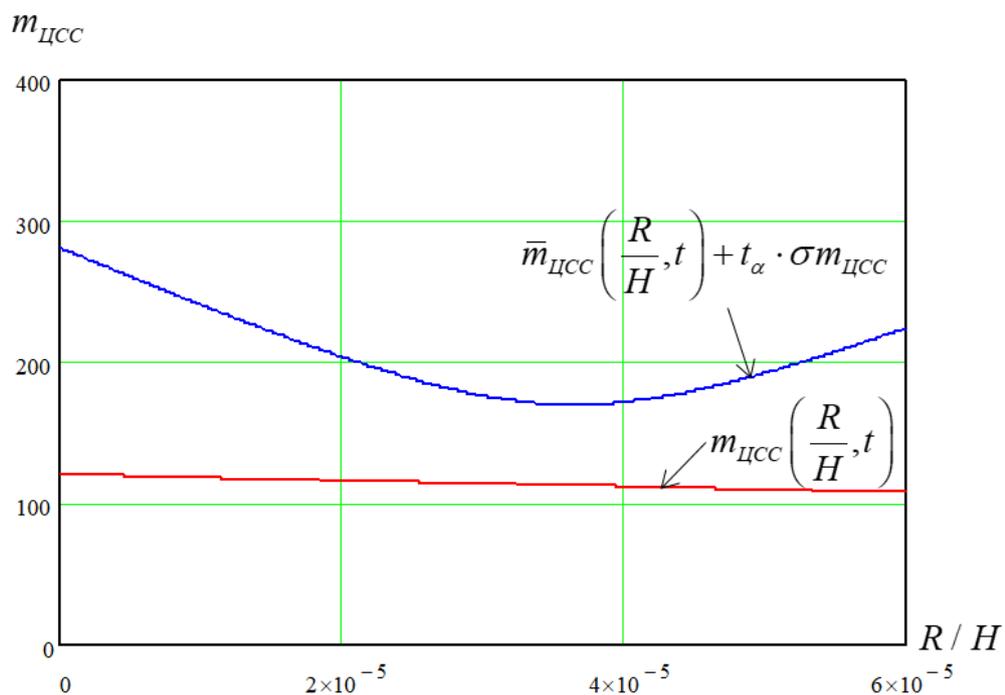


Рисунок 2.7 - Зависимость массы ЦСС от  $\frac{R}{H}$  в случае прогнозирования к моменту  $t_{np} = 2020$ г

2. Математическая модель для определения затрат на реализацию проекта КА наблюдения в зависимости от массы КА и времени реализации техники

В данном случае получим математическую модель для определения затрат на реализацию проекта КА и рассмотрим влияние количества временных интервалов, на которые разбивают время предыстории (см. рис. 2.1), на точность прогноза.

Для выбора рациональной ширины временного интервала, при которой точность прогноза затрат будет наибольшая, используется следующая зависимость [1, 2] :

$$T_{onm} = \frac{T_{nped} \cdot \sqrt{\frac{\sigma_{a0} \left(1 + \frac{T_{np} - T_{aver}}{\sigma_t}\right) \cdot \sigma_y \cdot N_{inter}}{T_{nped}}} - \sigma_y}{\frac{\sigma_{a0} \left(1 + \frac{(T_{np} - T_{aver})^2}{\sigma_t}\right) \cdot N_{inter}}{T_{nped}} - \sigma_y}, \quad (2.14)$$

$$\text{где } N_{inter} = \left(\frac{T_{nped} - T}{\Delta T}\right) + 1,$$

$$\sigma_{a0} = \frac{\sum (a_0^k - \hat{a}_0^k)^2}{K}, \quad \sigma_y = \frac{\sum a_{yk}^2}{K}, \quad \sigma_t = \frac{\sum (t_i - \bar{t})^2}{K}$$

$N_{inter}$  – количество временных интервалов.

Если  $T_{nped} = 38 \text{ лет}$ ,  $\Delta T = 5 \text{ лет}$ ,  $T_{np} = 2025 \text{ г}$ , тогда  $T_{onm} = 10.5$

Проведены расчеты в соответствии с алгоритмом формирования динамических статистических моделей (см. рис. 2.2). В расчетах приняты значения:  $T = 10$  лет - ширина временных интервалов,  $N_{inter} = 6.6 \approx 7$ , смещение интервалов- 5 лет.

Получена статистическая динамическая модель для определения затрат на реализацию проекта КА наблюдения в зависимости от массы КА и времени реализации техники:

$$C_{KA}(m_{KA}, t) = a_3(t) + a_4(t)(m_{KA} - \bar{m}_{KA})$$

$$\text{Здесь } a_3(t) = -1.251 \cdot 10^4 + 6.301 \cdot t,$$

$$a_4(t) = -14.512 + 7.279 \cdot 10^{-3} \cdot t,$$

$$700 \leq m_{KA} \leq 3500,$$

$$\bar{m}_{KA} = 2268.63 - \text{среднее значение массы КА}$$

На рисунках 2.8, 2.9 и 2.10 приведены зависимости коэффициентов  $a_3, a_4$  от времени прогноза и зависимость стоимость КА от массы аппарата в случае прогноза затрат к моменту  $t_{np} = 2020$ г.  $C_{\Sigma} = f_2(m_{КА}, t_{np})$ . На рисунках представлены также кривые возможных отклонений соответствующих показателей из-за стохастического характера зависимостей.

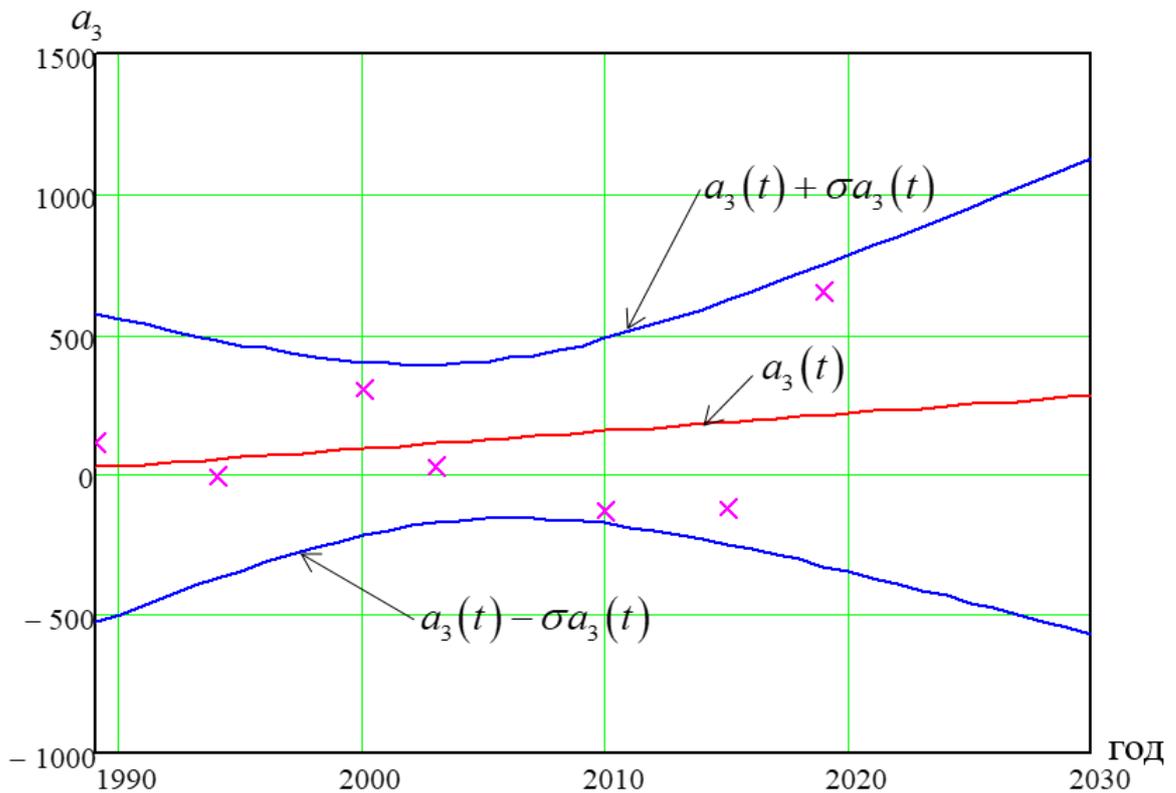


Рисунок 2.8 - Зависимость коэффициентов  $a_3$  от времени прогноза

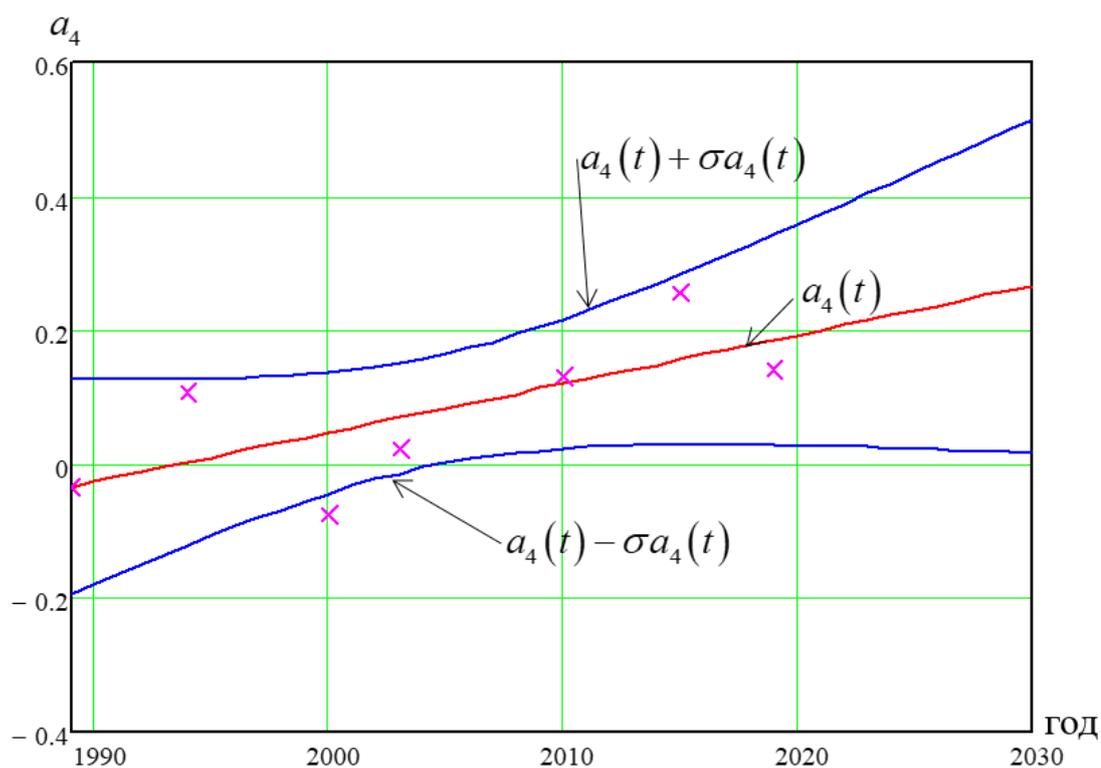


Рисунок 2.9 -Зависимость коэффициентов  $a_4$  от времени прогноза

$C_{\Sigma}$  (тыс. ед.)

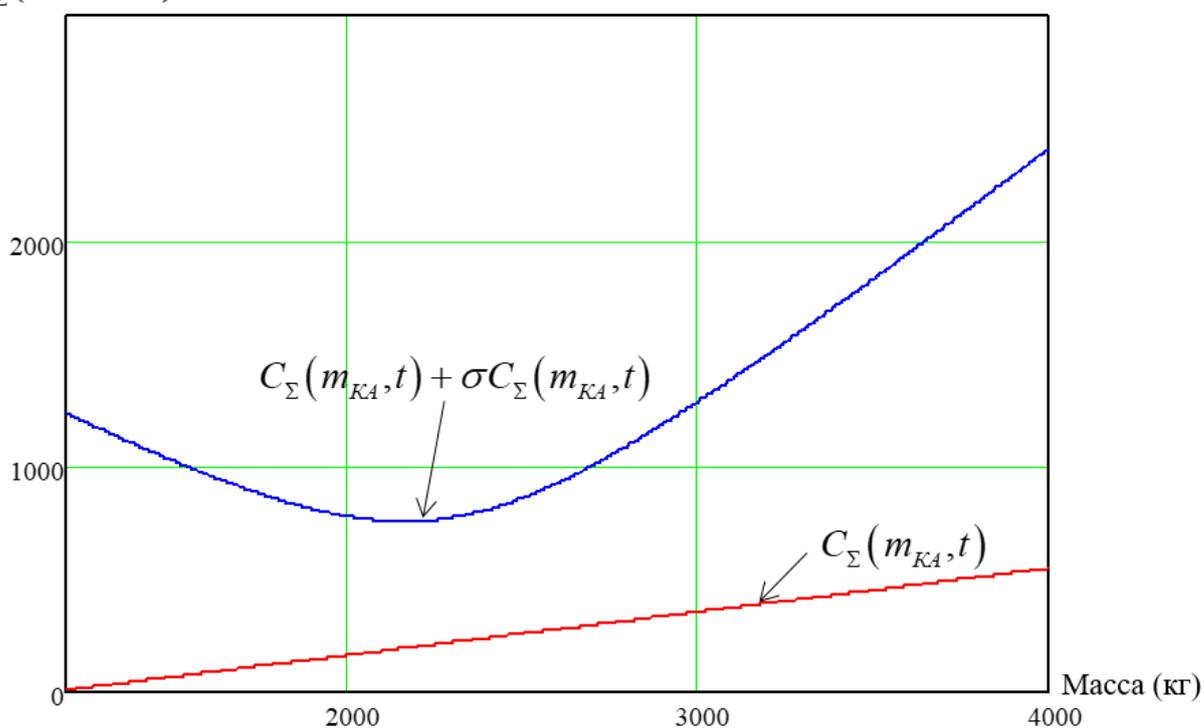


Рисунок 2.10 -Зависимость стоимости космического аппарата от массы КА для прогноза затрат на реализацию проекта к моменту прогноза 2025г.

Используя полученные результаты, можно оценить влияние требования

к пространственному разрешению ЦСС перспективных КА наблюдения на высокой орбите на массовые характеристики КА и затраты на реализацию проекта к моменту прогноза (см. таблицу 2.2). Расчеты показывают, что при заданном пространственном разрешении масса целевой аппаратуры перспективных КА будет снижаться, одновременно затраты на реализацию проекта будут расти. Прогнозные оценки к моменту  $t_{np} = 2020$  г массы целевой аппаратуры (при  $\frac{R}{H} = 1.401 \cdot 10^{-5}$ ) и затрат на проект (при  $m_{КА} = 2500$  кг) имеют соответственно значения 117.86 кг и 259.99 миллионов долларов, а в случае прогноза к моменту  $t_{np} = 2025$  г. масса - 91.813 кг и затрат - 299.91 миллионов долларов. Эти особенности надо учитывать при определении технических заданий на проект.

Таблица 2.2 – Регрессионные модели и оценки массовых характеристик и стоимостей перспективных КАМ к моменту реализации проекта

	К моменту реализации проекта $t_{np}$	
	2020 г	2025г
Модели $m_{ЦСС} \left( \frac{R}{H}, t_{np} \right)$	$(7.208 \cdot 10^3 - 3.508 \cdot t_{np}) + (2.452 \cdot 10^8 - 1.215 \cdot 10^5 \cdot t_{np}) \cdot \left( \frac{R}{H} - \frac{\bar{R}}{H} \right)$	
Модели $C_{\Sigma} (m_{КА}, t_{np})$	$(-1.251 \cdot 10^4 + 6.301 \cdot t_{np}) + (-14.512 + 7.279 \cdot 10^{-3} \cdot t_{np}) \cdot (m_{КА} - \bar{m}_{КА})$	
Масса ЦСС (кг) (при $R/H = 1.401 \cdot 10^{-5}$ )	117.86	91.813
$C_{\Sigma}$ (мл. долларов) (при $m_{КА} = 2500$ кг)	259.9	299.91

#### Заключение к главе 2:

1. Разработана методика формирования динамических статистических моделей и алгоритм формирования динамических статистических моделей массовых и стоимостных характеристик КАМ на высоких орбитах. Алгоритм включает последовательное решение следующих задач:

- Определение рациональных значений длительности временного интервала и количества временных интервалов  $k$ .
- Формирование регрессионных зависимостей для  $k$ -х временных интервалов. Определение временных рядов коэффициентов регрессионных зависимостей.
- Определение регрессионных зависимостей, определяющих динамику изменения коэффициентов регрессионных зависимостей. Формирование динамических статистических моделей.
- Проведение прогнозных оценок характеристик перспективных КАМ к моменту  $t_{np}$ . Оценка точности прогнозных оценок.

2. На основе опытных данных получены динамические статистические модели (проектные зависимости) для прогнозирования массы ЦСС от величины пространственного разрешения и затрат на реализацию проекта от массы КАМ. Такие модели позволяют оценить значения массы ЦСС и затрат на проект при заданном (требуемом) пространственном разрешении перспективной разработки в случае реализации проекта к определенному моменту времени. Одновременно применение моделей позволит исследовать изменение таких характеристик перспективных КАМ как масса ЦСС и затраты на реализацию проекта при увеличении срока прогноза.

### 3 МЕТОДИКА КОНСТРУКТИВНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕРСПЕКТИВНЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ МОНИТОРИНГА ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ ПРИ НАЛИЧИИ ОГРАНИЧЕНИЙ

Анализ известного опыта позволил выявить закономерности развития КСМ, в частности, отмечено что при создании модификации КАМ совершенствуется в основном целевая аппаратура, используются унифицированные космические платформы. Ниже, используя эти результаты, сформулируем задачу прогнозирования характеристик перспективных КА мониторинга при наличии ограничений, рассмотрим структуру проектной модели и алгоритм исследования.

#### 3.1 Задача прогнозирования характеристик перспективных КА мониторинга природной среды при наличии ограничений

На рисунке 3.1 приведена укрупненная структура КСМ.

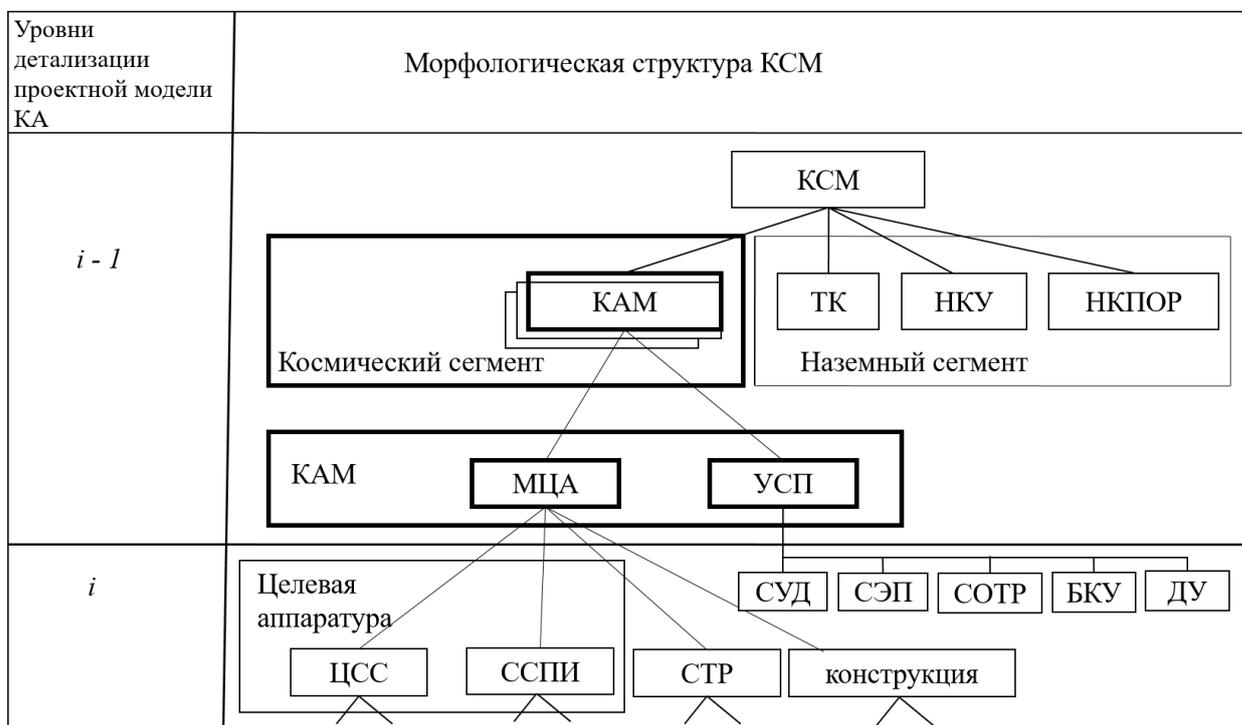


Рисунок 3.1 – Укрупненная структура КСМ

С учётом укрупненной структуры (рис. 3.1) КАМ задача прогнозирования характеристик КАМ на *i-1*-м уровне управления разработкой может быть записана в следующем виде:

$$\begin{aligned}
& C_{\Sigma KA}(\Pi_{KA}, \beta(t_{np})) \rightarrow \min, \\
& \Pi_{KA} \in G_{зад}(t_{np}), \\
& \Pi_{KA} = (\Pi_{МЦА}, m_{МЦА}, \Pi_{УКП}, m_{УКП}, \Pi_{орб}), \\
& m_{KA}(\Pi_{МЦА}, m_{МЦА}, \Pi_{УКП}, m_{УКП}, \beta(t_{np})) \leq m_{KA}^{зад^{i-1}}, \\
& W_{KA}(\Pi_{МЦА}, m_{МЦА}, \Pi_{УКП}, \Pi_{орб}, m_{УКП}, \beta(t_{np})) \geq W_{KA}^{зад^{i-1}}, \\
& P_{KA}(\Pi_{МЦА}, m_{МЦА}, \Pi_{УКП}, m_{УКП}, \beta(t_{np})) \geq P_{KA}^{зад^{i-1}}, \\
& \Pi_{орб} = \Pi_{орб}^{зад}, \\
& t_{np} = t_{np}^{зад},
\end{aligned} \tag{3.1}$$

где  $C_{\Sigma KA}(\cdot)$ - функция, определяющий суммарные затрат на разработку и производство КА,

$m_{KA}(\cdot)$  - масса КА,

$W_{KA}(\cdot)$ - соотношение, определяющее функциональную эффективность КА (требуемые пространственное разрешение, объем передаваемой информации),

$P_{KA}(\cdot)$ - надежность КА,

$\Pi_{орб}$  - параметры орбиты,

$m_{МЦА}, m_{УКП}$  - соответственно массы МЦА и УКП,

$\Pi_{МЦА}, \Pi_{УКП}$  - соответственно параметры, определяющие структуру и состав МЦА и УКП,

$t_{np}$  - время прогноза. Это момент времени, к которому планируются создавать перспективных КА мониторинга,

$\beta(t_{np})$  - вектор определяющих параметров. Это коэффициенты массовых, стоимостных зависимостей, соотношений для определения функциональной эффективности и надежности КАМ, значения которых обычно определяются при анализе опытных данных по прототипам. При

проведении проектных исследований учитывается (оценивается) динамика этих параметров к моменту  $t_{np}$ , используется метод формирования динамических статистических моделей (см. выше).

$G_{зад}(t_{np})$  - область допустимого выбора проектных параметров. Эта область задается функциональными и параметрическими соотношениями, определяющими внешние и внутренние функциональные связи. Это выделяемые ограничения (обусловленные внешними функциональными связями КАМ в КСМ) по массе, надежности и функциональной эффективности и др.

В главе 1.2. обсуждались особенности задачи прогнозирования характеристик перспективных КА мониторинга природной среды.

При конструктивном прогнозировании характеристик КАМ используется метод времени сечения. В этом случае последовательно решаются две задачи. Это: задача 1 - прогнозирования определяющих (динамических) параметров к моменту  $t_{np}$  и задача 2 – оптимизация проектных параметров перспективных КАМ при полученных значениях определяющих динамических параметрах на момент  $t_{np}$ . Для более точных прогнозных оценок перспективных КАМ проводится детализация и решаются задачи прогнозирования характеристик подсистем на  $i$ -м уровне управления разработкой. Подробно об организации прогнозных исследований характеристик КА на  $i$ -м уровне управления разработкой см. [2,5].

Свойства перспективных КА мониторинга во многом зависят от характеристик МЦА. Рассмотрим ниже вопросы прогнозирования параметров МЦА КАМ.

Задачу прогнозирования характеристик МЦА на  $i$ -м уровне управления разработкой можно записать следующие образом:

$$C_{\Sigma \text{МЦА}}(i \text{ П}_{\text{МЦА}}, \beta(t_{\text{нр}})) \rightarrow \min, \quad (3.2)$$

$$\text{П}_{\text{МЦА}} \in G_{\text{зад}}(i-1 \text{ П}_{\text{КАМ}}, t_{\text{нр}}),$$

$$m_{\text{МЦА}}(\text{П}_{\text{ЦСС}}, m_{\text{ЦСС}}, \text{П}_{\text{ССПИ}}, m_{\text{ССПИ}}, \text{П}_{\text{СТР}}, m_{\text{СТР}}, m_{\text{Кон}}, \beta(t_{\text{нр}})) \leq m_{\text{МЦА}}^{\text{зад}^{i-1}}, \quad (3.3)$$

$$W_{\text{МЦА}}(\text{П}_{\text{ЦСС}}, m_{\text{ЦСС}}, \text{П}_{\text{ССПИ}}, m_{\text{ССПИ}}, \text{П}_{\text{СТР}}, m_{\text{СТР}}, m_{\text{Кон}}, \beta(t_{\text{нр}})) \geq W_{\text{МЦА}}^{\text{зад}^{i-1}}, \quad (3.4)$$

$$P_{\text{МЦА}}(\text{П}_{\text{ЦСС}}, m_{\text{ЦСС}}, \text{П}_{\text{ССПИ}}, m_{\text{ССПИ}}, \text{П}_{\text{СТР}}, m_{\text{СТР}}, m_{\text{Кон}}, \beta(t_{\text{нр}})) \geq P_{\text{МЦА}}^{\text{зад}^{i-1}}, \quad (3.5)$$

$$t_{\text{нр}} = t_{\text{нр}}^{\text{зад}},$$

$$\text{П}_{\text{УКП}} = \text{П}_{\text{УКП}}^{\text{зад}},$$

$$\text{П}_{\text{МЦА}} = (\text{П}_{\text{ЦСС}}, m_{\text{ЦСС}}, \text{П}_{\text{ССПИ}}, m_{\text{ССПИ}}, \text{П}_{\text{СТР}}, m_{\text{СТР}}, m_{\text{Кон}}, \beta(t_{\text{нр}})),$$

где  $C_{\Sigma \text{МЦА}}(\cdot)$  - функция, определяющая суммарные затраты на разработку и производство МЦА,

$m_{\text{МЦА}}(\cdot)$  - масса МЦА,

$W_{\text{МЦА}}(\cdot)$  - соотношения, определяющие функциональную эффективность МЦА (требуемое пространственное разрешение, объем передаваемой информации),

$P_{\text{МЦА}}(\cdot)$  - надежность МЦА,

$m_{\text{ЦСС}}, m_{\text{ССПИ}}, m_{\text{СТР}}, m_{\text{Кон}}$  - соответственно массы целевой съемочной системы (ЦСС), системы сбора и передачи информации (ССПИ), системы терморегулирования (СТР) и конструкции,

$\text{П}_{\text{ЦСС}}, \text{П}_{\text{ССПИ}}, \text{П}_{\text{СТР}}, \text{П}_{\text{Кон}}$  - соответственно параметры, определяющие тип, структуру и состав ЦСС, ССПИ, СТР и конструкции,

$W_{\text{МЦА}}^{\text{зад}^{i-1}}, P_{\text{МЦА}}^{\text{зад}^{i-1}}$  - заданные (требуемые) значения показателей функциональной эффективности. Значение их определяются на  $i-1$ -м уровне управления разработкой.

Задача прогнозирования характеристик МЦА записана как задача

оптимизации проектных параметров МЦА  $P_{МЦА}$  при заданных значениях определяющих параметров -  $\beta(t_{np})$  и при наличии ограничений (3.3),(3.4),(3.5). По существу, это задача оптимального проектирования, это многокритериальная и многопараметрическая задача. В данном случае при записи многокритериальной задачи проектирования МЦА используется метод ограничений. Проектные параметры включают целочисленные показатели, которые задают структуру и состав основных подсистем ( $P_{ЦСС}, P_{ССПИ}, P_{СТР}$ ), а также непрерывные переменные (в данном случае это  $m_{ЦСС}, m_{ССПИ}, m_{СТР}, m_{Кон}$ ).

Основные соотношения математической модели и алгоритм оптимизации характеристик перспективных КАМ природной среды при наличии ограничений рассмотрены ниже.

### **3.2 Методика (алгоритм) оценки характеристик перспективных КА мониторинга природной среды при наличии ограничений**

На рисунке 3.2 приведем алгоритм решения задачи (3.1), в детерминированной постановке. Алгоритм включает решение задачи прогнозирования определяющих параметров к моменту  $t_{np}$  и решению задачи оптимизации параметров перспективного КА при наличии ограничений (т.е. с учетом динамики внешних и внутренних связей). В качестве метода оптимизации в общем случае используется случайный поиск. При поиске решения проводится оценка выполнения функциональных требований к КАМ - условие 1 (см. рис. 3.2). Условие 2 – это условие выхода из процедуры поиска оптимального решения.

Блок оптимизации параметров КАМ (МЦА и УСП) осуществляет процедуру случайного поиска, реализует перебор параметров КАМ при поиске их оптимального значения.

В процессе поиска рационального решения (оптимальных параметров) для КАМ проводится оценка обобщенных характеристик систем:

функциональной эффективности  $W_{КАМ}(\cdot)$  (периодичность наблюдения, количество каналов, пространственные разрешение, и т.д.), надежности КАМ  $P_{КАМ}(\cdot)$  и массы  $m_{КАМ}(\cdot)$ . На каждом шаге итерационного поиска оптимальных параметров проводится оценка выполнения соответствующих условий по уровню функциональных эффективности, массы и надежности КАМ. При выполнении данных условий определяются суммарные затраты на реализацию проекта  $C_{\Sigma КАМ}(\cdot)$ . Оптимальное решение должно удовлетворять предъявляемым требованиям и ограничениям, а также обеспечивать минимальные суммарные затраты на реализацию проекта КСМ.

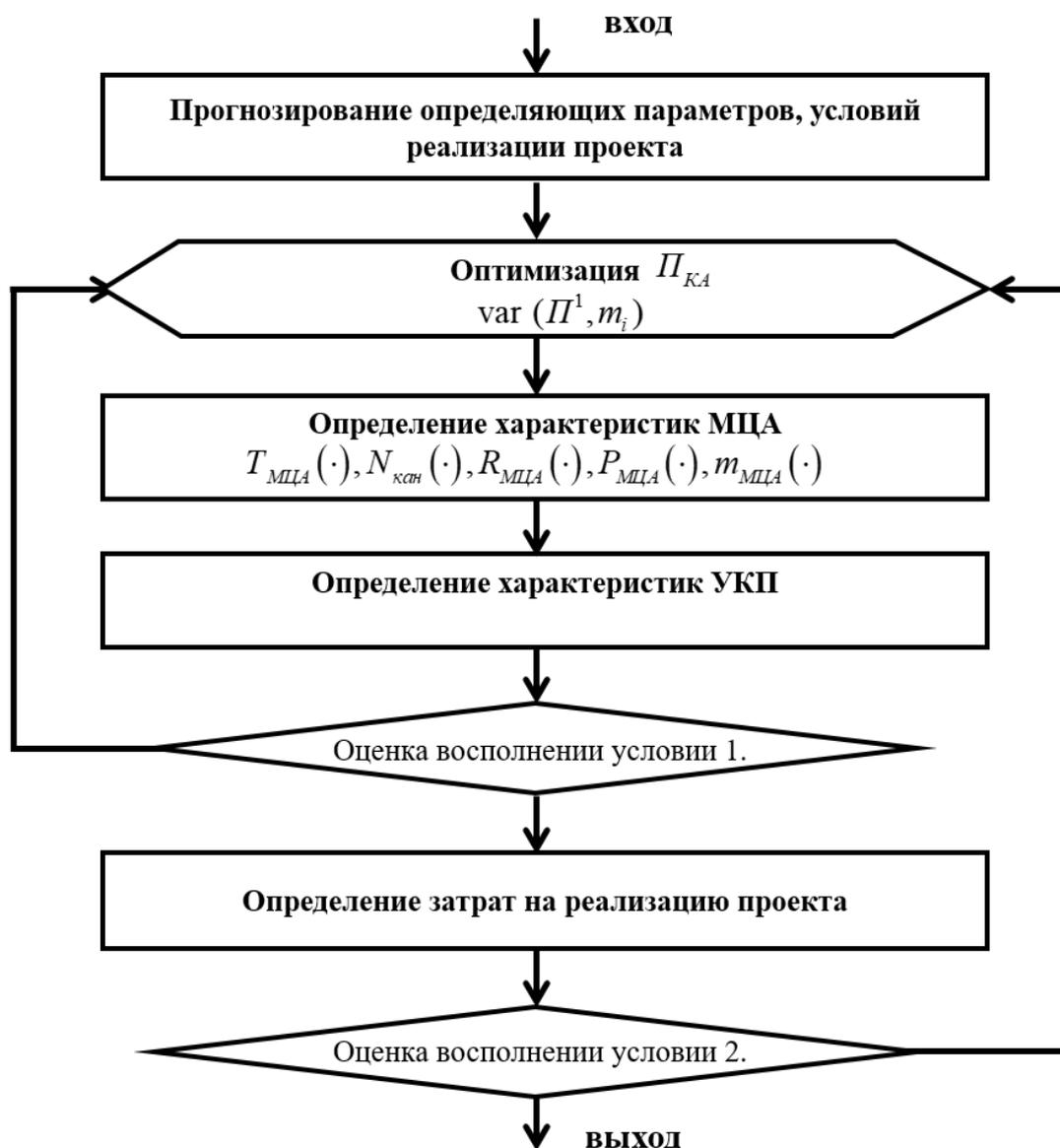


Рисунок 3.2. – Алгоритм решения задачи (3.1)

На рисунке 3.3 показан алгоритм решения задачи оценки характеристик модуля МЦА (подсистемы КА) при заданных функциональных и

параметрических связях на  $i$ -м уровне управления разработкой (см. записи (3.2)-(3.5)). Алгоритм включает решение задачи прогнозирования определяющих параметров  ${}^i\beta(t_{np})$  величин  $m_{МЦА}^{зад^{i-1}}, W_{МЦА}^{зад^{i-1}}, P_{МЦА}^{зад^{i-1}}$  к моменту  $t_{np}$  и решение задачи оптимизации параметров перспективного МЦА при наличии ограничений (3.3), (3.4), (3.5) (т.е. определение параметров МЦА с учетом динамики внешних и внутренних связей). В качестве метода оптимизации в общем случае используется случайный поиск.

Блок определения (оценки) параметров подсистем КА (МЦА) реализует случайный перебор параметров подсистем и поиск их оптимального значения. В процессе поиска рационального решения проводится оценка обобщенных характеристик КА (количество каналов, периодичность, надежности, массы) и затрат на реализацию проекта. На каждом шаге итерационного поиска рациональных параметров проводится оценка уровня надежности, количества каналов и массы МЦА (выполнение условия (3.3), (3.4), (3.5)).

Оптимальное решение удовлетворяет предъявляемым требованиям и обеспечивает минимальные затраты на проект КАМ.

Если характеристики модуля УСП уже заданы, то формирование моделей оценки характеристик на  $i$ -м уровне управления разработкой только для МЦА.

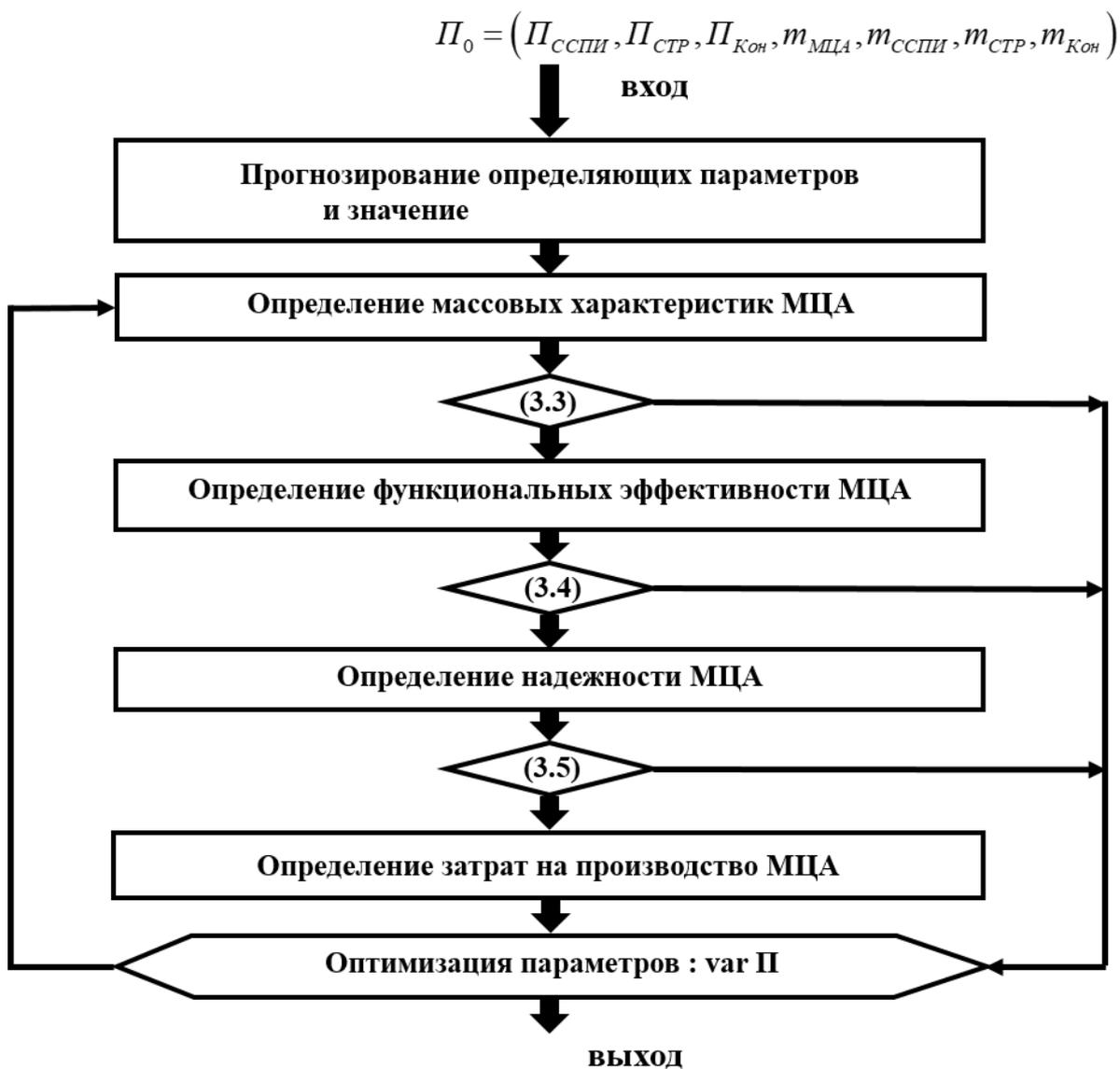


Рисунок 3.3 – Алгоритм решения задачи прогнозирования характеристик МЦА (*i*-ый уровень детализации)

### 3.3 Математические (проектные) модели для определения характеристик КАМ в составе КСМ

При формировании модели оценки массово-габаритных, энергетических характеристик и надежности КАМ в составе КСМ на *i*-1-м уровне управления разработкой используется укрупненная структура (рис.3.2), устанавливается связь массогабаритных, энергетических характеристик и надежности КА от обобщенных параметров подсистем КА.

Приведем соотношения, используемые при решении задачи (3.1), для определения массы, функциональной эффективности, надежности и затрат на

разработку и производство КА.

1) Модели для определения массы и функциональной эффективности КАМ.

Масса КА определяется суммированием массы МЦА и УКП:

$$m_{КА} = m_{МЦА} + m_{УКП},$$

Масса МЦА включает массу модуля целевой аппаратуры ( $m_{ЦСС}$ ), массу системы сбора и передачи информации ( $m_{ССПИ}$ ), массу системы терморегулирования ( $m_{СТР}$ ) и массу конструкции ( $m_{Кон}$ ). При определении массы УКП рассматриваются подсистемы - бортовой комплекс управления (БКУ), система энергопитания (СЭП), двигательная установка (ДУ), система терморегулирования (СТР), конструкция (Кон) и прочие элементы (пр):

$$m_{МЦА} = m_{ЦСС} + m_{ССПИ} + m_{СТР} + m_{Кон},$$

$$m_{УКП} = m_{БКУ} + m_{СЭП} + m_{ДУ} + m_{СТР} + m_{Кон} + m_{пр}$$

Ниже остановимся на особенностях построения проектных моделей для оценки массовых характеристики перспективного МЦА. Для определения массы УКП обычно используется данные по известным проектным решения.

Формирование моделей прогнозирования масс, функциональной эффективности характеристик и надежности ЦСС проводится на основе опытных данных по прототипам существующих и вновь создаваемых ЦСС. Характеристики МЦА и КАМ зависят от обобщенного параметра, определяющего изменение пространственного разрешения R от высоты орбиты КАМ H, т.е. от величины R/H. На базе статистических данных по ранее разработанным и перспективным ЦСС для КАМ формируются зависимости  $m_{ЦСС}$  от относительной величины R/H при заданном составе  $P_{МЦА}^1$ , т.е. при заданных типах ЦСС, ССПИ, СТР и конструкции. Ниже приведены зависимости  $m_{ЦСС}$  от относительной величины R/H для

многозональной сканирующей оптико-электронной ЦСС видимого и ИК диапазона и базовых ССПИ, СТР, Конструкции.

Для перспективного КАМ величин функциональная эффективность  $W_{ЦСС}$  определяются в зависимости от  $m_{ЦСС}$  и время прогноза.

Соответствующие проектные модели имеют вид:

$$m_{ЦСС} \left( \frac{R}{H}, t_{np} \right) = \bar{m}_{ЦСС_1}(t_{np}) + \bar{m}_{ЦСС_2}(t_{np}) \cdot \left( \frac{R}{H} - \frac{\bar{R}}{H} \right),$$

$$W_{ЦСС} (M_{ЦСС}, t_{np}) = \bar{W}_{ЦСС_1}(t_{np}) + \bar{W}_{ЦСС_2}(t_{np}) \cdot (m_{ЦСС} - \bar{m}_{ЦСС}),$$

$$\frac{R}{H} \leq \frac{R}{H} \leq \frac{\bar{R}}{H},$$

$$\underline{m}_{ЦСС} \leq m_{ЦСС} \leq \bar{m}_{ЦСС},$$

$$\Pi_{МЦА}^1 = \Pi_{МЦА}^{1\text{зад}},$$

где  $\bar{m}_{ЦСС_1}(t_{np}), \bar{m}_{ЦСС_2}(t_{np}), \bar{W}_{ЦСС_1}(t_{np}), \bar{W}_{ЦСС_2}(t_{np})$  – статистические коэффициенты. Следует обратить внимание, что последние зависят от времени прогноза  $t_{np}$ . В данном случае речь идет о динамических статистических моделях. Выше обсуждается методика формирования таких модели.

Для определения массы  $m_{ССПИ}$ , а также для определения массы СТР  $m_{СТР}$  и конструкции  $m_{Кон}$  в случае прогнозных исследования КА используется метод базовых коэффициентов.

Обычно ССПИ включает две основных подсистемы – бортовое устройство считывания информации (БУСИ) и радиокomплекс передачи информации (РКПИ). Зависимость массы ССПИ от массы БУСИ и массы РКПИ можно записать в следующем виде [3,5,12]:

$$m_{ССПИ} = \alpha_0 \cdot m_{БУСИ} + \alpha_1 \cdot m_{РКПИ}.$$

Масса ССПИ зависит от массы МЦА и от массы ЦСС [2,10,13,25]. Зависимость для определения массы ССПИ можно записать на следующем

виде:

$$m_{\text{ССПИ}} = a_0 \cdot m_{\text{ЦСС}} + a_1 \cdot m_{\text{МЦА}}.$$

Для определения массы СТР и конструкции используют соотношения [1,3,10]:

$$m_{\text{СТР}} = \beta \cdot m_{\text{ЦСС}},$$

$$m_{\text{Кон}} = \gamma \cdot m_{\text{МЦА}}.$$

Здесь  $\alpha_0, \alpha_1, \beta, \gamma$  - базовые коэффициенты, определяются на основе опытных данных.

В таком случае, при определении массы ЦСС перспективного КАМ используют соотношения:

$$m_{\text{МЦА}} = m_{\text{ЦСС}} + a_0 \cdot m_{\text{ЦСС}} + a_1 \cdot m_{\text{МЦА}} + \beta \cdot m_{\text{ЦСС}} + \gamma \cdot m_{\text{МЦА}}$$

отсюда

$$\Rightarrow m_{\text{МЦА}}(1 - a_1 - \gamma) = m_{\text{ЦСС}} + a_0 \cdot m_{\text{ЦСС}} + \beta \cdot m_{\text{ЦСС}}$$

$$\Rightarrow m_{\text{МЦА}} = \frac{(1 + a_0 + \beta)}{(1 - a_1 - \gamma)} m_{\text{ЦСС}} = \left( \alpha_{M0}(t_{np}) + \alpha_{M1}(t_{np}) \cdot \frac{R}{H} \right) \cdot \frac{(1 + a_0 + \beta)}{(1 - a_1 - \gamma)},$$

$$\text{Таким образом } m_{\text{МЦА}} = f\left(\Pi_{\text{МЦА}}^1, \frac{R}{H}, t_{np}\right),$$

$\Pi_{\text{МЦА}}^1$ -вектор, определяющий состав(тип) ССПИ, СТР, Кон.

На основе опытных данных для определения массовых характеристик ССПИ, СТР и для конструкции получены соотношения [2,10,13,25]:

$$m_{\text{ССПИ}} = 0.103 \cdot m_{\text{ЦСС}} + 0.12 \cdot m_{\text{МЦА}},$$

$$m_{\text{СТР}} = 0.18 \cdot m_{\text{ЦСС}},$$

$$m_{\text{Кон}} = 0.12 \cdot m_{\text{МЦА}}.$$

Используя такие модели можно рассчитать массу МЦА.

В таблице 3.1 представлены оценки массовых характеристик подсистем МЦА перспективного КАМ в случае прогноза массы МЦА к 2016

году при  $\frac{R}{H} = 1.39719 \cdot 10^{-6}$

На рисунке 3.4 приведены зависимость массы МЦА от пространственных разрешений при заданной высоте орбиты в случае прогноза массы МЦА к 2016 году, 2020 году, 2025 году.

Таблица 3.1 – оценки массовых характеристик МЦА перспективного КАМ

Состав МЦА	масса, кг
Целевая съемочная аппаратура	132.295
Система сбора и передачи информации	38.196
Система терморегулирования	9.690
Конструкции	24.570
Суммарная масса МЦА	204.752

При уменьшении разрешения (R/H) масса МЦА увеличивается, что связано в основном с ростом массы ЦСС (см. главе 2). При данных  $P_{МЦА}^1$  и при увеличении  $t_{np}$  характер зависимости  $m_{МЦА} = f\left(\frac{R}{H}\right)$  меняется, что обусловлено изменением определяющих параметров от  $t_{np}$ .

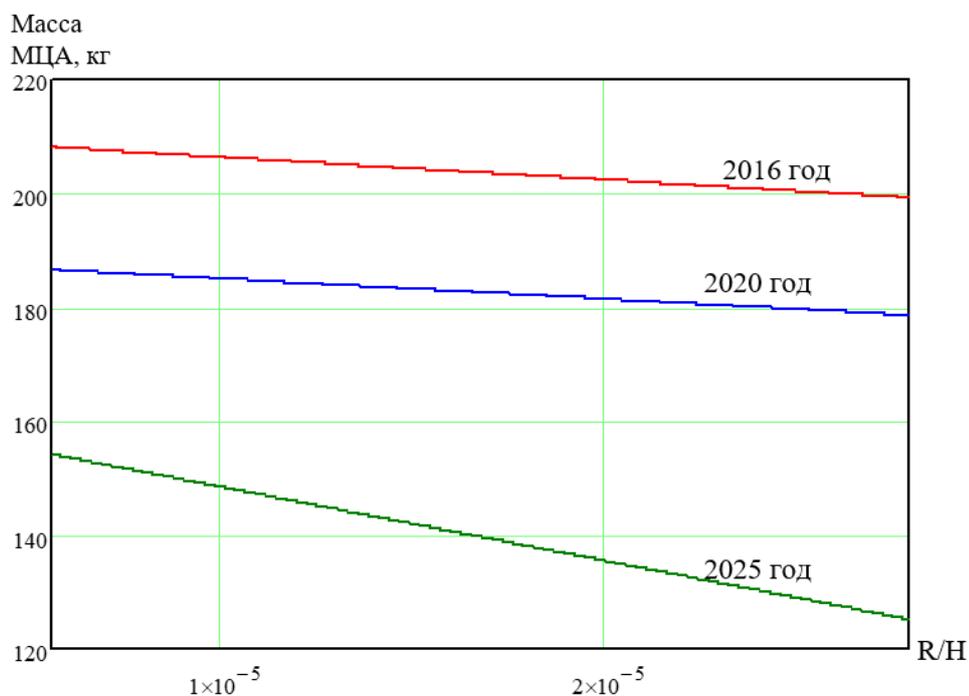


Рисунок 3.4 - Зависимость массы МЦА от пространственного разрешения при реализации проекта к моменту прогноза ( $t_{np} = 2016, 2020, 2025$ )

2) Математические модели для определения надежности (вероятности безотказной работы(ВБР)) КАМ.

Надежности МЦА и КАМ зависят от состава входящих подсистем, их проектных параметров (массы подсистем). Если определены структура и состав МЦА КАМ, т.е.  $\Pi_{ЦСС}^1, \Pi_{ССПИ}^1, \Pi_{СТР}^1, \Pi_{Кон}^1$  – заданы, то для определения вероятности безотказной работы (ВБР) перспективного КАМ используются соотношения [1,2,3,4,5,10,15]:

$$P_{КА}(\cdot) = P_{МЦА}(m_{МЦА}) \cdot P_{УКП}(m_{УКП});$$

$$P_{МЦА}(m_{МЦА}) = P_{ЦСС}(m_{ЦСС}) \cdot P_{ССПИ}(m_{ССПИ}) \cdot P_{СТР}(m_{СТР}) \cdot P_{Кон}(m_{Кон});$$

$$P_{ЦСС}(m_{ЦСС}) = 1 - \bar{P}_{ЦСС1} \cdot e^{-\bar{P}_{ЦСС2} \cdot m_{ЦСС}},$$

$$P_{ССПИ}(m_{ССПИ}) = 1 - \bar{P}_{ССПИ1} \cdot e^{-\bar{P}_{ССПИ2} \cdot m_{ССПИ}},$$

$$P_{СТР}(m_{СТР}) = 1 - \bar{P}_{СТР1} \cdot e^{-\bar{P}_{СТР2} \cdot m_{СТР}},$$

$$P_{Кон}(m_{Кон}) = 1 - \bar{P}_{Кон1} \cdot e^{-\bar{P}_{Кон2} \cdot m_{Кон}}.$$

$$\Pi_{МЦА}^1 = (\Pi_{ЦСС}^1, \Pi_{ССПИ}^1, \Pi_{СТР}^1, \Pi_{Кон}^1),$$

$$\Pi_{МЦА}^1 = \Pi_{МЦА}^{1\text{ зад}}$$

Здесь  $\bar{P}_{ЦСС1}, \bar{P}_{ЦСС2}, \bar{P}_{ССПИ1}, \bar{P}_{ССПИ2}, \bar{P}_{СТР1}, \bar{P}_{СТР2}, \bar{P}_{Кон1}, \bar{P}_{Кон2}$  -

статистические коэффициенты;

$P_{МЦА}(m_{МЦА}), P_{УКП}(m_{УКП})$  - соответственно надежность (ВБР) МЦА и УКП,

$P_{ЦСС}(m_{ЦСС}), P_{ССПИ}(m_{ССПИ}), P_{СТР}(m_{СТР}), P_{Кон}(m_{Кон})$  - соответственно надежность выделенных подсистем ЦСС, ССПИ, СТР, Кон.

На основе опытных данных получены зависимости [13,19,21,22]:

$$P_{ЦСС}(m_{ЦСС}) = 1 - 0.167 \exp(-0.259 \cdot 10^{-2} \cdot m_{ЦСС}), 107.37 \leq m_{ЦСС} \leq 115.41,$$

$$P_{ССПИ}(m_{ССПИ}) = 1 - 0.254 \exp(-0.052 \cdot m_{ССПИ}), 31 \leq m_{ССПИ} \leq 33.32,$$

$$P_{СТР}(m_{СТР}) = 1 - 0.285 \exp(-0.514 \cdot m_{СТР}), 7.86 \leq m_{СТР} \leq 8.45,$$

$$P_{Кон}(m_{Кон}) = 1 - 0.451 \exp(-0.401 \cdot m_{Кон}), 19.94 \leq m_{Кон} \leq 21.43,$$

$$P_{ЦСС}^1 = P_{ЦСС}^{1\text{ зад}}, P_{ССПИ}^1 = P_{ССПИ}^{1\text{ зад}}, P_{СТР}^1 = P_{СТР}^{1\text{ зад}}, P_{Кон}^1 = P_{Кон}^{1\text{ зад}}$$

Результаты оценки надежности МЦА и подсистем при реализации проекта в 2016 г. представлены в таблице 3.2. На рисунке 3.5 показана динамика изменения суммарной величины ВБР при изменении массы подсистем МЦА.

Таблица 3.2 – Оценка ВБР составных частей МЦА при реализации проекта в 2016 году

Состав МЦА	надежность
Целевая съемочная аппаратура	0.881
Система сбора и передачи информации	0.96466
Система терморегулирования	0.99797
Конструкции	0.99997
Суммарная надежность МЦА	0.84827

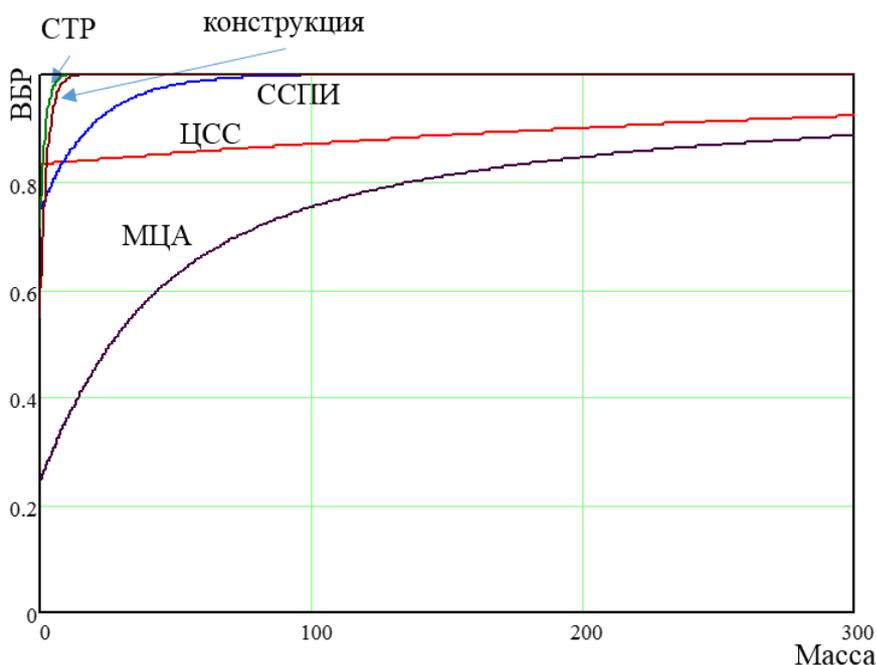


Рисунок 3.5 - Зависимость ВБР составных частей МЦА от их массы

Заметим, что при ограничении на суммарную массу МЦА КАМ и при наличии ограничений по надежности МЦА возможна постановка задачи

нормирования надежности подсистем (см. [1,10,13,14,15]). Если надежность МЦА задана и равна 0.8, то при реализации проекта в 2016 году масса МЦА будет около 137 кг.

Для определения ВБР перспективных КАМ используются соотношения:

$$P_{КА}(\cdot) = P_{МЦА}(m_{МЦА}) \cdot P_{УКП}(m_{УКП});$$

$$P_{МЦА}(m_{МЦА}) = P_{ЦСС}(m_{ЦСС}) \cdot P_{ССПИ}(m_{ССПИ});$$

$$P_{УКП}(m_{УКП}) = 1 - 0.518 \cdot e^{-2.315 \cdot 10^{-4} \cdot m_{УКП}}$$

$$P_{ЦСС}(m_{ЦСС}) = 1 - \bar{P}_{ЦСС1} \cdot e^{-\bar{P}_{ЦСС2} \cdot m_{ЦСС}}, \quad (3.6)$$

$$P_{ССПИ}(m_{ССПИ}) = 1 - \bar{P}_{ССПИ1} \cdot e^{-\bar{P}_{ССПИ2} \cdot m_{ССПИ}}, \quad (3.7)$$

Обычно принимается в расчетах  $P_{СТР} = 1, P_{кон} = 1$ ;

Здесь  $\bar{P}_{ЦСС1}, \bar{P}_{ЦСС2}, \bar{P}_{ССПИ1}, \bar{P}_{ССПИ2}$  - статистические коэффициенты;

$P_{МЦА}(m_{МЦА})$  - ВБР МЦА,  $P_{УКП}(m_{УКП})$  - ВБР УКП,

$P_{ЦСС}(m_{ЦСС})$  - ВБР ЦСС,  $P_{ССПИ}(m_{ССПИ})$  - ВБР ССПИ;

3) Проектные модели определения функциональной эффективности перспективных КАМ на высоких орбитах.

Рассмотрим характеристики показателей функциональной эффективности КАМ и МЦА, определим зависимости этих показатели от выбираемых проектных параметров МЦА  $(P_{МЦА}^i, m_{МЦА}, t_{np})$ .

Перспективные КАМ должны удовлетворять ряду функциональных требований:

1. к пространственному разрешению (R/H),
2. к спектральным характеристикам целевой аппаратуры  $(\Delta v_i, i = 1, k)$ ,
3. к периодичности наблюдения  $(\tau)$ ,
4. к орбитальным характеристикам  $(T)$ ,
5. к информационной производительности КАМ  $(I)$ ,

6. к оперативности доставки информации ( $\tau_{инф}$ ),
7. к стоимости реализации проекта.

Первые два требования влияют на выбор типа и состава ЦСС. Периодичность наблюдения в общем случае зависит от орбитального построения КСМ и количества КАМ на орбите. Таким образом,  $W_{КСМ}(R/H, \Delta v, \tau, T, \tau_{инф}, I)$ .

Рассмотрим ниже модели для оценки срока активного существования, периодичности наблюдения и информационной производительности перспективных КАМ.

#### Определение срока активного существования КАМ

Чем больше время (срок) активного существования (САС) КАМ, тем больше затраты на разработку КАМ, что связано с необходимостью обеспечения надежности и жизнестойкости системы (массы системы). Но, одновременно, количество создаваемых систем (КАМ) в планируемый период уменьшается. Для цели уменьшения затрат на разработку и производство МЦА, нужно оптимизировать САС  $\tau_{САС}$  КАМ [1,3,4,15].

Таким образом  $\tau_{САС} = f(P_{КАМ}, t_{пр})$

При высоком уровне  $P_{КАМ}$  или при заданном  $P_{КАМ}$  можно положить  $\tau_{САС} = \varphi(t_{пр})$ . На рисунке 3.6. представлена зависимость срока активного существования КАМ от даты запуска КАМ.

С помощью статистических методов можно определить рациональное значение САС. Ещё 10 лет назад САС целевой съёмочной аппаратуры был 7 или 8 лет. У современных КАМ САС целевой съёмочной аппаратуры составляет 10 лет.

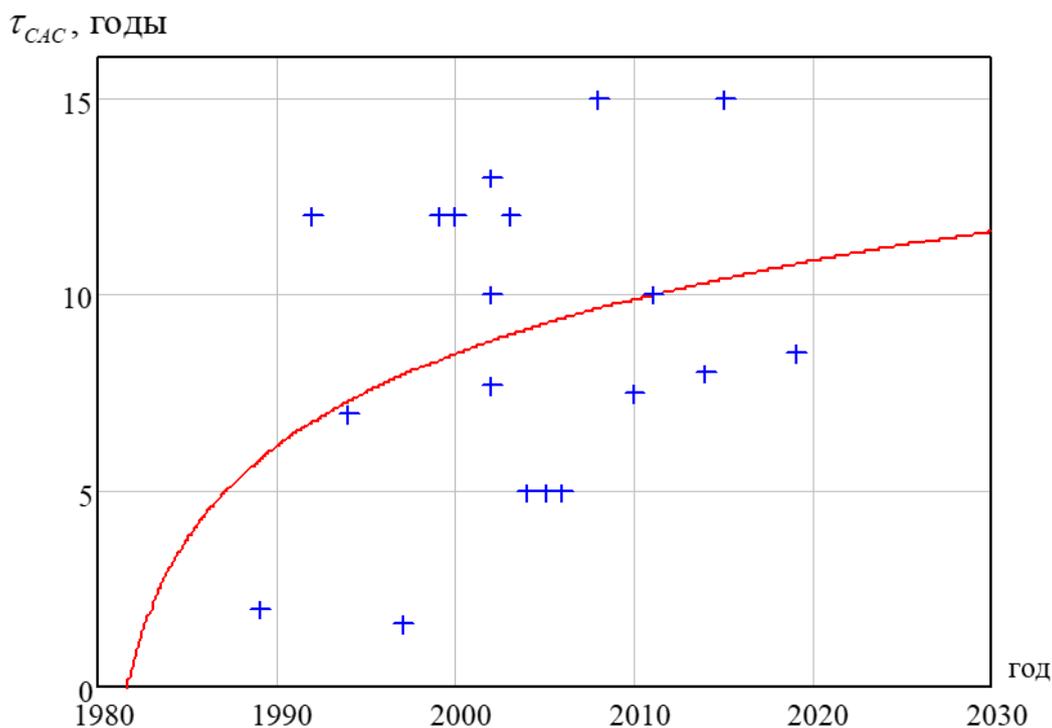


Рисунок 3.6 - Зависимость срока активного существования КАМ от даты запуска КАМ

#### Определение периодичности наблюдения

Оценки периодичности наблюдения КАМ зависят от орбитальных характеристик, в частности от количества КАМ, обреты наблюдения, высоты полета, от характеристик оптических систем [10,15]. В нашем случае КАМ находятся на ГСО. Поэтому для оценки периодичности наблюдения учитываются только характеристики МЦА. У современных МЦА периодичность съемки и представления информации около 10-15 минут в случае, если проводится съемка полного диска Земли.

#### Определение информационной производительности КАМ

В качестве оценки информационной производительности рассматривается количество квадратных километров земной поверхности, которое может снять КА за один сутки. Для оценки информационной производительности, оцениваются углы зрения КАМ, которые изображены на рисунке 3.7. Можно рассчитать количество квадратных километров земной поверхности, используя данные по углу зрения, высоте орбиты и

тригонометрические функции.

В таблице 3.3 представлены характеристики информационной производительности КАМ, запущенных за последние 5 лет. [21,22]

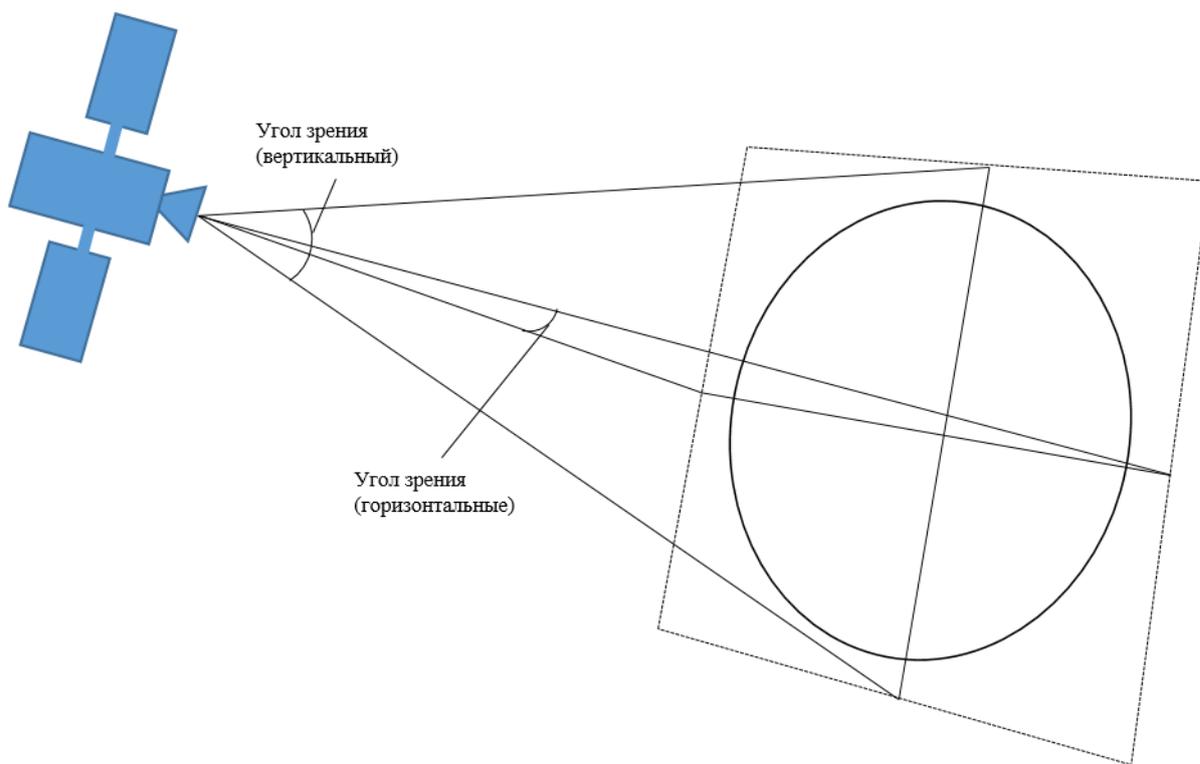


Рисунок 3.7 - Схема, иллюстрирующая производительность КАМ при съемке полной диска Земли

Таблица 3.3 - Характеристики информационной производительности КАМ, запущенных за последние 5 лет

	COMS	Электро-Л	GOES-R
время запуски (год)	2010	2011	2016
угол зрения	23°x21°	20°x20°	17.66°x17.66°
периодичность при съемке полной диска Земли	30 минут	30 минут	15 минут
количество съемки за сутки (раз)	48	48	96
квадратные километры за одну съемку	$2.68 \cdot 10^8$	$2.21 \cdot 10^8$	$1.73 \cdot 10^8$
квадратные километры за один сутки	$1.287 \cdot 10^{10}$	$1.061 \cdot 10^{10}$	$1.666 \cdot 10^{10}$

Используя приведенные данные, можно записать регрессионную зависимость для определения информационной производительности:

$$I_{np} = f(\theta_1, \theta_2, m_{ЦСС}, \frac{R}{H}, N_{кан}, \tau(t_{np}))$$

$\theta_1, \theta_2$  - углы зрения,

$\tau(t_{np})$  - периодичность съемки.

Для построения зависимости информационной производительности проводится расчет квадратных километрах площади земной поверхности за одну съемку (используются данные по углу зрения, высоте орбиты и тригонометрические функции) и количество съемок за сутки. Получено соотношение:

$$I_{np} \left( m_{ЦСС}, \frac{R}{H}, N_{кан}, t_{np} \right) = 8.48 \cdot 10^8 \cdot (m_{ЦСС} - 110)^{0.217} \cdot \left( \frac{R}{H} \right)^{-0.106} \cdot N_{кан}^{0.179} \cdot (t_{np} - 2000)^{0.255}$$

$$110 \leq m_{ЦСС} \leq 150,$$

$$1.397 \cdot 10^{-5} \leq \frac{R}{H} \leq 2.794 \cdot 10^{-5},$$

$$5 \leq N_{кан} \leq 16,$$

Здесь,  $I_{np}$  - информационная производительность, измеряемая в квадратных километрах, за один сутки.

### 3.4 Модели определения технико-экономического характеристик перспективных КА мониторинга

Суммарные приведенные затраты на разработку, производство, выведение в эксплуатацию и эксплуатацию в течение срока активного существования (САС) КА в составе КСМ определяются в виде [1,3,5,6,10,15]:

$$C_{\Sigma КА} = (k_p N_p \eta(\tau_{np1}) + f(N_{КА}) \eta(\tau_{np2})) \cdot C_{СКА}^1(\cdot) + C_B(\cdot) \cdot \eta(\tau_{np3}) + C_{Э}(\cdot) \cdot \eta(\tau_{np4}),$$

где  $k_p$  - базовый коэффициент, определяющий связь затрат на разработку и производство первого образца изделия, представляется в виде:

$k_p = C_p^1 / C_C^1(\cdot)$  (проведенный анализ показал, что значение базового коэффициента  $k_p$  зависит от особенностей КАМ и по статистическим данным составляет  $k_p = 2 - 13$ );

$N_p$  - приведенное число КАМ на этапе разработки ( $N_p = 1 - 3$ );

$\eta(\tau_{np})$  - коэффициент дисконтирования затрат (приведения затрат к базовым), определяется в виде:  $\eta(\tau_{np}) = (1 + E)^{\tau_{np}}$ ,  $E$  - нормативный коэффициент ( $E = 0,03 - 0,08$ )[1,8,26],  $\tau_{np}$  - время приведения затрат:

$\tau_{np} = t_k - t_p$ , где  $t_k$  - момент окончания проекта (окончание эксплуатации),

$t_p$  - момент окончания разработки;  $f(N_{KA})$  - функция снижения затрат при росте объема производства, определяется в виде:

$$f(N_{KA}) = \frac{N_{KA}^{-\alpha}}{1 - \alpha}, \alpha \approx 0.2 - 0.24; [1,8,26]$$

$C_{CKA}^1(\cdot)$  - функция, определяющая затраты на производство первого образца КА, определяется в виде:

$$C_{CKA}^1(\cdot) = C_{CMЦA}^1(\cdot) + C_{CУСП}^1(\cdot),$$

$C_{CMЦA}^1(\cdot)$  и  $C_{CУСП}^1(\cdot)$  - функция, определяющая затраты на производство первого образца МЦА и УСП соответственно;

$C_B(\cdot)$  и  $C_Э(\cdot)$  - функция, определяющая затраты на выведение и эксплуатацию КА соответственно.

В общем случае зависимость для определения затрат на производство первого образца МЦА имеет вид:[1,8,26]

$$C_{CMЦA}^1(\cdot) = \bar{C}_{CMЦA}^1 \cdot m_{MЦA}^{\alpha_1} \cdot \left(\frac{R}{H}\right)^{\alpha_2} \cdot \Xi^{\alpha_3} \cdot \Delta \lambda^{\alpha_4} \cdot N_{кан}^{\alpha_5} \cdot T_{CASC_{MЦA}}^{\alpha_6} \cdot P_{MЦA}^{\alpha_7} \cdot t_{np},$$

где  $\bar{C}_{CMЦA}^1, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6, \alpha_7$  - статистические коэффициенты;

$m_{MЦA}$  - масса МЦА, кг;

$\frac{R}{H}$  - отношение пространственного разрешения к высоте орбиты, б/р;

$\Delta\lambda$  - спектральный диапазон, мкм

$N_{кан}$  - число каналов целевой съемочной аппаратуры;

$\mathcal{E}$  – э МЦА, Вт;

$T_{САС_{МЦА}}$  - срок активного существования МЦА годы;

$P_{МЦА}$  - надежность (вероятность безотказной работы в течение САС)

МЦА;

$t_{пр}$  - время прогноза.

Если учесть связь

$$M_{МЦА} = f(R/H, \mathcal{E}, \Delta\lambda, N_{кан}, T_{САС}, P_{МЦА}, t_{пр}),$$

$$\text{то } C_{СМЦА}^1(\cdot) = \bar{C}_{СМЦА}^1 \cdot m_{МЦА}^{\alpha_1}.$$

Используя статистические данные, получим регрессионную модель оценки затрат на создание (производство) первого образца МЦА от времени прогноза и массы ЦСС в виде:

$$C_{СМЦА}^1(\cdot) = 6.430 \cdot m_{МЦА}^{1.86}, \quad [\text{млн долл.}]$$

$$\text{При } 60 \leq m_{МЦА} \leq 400;$$

$$10^{-6} \leq R/H \leq 10^{-3};$$

$$0.4 \leq \Delta\lambda \leq 1.5$$

$$3 \leq N_{кан} \leq 16;$$

$$17 \leq \mathcal{E} \leq 500;$$

$$3 \leq N_{кан} \leq 16;$$

$$10 \leq T_{САС} \leq 15.$$

Зависимость для определения затрат на производство первого образца УСП имеет вид[10,27]:

$$C_{СУСП}^1(\cdot) = \bar{C}_{СУСП}^1 \cdot M_{УСП}^{\beta_1} \cdot W_{СЭП}^{\beta_2} \cdot \Delta\varphi_{СУДН}^{\beta_3} \cdot M_{ТДУ}^{\beta_4} \cdot T_{САС_{УСП}}^{\beta_5} \cdot P_{УСП}^{\beta_6},$$

где  $\bar{C}_{СУСП}^1, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5, \beta_6$  - статистические коэффициенты;

$M_{УСП}$  - масса УСП, кг;

$W_{СЭП}$  - мощность системы электропитания (СЭП), Вт;

$\Delta\varphi_{СУДН}$  -точность стабилизации системы управления движением и навигации (СУДН), град/ с;

$M_{ТДУ}$  - масса топлива двигательной установки, кг;

$T_{САС_{УСП}}$  - срок активного существования МЦА;

$P_{УСП}$  - надежность (вероятность безотказной работы в течение САС) УСП.

Если положить, что

$$2000 \leq M_{УСП} \leq 6600 ;$$

$$100 \leq W_{СЭП}^{\beta_2} \leq 1500 ;$$

$$0,1 \leq \Delta\varphi_{СУДН} \leq 0,001 ;$$

$$5 \leq M_{ТДУ} \leq 50 ;$$

$$10 \leq T_{САС} \leq 15 ,$$

и учесть связь

$$M_{УСП} = f_{УСП} (W_{СЭП}, \Delta\varphi_{СУДН}, M_{ТДУ}, T_{САС_{УСП}}, P_{УСП}),$$

тогда, используя статистические данные, получим регрессионную модель оценки затрат на создание (производство) первого образца УСП в виде:

$$C_{СУСП}^1 = 8.445 \cdot 10^{-10} \cdot \exp(3.733 \cdot 10^{-3} \cdot m_{УСП}) + 57.492, \text{ [млн. долларов.]}$$

Суммарные приведенные затраты на выведение и эксплуатацию КА определяются зависимостями вида:

$$C_B = C_B(\cdot) \cdot \eta(\tau_{np3});$$

$$C_Э = C_Э(\cdot) \cdot \eta(\tau_{np4}),$$

где  $C_B(\cdot)$  и  $C_{\mathcal{E}}(\cdot)$  - соответственно функции, определяющие затраты на выведение (попутное) и эксплуатацию КА:

$$C_B(\cdot) = C_B^1(\cdot) N_{KA};$$

$$C_{\mathcal{E}}(\cdot) = C_{\mathcal{E}}^1(\cdot) N_{KA} T_{CAC},$$

$C_{\mathcal{E}}^1(\cdot)$  - функция, определяющая средние затраты на эксплуатацию одного КА в течение 1 года в составе КСМ с заданными параметрами, определяется в виде:

$$C_{\mathcal{E}}^1(\cdot) = \bar{C}_{\mathcal{E}} \ln(M_{KA}) + \varphi_2;$$

$C_B^1(\cdot)$  - функция, определяющая затраты на выведение одного КА в составе КСМ с заданными параметрами, определяется в виде:

$$C_B^1(\cdot) = \bar{C}_B \ln(M_{KA}) + \varphi_1 ;$$

$\bar{C}_B$  и  $\bar{C}_{\mathcal{E}}$  - удельные затраты на выведение и эксплуатацию единицы массы КА;  $H$  - высота орбиты выведения КА;  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  - статистические коэффициенты;  $M_{KA}$  - масса КА;  $N_{KA}$  - количество КА в течение срока реализации проекта КАМ;  $T_{CAC}$  - срок активного существования КА.

Используя данные оценок затрат на выполнение проектов КА за последние десять лет, установлены зависимости (масса КА в кг, высота орбиты выведения в км):

$$C_{\mathcal{E}}^1 = 8.185 \cdot 10^{-11} \cdot M_{KA}^{3.113} \quad [\text{млн долл.}],$$

$$1500 \leq M_{KA} \leq 3500 \quad ; \text{ кг}$$

$$C_B^1 = 59.449 \cdot \ln(M_{KA}) - 386.716 \quad [\text{млн долл.}]$$

$$1500 \leq M_{KA} \leq 3500 ; \text{ кг}$$

$$H = 35786 \text{ км} .$$

На  $i$ -м уровне управления разработкой пользуются более подробными моделями.

При формировании модели затрат на производство первого образца модуля целевой аппаратуры (МЦА) на  $i$ -ом уровне управления разработкой используется укрупненная структура МЦА, устанавливается связь составляющих затрат от обобщенных параметров подсистем.

Модель затрат на производство первого образца МЦА  $C_{СМЦА}^1$  представляется в виде суммы затрат на производство подсистем:

$$C_{СМЦА}^1(m_{ЦСС}) = \sum_{j=1}^4 C_{Cj}^1(\cdot) = C_{ЦСС}^1(m_{ЦСС}) + C_{ССПИ}^1(m_{ЦСС}) + C_{СТР}^1(m_{ЦСС}) + C_{кон}^1(m_{ЦСС})$$

где  $C_{Cj}^1(\cdot)$  - функции, определяющие затраты на производство первого образца  $j$ -ой подсистемы.

Функции определяющие затраты на производство первого образца  $j$ -х подсистем можно определить в таком виде:

$$C_{ЦСС}^1(m_{ЦСС}, t) = \bar{C}_{ЦСС1} \cdot m_{ЦСС}^{\alpha_1} \cdot t^{\alpha_2};$$

$$C_{ССПИ}^1(m_{ССПИ}) = \bar{C}_{ССПИ1} \cdot m_{ССПИ}^{\alpha_3};$$

$$C_{СТР}^1(m_{ЦСС}) = \bar{C}_{СТР} \cdot m_{ЦСС}^{\alpha_4};$$

$$C_{Кон}^1(m_{Кон}) = \bar{C}_{Кон} \cdot m_{Кон}^{\alpha_5}$$

где  $\bar{C}_{ЦСС1}, \alpha_1, \bar{C}_{ССПИ1}, \alpha_2, \bar{C}_{СТР}, \bar{C}_{кон}, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5$  - статистические коэффициенты;

Здесь соответственно  $C_{МЦА}^1(\cdot)$  - затраты на производство первого образца МЦА;

$C_{ЦСС}^1(m_{ЦСС}, t)$ ,  $C_{ССПИ}^1(m_{ССПИ})$ ,  $C_{СТР}^1(m_{ЦСС})$ ,  $C_{Кон}^1(m_{Кон})$  - соответственно затраты на производство первого образца ЦСС, ССПИ, СТР и первого образца конструкции.

На основе опытных данных получены зависимости [15]:

$$C_{ЦСС}^1(m_{ЦСС}, t) = 0.396 \cdot m_{ЦСС}^{0.105} \cdot (\Delta t)^{2.349};$$

$$C_{ССПИ}^1(m_{ССПИ}) = 14.67 \cdot m_{ССПИ}^{0.234};$$

$$C_{СТР}^1(m_{ЦСС}) = 0.0135 \cdot m_{ЦСС}^{0.734};$$

$$C_{Кон}^1(m_{Кон}) = 2.372 \cdot 10^{-6} \cdot m_{Кон}^{0.754}.$$

где  $\Delta t = t - t^*$ ,  $t^* = 2002$

На рисунке 3.8 представлена зависимость затрат на производство первого образца МЦА от массы МЦА и времени прогноза. Зависимость показывает, что время прогноза по сравнению с массой МЦА сильно влияет на затраты на производство первого образца МЦА.

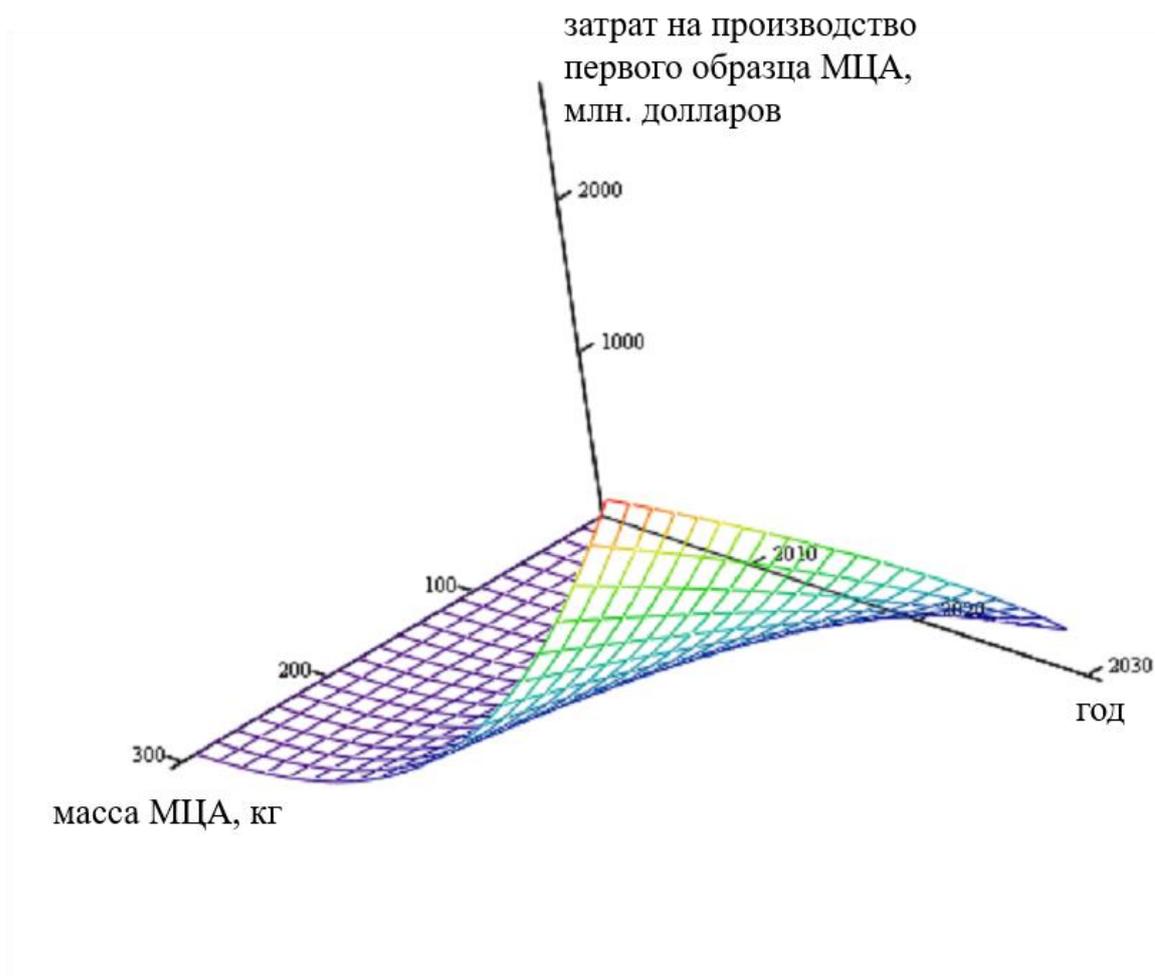


Рисунок 3.8 - Зависимость стоимости МЦА от массы МЦА и времени  $t_{np}$

Для оценки затрат на разработку перспективных КАМ обычно используют метод базовых коэффициентов. Тогда

$$C_{PKA}(\cdot) = \bar{C}_{PKA} \cdot C_{KA}^1(\cdot),$$

где  $\bar{C}_{PKA}$  - базовый коэффициент определяют из опыта.

В таблице 3.4 приведены оценки стоимости производства подсистем МЦА при реализации проекта к 2016 г.

Как видно, стоимость производства СТР и конструкции является очень малой величиной, по сравнению стоимостью ЦСС и ССПИ. Поэтому, принимая во внимание, что точность моделей затрат не велика, при ведении сравнительного анализа перспективных КАМ можно пренебречь значением стоимостей СТР и конструкции.

Заметим, что оценка затрат на производство первого образца, получаемая с помощью приведенных математических моделей близка к данным по затратам на производство первого образца реального КАМ (GOES-R запущенным в 2016г.). Это, в определенной мере, подтверждает справедливость приведенных выше моделей затрат.

Таблица 3.4 – Стоимость производства МЦА при реализации проекта в 2016 году

Состав МЦА	Стоимостные характеристики, млн \$
Целевая съемочная аппаратура	325.857
Система сбора и передачи информации	34.348
Система терморегулирования	0.07161
Конструкции	$2.6377 \cdot 10^{-5}$
Суммарный затрат на производство первого образца МЦА	360.27921

Заключение к главе 3:

1. Рассмотрена задача конструктивного прогнозирования технико-экономических характеристик перспективных КАМ. Представлена методика её решения, которая включает последовательное решение двух главных задач: 1) - прогнозирования динамических (определяющих) параметров (это коэффициенты массовых и стоимостных зависимостей) к моменту реализации проекта и 2) - оптимизацию параметров перспективных КАМ при наличии ограничений.

2. На основе опытных данных получены проектные зависимости определения массовых и стоимостных характеристик, надежности и функциональных эффективности. Определены значения динамических параметров и характеристики перспективных МЦА к моменту  $t_{np}$ .

3. Исследовано влияние фактора времени на характеристики перспективных КАМ ( $t_{np} = 2020$  г.). Анализ показывает, что необходимый уровень пространственного разрешения обеспечивается при меньшей массе МЦА уменьшается. Одновременно происходит увеличение затрат на производство первого образца и реализацию проекта.

#### **4 КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕРСПЕКТИВНЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ МОНИТОРИНГА ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ С УЧЕТОМ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ОГРАНИЧЕНИЙ**

С помощью разработанной выше методики конструктивного прогнозирования характеристик перспективных космических аппаратов мониторинга проведем:

1. Оценку технико-экономических характеристик перспективных КАМ при наличии ограничений (динамики связей внешних и внутренних),
2. Проведем прогнозный анализ характеристик перспективных КАМ при наличии неопределенностей, исследуем влияние фактора времени на характеристики перспективных средств, оценим влияние  $t_{np}$  на точность решения.

##### **4.1 Прогнозная оценка характеристик перспективных космических аппаратов мониторинга природной среды при наличии ограничений**

Как показывает анализ, при проектировании современных КСМ и модификаций КАМ обычно используется УКП.

Такой подход дает возможность сократить сроки и затраты на разработку и производство КАМ в составе КСМ. Одновременно такой подход позволяет повысить надежность и снизить риск реализации проекта способствует международной кооперации, устойчивости научно-технического прогресса при развитии космических технологий. Используя полученную выше методику проведем прогнозную оценку перспективных КАМ, создаваемых на базе УКП при наличии технико-экономических ограничений. Ниже приведем характеристики перспективных УКП, которые по видимому будут использоваться ближайшие 10 – 15 лет в КАМ на высоких орбитах.

Тактико-технические характеристики УКП, которые можно использовать при проектировании КАМ в составе КСМ, приведены в таблице 4.1. Рассматривается суммарная масса КАМ с УКП до 3500кг.

Таблица 4.1 – Основные технические характеристики перспективных универсальных космических платформ

№	страна	платформа	производитель	масса КА (тон)	мощность ПН, кВт	САС	полученные заказы
1	США	A2100A	Lockheed martin	3-6	18	15	70
2		BSS702	Boeing	5-6	17	15	52
3		SSL71300	SS/L	6-7	25	15	115
4		Geostar -1/-2	Orbital Sciences	2-4	5	15	40
5	Европа	Eurostar-3000	Airbus	5-6	18	15	46
6		Spacebus-4000	Thales	5-6	15	15	28
7	Россия	Экспресс-2000	ИСС «Решетнева»	3-4	-	15	4
		Навигатор	ФГУП «НПО Лавочкина»	до 2.6	1.2	-	5
8	Япония	DS-2000	Mitsubishi	3-5	14	15	15
9	Китай	Dongfang Hong 4	CAST	5	18	15	19
10	Индия	I-3000,4000	ISRO	2-3	-	10	9

Если в проекте перспективного КАМ в КСМ планируется использование УКП, то при определении рациональных параметров КАМ выбираются параметры полезной нагрузки – модуля целевой аппаратуры (МЦА). При этом учитываются требования технического задания на проект, назначение и условия функционирования КАМ в составе КСМ, проводится согласование параметров МЦА и УКП. Одновременно учитываются функциональные связи и проводится согласование характеристик КА и НКПОР и КАМ – основных подсистем КСМ.

Остановимся на этих моментах подробнее, определим проектные параметра перспективных КАМ в составе КСМ, функциональные и параметрические связи.

Для примера на рисунке 4.1 приведены компоновка УКП «SSL1300», которые разработаны в компании SSL (США). УКП SSL1300 использовали более 100 раз при проектировании КАМ на высоких орбитах. Ниже при прогнозировании характеристик перспективных КАМ в качестве УКП будем

рассматривать SSL1300. В таблице 4.2 приведены основные характеристики УКП SSL1300. На рисунке 4.2 для сравнения приведено компоновка УКП «Навигатор» В АО «НПО им. С.А. Лавочкина» и на основе УКП «Навигатор» разработана серия КАМ «Электро-Л» и других КА для исследования космического пространства.

### Space Systems/Loral 1300 Satellite Overview

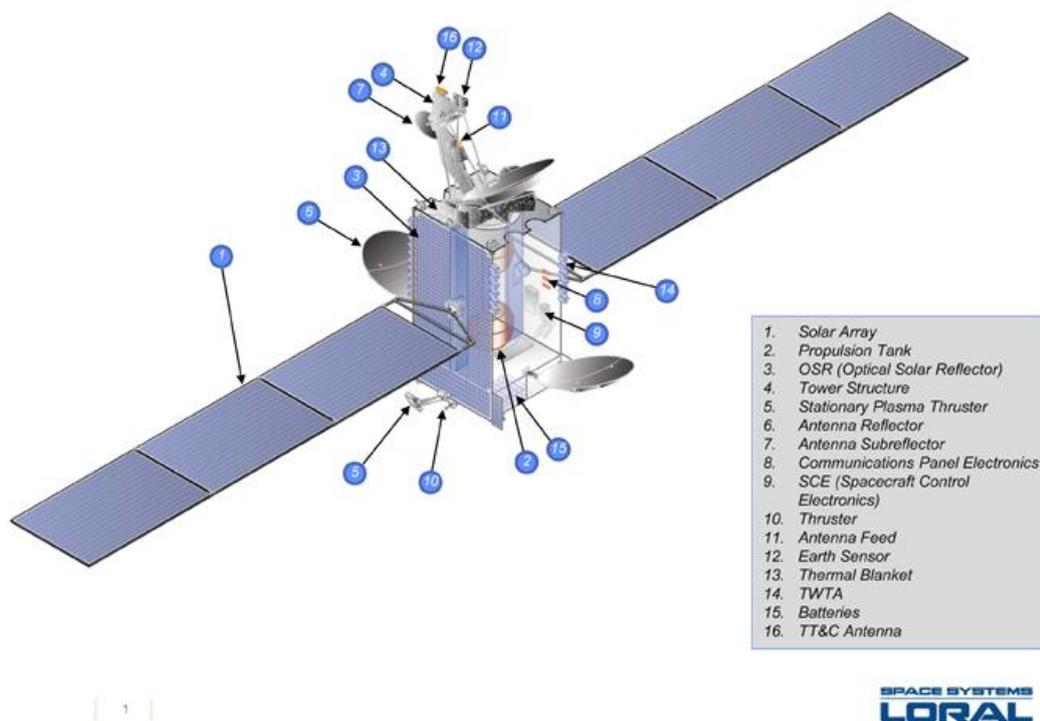


Рисунок 4.1 – Компоновка универсальной космической платформы SSL1300

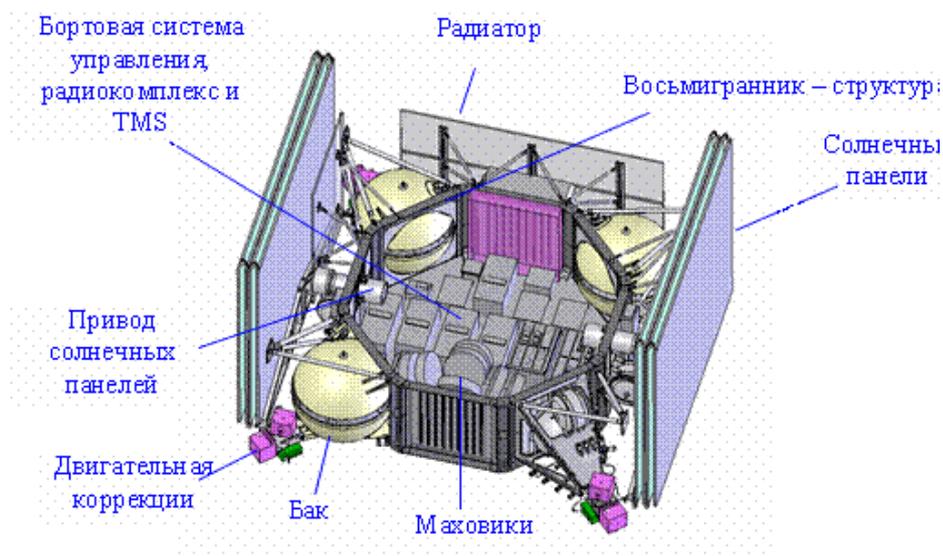


Рисунок 4.2 – Компоновка УКП «Навигатор»

Таблица 4.2. основные характеристики УКП SSL1300

Характеристика УКП SSL 1300	
Особенность размещения полезной нагрузки	
Масса ПН	более 500
Мощность ПН	2857 Вт
Внешний объем ПН	2.4 м x 2.2 м x 3.1 м
Внутренний объем ПН	4 место, 2.4 м x 1.2 м x 0.31 м
Характеристики платформы	
Орбита	ГСО (СОО, НОО)
Срок Активного существования	более 15 лет
Скорость передачи информации, кбит/с	350
Система энергоснабжения - тип СБ/ мощность, Вт - тип АБ/ емкость А*ч - мощность максимальная, Вт	Тройной, GaAs/ 19м <sup>2</sup> Литий-ионный 145 Ампер-час 4000
Двигательная установка	
типа	химическая
масса топлива	2272 кг (более 3800 кг)
Конструкция	
конструкция	Композитные и алюминиевые соты
сухая масса	916 кг
выбор ракета-носителя	Н-2А, Atlas V, Delta IV, Ariane V, Falcon 9

Степень детализации проектного анализа зависит от этапа проектных работ, сроков прогнозных исследований. В данном случае речь идет о проектном анализе перспективных КА, который проводится на начальном этапе проектирования (при обосновании тактико-технического задания).

Будем полагать, что определена УКП, т. е. уже известны масса, мощность электропитания, надежность, габариты и затраты на производство УКП.

#### Постановка задачи проектирования перспективных КАМ с УКП

Выбор проектных параметров КСМ зависит от характера решаемых функциональных задач, целевой нагрузки на систему в рассматриваемый период – Ц(t). Целевая нагрузка зависит от типа районов наблюдения, особенностей решаемых задач. Целевая нагрузка задается вектором  $V_{HP} = V_{HP}^{3D}$ , который определяет параметры наблюдаемых районов

(объектов). Если определены задачи наблюдения, то должны быть заданы координаты, площадь, условия наблюдения. В данном случае, наблюдаемый район является полным диском Земли, КАМ находится на ГСО и целью КАМ является метеорологические наблюдения.

В общем случае частотный диапазон наблюдения и пространственное разрешение определяется из условия выполнения задач мониторинга природной среды. На рисунках 4.3, 4.4 представлены данные, которые позволяют определить основные требования к ЦСС. Для перспективных метеорологических КАМ на ГСО предъявляются требования:

- пространственные разрешения  $0.5 < R < 1 \text{ км}$ ,
- периодичность наблюдения  $0.5 < t_{\text{период}} < 4 \text{ часы}$ ,
- длин волн при видимой съемке  $0.4 < \lambda^* < 0.9 \text{ мкм}$ .

При определении облика и параметров КАМ в космической системе мониторинга (далее КАМ- космический аппарат мониторинга), параметры наземного комплекса приема, обработки и распределения информации - НКПОР, наземного комплекса управления – НКУ полагаются заданными.

Основные области применения космической информации КАМ	Длина волны, мкм									
	0,43	0,5	0,76	1,3	5	8	12	100	1000	
	Ультра-фиолетовый	Видимый		Ближний	Средний			Дальний	Микроволновый	
	Тепловой									
Гидрометеорология	■	■	■	■	■		■	■	■	■
Экология		■	■		■	■	■	■		■
Контроль чрезв. ситуаций		■	■	■	■	■	■	■		■
Картография		■	■		■		■	■		■
Сельс. и водное хозяйство		■	■	■	■		■	■		■
Лесное хозяйство		■	■	■	■		■	■		■
Геология		■	■	■	■		■	■		■
Землеустройство		■	■	■	■		■	■		■
Фундамент. исследования	■	■	■		■		■	■		■

Рисунок 4.3- Области длин волн ЦСС в КСМ, используемые для решения народнохозяйственных задач [2,26]



Рисунок 4.4 - Области пространственного разрешения и периодичности наблюдения, которые реализуются КСМ при решении определенных хозяйственных задач [2,26]

При проектном анализе перспективных КАМ на высоких орбитах в качестве выбираемых, проектных параметров используются

- $R / H$  - величину относительного разрешения;
- $\Pi_{МЦА}, \Pi_{УКП}$  - параметры, определяющие структуру, состав, конструктивно-компоновочные особенности целевой аппаратуры и универсальной космических платформы;
- $m_{МЦА}(\cdot), m_{УКП}(\cdot)$  массы модуля целевой аппаратуры и унифицированной космических платформы.

Задачу проектирования перспективного КАМ с УКП в составе КСМ можно записать следующим образом.

При заданной целевой нагрузке определить параметры КАМ

$${}^{i-1}\Pi_{КАМ}(t_{np}) = (R / H, \Pi_{МЦА}, \Pi_{УКП}, m_{МЦА}(\cdot), m_{УКП}(\cdot)),$$

такие, что

$$\left. \begin{aligned}
 &C_{\Sigma КАМ} \left( {}^{i-1} \Pi_{КАМ} (t_{np}), \beta(t_{np}) \right) \rightarrow \min \\
 &{}^{i-1} \Pi_{КАМ} (t_{np}) \in G(t_{np}); \\
 &W \left( {}^{i-1} \Pi_{КАМ} (t_{np}), \beta(t_{np}) \right) \geq W^{зад}, \\
 &m_{КАМ} (\cdot) \leq m_{КАМ}^{зад}, \\
 &T_P \left( {}^{i-1} \Pi_{КАМ}, \dots \right) \leq T_P^{зад}, \\
 &t_{np} \in \langle T \rangle, \\
 &\Pi_{УКП}, m_{УКП} (\cdot) - \text{заданы,}
 \end{aligned} \right\} (4.1)$$

где  $C_{\Sigma КАМ} (\cdot)$  - суммарные приведенные затраты на реализацию проекта в планируемый период. Это затраты на разработку, создание космической системы, на выведение КАМ и эксплуатацию в планируемый период;

$W (\cdot)$  - целевая эффективность КАМ в космической системе мониторинга:

$W (\cdot) = (T_{наб} (\cdot), N_{кан} (\cdot), S_{об} (\cdot), R_{кан} (\cdot), I (\cdot))$  . Эффективность КАМ в КСМ определяется рядом показателей:

$T_{наб} (\cdot) \leq T_{наб}^{зад}$  - периодичностью наблюдения;

$N_{кан} (\cdot) \geq N_{кан}^{зад}$  - количеством спектральных каналов;

$S_{об} (\cdot) \geq S_{об}^{зад}$  - обзорностью;

$R_{кани} (\cdot) \leq R_{кани}^{зад}$  - разрешением спектрального канала,  $i = \overline{1, N_{кан}}$  ;

$I (\cdot) \geq I^{зад}$  - информационной производительности.

Эффективность КАМ определяется также показателем информационной производительности  $I (\cdot)$  . Информационная производительность оценивается площадью отснятой поверхности за один сеанс связи.

$$\text{В общем случае: } I (\cdot) = I \left( n_k, \Pi_{ЦСС}^1, \frac{R_i}{H}, m_i \right);$$

$n_k$  - количество камер,  $\Pi_{МЦА_i}^1$  - тип  $i$ -й камеры  $i = \overline{1, n_k}$  с числом

каналов  $n_i$ ,  $\frac{R_i}{H}$  - разрешение  $i$ -го спектрального канала,  $m_i$  - масса  $i$ -й камеры.

$T_p(\cdot)$  - функция, определяющая трудоемкость работ, длительность разработки и создания КАМ;

$\langle T \rangle$  - планируемый период;

$G(t_{np})$  - область допустимых решений, определяемая внешними и внутренними дополнительными функциональными связями, в частности, по энергетическому обеспечению целевой аппаратуры и надежности КАМ:

$$\mathcal{E}_{МЦА}(\cdot) \leq \mathcal{E}_{УКП},$$

$$P_{МЦА}(\cdot) \cdot P_{УКП}(\cdot) \geq P^{30};$$

$\beta(t_{np})$  - вектор определяющих параметров. Это коэффициенты стоимостных зависимостей, массовых и др. соотношений, которые определяются на основе опытных данных.

Проектная задача (4.1) записана в детерминированной постановке. В данном случае при решении многокритериальной задачи проектирования используется метод ограничений. Такой подход дает возможность исследовать влияние динамики внешних связей (ограничений) на проектное решение.

Отметим особенности задачи перспективного проектирования КАМ (конструктивного прогнозирования характеристик КА):

5. Задача перспективного проектирования является многокритериальной. Основными показателями качества являются суммарные приведенные затраты на реализацию проекта ( $C_{\Sigma КАМ}$ ), показатели функциональной эффективности  $W$  и показатели, определяющие время разработки и создания КАМ (трудоемкость работ). Вектор -  $W$  определяющий функциональную эффективность содержит, как показано выше, ряд показатели:  $W(\cdot) = (T_{наб}(\cdot), N_{кан}, S_{об}(\cdot), R_{кан}, I(\cdot))$ .

При поиске решения многокритериальной задачи проектирования КАМ, используемые метод ограничений. Основным показателем являются суммарные затраты на проект, на другие показатели качества КАМ наложены ограничения типа равенства и неравенства.

6. Задача (4.1) является многопараметрической. Вектор проектных параметров (параметров управления или варьируемых параметров) содержит целочисленные показатели, определяющие состав и тип основных подсистем КАМ, а также непрерывные  $-m_i$  и  $p_i$ . В этом случае  $m_i$  – интегральный параметр, задающий свойства выделяемых подсистем.

7. Задача перспективного проектирования (4.1) является динамической. Учитывается время прогноза (время реализации проекта). При решении такой динамической задачи используется метод временных сечений. В этом случае проводится декомпозиция задачи на 2 главных. Первая задача прогнозирования (определения значений динамических показателей к моменту  $t_{np}$ . (Это определяющие параметры -  $\beta(t_{np})$  и функциональные ограничения  $T_{наб}^{zd}(t_{np}), N_{кан}^{zd}(t_{np}), S_{ОБ}^{zd}(t_{np}), R_{кан_i}^{zd}(t_{np}), I^{zd}(t_{np})$ ).

Вторая задача – собственно задача проектирования перспективного КАМ при полученных значениях динамических показателей. Проводится определение состава КАМ( $P_{КАМ}$ ), при которых выполняются требования к функциональной эффективности и трудоемкости работ, и суммарные затраты на проект минимальные.

8. Задача (4.1) записана как детерминированная. В общем случае при исследовании характеристик перспективных КАМ необходимо учесть факторы неопределенности (неопределенности коэффициентов проектной модели, полученных на основе опытных данных  $\beta(t_{np}), \dots$ ), которые могут влиять на точность решения.

### ***Основные соотношения проектной модели***

При формировании проектных зависимостей, используются данные по прототипам, приемы регрессионного анализа. Для учета влияния фактора

времени при проведении прогнозных исследований, некоторые зависимости получены с помощью метода формирования динамических статистических моделей.

Ниже проведем оценку влияния фактора времени. Приведем основные соотношения для определения массовых и стоимостных характеристик и надежности КАМ.

***Зависимости, используемые для определения массовых и стоимостных характеристик, функциональной эффективности и надежности КАМ***

1. Масса КАМ  $m_{КАМ}$  определяется как сумма масс модуля целевой аппаратуры (МЦА)  $m_{МЦА}$  и универсальной космической платформы (УКП)  $m_{УКП}$ :

$$m_{КАМ} = m_{МЦА} + m_{УКП};$$

Если проводится оценка массы УКП перспективных КАМ, то массу УКП можно определить с помощью метода базовых коэффициентов,

$$m_{УКП} = \mu_{УКП} \cdot m_{КАМ}$$

Здесь  $\mu_{УКП} = 0.69 - 0.94$ . Для американского КАМ с использованием УКП SSL1300  $\mu_{УКП} = 0.86$ , для японского КАМ с использованием УКП DS2000  $\mu_{УКП} = 0.935$ .

Величина  $m_{МЦА}$  зависит от  $n_k, \text{типa ЦСС}, \frac{R_i}{H}, t_{np}$ , т. е.

$$m_{МЦА} = f\left(n_k, \text{типa ЦСС}, \frac{R_i}{H}, t_{np}\right),$$

$$m_{МЦА} = \sum_{i=1}^{n_k} m_{ЦСС_i} \left(\frac{R_i}{H}\right) + m_{ССПИ} + m_{СТР} + m_{Кон},$$

где  $n_k$  - количество камер (модулей для  $i$ -х спектральных диапазонов) целевой съемочной системы,

$m_{ЦСС_i}, m_{ССПИ}, m_{СТР}, m_{Кон}$  - соответственно массы целевой съемочной системы

(ЦСС), системы сбора и передачи информации (ССПИ), системы терморегулирования (СТР) и конструкции.

Формирование моделей оценки массовых и стоимостных характеристик, функциональной эффективности и надежности проводится на базе статистических данных по прототипам ЦСС. Обобщенным параметром, определяющим значение  $m_{ЦСС_i}$ , является относительная величина  $R_i / H$ , а также величина времени прогноза:

$$m_{ЦСС} = m_{ЦСС_i} \left( n_i, \frac{R}{H}, t_{np} \right), \quad n_i - \text{количество модулей, если } n_i \text{ заданы, то}$$

$$m_{ЦСС} = m_{ЦСС_i} \left( \frac{R}{H}, t_{np} \right).$$

В настоящее время ЦСС на ГСО является однокамерный, многомодульным для каждого спектрального диапазона. Получены зависимости с использованием разрешения видимого диапазона. (используется разрешение видимого диапазона, потому что разрешение видимого диапазона является минимальным разрешением по сравнению с разрешением других диапазонов (ближний инфракрасный, инфракрасный, термальный ультракрасный и т.д.))

Зависимость массы ЦСС ( $m_{ЦСС}$ ) определяется с помощью формирования динамической статистической модели (см. главе 2.)

$$m_{ЦСС} = \left( 7.208 \cdot 10^3 - 3.508 \cdot t_{np} \right) + \left( -2.452 \cdot 10^8 + 1.215 \cdot 10^5 \cdot t_{np} \right) \cdot \left( \frac{R_i}{H} \right), \quad (4.2)$$

$$3 \leq t_{np} \leq 9,$$

$$1.397 \cdot 10^{-5} \leq \frac{R_i}{H} \leq 6.287 \cdot 10^{-5},$$

$$3 \leq n_i \leq 16.$$

Для определения  $m_{ССПИ}, m_{СТР}, m_{Кон}$  используются соотношения

$$m_{ССПИ} = 0.103 \cdot m_{ЦСС} + 0.12 \cdot m_{МЦА},$$

$$m_{СТР} = 0.18 \cdot m_{ЦСС},$$

$$m_{Кон} = 0.12 \cdot m_{МЦА}.$$

Подробно процедура получения зависимости (4.2) на основе опытных данных описана в главе 3.3.

2. Зависимости для определения надежности (вероятности безотказной работы) ЦСС, ССПИ, СТР и конструкции.

В главе 3, рассмотрена математические модели для определения надежности КАМ. Надежность МЦА и КАМ зависит от состава и массы подсистем. Если состав МЦА и КАМ заданы, то надежность МЦА перспективного КАМ только зависит от массы подсистем. На основе опытных данных можно определить надежность ЦСС, ССПИ, СТР и конструкции. Подробно о методе и об особенностях его реализации см. в главе 3.3.

Для определения надежности ЦСС используется соотношение [15]:

$$P_{ЦСС}(m_{ЦСС}) = 1 - 0.167 \cdot e^{-0.259 \cdot 10^{-2} \cdot m_{ЦСС}},$$

$$107.37 \leq m_{ЦСС} \leq 115.41,$$

Для оценки надежности ССПИ, СТР и конструкции применяются формулы [15]:

$$P_{ССПИ}(m_{ССПИ}) = 1 - 0.254 \cdot \exp(-0.052 \cdot m_{ССПИ}),$$

$$31 \leq m_{ССПИ} \leq 33.32,$$

$$P_{СТР}(m_{СТР}) = 1 - 0.285 \cdot \exp(-0.514 \cdot m_{СТР}),$$

$$7.86 \leq m_{СТР} \leq 8.45,$$

$$P_{Кон}(m_{Кон}) = 1 - 0.451 \cdot \exp(-0.401 \cdot m_{Кон}),$$

$$19.94 \leq m_{Кон} \leq 21.43.$$

3. Модель затрат на реализацию проекта КСМ в планируемый период  $T_9^{KC}$  представляется в виде суммы затрат на космический сегмент (КА или группировку КА) и подсистемы наземного сегмента (ТК КА, НКУ и НКПОР):

$$C_{\Sigma}^{KC} = C_{\Sigma KA} + C_{\Sigma HC},$$

где  $C_{\Sigma}^{KC}$  - суммарные приведенные затраты на проект создания КС;

$C_{\Sigma KA}$  - суммарные приведенные затраты на разработку, производство, выведение и эксплуатацию в течение срока активного существования (САС) КА в КСМ;

$C_{\Sigma HC}$  - суммарные приведенные затраты на доработку подсистем наземного сегмента: технического комплекса КА, наземного комплекса управления и наземного комплекса приема, обработки и распространения информации заданной номенклатуры.

Суммарные приведенные затраты на разработку, производство, выведение и эксплуатацию в течение срока активного существования (САС) КА в КСМ определяются в виде:

$$C_{\Sigma KA} = (k_p N_p \eta(\tau_{np1}) + f(N_{KA}) \eta(\tau_{np2})) \cdot C_{CKA}^1(\cdot) + C_B(\cdot) \cdot \eta(\tau_{np3}) + C_{\Xi}(\cdot) \cdot \eta(\tau_{np4}),$$

где  $k_p$  - базовый коэффициент, определяющий связь затрат на разработку и производство первого образца изделия, представляется в виде:

$k_p = C_P^1 / C_C^1(\cdot)$ ; проведенный анализ показал, что значение базового коэффициента  $k_p$  зависит от особенностей КА и по статистическим данным составляет  $k_p = 2 - 13$  [1,10,26];

$N_p$  - приведенное число КА на этапе разработки ( $N_p = 1 - 3$ );

$\eta(\tau_{np})$  - коэффициент дисконтирования затрат (приведения затрат к моменту окончания проекта), определяется в виде:  $\eta(\tau_{np}) = (1 + E)^{-\tau_{np}}$ ,  $E$  - нормативный коэффициент ( $E = 0,03 - 0,08$ ),  $\tau_{np}$  - время приведения текущих затрат к моменту  $t_{np}$  (времени окончания проекта);

$f(N_{KA})$  - функция снижения затрат при росте объема производства,

определяется в виде:  $f(N_{KA}) = \frac{N_{KA}^{-\alpha}}{1 - \alpha}$ ,  $\alpha \approx 0.2 - 0.24$  [1,10,26];

$C_{сКА}^1(\cdot)$  - функция, определяющая затраты на производство первого образца КА, определяется в виде:

$$C_{сКА}^1(\cdot) = C_{сМЦА}^1(\cdot) + C_{сУСП}^1(\cdot)$$

$C_{сМЦА}^1(\cdot)$  и  $C_{сУСП}^1(\cdot)$  - функция, определяющая затраты на производство первого образца МЦА и УСП соответственно;

$C_B(\cdot)$  и  $C_э(\cdot)$  - функция, определяющая затраты на выведение и эксплуатацию КА соответственно.

В общем случае зависимость для определения затрат на производство первого образца МЦА имеет вид [1,10,26]:

$$C_{сМЦА}^1(\cdot) = \bar{C}_{сМЦА}^1 \cdot m_{МЦА}^{\alpha_1} \cdot \left(\frac{R}{H}\right)^{\alpha_2} \cdot Q^{\alpha_3} \cdot \Delta\lambda^{\alpha_4} \cdot N_{ПРД}^{\alpha_5} \cdot T_{САС_{МЦА}}^{\alpha_6} \cdot P_{МЦА}^{\alpha_7} \cdot t_{np},$$

где  $\bar{C}_{сМЦА}^1, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6, \alpha_7$  - статистические коэффициенты;

$m_{МЦА}$  - масса МЦА, кг;

$\frac{R}{H}$  - отношение пространственного разрешения к высоте орбиты, б/р;

$$\frac{R}{H} = \min_i \left( \frac{R_i}{H}, n_{ка} \right)$$

$\Delta\lambda$  - спектральный диапазон, мкм;

$N_{ПРД}$  - число каналов передачи целевой информации;

$Q$  - информационный поток МЦА, Мбит;

$T_{САС_{МЦА}}$  - срок активного существования МЦА;

$P_{МЦА}$  - надежность (вероятность безотказной работы в течение САС) МЦА;

$t_{np}$  - время прогноза.

Если учесть связь

$$M_{МЦА} = f(R/H, Q, \Delta\lambda, N_{ПРД}, T_{САС}, P_{МЦА}, t_{np}),$$

можно записать регрессионную модель оценки затрат на создание (производство) первого образца МЦА от времени прогноза и массы ЦСС в виде:

$$C_{МЦА}^1(m_{МЦА}) = C_{ЦСС}^1(m_{ЦСС}, t_{np}) + C_{ССПИ}^1(m_{ССПИ}) + C_{СТР}^1(m_{СТР}) + C_{Кон}^1(m_{Кон});$$

$$C_{ЦСС}^1(m_{ЦСС}, t) = 1.07 \cdot 10^{-3} \cdot m_{ЦСС}^{0.848} \cdot (t - 2000)^{2.9113},$$

$$107.37 \leq m_{ЦСС} \leq 115.41, \quad 2020 \leq t_{np} \leq 2030,$$

$$C_{ССПИ}^1(m_{ССПИ}) = 14.67 \cdot m_{ССПИ}^{0.234},$$

$$31 \leq m_{ССПИ} \leq 33.32,$$

$$C_{СТР}^1(m_{СТР}) = 0.0135 \cdot m_{СТР}^{0.734},$$

$$7.86 \leq m_{СТР} \leq 8.45,$$

$$C_{Кон}^1(m_{Кон}) = 2.372 \cdot 10^{-6} \cdot m_{Кон}^{0.754},$$

$$19.94 \leq m_{Кон} \leq 21.43.$$

Подробно зависимости объяснены в главе 3.4.

Вопроса оценки трудоемкости работ в данном случае не рассматриваются.

На рисунке 3.3, который показан в главе 3, приведен алгоритм решения задачи прогнозирования характеристик перспективного КАМ в детерминированной постановке. Алгоритм включает решение задачи прогнозирования определяющих параметров  $\beta(t_{np})$  МЦА к моменту  $t_{np}$  и решении задачи оптимизации параметров перспективного КА при наличии ограничений (т.е. с учетом динамики внешних и внутренних связей). На рисунке 4.5 представлен подробный алгоритм решения задачи (4.1). В качестве метода оптимизации в общем случае можно использовать случайный поиск или прямой перебор при конечном числе альтернативных вариантов.

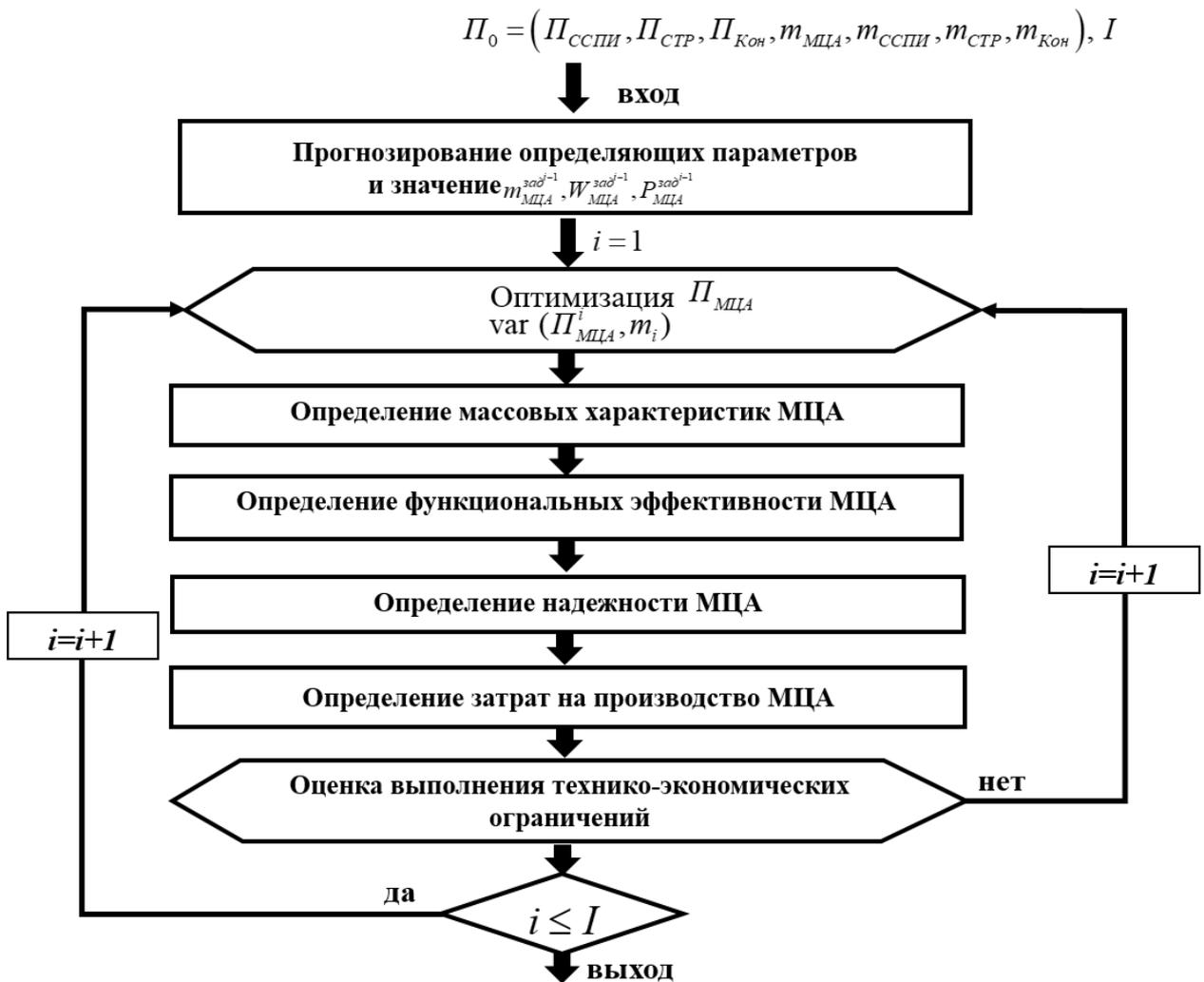


Рисунок 4.5 - Подробный алгоритм решения задачи (4.1)

Зависимость для определения информационной производительности может быть записана в виде:

$$I_{np} = \alpha_0 \cdot m_{МЦА}^{\alpha_1} \cdot \left(\frac{R}{H}\right)^{\alpha_2} \cdot N_{кан}^{\alpha_3},$$

где  $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  - статистические коэффициенты.

В данном случае для оценки функциональной эффективности (информационной производительности) КАМ применяется формула [15]:

$$I_{np} = 4.45 \cdot 10^3 \cdot m_{МЦА}^{2.127} \cdot \left(\frac{R}{H}\right)^{-0.425} \cdot N_{кан}^{0.018},$$

Решение задачи оптимизации сводится в данном случае к выбору из конечного множества альтернативных вариантов рационального

(оптимального) состава МЦА  $\left( n_k, \Pi_{МЦА_i}^1, \frac{R_i}{H}, m_i \right)$ . Для альтернативных вариантов оцениваются условия функциональной эффективности.

$$T_{наб} \left( n_k, \Pi_{МЦА_i}^1, \frac{R_i}{H}, N_{КА} \right) \leq T_{наб}^{з\delta} - \text{периодичность наблюдения};$$

$$N_{кан} \left( n_k, \Pi_{МЦА_i}^1, \frac{R_i}{H} \right) \geq N_{кан}^{з\delta} - \text{количество спектральных каналов};$$

$$S_{ОБ} \left( n_k, \dots \right) \geq S_{ОБ}^{з\delta} - \text{обзорность};$$

$$R_{кан_i} \left( n_k, \Pi_{МЦА_i}^1, m_i \right) \leq R_{кан_i}^{з\delta} - \text{разрешением спектрального канала, } i = \overline{1, N_{кан}};$$

$$\frac{R}{H} = \min_i \left( \frac{R_i}{H} \right), i = \overline{1, n_k} - \text{выбор разрешения спектральных каналов};$$

$$I_{пр} \left( n_k, \Pi_{МЦА}^1, m_{МЦА}, \frac{R}{H}, N_{кан} \right) \geq I_{пр}^{з\delta} - \text{информационная производительность.}$$

$n_k$  - количество КАМ на орбите

Оценки периодичности наблюдения КАМ зависят от орбитальных характеристик, в частности от количества КАМ, обрты наблюдения, высоты полета, от характеристик оптических систем [1,3,10]. В нашем случае КАМ находятся на ГСО. Поэтому для оценки периодичности наблюдения учитывается только характеристики МЦА. У современных МЦА периодичность съемки и представления информации около 10-15 минут в случае, если проводится съемка полного диска Земли.

По обзорности космическую информацию можно разделить на четыре группы:

- глобальные съемки обзорностью  $10^7 \dots 10^8$  км, дающие изображение всего или почти всего видимого диска Земли;
- региональные съемки обзорностью  $10^6 \dots 10^7$  км, дающие изображение крупных географических областей и стран;
- локальные съемки обзорностью  $10^5 \dots 10^6$  км, дающие изображения отдельных районов;

- детальные съемки обзорностью  $10^4 \dots 10^5$  км<sup>2</sup>.

В диссертации рассматриваются условия съемки с глобальной обзорностью, так как на высоких орбитах наблюдается полный диск Земли.

Число спектральных каналов является важным параметром, определяющим массу ЦСС. В настоящее время ЦСС КАМ на ГСО используют однокамерные, многоспектральные системы. Анализ опытных данных показывает, что перспективные МЦА к 2023 г. будут иметь минимально 10 каналов. Национальное управление океанических и атмосферных исследований (США) уже разрабатывает ЦСС с 16 каналами, Европейское космическое агентство планировали разработать ЦСС с 32 каналами. Из-за финансовых проблем в настоящее время ЕКА будет разрабатываться ЦСС с 16 каналами.

***Оценка эффективности альтернативных проектных решений КАМ при изменении целевой нагрузки (модификации КАМ в планируемый период)***

Состав целевой аппаратуры двух сравниваемых вариантов перспективных КАМ приведены в таблице 4.3.

Опыт показывает, что на КАМ на высокой орбите устанавливают дополнительные системы ЦСС для решения других задач. Так системы GEOS&R, GLM разработанные в США, установлены на КАМ GOES-R. Система GLM используется для исследования электрического поля Земли, измерения активности молнии (в дневное и в ночное время). GOCI-II – это оборудование для исследования цвета океана и аэрозоля. GEOS&R – это оборудование для международной спутниковой поисково-спасательной системы. Последняя позволяет при аварийных ситуациях на судах и самолётах оповещать о бедствии и местоположении персональных радиобуев, установленных на них.

Таблица 4.3 - Состав целевой аппаратуры КАМ

Обобщенные характеристики ЦСС			
ЦСС	Спектральный диапазон	Количество спектральных зон	Разрешение R, км
$P_{цсс}^1$	0.444, 0.51, 0.64, 0.86, 0.91, 1.38, 1.61, 2.25, 3.80, 6.19, 6.3, 6.95, 7.35, 8.7, 9.6, 10.5, 11.2, 12,3, 13.3	20	0.5
$P_{цсс}^2$	0.47, 0.64, 0.885, 1.378, 1.61 2.25, 3.9, 6.19, 6.95, 7.34, 8.5 9.61, 10.35, 11.2, 12.3, 13.3	16	1
Дополнительная ЦСС			
	Назначение	Масса, кг	Стоимость, (мл. долларов)
GLM	Исследование электрического поля Земли, измерения для конвективных осадков	125	97
GOCI-II	Исследование цвета океана и аэрозоля	150	47
GEOS&R	Международная спутниковая поисково-спасательная система	51.5	-

Перспективный КАМ может быть реализован в виде 4-х альтернативных вариантов. Это КАМ №1, №2, №3, №4 (см. рис 4.6). Их отличие заключается в варианте реализации дополнительной ЦСС (GLM, GOCI-II). На КАМ №1 установлены основные ЦСС с разрешением 0.5 км и количеством спектральных зон 20 и поисково-спасательная система. На КАМ №2 установлены основные ЦСС с разрешением 1 км и количеством спектральных зон 16 и поисково-спасательная система. На КАМ №3 установлены основные ЦСС с разрешением 1 км и количеством спектральных зон 16, дополнительной ЦСС (GLM) и поисково-спасательная система. На КАМ №4 установлены основные ЦСС с разрешением 0.5 км и количеством спектральных зон 20, дополнительной ЦСС (GOCI-II) и поисково-спасательная система.

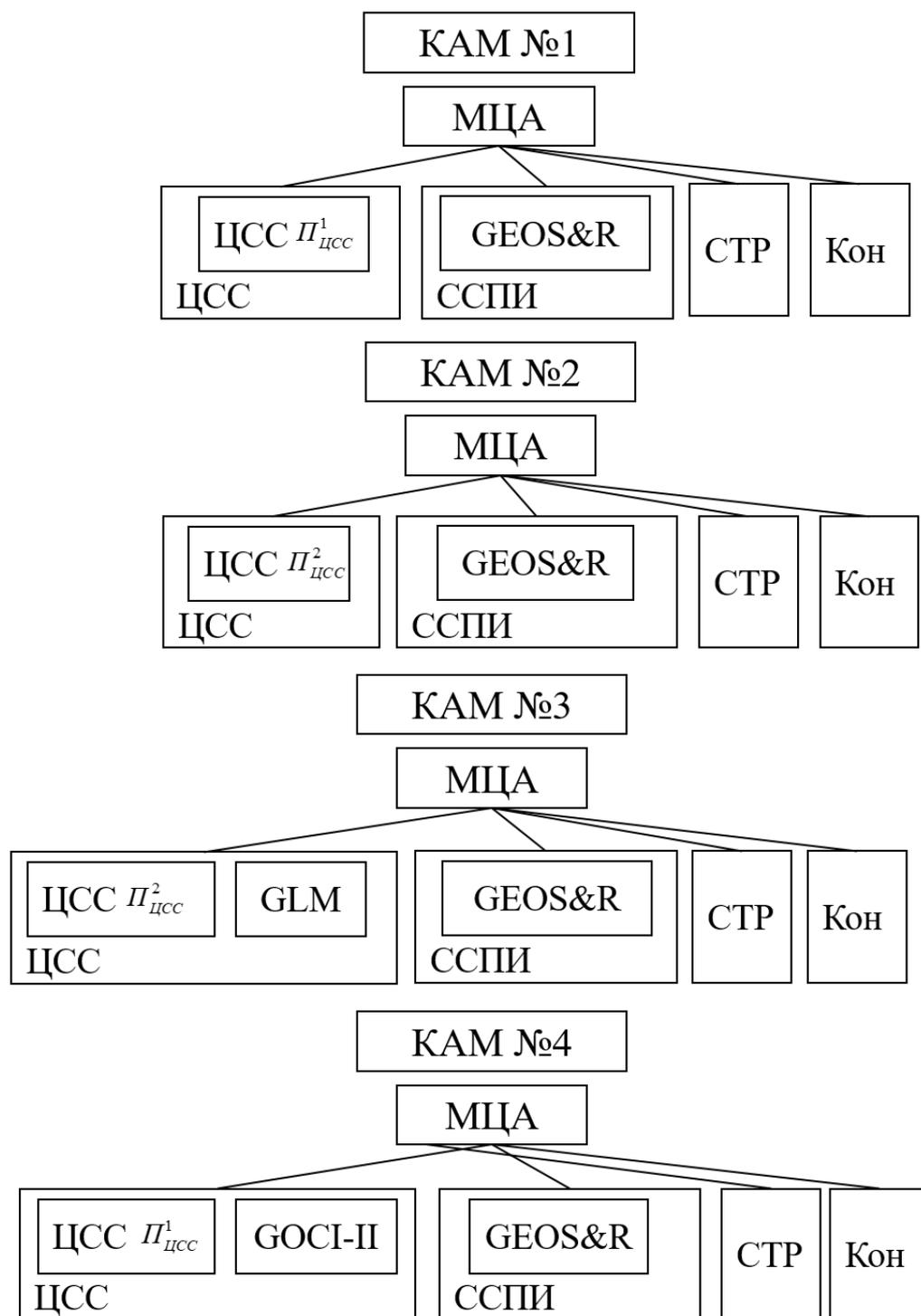


Рисунок 4.6 – Варианты модификаций КАМ

Ниже приведем результаты исследования сравнительного анализа эффекта модификации КАМ с различным составом ЦСС и определить с использованием проектных зависимостей вариант реализации модификации КА, обеспечивающий наименьшие суммарные затраты на его разработку и создание; а также исследовать влияние момента реализации проекта на

приведенные затраты КАМ. В таблице 4.4, 4.5 приведены основные характеристики модификации МЦА КАМ. На рисунке 4.7 представлены изменение основных характеристик МЦА КАМ №1, №2, №3, №4.

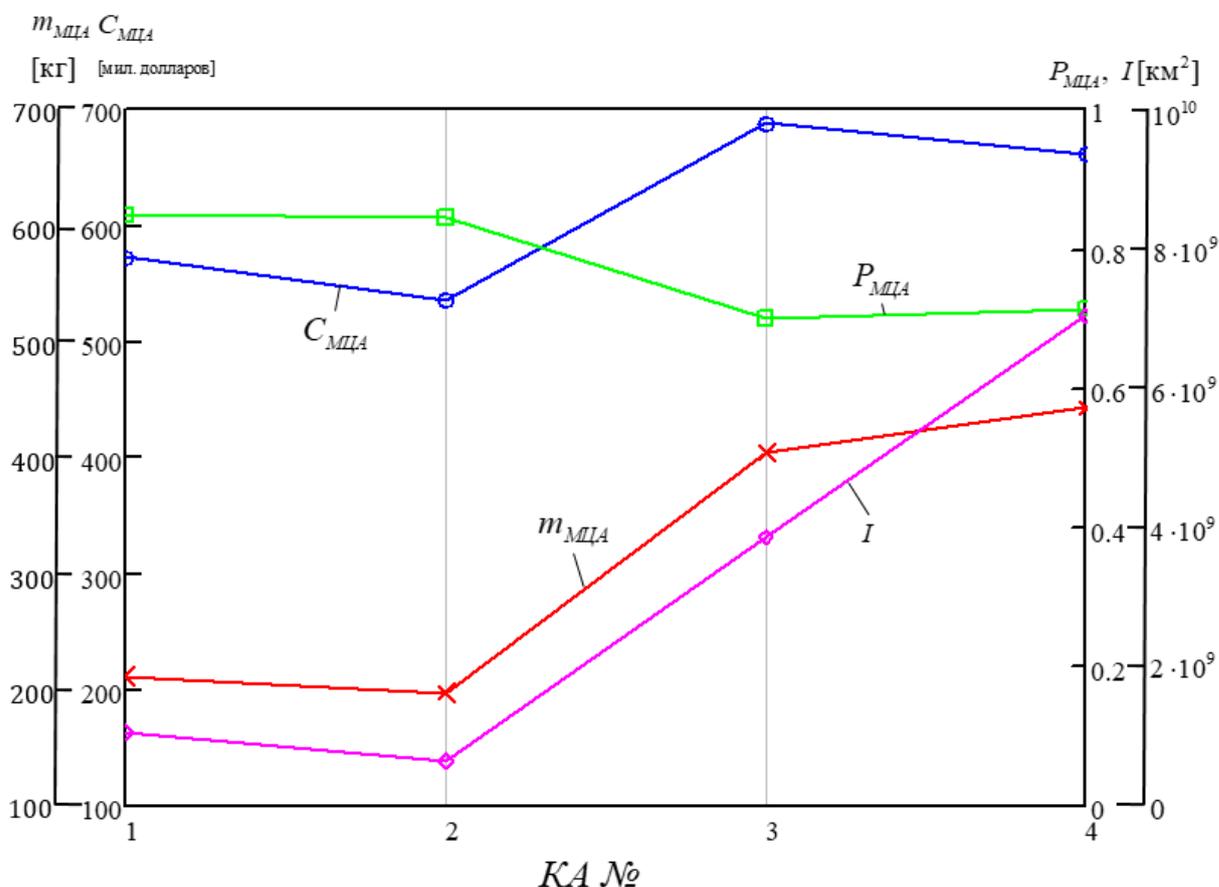


Рисунок 4.7 - Изменение основных характеристик МЦА КАМ №1, №2, №3, №4

На рисунке 4.7 показано, что по критерию затрат на производство первого образца КАМ №2 является самым рациональным вариантом. Но у КАМ №2 разрешение ЦСС имеет худшее разрешение и наименьшее значение информационного производительности. При многокритериальной оценке модификации КАМ проводится выбор рационального проектного решение при наличии технико-экономических ограничений. Так у МЦА модификаций КА №3, №4, являющий двухкамерный, затраты на производство первого образца больше, чем затраты на производство первого образца однокамерной МЦА и одновременно надежность КА №3, №4 уменьшается. Если заданное требование по надежности КАМ больше чем 0.8, то модификации КА М №3

и №4 (с двухкамерными МЦА) проектные решения КА №3 и №4 не подходят.

Таблица 4.4 – Основные массовые характеристики и надежности модификации МЦА КАМ

	№ модификации КАМ			
	КА №1	КА №2	КА №3	КА №4
	Массовые характеристики МЦА КАМ (кг)			
ЦСС $P_{цсс}^1$	103.01	-	-	103.01
ЦСС $P_{цсс}^2$	-	94.7	94.7	-
GLM или GOCI	-	-	125	150
ССПИ	29.74	27.34	63.43	73.04
GEOS&R	51.5	51.5	51.5	51.5
СТР	7.5	6.93	16.09	18.53
Конструкции	19.13	17.58	40.80	46.98
МЦА	210.92	198.07	391.53	443.08
	Надежность			
ЦСС $P_{цсс}^1$	0.872	-	-	0.872
ЦСС $P_{цсс}^2$	-	0.869	0.869	-
GLM или GOCI	-	-	0.879	0.886
ССПИ	0.996	0.938	0.99	0.991
GEOS&R	0.982	0.982	0.982	0.982
СТР	0.994	0.991	0.99	0.99
Конструкции	1	1	1	1
МЦА	0.848	0.795	0.743	0.75352

Таблица 4.5 – Основные стоимостные характеристики и характеристики функциональной эффективности модификации МЦА КАМ

	№ модификации КАМ			
	КА №1	КА №2	КА №3	КА №4
	Затрат на производство первого образца (ед)			
ЦСС $P_{цсс}^1$	502.24	-	-	502.24
ЦСС $P_{цсс}^2$	-	467.67	467.67	-
GLM или GOCI	-	-	82.5	47
ССПИ	32.44	31.81	65.76	67.88
GEOS&R	36.89	36.89	36.89	36.89
СТР	0.059	0.056	0.12	0.13
Конструкции	$2.19 \cdot 10^{-5}$	$2.06 \cdot 10^{-5}$	$4.60 \cdot 10^{-5}$	$5.11 \cdot 10^{-5}$
МЦА	571.65	536.44	652.96	654.16
	Функциональные эффективности основных ЦСС			
Разрешение	0.5	1	1	0.5
Количество каналов	20	16	16	20
Информационная производительность	$1.04 \cdot 10^{10} км$	$6.45 \cdot 10^9 км$	$3.86 \cdot 10^{10} км$	$7.03 \cdot 10^{10} км$

При ограничении надежности  $P_{МЦА} \geq 0.8$  можно выбрать только варианты КА №1 и №2, так как надежность КА №3 и №4 меньше чем 0.8.

#### 4.2 Прогнозный анализ характеристик перспективных КАМ с учетом неопределенностей

Задача проектирования перспективного КАМ с УКП в составе КСМ имеет стохастический характер. Проектные модели содержат определяющие параметры, значения которых находят на основе опытных данных с помощью статистических методов при ограниченной выборке.

В дальнейшем проведем оценку влияния точности определяющих параметров на оценку стоимостных характеристик перспективных МЦА и

КАМ. Ниже приводится общая запись задачи оптимизации параметров перспективных МЦА и КАМ при наличии неопределенностей.

$$\left. \begin{aligned}
 & MC_{\Sigma МЦА}(\Pi_{МЦА}, \beta(t_{np})) \rightarrow \min, \\
 & \max_{\beta} m_{МЦА}(\Pi_{ЦСС}, m_{ЦСС}, \Pi_{ССПИ}, m_{ССПИ}, \Pi_{СТР}, m_{СТР}, m_{Кон}, \beta(t_{np})) \leq m_{МЦА}^{зад}, \\
 & \min_{\beta} W_{МЦА}(\Pi_{ЦСС}, m_{ЦСС}, \Pi_{ССПИ}, m_{ССПИ}, \Pi_{СТР}, m_{СТР}, \beta(t_{np})) \geq W_{МЦА}^{зад}, \\
 & \min_{\beta} P_{МЦА}(\Pi_{ЦСС}, m_{ЦСС}, \Pi_{ССПИ}, m_{ССПИ}, \Pi_{СТР}, m_{СТР}, m_{Кон}, \beta(t_{np})) \geq P_{МЦА}^{зад}, \\
 & \Pi_{МЦА} = (\Pi_{ЦСС}, m_{ЦСС}, \Pi_{ССПИ}, m_{ССПИ}, \Pi_{СТР}, m_{СТР}, m_{Кон}) \\
 & \Pi_{МЦА} \in G_{зад}(t_{np}), \\
 & t_{np} = t_{np}^{зад},
 \end{aligned} \right\} (4.3)$$

где  $MC_{\Sigma МЦА}$  - среднее значение суммарных затрат на производство первого образца МЦА,  $\beta(t_{np})$  - вектор определяющих параметров, статистических коэффициентов проектных зависимостей, определяющих затраты на создание МЦА,  $m_{МЦА}$  - Масса МЦА,  $W_{МЦА}$  - показатель функциональной эффективности,  $P_{МЦА}$  - надежности МЦА.

При решении стохастической проектной задачи должны удовлетворяться ограничения

$$\begin{aligned}
 & \max_{\beta} m_{МЦА}(\Pi_{ЦСС}, m_{ЦСС}, \Pi_{ССПИ}, m_{ССПИ}, \Pi_{СТР}, m_{СТР}, m_{Кон}, \beta(t_{np})) \leq m_{МЦА}^{зад}, \\
 & \min_{\beta} W_{МЦА}(\Pi_{ЦСС}, m_{ЦСС}, \Pi_{ССПИ}, m_{ССПИ}, \Pi_{СТР}, m_{СТР}, \beta(t_{np})) \geq W_{МЦА}^{зад}, \\
 & \min_{\beta} P_{МЦА}(\Pi_{ЦСС}, m_{ЦСС}, \Pi_{ССПИ}, m_{ССПИ}, \Pi_{СТР}, m_{СТР}, m_{Кон}, \beta(t_{np})) \geq P_{МЦА}^{зад}
 \end{aligned}$$

которые определяют гарантированную область допустимых решений при оптимизации  $\Pi_{МЦА}$ .

Если закон распределения случайного вектора  $\beta(t_{np})$  не известен, то при решении задачи (4.3) полагают, что

$$\beta(t_{np}) \in \text{rav}(\beta(t_{np}) - \sigma\beta(t_{np}), \beta(t_{np}) + \sigma\beta(t_{np}))$$

и считают, что компоненты вектора  $\beta(t_{np})$  статистические независимые.

Учет неопределенности (случайных значений  $\beta(t_{np})$ ), естественно, усложняет решение задачи оптимизации параметров перспективных КАМ. В данном случае будем полагать, что только коэффициенты зависимости для определения стоимостных характеристик (стоимости производства) МЦА случайны и для них известны моментные характеристики  $(M\beta, \sigma\beta)$ . Тогда  $\hat{\beta}(t_{np}) = (\hat{\alpha}_1, \hat{\alpha}_2, \hat{\alpha}_3)$ , где  $\hat{\beta}(t_{np})$  - вектор коэффициентов стоимостной зависимости  $C_{ЦСС}^1(m_{ЦСС}, t) = \hat{\alpha}_1 \cdot m_{ЦСС}^{\hat{\alpha}_2} \cdot (t - 2000)^{\hat{\alpha}_3}$ .

На основе опытных данных в результате исследования (см. главе 2), было получено зависимости стоимости на производство первого образца, получены  $\beta(t_{np}) = (1.07 \cdot 10^{-3}, 0.848, 2.911)$ . Для определения  $\sigma\beta(t_{np})$  воспользуется соотношением  $\sigma\beta(t_{np}) = \nu \cdot \hat{\beta}(t_{np}) = (8.363 \cdot 10^{-5}, 0.066, 0.228)$ .

где  $\nu = \frac{\sigma C}{\bar{C}}$  - коэффициент вариации,  $\sigma C$  - среднеквадратическое отклонение затрат,  $\bar{C}$  - среднее арифметическое выборки.

Пусть критерием поиска рационального решения является среднее значение затрат на производство первого образца МЦА.

Алгоритм стохастической оптимизации параметров перспективных МЦА КАМ приведен на рисунке 4.8. при решении задачи используется метод статистического моделирования.

На рисунке 4.9. представлены результаты исследования влияния числа статистических испытаний на оценку математического ожидания затрат на производство первого образца. При числе статистических испытаний больше 500 ( $N \geq 500$ ) величина математических ожидания затрат на производство первого образца не зависит от число статистических испытаний ( $N$ ).

На рисунке 4.10 представлены результаты исследования влияния числа статистических испытаний на оценку разброса (среднеквадратическое отклонение) значения затрат на производство первого образца МЦА. При

$N \geq 500$  величина среднеквадратическое отклонение затрат на производство первого образца МЦА также не зависит от  $N$  (испытаний).

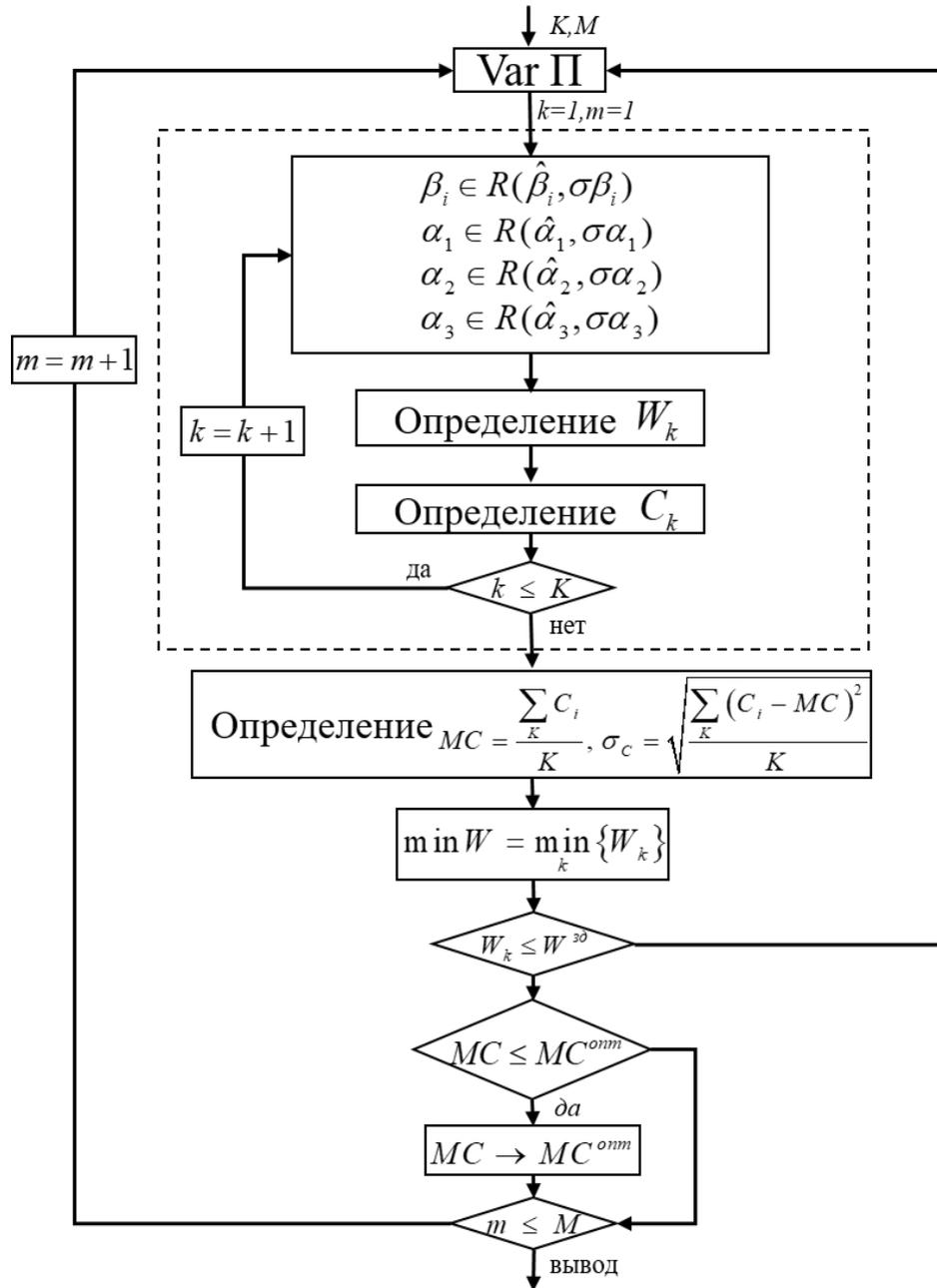


Рисунок 4.8 - Алгоритм стохастической оптимизации параметров перспективных КАМ

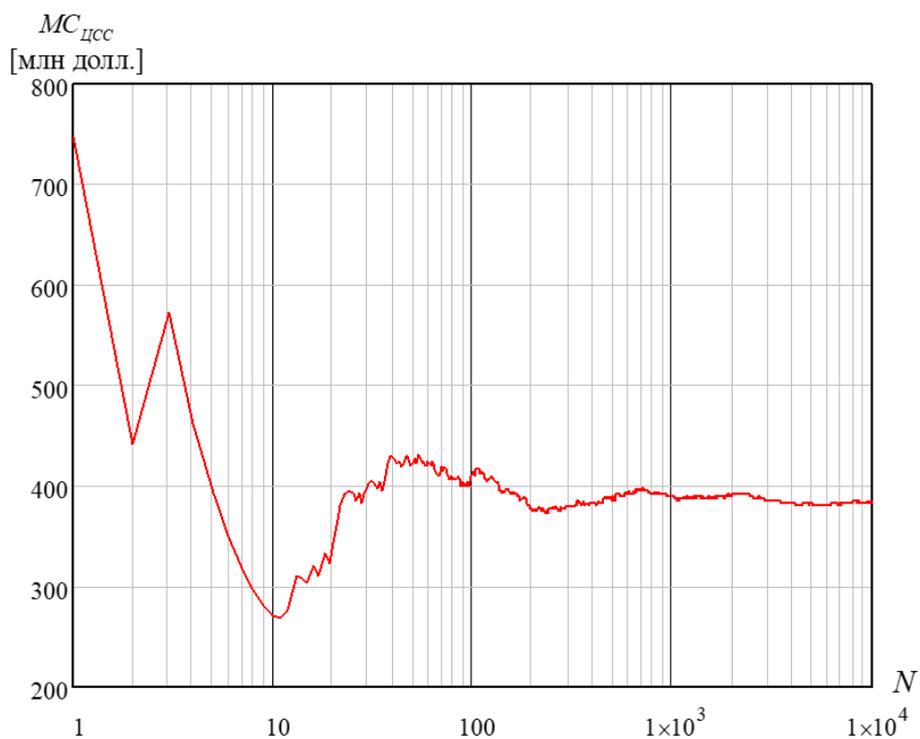


Рисунок 4.9– Изменение оценки математического ожидания затрат на производство первого образца МЦА при увеличении количества статистических испытаний.

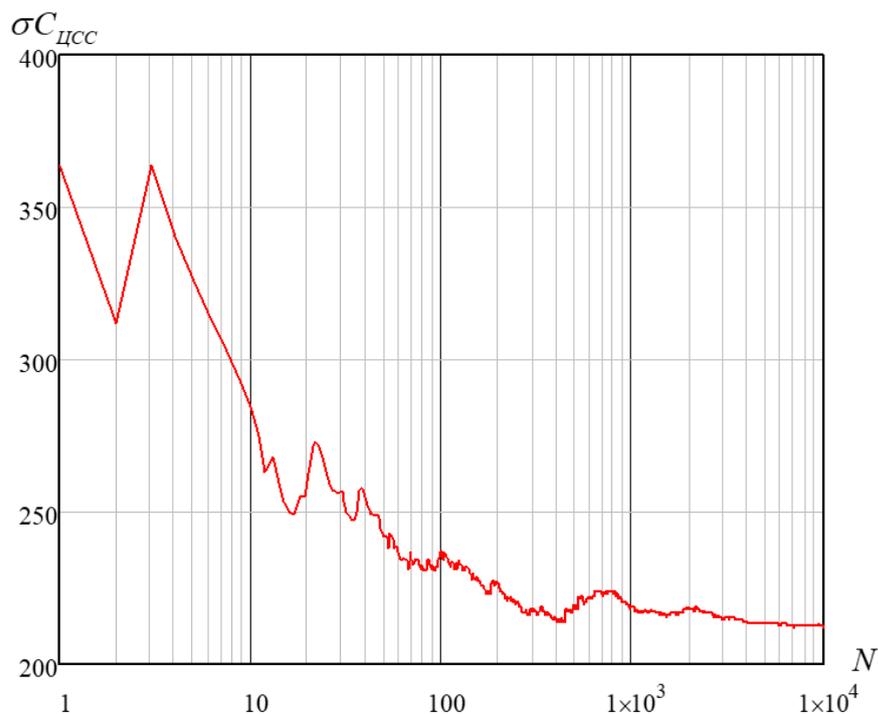


Рисунок 4.10 – Изменение оценки среднеквадратического отклонения затрат на производство первого образца МЦА при увеличении количества статистических испытаний.

Результаты исследования точности решения в зависимости от ошибок определения коэффициентов модели  $C_{МЦА} = C_{ЦСС} + C_{ССПИ} + C_{СТР} + C_{Кон}$  (случайных значений коэффициентов  $\beta(t_{пр})$ ) представлены на рисунке 4.11. для определения  $C_{ССПИ}, C_{СТР}, C_{Кон}$  используется метод базовых коэффициентов, будем полагать, что они постоянны. Поэтому в этом случае точности решения зависит от точности определения коэффициентов модели затрат на производство первого образца ЦСС:

$$C_{ЦСС} = 1.069 \cdot 10^{-3} \cdot m^{0.848} \cdot (t - 2000)^{2.911}$$

На рисунке 4.11 показано изменение среднего квадратического отклонения суммарных затрат в зависимости от величины средних квадратических отклонений случайных коэффициентов модели  $C_{ЦСС}$ . График иллюстрирует увеличение ошибки определения затрат на производство ЦСС с ростом средних квадратических отклонений вектора случайных коэффициентов модели. Достоверность полученного результата определяется числом попыток  $N$  при статистическом моделировании на каждом шаге поиска.

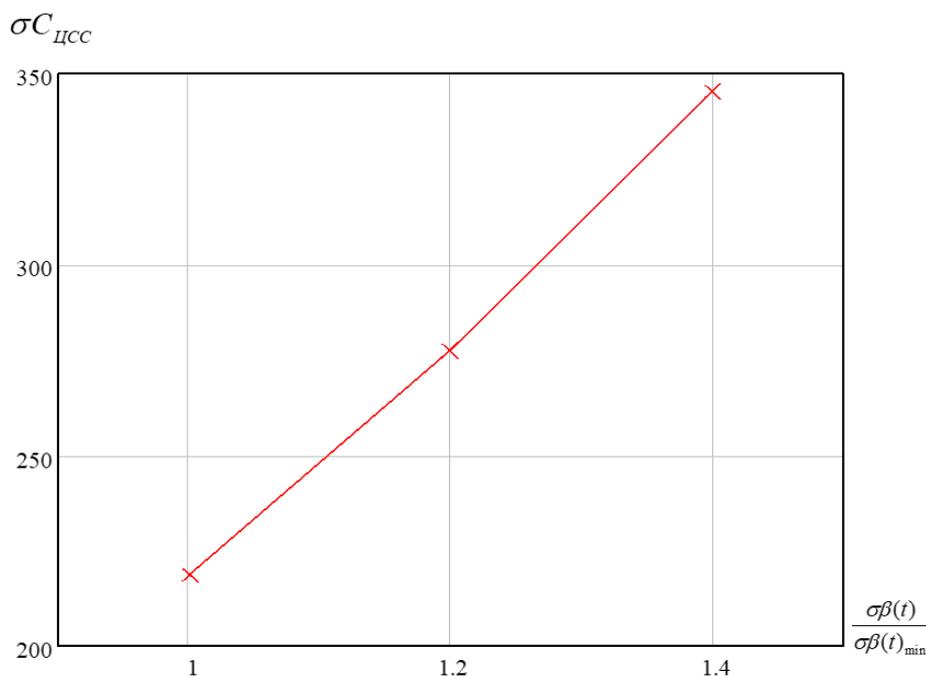


Рисунок 4.11 – Изменение дисперсии суммарных затрат в зависимости от точности определения коэффициентов модели.

Отсюда следует, что увеличение точности прогноза определяющих параметров  $(\beta(t_{np}))$  модели затрат  $C_{МЦА} = f(\Pi_{МЦА}, \beta(t_{np}))$ , т.е. уменьшения  $\sigma\beta(t_{np})$  на 20%, приводит к уменьшению значения  $\sigma C_{ЦСС}$  на 26.9 %, увеличения  $\sigma\beta(t_{np})$  на 20%, приводит к увеличению значения  $\sigma C_{ЦСС}$  на 24.4 %.

Полученные результаты могут быть использованы при оценке устойчивости решения при наличии случайных факторов модели оценки затрат.

### 4.3 Исследование влияния фактора времени на характеристики перспективных КАМ

Выше, при оценке массовых и стоимостных характеристик МЦА использовались зависимости

$$m_{ЦСС} = (7.208 \cdot 10^3 - 3.508 \cdot t_{np}) + (-2.452 \cdot 10^8 + 1.215 \cdot 10^5 \cdot t_{np}) \cdot (R_i / H)$$

и

$$C_{ЦСС}^1(m_{ЦСС}, t) = 1.07 \cdot 10^{-3} \cdot m_{ЦСС}^{0.848} \cdot (t - 2000)^{2.9113}.$$

Рассмотрим, как влияет фактор времени на характеристики перспективных КАМ. При заданных условиях

$$\min_i \frac{R_i}{H} \leq \frac{R}{H}^{30}$$

$$\text{и } \frac{R}{H}^{30} = 2.7943 \cdot 10^{-5} \text{ и } 1.3971 \cdot 10^{-5}.$$

Результаты исследования влияния фактора времени на характеристики перспективных МЦА и КАМ представлены в таблице 4.6 и 4.7. В таблице 4.6 представлены результаты при  $\frac{R}{H} = 2.794 \cdot 10^{-5}$  (1 км на ГСО), в таблице 4.7 при  $R / H = 1.3971 \cdot 10^{-5}$  (0.5 км на ГСО).

Таблица 4.6 – Основные характеристики перспективных КАМ при изменении времени реализации проекта при  $R / H = 2.7943 \cdot 10^{-5}$

$R / H = 2.7943 \cdot 10^{-5}$	2020г.	2030г.
$M_{МЦА}$ [кг]	178.62	71.78
$I$ [км <sup>2</sup> за сутки]	$2.760 \cdot 10^{10}$	$4.1382 \cdot 10^{10}$
$C_{МЦА}$ [млн долл.]	401.59	580.16

Таблица 4.7 - Основные характеристики перспективных КАМ при изменении времени реализации проекта при  $R / H = 1.3971 \cdot 10^{-5}$

$R / H = 1.3971 \cdot 10^{-5}$	2020г.	2030г.
$M_{МЦА}$ [кг]	183.59	103.03
$I$ [км <sup>2</sup> за сутки]	$2.492 \cdot 10^{10}$	$4.2958 \cdot 10^{10}$
$C_{МЦА}$ [млн долл.]	410.49	781.005

Результаты показывают, что при проектировании КАМ с разрешением 0.5 км на ГСО при реализации проекта в 2030 г. затраты на производство первого образца МЦА растут на 90.2% по сравнению с затратами на производство первого образца МЦА при реализации проекта 2020 г и одновременно при реализации проекта в 2030 г. масса МЦА уменьшается на 78.1% по сравнению с массой МЦА при реализации проекта 2020г.

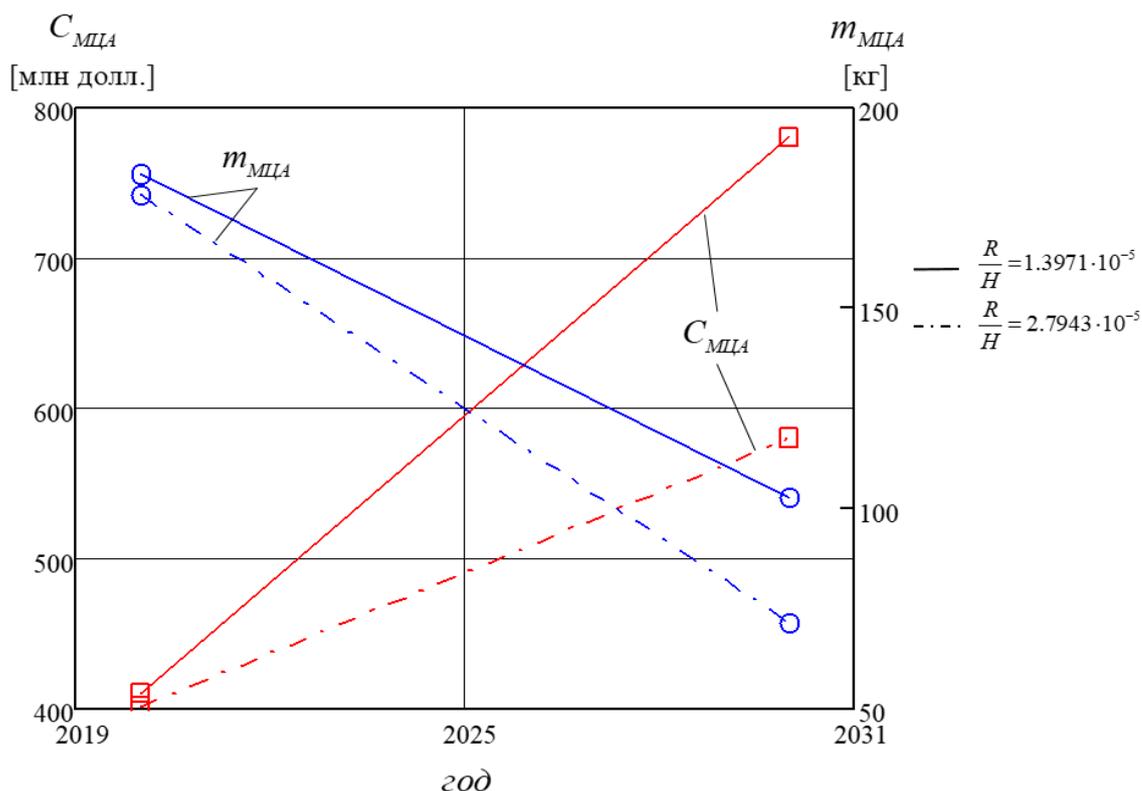


Рисунок 4.12 - Изменение затрат на производство первого образца МЦА и массы МЦА в зависимости от срока реализации проекта

На рисунке 4.12 показано как с течением времени при условии  $R/H = 2.7943 \cdot 10^{-5}$  и  $R/H = 1.3971 \cdot 10^{-5}$  масса МЦА уменьшается и, одновременно, увеличиваются затрат на производство первого образца МЦА. По видимому, применение новых технологий позволяет уменьшаться массу МЦА перспективных КАМ по сравнению с базовыми технологиями реализации к 2020г. Одновременно новые технологии приведут к увеличению затрат на проект (из-за применения новых КТР новых материалов, использования патентов и т.д.), затрат на производство первого образца МЦА.

#### Заключение к главе 4:

1. С помощью разработанной методики прогнозирования характеристик перспективных космических аппаратов мониторинга проведена оценка основных технико-экономических характеристик перспективных КАМ при наличии ограничений. Многокритериальная оценка эффективности альтернативных решений КАМ при изменении целевой нагрузки (при изменении требований к характеристикам модификации

системы в планируемый период), позволили найти рациональное проектное решение.

2. Проведена оценка влияния точности заданных определяющих параметров на оценку стоимостных характеристик перспективных МЦА КАМ и исследовано влияние фактора времени на характеристики перспективных средств. Критерием поиска рационального решения является среднее значение затрат на производство первого образца МЦА.

При числе статистических испытаний больше 500 ( $N \geq 500$ ) величина математических ожидания затрат на производство первого образца и среднеквадратических отклонений затрат на производство первого образца не зависит от числа статистических испытаний.

Увеличение точности прогноза определяющих параметров ( $\beta(t_{np})$ ) модели затрат  $C_{МЦА} = f(P_{МЦА}, \beta(t_{np}))$ , т.е. уменьшения  $\sigma\beta(t_{np})$  на 20%, приводит к уменьшению значения  $\sigma C_{ЦСС}$  на 26.9 %, увеличения  $\sigma\beta(t_{np})$  на 20%, приводит к увеличению значения  $\sigma C_{ЦСС}$  на 24.4 %.

Результат исследования влияния фактора времени показывают, что при проектировании КАМ с разрешением 0.5 км на ГСО при реализации проекта в 2030 г. затрат на производство первого образца МЦА растут на 90.2% по сравнению затрат на производство первого образца МЦА при реализации проекта 2020 г и одновременно при реализации проекта в 2030 г. масса МЦА уменьшается на 78.1% по сравнению массы МЦА при реализации проекта 2020г.

## Заключение

1. Разработана методика комплексного анализа характеристик перспективных КАМ природной среды. Методика включает решение двух главных задач: 1) - прогнозирования динамических (определяющих) параметров (это коэффициенты массовых и стоимостных зависимостей) к моменту реализации проекта и 2) - оптимизацию параметров перспективных КАМ при наличии ограничений. Показано, что использование метода конструктивного прогнозирования при решении основной задачи проектирования с учетом динамики определяющих параметров позволяет определить рациональные (оптимальные) характеристики перспективных КАМ при наличии технико-экономических ограничений

2. Разработан алгоритм формирования динамических статистических моделей при ограниченной статистической выборке. На основе опытных данных получены динамические статистические модели для прогнозирования массы ЦСС и затрат на реализацию проекта.

3. Исследовано влияние фактора времени на характеристики перспективных КАМ. Анализ показывает, что при увеличении времени прогноза до 2030г обеспечивается необходимый (требуемый) уровень пространственного разрешения и масса МЦА уменьшается на 80%. Одновременно происходит увеличение затрат на производство первого образца и реализацию проекта на 90%.

4. С помощью разработанной методики проведена многокритериальная оценка основных технико-экономических характеристик альтернативных проектных решений перспективных КАМ. Решена задача оптимизации параметров перспективного КАМ при наличии ограничений (требования к проектному решению). Показано, что при увеличении требований к информационной производительности КАМ (до  $4 \cdot 10^{10}$  км) рациональное проектное решение (из данного множества альтернатив) будет иметь  $m_{МЦА} = 443.08$  кг,  $C_{МЦА} = 654.04$ , ( $t_{np} = 2030$ ).

5. Исследовано влияние точности прогнозирования определяющих параметров (коэффициентов массовых и стоимостных соотношений) на точность определения характеристик перспективных КАМ. Используется метод статистического моделирования. Показано, в частности что точность определения  $\bar{C}_{цсс}$  прямо влияет на точность  $(\sigma\bar{C}_{\Sigma МЦА})$  определения стоимости производства МЦА.

### Список используемых источников

1. Матвеев Ю.А. Методы прогнозирования характеристик ЛА. - М.:Изд-тво МАИ2005 г.
2. Матвеев Ю.А., Ламзин В.В. Космические системы дистанционного зондирования Земли: состояние и перспективы развития.Общероссийский научно-технический журнал «Полет», № 5, Москва, 2007 г. С.31-37
3. Матвеев Ю.А. Методы исследования модификаций при разработке летательных аппаратов – М.: Изд-тво МАИ, 1992г.
4. Матвеев Ю.А., Ламзин В.А., Ламзин В.В., Разработка конструктивно-компоновочной схемы космического аппарата мониторинга окружающей среды. -М : Изд-тво МАИ, 2006.
5. Матвеев Ю.А. Комплексный анализ и совершенствование конструкторско-технологических решений при разработке ЛА – М.:Изд-тво МАИ, 1995.
6. Матвеев Ю.А., Позин А.А., Юнак А.И. Прогнозирование и управление экологической безопасностью при реализации сложных технических проектов. - М.:Изд-тво МАИ, 2005. 368 с.
7. Малышев В.В. Спутниковые системы мониторинга .- М : Изд-тво МАИ ,2000.
8. Конструирование автоматических космических аппаратов. Под ред. Д.И. Козлова. - М.: Машиностроение, 1996.
9. Волоцуев В. В., Ткаченко И. С., Сафронов С. Л., Выбор проектных параметров универсальных платформ малых космических аппаратов. Журнал «Вестник самарского государственного аэрокосмического университета», №2, Самара, 2012г. 35 – 47с.
10. Аунг Зо Мин, Матвеев Ю.А., Методика прогнозирования характеристик перспективной технической системы регионального мониторинга., Актуальные проблемы российской космонавтики: Москва, 2011, 284с.

11. Золотов А.А., Вараев В.К. Выбор проектных решений ЛА с учетом согласования массы, надежности и ресурса многофазовых систем / Учебное пособие. М.: Изд-во МАИ, 2000. 84 с.
12. Паничкин Н.И. и др. Конструкция и проектирование космических летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1986.
13. Чо Хюнчжэ, Матвеев Ю.А. Развитие космических средств мониторинга природной среды на высоких орбитах – Вестник «НПО имени С. А. Лавочкина», №4, 2016. 126 - 131 с.
14. Чо Хюнчжэ, Матвеев Ю.А. Задача прогнозирования характеристик перспективных космических аппаратов мониторинга – Общероссийский научно-технический журнал «Полет», № 5-6, 2016. 53– 58 с.
15. Чо Хюнчжэ, Матвеев Ю.А. Прогнозные оценки характеристик перспективных космических аппаратов мониторинга - Общероссийский научно-технический журнал «Полет», № 7, 2017. 36 - 44 с.
16. Гуцин В.Н. , Основы устройства и конструирования космических аппаратов. –М :Машиностроение ,1992
17. Агалаков В.С., Сире А.Ш. Метеорологические искусственные спутники // Сер. Космонавтика, астрономия. М.: Знание. 1997, № 11, 64 с.
18. Мишин, В.П, Безвербый В.К, Панкратов Б.М, Щеверов Д.Н, Основы проектирования летательных аппаратов/ Учебник для технических вузов.-М.: Машиностроение, 1985, 360 с.
19. H.J. Kramer, Observation of the Earth and its environment, Berlin : Springer, 1996, 961 с.
20. Ronald G. Ross, Jr. Cryocoolers 12, New York : Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2003, 825 с.
21. SharingEarthObservationResources [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://directory.eoportal.org/> (дата обращения : 18.10.17)
22. Obseving Systems Capability Analysis and Review Tool [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.wmo-sat.info/oscar/satellites/> (дата обращения : 20.09.17)

23. Смирнов Н.В., Дунин-Барковский И.В. Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений. – М.: Изд-во «Наука», 1969, 512с.
24. Четыркин Е. М. Статистические методы прогнозирования. – М.: Изд-во «Статистика», 1976, 200с.
25. Туманов А.В., Зеленцов В.В., Щеглов Г.А., Основы компоновки бортового оборудования космических аппаратов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010, 344с.
26. Матвеев Ю.А., Ламзин В.А., Ламзин В.В. Основы проектирования модификаций космических аппаратов дистанционного зондирования Земли. – М.: Изд-во МАИ, 2015, 174с
27. Аунг Зо Мин, Методика прогнозирования характеристик технических систем регионального мониторинга: дис. канд технических наук. МАИ, М.: 2012
28. Ламзин В. В. Методические основы проектирования модификаций космических аппаратов в составе космической системы дистанционного зондирования Земли: дисс. д-ра технических наук МАИ, М.: 2011
29. Матвеев Ю.А. Разработка метода прогнозирования оптимальной программы развития и требований к надежности перспективной системы однотипных летательных аппаратов. дисс. Канд. технических наук МАИ, М.: 1975, 222 с.
30. Матвеев Ю.А. Оптимизация состава системы ЛА с учетом развития техники. - М.:Изд-во МАИ 1993 г.
31. Чо Хюнчжэ, Матвеев Ю.А. Перспективы развития средств космического мониторинга природной среды, К.Э. Циолковский и этапы развития космонавтики, г. Калуга, 2015, 290 - 291с.
32. Чо Хюнчжэ, Матвеев Ю.А. Задача прогнозирования характеристик перспективных КА мониторинга природной среды, XL

Академические чтения по космонавтике, М.: Изд-во МГТУ им Баумана, 2016, 171с

33. Чо Хюнчжэ, Матвеев Ю.А. Модели прогнозирования массово-габаритных и энергетических характеристик перспективных КА мониторинга, Идеи К.Э. Циолковского в инновациях науки и техники, г. Калуга, 2016, 275с.

34. Чо Хюнчжэ, Матвеев Ю.А. Прогнозные оценки характеристик перспективных КА мониторинга природной среды, ХLI Академические чтения по космонавтике, М.: Изд-во МГТУ им Баумана, 2017, 191с.

35. Чо Хюнчжэ, Матвеев Ю.А. Задача направленной адаптации проектной модели при оценке характеристик подсистем КА мониторинга с учетом особенностей проектно-конструкторских решений для модуля целевой аппаратуры, К.Э. Циолковский и этапы развития космонавтики, г. Калуга, 2017, 336 - 337с

36. Чо Хюнчжэ, Матвеев Ю.А. Методика прогнозирования технико-экономических характеристик перспективной КА мониторинга природной среды при наличии ограничений, Актуальные проблемы космонавтики, М.: Изд-во МГТУ им Баумана, 2018, 174с

37. Gunter'sSpacePage [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://space.skyrocket.de/> (дата обращения : 18.11.17)

38. Энциклопедия ракетно-космической техники [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://http://ecoruspace.me/> (дата обращения : 05.11.17)

39. James R. Wertz Space mission analysis and Design, Third edition. – London: Microcosm Press and Kluwer academic publishers, 2005, 987 с.

40. Charles D. Brown, Elements of spacecraft design. – Colorado : American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2002, 601с.

41. Peter Fortescue Spacecraft system engineering, third edition, Chichester: Wiley, 2003, 704 с.

42. Lee Haesun Satellite communication Theory & system, Seoul: Bogdoo, 2013, 289 с.

43. Kim Kwangyoung Satellite Telecommunication system engineering, Seoul: Jinhon, 2013, 531 с.
44. Gerard Maral Satellite communications systems, Chichester: Wiley, 2009, 713 с.
45. Гарбук С.В., Гершензон В.Е. Космические системы дистанционного зондирования Земли, М.: Изд-во А и Б, 1997, 296 с.
46. Куренков В. И., Салмин В. В., Абрамов Б. А., Основы устройства и моделирования целевого функционирования космических аппаратов наблюдения: учеб. Пособие. – Самара: Изд-во Самар. Гос аэрокосм. Ун-та, 2006, 296с.