

На правах рукописи



Чо Хюнчжэ

**МЕТОДИКА КОМПЛЕКСНОГО АНАЛИЗА ХАРАКТЕРИСТИК
ПЕРСПЕКТИВНЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ МОНИТОРИНГА
ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ**

Специальность 05.07.02

«Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов»

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертация на соискание ученой степени

кандидат технических наук

Москва – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: Матвеев Юрий Александрович – доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», профессор

Официальные оппоненты: Позин Анатолий Александрович – доктор технических наук, Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды «Научно-производственное объединение «Тайфун», Институт экспериментальной метеорологии, заведующий лабораторией №6

Оноприенко Виктор Демьянович – кандидат технических наук, Федеральное государственное унитарное предприятие «Организация «Агат», старший научный сотрудник

Ведущая организация: Акционерное общество «Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина» (АО «НПО им. С.А. Лавочкина»)

Защита диссертации состоится 26 июня 2018 г. в 12.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.10 в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» и на сайте: <http://www.mai.ru/events/defence>

Автореферат разослан « ____ » _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д212.125.10,

кандидат технических наук, доцент  Денискина Антонина Робертовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность.

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.

Для обеспечения эффективной организации и управления при выполнении таких работ необходимы прогнозные исследования перспектив развития техники и технологии космического мониторинга природной среды. В связи с этим **актуальными являются вопросы** совершенствования методов прогнозного анализа и оценки технико-экономических характеристик перспективных космических систем мониторинга, проведение исследований в направлении развития техники и определение рациональных параметров космических аппаратов мониторинга (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 космических средств мониторинга природной среды проводится на базовых предприятиях отрасли. Результаты исследований привязаны к конкретным разработкам и используются при формировании программ создания техники на перспективу до 2020 г. и далее. В ряде опубликованных научных работ представлены данные методического плана, в частности, рассмотрена методика исследования перспективных космических систем дистанционного зондирования Земли (КС ДЗЗ) с учетом модернизации космических систем в планируемом периоде и создания модификаций КАМ. В литературе приводится методика прогнозирования низкоорбитальных КС ДЗЗ с учетом унификации и комплексирования целевой аппаратуры. Проведено

исследование влияния неопределенности условий 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 космических аппаратов мониторинга природной среды на высокой орбите, проведение прогнозных исследований характеристик перспективных космических аппаратов мониторинга при наличии технических и экономических ограничений, оценки влияния срока реализации проекта на массовые и стоимостные характеристики перспективных космических аппаратов мониторинга.

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

Предметом исследования является опытные данные по КАМ природной среды, опубликованные в известной литературе, модели и методы исследования динамики и прогнозирования характеристик перспективных космических аппаратов, методика комплексного анализа характеристик перспективных КАМ природной среды, закономерности развития перспективных космических аппаратов при наличии технико-экономических ограничений.

Научная новизна работы:

1. Обобщен опыт создания КАМ на высоких орбитах за последние 30 лет. Анализ показал, что развитие средств ДЗЗ на высоких орбитах связано с разработкой модификации базовых КАМ с использованием унифицированных космических платформ (УКП), с обеспечением высокого разрешения (R/H) за счет совершенствования модулей целевой аппаратуры (МЦА).

2. Разработана методика построения динамических статистических моделей прогнозирования характеристик КАМ природной среды при ограниченном объеме эмпирических (опытных) данных. Получены многофакторные динамические статистические модели для оценки массовых и стоимостных характеристик перспективных КАМ 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 внутренних и внешних связей, оптимизировать параметры перспективных КАМ.

4. Проведены исследования характеристик перспективных КАМ при наличии технико-экономических ограничений. Реализация многокритериального анализа позволяет найти рациональные характеристики перспективных МЦА и КАМ, оценить влияние времени при изменении времени реализации проекта, ограничении массы и информационной производительности и т.д.

Практическая ценность работы.

В работе сформирована методика прогнозирования технико-экономических характеристик перспективных КАМ в составе космических систем мониторинга (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, включая регрессионный метод и метод формирования динамических статистических моделей. Оценка адекватности соответствующих проектных моделей проводилась путем сравнения с опытными данными, результатами исследований, изложенными в научной литературе.

Достоверность разработанных методик, моделей и алгоритмов подтверждена при выполнении численных расчетов и сравнительных оценок параметров КАМ на высоких орбитах с реализованными на практике характеристиками, 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 объемом 142 страницы состоит из введения, 4-х глав, заключения и списка использованных источников из 46 наименований. В диссертации содержится 17 таблиц, 42 рисунка.

Апробация результатов работы.

Материалы диссертационной работы были доложены и обсуждены на Научных чтениях, посвященных памяти К.Э. Циолковского в 2015, 2016 и 2017 г.г., на Академических научных чтениях, посвященных С.П. Королеву и другим пионерам космонавтики в 2016, 2017 и 2018 г.г., а также на Корейско-российском космическом форуме в Московском авиационном институте (национальном исследовательском университете) в 2017 г.

Публикации.

По основным результатам выполненных в диссертации исследований опубликованы 3 печатные работы. В том числе 3 работы опубликованы в журналах, включенных в перечень 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 данные об апробации результатов исследования.

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

Рассмотрены требования, предъявляемые к космическим аппаратам ДЗЗ на современном этапе развития технологий. Проведен анализ опытных данных характеристик КАМ на высоких орбитах за последние 30 лет. Определены основные закономерности изменения относительной величины линейного разрешения (R/H), масса космических аппаратов мониторинга ($m_{КАМ}$), функциональные эффективности ($W_{КАМ}$), от времени реализации проекта. Основным фактором, влияющим на улучшение характеристик КАМ, является совершенствование базовых подсистем УКП и МЦА.

Анализ показал, что развитие и совершенствования средств ДЗЗ на высоких орбитах связано с созданием эффективных модификаций КАМ на основе базовых проектных решений с использованием УКП, с повышением характеристик МЦА.

В работе рассмотрен метод прогнозирования характеристик перспективных КАМ. Для проведения таких исследований используются опытные данные за предысторию, приемы формирования динамических статистических моделей.

Для учета особенностей реализации перспективных КАМ, определения их рациональных параметров предложена методика конструктивного прогнозирования характеристик КАМ к моменту t_{np} . В методике используется т.н.

метод временных сечений. Прогнозные исследования проводятся в 2 этапа: 1) проводится оценка динамических параметров к моменту t_{np} (коэффициентов проектных зависимостей) 2) решается задача оптимизации параметров перспективного КАМ при наличии ограничений.

Задача оптимизации параметров перспективного КАМ рассматривается в следующей постановке.

$$C_{\Sigma КАМ}({}^{i-1} \Pi_{КА}, \beta(t_{np})) \rightarrow \min ;$$

$$W(R_{КАМ}, T_{наб}, N_{кан}, S_{об}, P_{КАМ}, I_{КАМ}, \tau_{КАМ}, m_{КАМ}, \beta(t_{np})) \geq W^{зод}(t); \quad (1.2)$$

$${}^{i-1} \Pi_{КА} \in G_{зод}(t_{np});$$

$$t_{np} \in \langle T \rangle;$$

$$G_{зод}(t_{np}) = \{ {}^{i-1} \Pi_{КА} : f_i({}^{i-1} \Pi_{КА}, \beta(t_{np})) \geq f_i^{зод} \}$$

$${}^{i-1} \Pi_{HKV}(t_{np}), {}^{i-1} \Pi_{HKПОР}(t_{np}) - \text{заданные параметры,}$$

$${}^{i-1} \Pi_{КА} - \text{определяет состав подсистем и параметра КА.}$$

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).

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

$\beta(t_{np})$ - вектор т.н. 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.

Эффективность КСМ (W) определяют показатели:

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

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

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

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

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

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

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

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

Задача проектирования перспективных КАМ записана как многокритериальная, многопараметрическая, динамическая и детерминированная.

При таком подходе к прогнозному анализу перспективных КАМ необходимо следующее:

- создание соответствующей проектной модели – математических зависимостей, определяющих целевую эффективность, стоимость разработки и производства при реализации проекта, трудоемкость работ;

- разработка алгоритма поиска рационального решения.

Важной задачей в таком случае является поиск рациональных параметров перспективных КАМ, исследование влияния на решение внешних и внутренних динамических связей. Вопросы разработки соответствующих приемов, моделей и методов подробно рассматриваются в главах 2 и 3.

Во второй главе «Модели и методы прогнозирования характеристик перспективных КАМ природной среды» рассматриваются методы прогнозирования характеристик перспективных КАМ. С целью проведения многофакторного анализа характеристик перспективных КАМ разработаны метод и алгоритм формирования динамических статистических моделей (рис. 1).

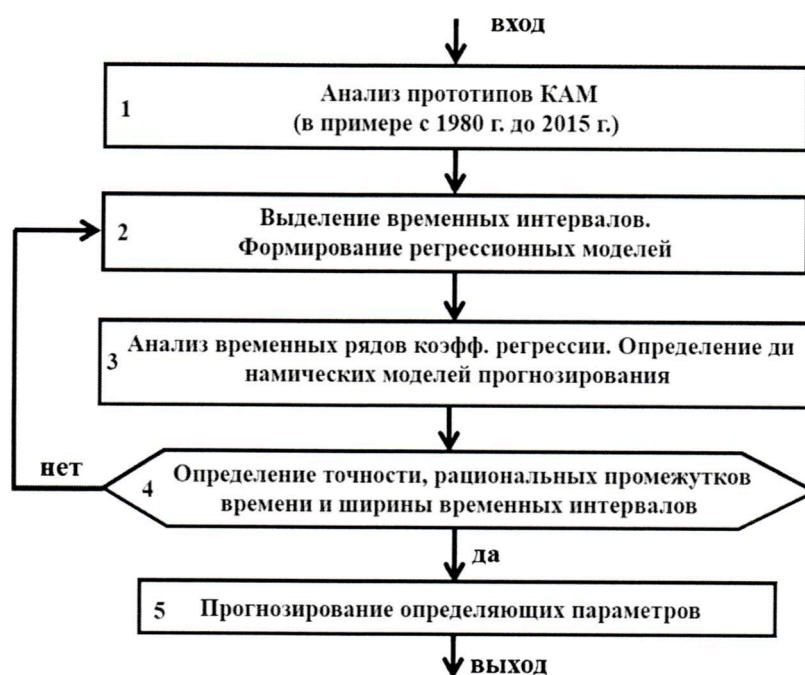


Рисунок 1 - Алгоритм формирования динамических статистических моделей

Приведены результаты практического применения метода формирования динамических статистических моделей оценки массовых и стоимостных характеристик КАМ на высоких орбитах (табл. 1, рис. 2). Полученные динамические статистические модели позволяют проводить многофакторный анализ характеристик перспективных КАМ при наличии ограниченного объема статистической выборки. Показано, что при увеличении t_{np} (времени реализации проекта) улучшается функциональная эффективность КАМ, уменьшается относительное разрешение R/H, одновременно с течением времени масса МЦА уменьшается, и растут суммарные затраты на создание перспективных КАМ.

Таблица 1 – Регрессионные модели и оценки массовых характеристик и стоимостей перспективных КАМ к моменту реализации проекта

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

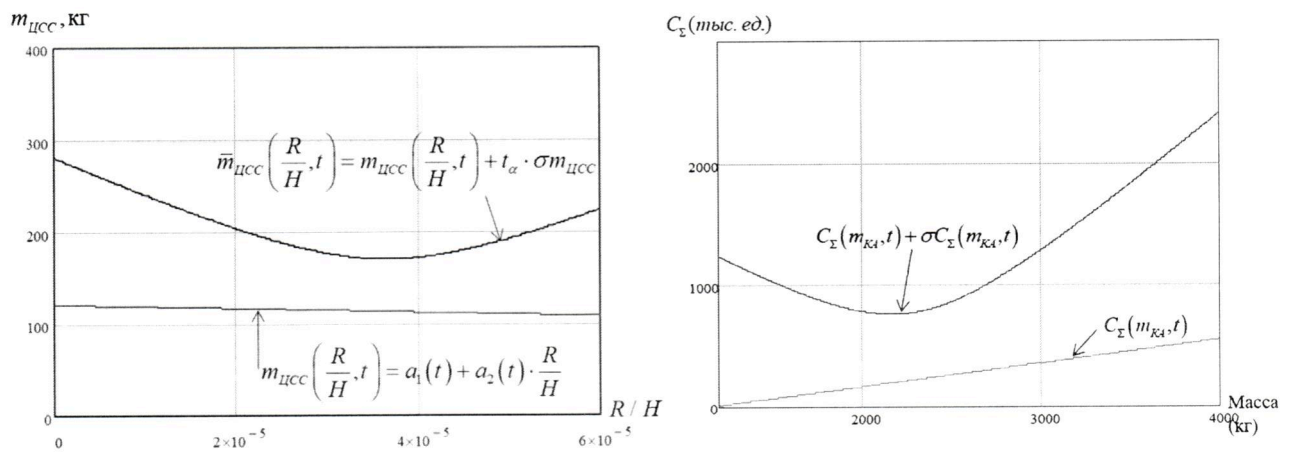


Рисунок 2 - Зависимость массы ЦСС от $\frac{R}{H}$ и стоимости космического аппарата от массы КА в случае прогнозирования к моменту $t_{np} = 2020$ г.

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 системе мониторинга к моменту t_{np}).

$$C_{\Sigma МЦА} ({}^i П_{МЦА}, \beta(t_{np})) \rightarrow \min, \quad (1)$$

$$П_{МЦА} \in G_{зад} ({}^{i-1} П_{КАМ}, t_{np}),$$

$$m_{МЦА} (П_{ЦСС}, m_{ЦСС}, П_{ССПИ}, m_{ССПИ}, П_{СТР}, m_{СТР}, m_{Кон}, \beta(t_{np})) \leq m_{МЦА}^{зад^{j-1}}, \quad (2)$$

$$W_{МЦА}(\Pi_{ЦСС}, m_{ЦСС}, \Pi_{ССПИ}, m_{ССПИ}, \Pi_{СТР}, m_{СТР}, m_{Кон}, \beta(t_{np})) \geq W_{МЦА}^{зад^{i-1}}, \quad (3)$$

$$P_{МЦА}(\Pi_{ЦСС}, m_{ЦСС}, \Pi_{ССПИ}, m_{ССПИ}, \Pi_{СТР}, m_{СТР}, m_{Кон}, \beta(t_{np})) \geq P_{МЦА}^{зад^{i-1}}, \quad (4)$$

$$t_{np} = t_{np}^{зад},$$

$$\Pi_{УКП} = \Pi_{УКП}^{зад},$$

$$\Pi_{МЦА} = (\Pi_{ЦСС}, m_{ЦСС}, \Pi_{ССПИ}, m_{ССПИ}, \Pi_{СТР}, m_{СТР}, m_{Кон}, \beta(t_{np})),$$

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

$m_{МЦА}(\cdot)$ - масса МЦА,

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

$P_{МЦА}(\cdot)$ - надежность МЦА,

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

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

$W_{МЦА}^{зад^{i-1}}, P_{МЦА}^{зад^{i-1}}$ - заданные (требуемые) значения показателей функциональной эффективности. Их значения определяются на более высоком уровне управления разработкой при прогнозировании характеристик КСМ.

Задача прогнозирования характеристик МЦА записана как задача оптимизации проектных параметров МЦА $\Pi_{МЦА}$ при заданных значениях определяющих параметров - $\beta(t_{np})$ и при наличии ограничений (2- 4). По существу это многокритериальная и многопараметрическая задача оптимального проектирования. 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 $m_{ЦСС}, m_{ССПИ}, m_{СТР}, m_{Кон}$).

На рисунке 3 показан алгоритм решения задачи оценки характеристик модуля МЦА (подсистемы КА) при заданных функциональных и параметрических связях (см. записи (2)-(4)). 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 (2), (3), (4) (т.е. определение параметров МЦА с учетом динамики внешних и внутренних связей). В качестве метода оптимизации в общем случае используется случайный поиск.

Разработанная методика решения задачи включает последовательное решение двух главных задач: 1) прогнозирование динамических (определяющих) параметров (это коэффициенты массовых и стоимостных зависимостей) к моменту реализации проекта и 2) оптимизация 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.

В работе получены необходимые соотношения для характеристик перспективных КАМ на высоких орбитах.

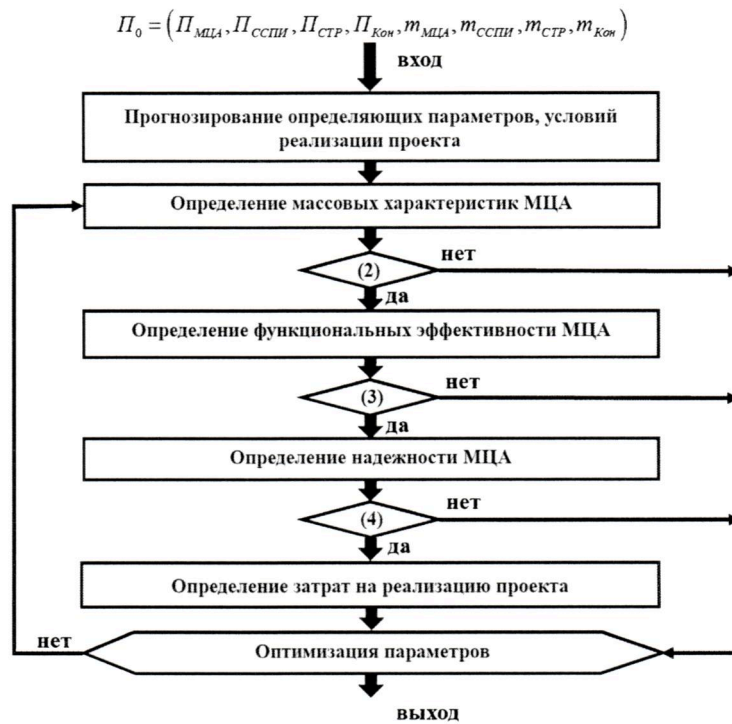


Рисунок 3 – Алгоритм решения задачи прогнозирования характеристик МЦА

1) Модели для определения массы, функциональной эффективности КАМ.

Масса КА определяется суммированием масс 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 приведены проектные модели для оценки массовых характеристик перспективного МЦА. Для определения массы УКП обычно используется данные известных проектных решений. Соответствующие проектные модели имеют вид:

$$m_{\text{ЦСС}}\left(\frac{R}{H}, t_{\text{np}}\right) = \bar{m}_{\text{ЦСС}_1}(t_{\text{np}}) + \bar{m}_{\text{ЦСС}_2}(t_{\text{np}}) \cdot \left(\frac{R}{H} - \frac{\bar{R}}{H}\right),$$

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

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

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

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

где $\bar{m}_{\text{ЦСС}_1}(t_{\text{np}}), \bar{m}_{\text{ЦСС}_2}(t_{\text{np}})$ – статистические коэффициенты. Следует обратить внимание, что последние зависят от времени прогноза t_{np} .

Для определения $m_{\text{ССПИ}}, m_{\text{СТР}}$ и $m_{\text{Кон}}$ в случае прогнозных исследования КА используется метод базовых коэффициентов.

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

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

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

На рисунке 4-1 приведена зависимость массы МЦА от пространственных разрешений при заданной высоте орбиты в случае прогноза массы МЦА к моменту $t_{\text{np}} = 2016, 2020, 2025$ г.г. При уменьшении R/H масса МЦА увеличивается. Для перспективных КАМ прогнозные оценки массы МЦА к $t_{\text{np}} = 2025$ г. и $R/H = 1.5 \cdot 10^{-5}$ лучше (меньше) оценок $m_{\text{МЦА}}$ при $t_{\text{np}} = 2016$ г. в 1.41 раза.

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

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

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

$$110 \leq m_{ЦСС} \leq 150,$$

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

$$5 \leq N_{кан} \leq 16,$$

3) Проектные модели определения технико-экономических характеристик перспективных КАМ.

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

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

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

На основе опытных данных получены зависимости:

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

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

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

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

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

На рисунке 4-2 представлена зависимость затрат на производство первого образца МЦА от массы МЦА и времени прогноза. Зависимость показывает, что время прогноза по сравнению с массой сильно влияет на затраты на производство первого образца МЦА.

Как видно, стоимости производства СТР и конструкции является малой величиной по сравнению со стоимостями ЦСС и ССПИ. Поэтому, принимая во внимание, что точность моделей затрат не велика, при выполнении сравнительного

анализа перспективных КАМ значением стоимостей СТР и конструкции можно пренебречь.

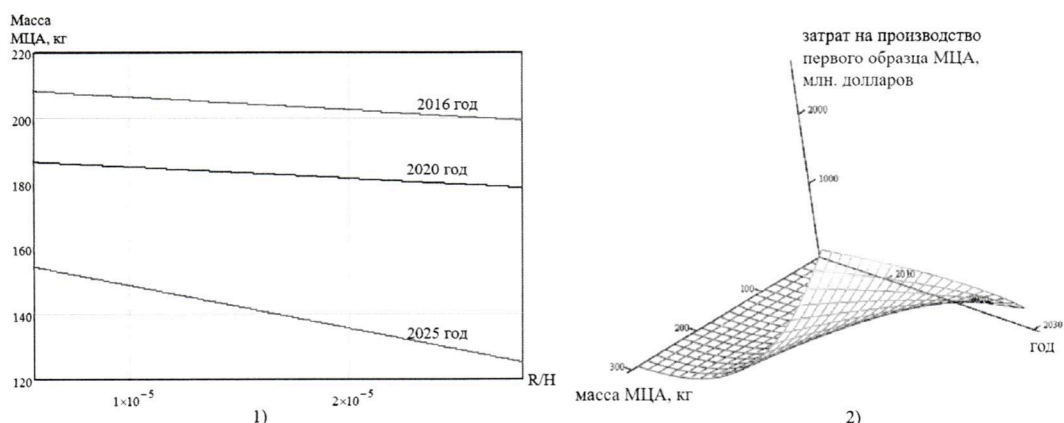


Рисунок 4 – 1) Зависимость массы МЦА от разрешения;
2) Зависимость стоимости МЦА от массы МЦА и t_{np}

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 внешних и внутренних связей), 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.

Анализ показал, что 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 он позволяет повысить надежность и снизить риск реализации проекта, способствует международной кооперации, устойчивости научно-технического прогресса при развитии космических технологий.

С помощью разработанных методик прогнозирования характеристик перспективных КАМ проведена оценка их технико-экономических характеристик (модификаций КАМ) при наличии ограничений (динамики внешних и внутренних связей). Многокритериальный сравнительный анализ модификаций КАМ позволяет выбрать рациональные решения при наличии технико-экономических

ограничений. Состав целевой аппаратуры четырех сравниваемых вариантов модификаций перспективных КАМ приведен в таблице 2.

Таблица 2 – 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 | - |

Варианты модификаций перспективных КАМ приведены на рисунке 5. Они отличаются вариантами реализации дополнительной ЦСС (GLM, GOCI-II).

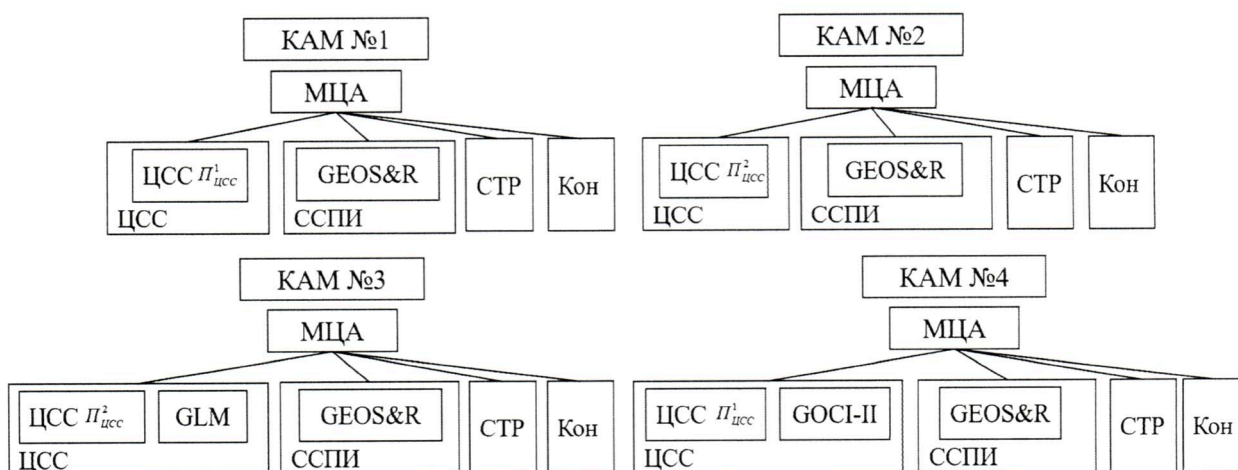


Рисунок 5 – Варианты модификаций КАМ

Проведен сравнительный анализ эффективности модификаций КАМ с различным составом ЦСС. Исследовано влияние момента реализации проекта на

приведенные затраты на производство КАМ. В таблице 3 приведены основные характеристики модификации МЦА КАМ. На рисунке 6 представлено изменение основных характеристик МЦА КАМ №1, №2, №3, №4.

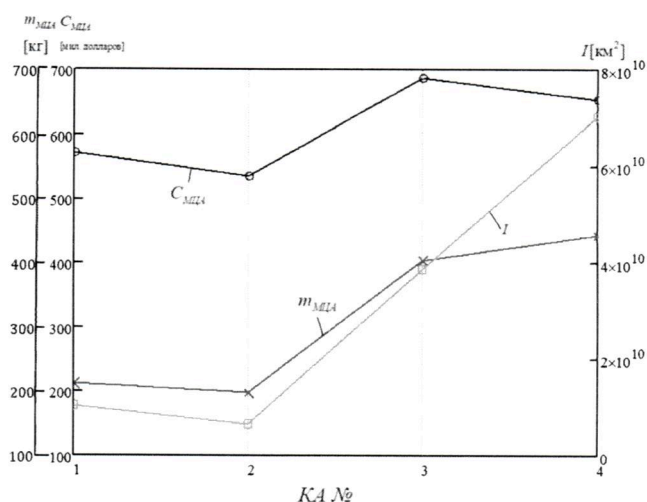


Рисунок 6 – Изменение основных характеристик МЦА КАМ №1, №2, №3, №4

Анализ показывает, что по критерию затрат на производство первого образца КАМ №2 является самым рациональным вариантом. Но у КАМ №2 разрешение ЦСС имеет худшее (меньше требуемого) значение и наименьшее значение информационной производительности. При многокритериальной оценке модификаций КАМ проводится выбор рационального проектного решения при наличии технико-экономических ограничений.

Таблица 3 – Основные массовые и стоимостные характеристики и надежности и характеристики функциональной эффективности модификации МЦА КАМ

| | № модификации КАМ | | | |
|---|---|----------------------|-------------------------|-------------------------|
| | КА №1 | КА №2 | КА №3 | КА №4 |
| Масса МЦА, кг | 210.92 | 198.07 | 391.53 | 443.08 |
| Затраты на производство первого образца МЦА (ед.) | 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 | $1.04 \cdot 10^{10} км$ | $6.45 \cdot 10^9 км$ | $3.86 \cdot 10^{10} км$ | $7.03 \cdot 10^{10} км$ |

Разработанная методика для определения характеристик перспективных КАМ позволяет решить задачи (2) - (4), а также провести необходимые комплексные технико-экономические исследования. Проведена оценка влияния точности прогнозирования определяющих параметров на оценку стоимостных характеристик перспективных МЦА и КАМ. При учете неопределенности

критерием поиска рационального решения является величина математического ожидания затрат на производство первого образца МЦА. Проведено численное моделирование оценки характеристик перспективных КАМ при наличии неопределенностей.

На рисунке 7 показано, что при числе статистических испытаний больше 500 ($N \geq 500$) $MC_{ЦСС}$ и $\sigma C_{ЦСС}$ не зависят от числа статистических испытаний.

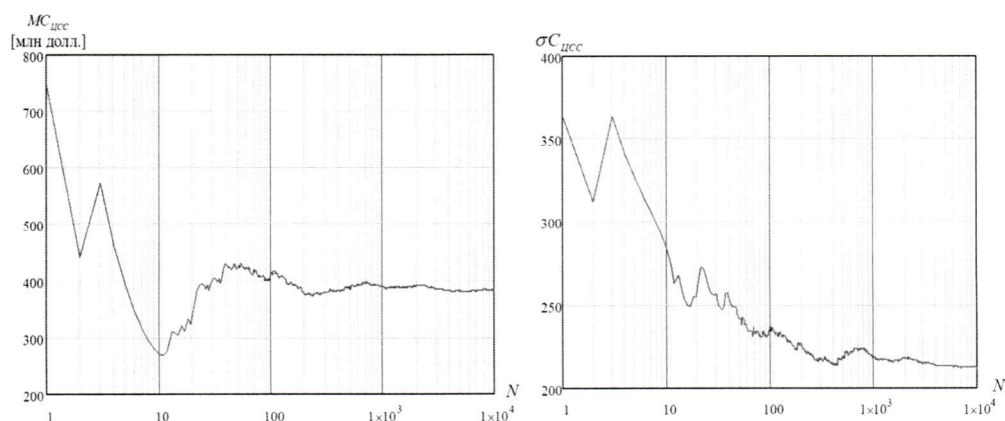


Рисунок 7 – Изменения оценки математического ожидания и среднеквадратического отклонения затрат на производство первого образца МЦА при увеличении количества статистических испытаний.

Результаты исследования точности решения в зависимости от ошибок определения коэффициентов модели $C_{МЦА} = C_{ЦСС} + C_{ССПИ} + C_{СТР} + C_{Кон}$ (случайных значений коэффициентов $\beta(t_{np})$) представлены на рисунке 8. Для определения $C_{ССПИ}, C_{СТР}, C_{Кон}$ используется метод базовых коэффициентов. При предположении, что их значения постоянны, точность 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 8 показано изменение среднеквадратического отклонения суммарных затрат от величины среднеквадратических отклонений случайных коэффициентов модели $C_{ЦСС}$. График иллюстрирует увеличение ошибки определения затрат на производство ЦСС от роста среднеквадратических отклонений вектора случайных коэффициентов модели. Достоверность полученного результата определяется числом попыток N при статистическом моделировании на каждом шаге поиска.

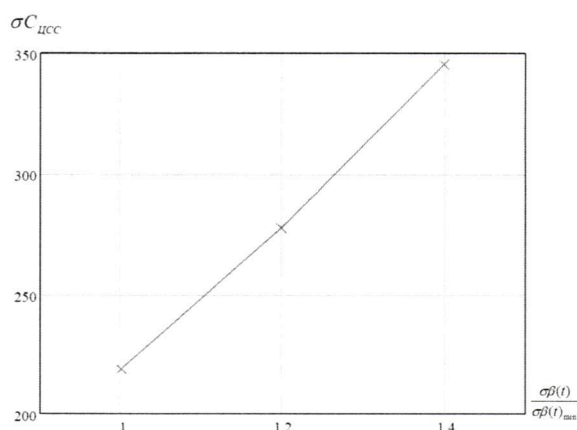


Рисунок 8 – Изменение дисперсии суммарных затрат в зависимости от точности определения коэффициентов модели

Отсюда следует, что увеличение точности прогноза определяющих параметров ($\beta(t_{np})$) модели затрат $C_{MЦА} = f(P_{MЦА}, \beta(t_{np}))$. Уменьшение $\sigma\beta(t_{np})$ на 20% приводит к уменьшению значения $\sigma C_{цсс}$ на 26.9 %, а увеличение $\sigma\beta(t_{np})$ на 20% приводит к увеличению значения $\sigma C_{цсс}$ на 24.4 %.

Результаты исследования влияния фактора времени на характеристики перспективных МЦА и КАМ представлены в таблицах 4 и 5. В таблице 4 результаты представлены при $R / H = 2.794 \cdot 10^{-5}$ (1 км на ГСО), в таблице 5 – при $R / H = 1.3971 \cdot 10^{-5}$ (0.5 км на ГСО).

Таблица 4 – 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. |
|--------------------------------|-----------------------|------------------------|
| $M_{MЦА}$ [кг] | 178.62 | 71.78 |
| I [км ² за сутки] | $2.760 \cdot 10^{10}$ | $4.1382 \cdot 10^{10}$ |
| $C_{MЦА}$ [млн долл.] | 401.59 | 580.16 |

Таблица 5 - 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. |
|--------------------------------|-----------------------|------------------------|
| $M_{MЦА}$ [кг] | 183.59 | 103.03 |
| I [км ² за сутки] | $2.492 \cdot 10^{10}$ | $4.2958 \cdot 10^{10}$ |
| $C_{MЦА}$ [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 вырастут на 90.2% по сравнению с затратами на производство первого образца МЦА при реализации проекта в 2020 г. и одновременно при реализации проекта в 2030 г. масса МЦА уменьшается на 78.1% по сравнению с массой МЦА при реализации проекта в 2020 г. (рис. 9).

Таким образом применение новых технологий позволяет уменьшить массу МЦА перспективных КАМ по сравнению с базовыми технологиями реализации к 2020 г. Одновременно новые технологии приведут к увеличению затрат на проект (из-за применения новых конструкторско-технологических решений, новых материалов, использования патентов и т.д.) и затрат на производство первого образца МЦА.

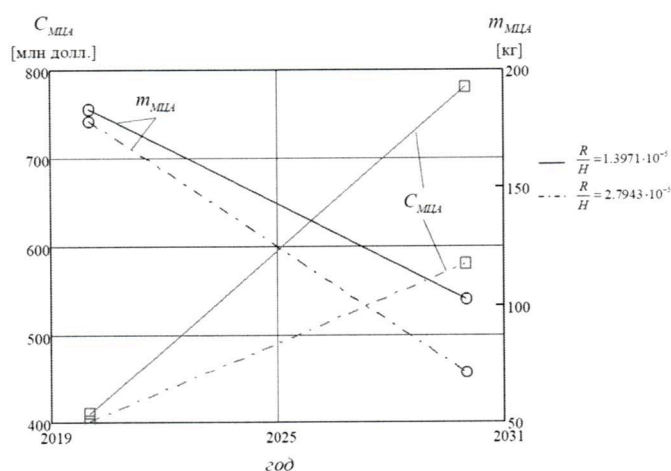


Рисунок 9 – Изменение затрат на производство первого образца МЦА и массы МЦА в зависимости от срока реализации проекта

Заключение

1. Разработана методика комплексного анализа характеристик перспективных КАМ природной среды. Методика включает решение двух главных задач: 1) прогнозирование динамических (определяющих) параметров (коэффициентов массовых и стоимостных зависимостей) к моменту реализации проекта и 2) оптимизация 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 показал, что при увеличении времени прогноза до 2030 г. обеспечивается необходимый (требуемый) уровень пространственного разрешения при уменьшении массы МЦА 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) будут иметь значения $m_{МЦА} = 443.08$ 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 с использованием метода статистического моделирования. В частности показано, что точность определения $\bar{C}_{ЦСС}$ прямо влияет на точность ($\sigma \bar{C}_{\Sigma МЦА}$) определения стоимости производства МЦА.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Чо Хюнчжэ, Матвеев Ю.А. Перспективы развития средств космического мониторинга природной среды // К.Э. Циолковский и этапы развития космонавтики, г. Калуга, 2015. – С.290 – 291.
2. Чо Хюнчжэ, Матвеев Ю.А. Задача прогнозирования характеристик перспективных КА мониторинга природной среды // XI Академические чтения по космонавтике, М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2016. - 171 с.
3. Чо Хюнчжэ, Матвеев Ю.А. Развитие космических средств мониторинга природной среды на высоких орбитах // Вестник «НПО имени С. А. Лавочкина», №4, 2016. – С.126 - 131.
4. 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. - 275 с.
5. Чо Хюнчжэ, Матвеев Ю.А. Задача прогнозирования характеристик перспективных космических аппаратов мониторинга // Общероссийский научно-технический журнал «Полет», № 5-6, 2016. – С. 53– 58.
6. Чо Хюнчжэ, Матвеев Ю.А. Прогнозные оценки характеристик перспективных КА мониторинга природной среды // XII Академические чтения по космонавтике, М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2017. – 191 с.
7. Чо Хюнчжэ, Матвеев Ю.А. Прогнозные оценки характеристик перспективных космических аппаратов мониторинга // Общероссийский научно-технический журнал «Полет», № 7, 2017. – С. 36 - 44.
8. 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. – С.336 – 337.
9. 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. – 174 с.