

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)»

На правах рукописи



Белый Руслан Владимирович

**КОМПЛЕКСНАЯ МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО
ОБЛИКА ПЕРСПЕКТИВНЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ
ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ**

05.07.02 – Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
Ламзин Владимир Алексеевич
кандидат технических наук, доцент

Москва – 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 Состояние и направление развития космических аппаратов дистанционного зондирования Земли.....	10
1.1 Роль место космических аппаратов дистанционного зондирования Земли в современном мире.....	10
1.2 Анализ НИОКР в области усовершенствования целевой аппаратуры и бортовых систем КА ДЗЗ	16
1.3 Анализ технических требований, предъявляемых к перспективным космическим аппаратам дистанционного зондирования Земли	30
1.4 Постановка задачи	40
1.5 Выводы по главе 1	46
2 Комплексная методика формирования технического облика перспективных космических аппаратов дистанционного зондирования Земли	48
2.1 Информационно-аналитическая модель процесса функционирования космических аппаратов ДЗЗ.....	49
2.2 Формирования информационного набора параметров, КА ДЗЗ с учетом выполнения целевых задач.....	60
2.2.1 Метод выявления характеристик КА ДЗЗ, оказывающих наибольшее влияние на эффективность его функционирования	61
2.2.2 Метод снижения размерности пространства исследуемых параметров на основе применения статистических методов	63
2.3 Оценка основных параметров перспективных космических аппаратов дистанционного зондирования Земли.....	71
2.3.1 Прогнозирование характеристик КА ДЗЗ на основе выявления временных тенденций изменения комплексных показателей эффективности и комплексных статистических показателей.....	72

2.3.2	Математические модели функциональных связей между основными параметрами КА	77
2.4	Выводы по главе 2	88
3	Экспериментальное исследование комплексной методики по формированию технического облика перспективных космических аппаратов дистанционного зондирования Земли.....	90
3.1	Результаты выявления информативного набора параметров, характеризующих технический облик КА ДЗЗ.....	90
3.1.1	Определение основных характеристик КА ДЗЗ, влияющих на эффективность его функционирования	90
3.1.2	Определение комплексных статистических показателей.....	94
3.2	Анализ временных тенденций и прогноз развития характеристик космических аппаратов ДЗЗ.....	98
3.3	Формирование функциональных зависимостей и математических моделей для получения численных оценок основных параметров КА ДЗЗ	102
3.4	Расчет технического облика перспективных КА ДЗЗ на заданный период времени.....	112
3.5	Выводы по главе 3	120
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	123
	СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	125
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	126
	ПРИЛОЖЕНИЕ А. Результаты анализа программ НИОКР, проводимых в области создания перспективных КА ДЗЗ	134
	ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Экспертный анализ	142
	ПРИЛОЖЕНИЕ В. Графики разброса данных.....	151
	ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Функциональные связи между основными параметрами КА ДЗЗ	155

ВВЕДЕНИЕ

Диссертационная работа посвящена разработке методики для формирования технического облика (ТО) и исследования перспективных космических аппаратов (КА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) для удовлетворения требований потребителей информации.

Актуальность темы исследования.

Практика создания новых космических систем (КС) ДЗЗ в последнее время выдвигает как особо важную задачу совершенствование управления разработкой, ориентированную на сокращение временных и стоимостных затрат. Ключевая задача внешнего проектирования при этом — найти оптимальные (компромиссные) параметры КА, удовлетворяющие ограничениям заданным техническими требованиями, при этом обеспечить надежную эксплуатацию КА в заданных условиях с заданными экономическими нормативами. В основном такие задачи сводятся к модернизации уже существующих КА. Риски в таком случае должны сводиться к минимуму.

Развитие техники и технологий взаимообусловлены, в связи с этим в интересах сбалансированного развития отечественной космонавтики и предотвращения наметившегося технического отставания, интерес представляют исследования и прогнозирование основных направлений развития отечественных и зарубежных КА. Эти данные используются при формировании ТО перспективных КА, обоснования новых видов космической техники и решении вопросов о реализации того или иного проекта. При таком подходе необходимо провести большую работу: собрать статистические данные, построить математические модели, сделать выборку по заданным показателям эффективности, выбрать наиболее предпочтительный облик по интересующим критериям.

Все это обуславливает актуальность создания комплексной методики формирования ТО перспективных КА ДЗЗ с востребованным в будущем и удовлетворяющим потребностям заказчика набором параметров.

Степень разработанности темы исследования.

При разработке методики формирования технического облика перспективных космических аппаратов КА дистанционного зондирования Земли ДЗЗ используются результаты, полученные в научных школах МАИ (работы Д.Н. Щеворова, Ю.А. Матвеева, А.А. Лебедева, И.С. Голубева, Е.В. Тарасова и других)[26, 27, 28, 29, 33, 34, 46], обобщается известный практический опыт организаций и предприятий Федерального космического агентства (Роскосмоса): АО «ЦНИИМаш», АО «Организация «Агат», ПАО РКК «Энергия», АО «НПО имени С.А. Лавочкина», АО ВПК «НПО машиностроения», АО «Корпорация «ВНИИЭМ», АО «ГКНПЦ имени М. В. Хруничева», АО «РКЦ «Прогресс», АО «КБ «Арсенал» и др.

В диссертации при решении ряда частных задач прогнозирования ТО перспективных КА ДЗЗ используются результаты решения задач проектирования отечественных и прогнозирования развития зарубежных космических аппаратов, изложенных в научных трудах Р.Н. Ахметова, А.И. Бакланова, А.В. Борисова, А.В. Горбунова, В.И. Карасева, А.А. Лебедева, Л.А. Макриденко, Г.Т. Петровского, Г.М. Полищука, В.И. Хижниченко и др. [4, 14, 15, 19, 23, 24, 29, 35, 36, 37, 43, 50]. Эти труды используются в работе в качестве основы при решении частной научно-технической задачи прогнозирования ТО перспективных КА ДЗЗ.

Необходимо отметить значительный вклад в моделирование информационно-космических систем Д.М. Макаренко и А.Ю. Потюпкина [30, 31].

Подходы, предложенные в этих работах, требуют высокой степени подготовки экспертов и в недостаточной степени учитывают особенности показателей эффективного функционирования в интересах конечных потребителей. Совершенствование методик оценки образцов ракетно-космической техники, прогнозирования технического облика перспективных систем является, таким образом, перспективным и пока, к сожалению, недостаточно реализованным направлением.

Целью работы является разработка методики, позволяющей в условиях ограниченного количества, противоречивости и недостаточной целостности

информации о перспективных зарубежных КА ДЗЗ получить научно обоснованную прогнозную оценку ТО перспективных КА ДЗЗ в заданный период времени, базируясь на выбранных показателях эффективности.

Задачи:

1. Исследовать научно-технический отечественный и созданный за рубежом задел в области технологий КА ДЗЗ. Провести классификацию по функциональному признаку. Определить минимально допустимые требования к перспективным КА ДЗЗ.
2. Разработать комплексную методику формирования технического облика перспективных КА ДЗЗ.
3. Сформировать на основе разработанной методики ТО перспективных КА ДЗЗ в заданный период времени. Провести сравнительный анализ с реализованными проектами, выявить проблемные области технических и технологических решений.

Объект исследования – перспективные КА ДЗЗ.

Предмет исследования - модели и методы исследования прогнозирования технического облика перспективных КА ДЗЗ. При этом под **техническим обликом** понимается совокупность структурных и параметрических данных, отражающих наиболее существенные технические решения и особенности КА ДЗЗ, состав и способ объединения его функционально связанных элементов между собой, а также тактико-технические характеристики КА в целом.

Научная новизна работы определяется:

– анализом работ по созданию перспективных КА оптико-электронного наблюдения на основе методов поискового и нормативного прогнозирования, с последующим определением области возможных решений и обоснованием требований к перспективным КА ДЗЗ;

– разработкой комплексной методики формирования ТО перспективных КА ДЗЗ в заданный период времени, которая позволяет учесть выбранные заказчиком показатели эффективности;

– проведением экспериментального исследования методики формирования ТО перспективных КА ДЗЗ, определением основных характеристик КА в заданный период времени, что позволит оценить на ранних стадиях проектирования проблемные области существующих технических и технологических решений.

Теоретическая и практическая значимость работы.

В работе впервые решена актуальная научно-техническая задача: с позиции системного подхода разработана методика формирования ТО КА ДЗЗ в условиях крайне ограниченной информации в интересах подготовки управленческих решений при программном планировании развития отечественного космического машиностроения.

На основе предложенной методики разработан сценарий развития КС ДЗЗ на период до 2030 года и сделаны прогнозные оценки ТО КА ДЗЗ, а также бортовой целевой аппаратуры.

Разработанные математические модели доведены до алгоритмов и реализованы на ПЭВМ. С их помощью оценена эффективность перспективных систем ДЗЗ в заданный период времени и произведена верификация прогноза ее технического облика.

Результаты диссертации нашли практическое применение в научно-исследовательских работах по экспертному обоснованию основных направлений, планов и программ развития ракетно-космической техники, а также при оценке ожидаемых результатов и требуемых уровней тактико-технических характеристик отечественной системы ДЗЗ.

Разработанная методика носит универсальный характер и может быть применена при прогнозировании ТО других средств космической техники. Положительный эффект при этом реализуется через своевременное распределение и выделение ресурсов на реализацию мероприятий по обеспечению заданных эксплуатационно-технических характеристик системы, на создание технологической, экспериментальной и производственной базы, что в

конечном счете приводит к сокращению затрат на систему и уменьшению диспропорции в сроках её создания и морального устаревания.

Методология и методы исследования.

Для решения поставленных в диссертации задач использовались: методы регрессионного анализа; методы корреляционного анализа; факторный анализ; экспертный анализ; методы последовательных уступок и релаксации; анализ временных трендов.

Для разработки программ для ЭВМ и проведения вычислительных экспериментов использовались компьютерные пакеты: Matlab, Statistica 10, curveexpert 2.1, MS Exel 2010, TableCurve 3D v4.

Положения, выносимые на защиту.

1. Классификация перспективных КС ДЗЗ и предъявляемые требования к каждому типу КА.
2. Комплексная методика формирования технического облика перспективных КА ДЗЗ.
3. Результаты экспериментальной отработки комплексной методики формирования технического облика перспективных КА ДЗЗ.

Степень достоверности и апробация результатов.

Обоснованность и достоверность полученных результатов подтверждается применением научных методов исследования, работоспособностью разработанного в диссертации научно-методического аппарата, а также непротиворечивостью результатов исследования с данными, полученными в других организациях – АО «РКЦ «Прогресс», ФГБОУ ВО МАИ (НИУ).

Основные положения и результаты диссертации изложены в научных статьях и докладах на 53-х Научных чтениях памяти К.Э.Циолковского, VIII Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли», Научно-практической конференции «Мировая экономика в условиях глобальной неопределенности трендов развития и рисков».

Результаты исследования были внедрены в работы АО «Научного центра оперативного мониторинга Земли» и использованы для экспертной оценки новых перспективных КА ДЗЗ.

Автор выражает признательность коллективу кафедры № 601 «Космические системы и ракетостроение» Московского авиационного института имени Серго Орджоникидзе за конструктивное обсуждение разработанных теоретических положений и ценные замечания, способствующие улучшению содержания диссертации.

1 Состояние и направление развития космических аппаратов дистанционного зондирования Земли

1.1 Роль место космических аппаратов дистанционного зондирования Земли в современном мире

Человечество на протяжении практически всей своей истории стремилось к использованию самых передовых достижений для исследования и получения информации о процессах, происходящих на Земле. Одним из передовых способов получения информации о больших территориях и растянутых во времени глобальных процессах является применение КА ДЗЗ. Неудивительно, что за последние 20 лет было запущено более 300 спутников ДЗЗ. Высокая оперативность доставки информации до потребителя позволяет оценивать быстроменяющиеся явления, как пример, таяние льдов и сход снежных покровов, определять состояние сельскохозяйственных посевов и количество растительной массы пастбищ, контролировать вырубку лесных массивов, циклоны, обнаруживать наводнения, помогать МЧС ликвидировать лесные пожары и другие техногенные катастрофы.

Для решения задач наблюдения из космоса используются КА широкого класса и назначения, оснащенные различными видами целевой аппаратуры и функционирующие на орбитах с широким диапазоном высот. Классификация космических средств наблюдения представлена на рисунке 1.

В подтверждение вышеуказанным выводам представлены требования к линейному разрешению на местности изображений для решения задач различных классов [19, 32].

Современные космические системы ДЗЗ обладают возможностью получения изображений земной поверхности с максимальным линейным разрешением на местности (ЛРМ) 0,6 м. Таким образом, по критерию разрешающей способности они покрывают большинство поставленных задач.

Задачи КА ДЗЗ можно разделить на наблюдательные к ним относятся создание крупномасштабных и мелкомасштабных карт разной тематики, обнаружение и наблюдение эволюционных природных процессов;

метеорологические – наблюдение облачности и изменение физических характеристик атмосферы и подстилающей поверхности; геодезические – уточнение и дальнейшее развитие геодезической основы, уточнение фигуры Земли и поля тяготения; навигационные – оперативное определение координат судов, экспедиций, буровых платформ и пр. Применении ДЗЗ позволяет получать большую экономическую отдачу, прежде всего в лесных водных и сельском хозяйствах. Так по космическим снимкам прогнозируется урожай, оценивается качество агротехнических и агрохимических мероприятий.

В водном хозяйстве на базе космических снимков обосновывают проекты мелиоративных и водохозяйственных объектов (особенно актуально для засушливых районов), осуществляют прогнозирование потенциальных районов промысла рыбы, а также контроль загрязнения морей и океанов. Определение зон сильного волнения моря и штормов, а также информация о местонахождении айсбергов и ледяных необходима для морского транспорта.

В области геологоразведки преимуществом является охват больших территорий. На основе таких снимков создаются геологические карты, определяются перспективные участки для поиска залежей золота, платины, нефти, газа и других полезных ископаемых.

Ключевую роль ДЗЗ играет в ликвидации последствий стихийных бедствии, будь то наводнение, пожары, крушение самолетов, обвалы горной породы и др. в общем, все те события, которые требуют оперативного получения информации и находятся в труднодоступных местах или распространяются на большие территории и требуют участия КС.

Метеорология и другие науки связанные с наблюдением за Землей, ее атмосферой биосферой, океанология и пр. были бы невозможны в таких масштабах.

Результаты работы координатно-метрических приборов спутников очень важны для службы кадастра геодезии и строительства. Для последнего десятилетия характерно то, что информация с высокодетальных КА ДЗЗ по своим параметрам

стала конкурировать с данными аэрофотосъемки, которые необходимы для создания геоинформационных систем, топографических планов и т.п. Это стало

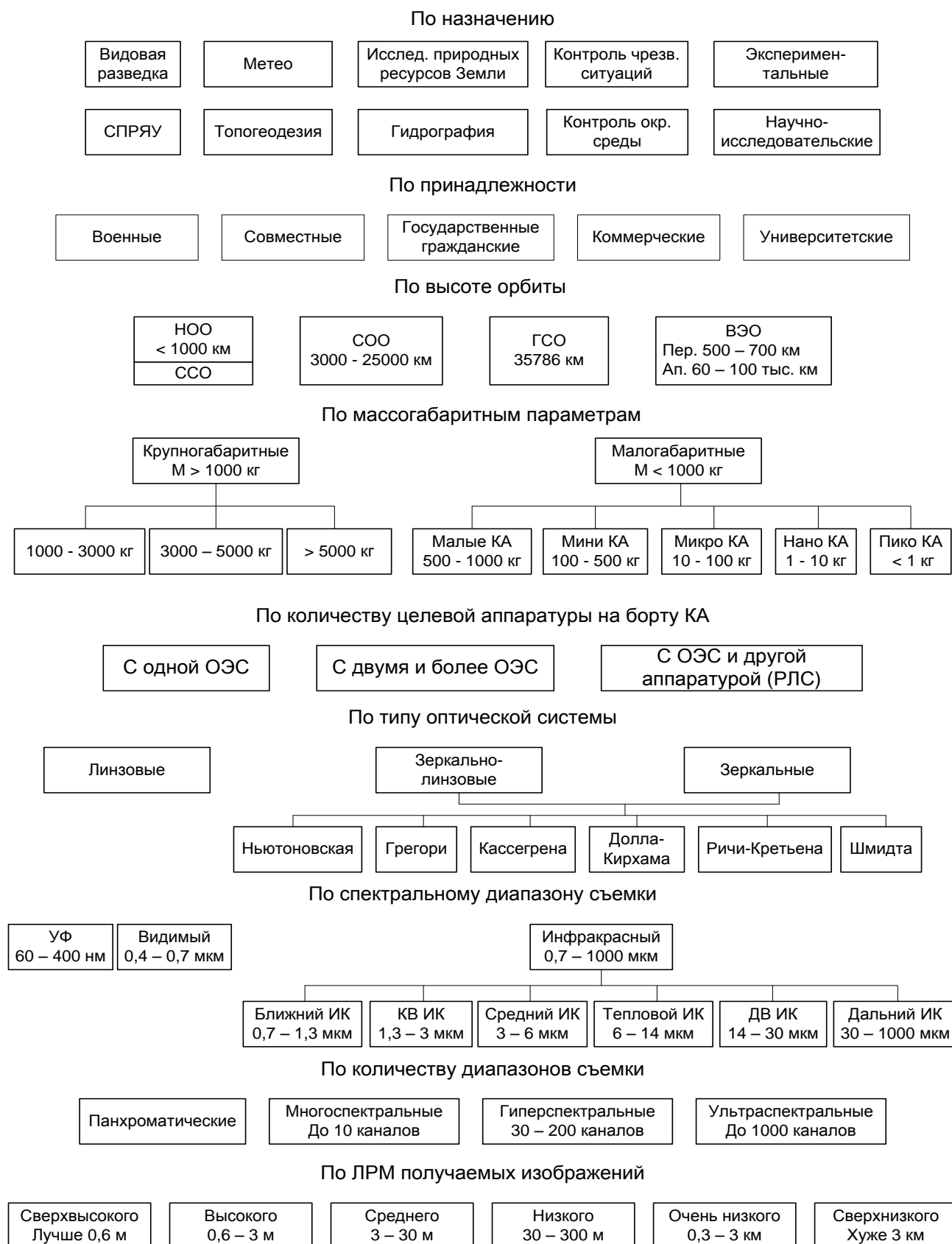


Рисунок 1 – Классификация космических аппаратов наблюдения

возможным благодаря повышению точности координатной привязки снимка с высокодетальных КА ДЗЗ до единиц метров.

Прежде чем приступить к проектированию спутниковой системы ДЗЗ, необходимо выявить тенденции на рынке космической информации, оценить требования потребителей космической информации к ее качеству и оперативности доставки, проанализировать последние достижения в области целевой аппаратуры, выявить возможности создания аппаратуры нового поколения в заданный период времени.

Методология и теоретические положения анализа основаны на исследовании основных ОКР и готовых изделий, находящихся в эксплуатации у разных стран мира. На данный момент в более чем 20 странах мира ведутся разработки новых КС ДЗЗ. В период с 2000 по 2020 гг. на околоземную орбиту было выведено более 40 типов спутников нового поколения с оптико-электронной целевой аппаратурой высокого и сверхвысокого разрешения (табл.1) [26, 27].

Спутники ДЗЗ можно классифицировать как малые КА с маленькой производительностью, картографические высокого разрешения и детальные сверхвысокого разрешения.

К малым КА высокого разрешения можно отнести успешный запуск в марте 2021 года южнокорейского спутника CAS500-1, имеющего при своем малом весе в 500 кг. Внушительные заявленные характеристики линейного разрешения в 0,5 метра. Спутник был разработан в корейском институте аэрокосмических исследований (KARI). Организация уже имела успешный опыт запусков КА Kompsat-1 (1999), Kompsat-2 (2006), Kompsat-3 (2012), последний из них имел пространственное разрешением 0,7 м.

В США отрасль ДЗЗ это бизнес, причем львиную долю дохода от него получает компания «Maxar». Данная компания является лидером в разработке КА сверхвысокого разрешения. В последние годы компания интересуется перспективными проектами по уменьшению массы КА без потери для качества снимков и такие проекты находятся на стадии реализации. В 2021 году компания

планирует пополнить свою группировку серией спутников WorldView Legion, эти малые КА будут иметь вес в районе 750 кг., и обеспечивать заказчиков космическими снимками с линейным разрешением 0,3 м., единственным минусом является маленькая полоса захвата в 9 км., но по заявлению производителей это можно компенсировать количеством КА. Пока же компания занимает первое место по предоставлению коммерческих снимков сверхвысокого разрешения в мире, используя ресурс, как действующих КА, так и архивные снимки вышедших из строя КА (Iconos, QuickBird, GeoEye-1 WorldView-3, WV-4). Кроме этого в США активно разрабатывает сверхмалые спутники серии BlackSky Global-9, которые при заявленном весе всего 56 кг., планируют предоставлять снимки с ЛРМм около 1 метра.

В соответствии с Федеральной космической программой РФ, были осуществлены запуски шести малых КА типа «Канопус-В» (1 КА в 2012 г., 1 КА в 2017 г., 3 КА в 2018 г.) ЦА достигает средних параметров разрешения в ПХ режиме 2,1м. и МС около 10,5м., полоса захвата порядка 20 км. Белорусское ОАО «Пелинг» совместно с отечественным АО «ВНИИЭМ» поставили себе цель разработать перспективный КА с ЛРМ до 0,5 м. в ближайшее время 2020-2025 гг. По концепции развития КС ДЗЗ на период до 2030 г., также планируется наращивание российской ОГ ДЗЗ запуском до четырех спутников серии «Обзор-О». В 2021 году Россия должна запустить четвертый спутник серии «Ресурс-П», а также новый КА с разрешения 0,4 метра «Ресурс-ПМ».

Франция совместно с Бельгией и Швецией за две прошедшие декады разработала и запустила КА ДЗЗ SPOT-5 (2002 г.), SPOT-6 (2012 г.), SPOT-7 (2014 г.), а также КА сверхвысокого разрешения Pleiades-1A (2011 г.), Pleiades-1B (2012 г.). Одной из ключевых особенностей КА серии «Pleiade» – высокая манёвренность и получение снимков с точность географической привязки меньше 3 м. которые они получают по бортовым навигационным системам, а прибегая к апостериорной обработке используя точные координаты нескольких точек на снимке геопривязка определяется на уровне 1 м.

Таблица 1. Основные характеристики КА ДЗЗ

Космический аппарат	Год запуска	САС, годы	Высота орбиты, км	Линейно разрешение, м	Ширина полосы захвата, км	Масса, кг
Alos-1	2006	5	697	2,5	70	4000
Alos-3	2015	5	618	0,8	50	2100
Asnaro-1	2014	3	504	0,5	10	450
Egypsat-A	2019	7	668	1,0	12	1050
Eros-A	2000	4	523	1,8	15	240
Eros-b	2006	10	510	0,8	7	350
Gaofen-7	2018	8	504	1,0	60	1080
Gaofen-DW	2020	8	639	1,0	30	2000
Geoeye-1	2008	5	770	0,5	15,2	1995
Geoeye-2	2016	5	617	0,3	13,5	2800
IGS-Optical 5	2015	5	485	0,4	-	4100
KompSat-3	2012	-	683	0,7	16,8	1000
KompSat-3A	2015	-	683	0,5	12,0	1000
Orbview-3	2003	5	470	1,0	8	306
Pleiades-1A	2011	5	705	0,7	20	1015
Pleiades-1B	2012	5	705	0,7	20	1015
Quickbird-2	2001	-	450	0,6	16,5	-
Resurs-DK	2006	4	567	0,9	28	6480
Resurs-P1	2013	5	475	0,8	38	6200
Resurs-P3	2016	5	478	0,8	38	5800
Spot-5	2002	5	832	2,5	60	3000
Spot-7	2014	10	695	2,0	60	720
Worldview-2	2009	7	770	0,5	13,5	2800
Worldview-3	2014	7	617	0,3	13,5	2800
Yaogan-5	2008	5	494	1,0	24	2200
Yaogan-11	2010	5	620	2,0	40	2100
Yaogan-30	2016	5	635	1,0	-	2800

Объединенные Арабские Эмираты в 2018 г. запустили малый (330 кг.) спутник высокого разрешения (1 м.) DubaiSat-3 собственного производства.

Китай за последние годы стал лидером по запуску спутников ДЗЗ, пройдя путь с 2002 г. по 2020 г. от «Ziyuan-3» до «Gaofen-7» и до небольшого спутника «Luoji-3», процесс разработки представляет три поколения геодезических и картографических спутников, которые дополняют и взаимодействуют друг с другом. В декабре 2020 года был запущен картографический спутник «Gaofen-14», который является улучшенным КА «Gaofen-7». Он предназначен для получение высокоточных стереоизображений, цифровых моделей рельефа местности, цифровых топографических карт с ЛРМ не хуже 1 метра. Кроме того, КНР до 2022 г. планирует развернуть ОГ состоящую из 60 малых КА типа «Jilin-1 Gaofen-03» — разработанные компанией Changguang Satellite Technology Co. Легкие (40 кг), дешевые (около 1 млн \$) спутники ДЗЗ. 6 КА «Jilin-1 Gaofen-03B» с ЛРМ около 1 метра и 3 КА «Jilin-1 Gaofen-03C» способных производить видеосъемку с ЛРМ 1,2 метра были уже запущены в 2020 г.

Множество стран пытается запустить собственные КА ДЗЗ для решения своих внутренних задач народного хозяйства, так и коммерческих целей удовлетворяя спрос тех стран, которым собственный КА не по карману. В связи с этим оптимальное проектирование КА ДЗЗ и выход на первые позиции позволят России решать свои задачи, которые напрямую положительно влиять на экономику в целом, но и выйти на мировой рынок предоставления космических услуг продавая конкурентоспособные данные съемки. Кроме этого возможно проектировать КА и экспортировать целые КС для заинтересованных в собственных спутниках стран.

1.2 Анализ НИОКР в области совершенствования целевой аппаратуры и бортовых систем КА ДЗЗ

Анализ содержания программ НИОКР, материалов международных конференций, посвященных вопросам разработки малых аппаратов, КА ДЗЗ, технологиям формирования и обработки данных КА обзора земной поверхности, навигационно-временного обеспечения, связи, вопросам повышения

эффективности космических систем показал, что усовершенствованию каждого элемента подсистем КА уделяется большое внимание в НИИ, государственных и коммерческих предприятиях.

Основные направления исследований, проводимых в США в рамках Главной программы в области совершенствования целевой аппаратуры, конструкции и подсистем КА ДЗЗ, представлены в приложении 1. [31, 68, 76, 78].

В рамках ПЭ 0602601F ведется разработка технологий поляриметрической съемки земной поверхности для перспективных КА, которая, как ожидают, позволит существенно повысить возможности по распознаванию и идентификации объектов в условиях различной фоновой обстановки. Поляризационные характеристики отраженного от наблюдаемого объекта света могут нести данные о материалах, входящих в его состав, а также об ориентации его поверхностей. Основным требованием к поляриметру с получением изображений является получение полного описания поляризационных характеристик спектров от одиночного импульса лазера, что предопределяет наличие четырех каналов мгновенного измерения поляризационных свойств объекта. Для точных поляризационных измерений при небольших уровнях отраженного светового излучения требуется камера, в фокальной плоскости которой располагается матрица ПЗС-элементов с высоким квантовым выходом и небольшим шумом считывания.

Анализ показывает, что современные системы ДЗЗ обладают большими возможностями и решают широкий круг задач. Однако требование «все в одном» ведет к созданию крупногабаритного, технологически сложного и дорогого аппарата, создания под него РН тяжелого класса и обширной распределенной глобальной сети управления, приема и обработки данных.

В рамках программы проводится демонстрация новейших технологий, таких как линза Френеля (Fresnel lens), мембранные (пленочные) зеркала и сверхлегкая оптика; технологии направлены на снижение общей массы КА в 2 раза, а телескопа – в 10 раз, что позволит осуществлять запуски КА с воздушного старта. Основная цель концепции – снижение массы оптической системы. Она будет

достигаться за счет использования дифракционной оптики. В случае успешных разработок впервые дифракционная оптика будет применяться задач ДЗЗ.

США также финансирует программу Tactical Optical Sensing (программный элемент PE 0603285E), в рамках программы разрабатываются новые технологии получения изображений, включающие комбинацию обзорного и детального режимов съемки, позволяющих с помощью одной оптической системы осуществлять обзорную съемку в районе 200×200 км и высокодетальную съемку в районе 5×5 км.

В конце 2005 г. технологии, наработанные в рамках данных программ, объединены в программу «Tacsat», в рамках которой появился экспериментальный КА «Tacsat-2» (2006). Успешные испытания позволили применять данную технологию и исследовать пути по увеличению САС малых КА до 5 лет к 2025 г.

Содержание программ НИОКР, проводимых в США в области создания перспективных систем ДЗЗ, представлено на рисунке 2.

Многоспектральная и гиперспектральная съемка. Анализ характеристик аппаратуры современных и перспективных зарубежных КС ДЗЗ показывает, что разработчиками уделяется большое внимание расширению количества спектральных каналов съемки (рис. 3). Одним из основных направлений совершенствования ОЭС в этой области в настоящее время является разработка средств гиперспектральной съемки (ГСА). К настоящему времени на орбиту было выведено два американских экспериментальных аппарата с гиперспектральной аппаратурой на борту: «EO-1», разработанный по программе НАСА «Нью Миллениум», и «MightySat II.1» (в 2002 г. окончил работу). В целях оценки информативности материалов гиперспектральной съемки КА «EO-1» и «MightySat II.1» функционирует «в связке» с КА «Landsat-7» и «Terra»;

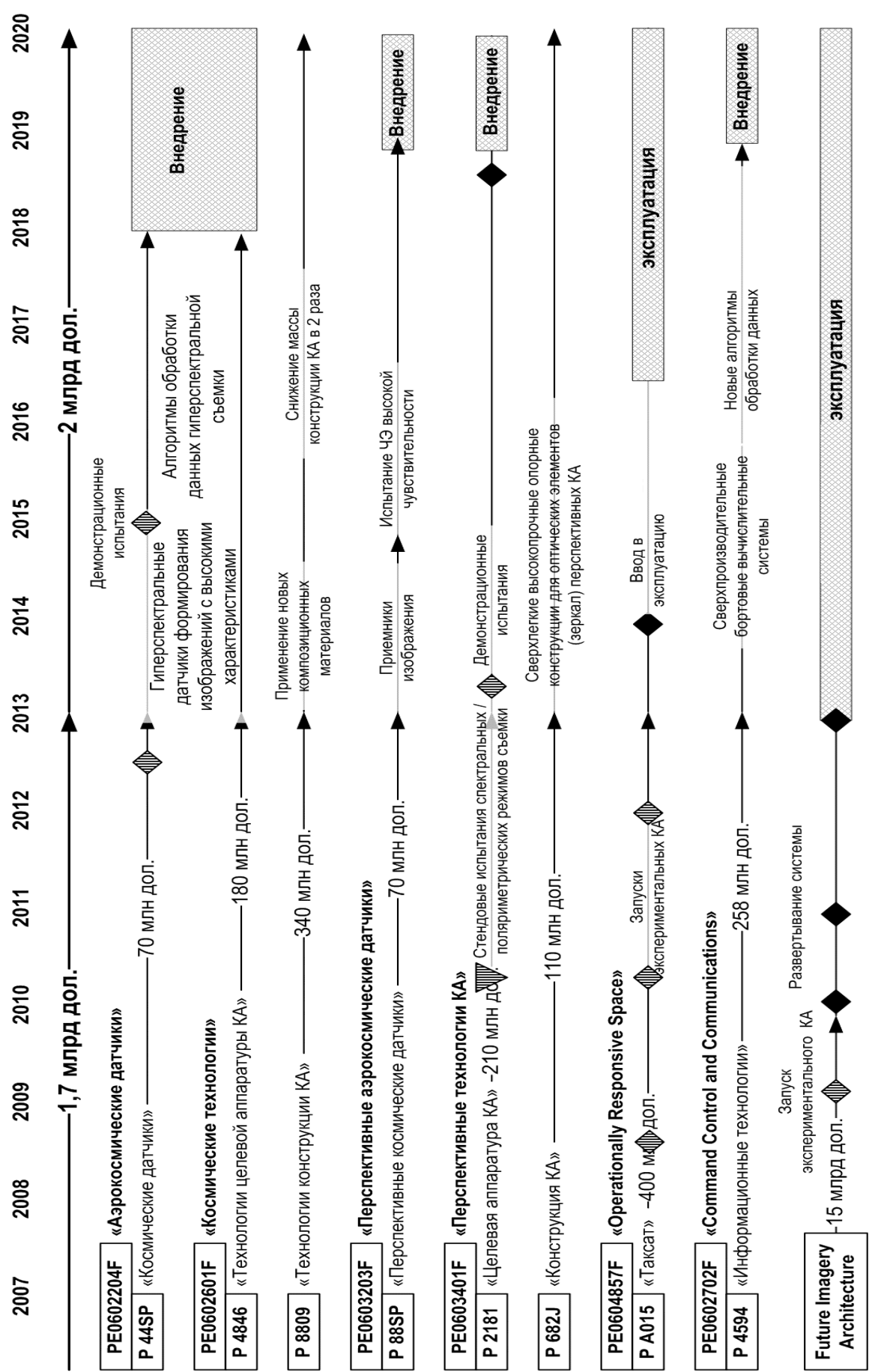


Рисунок 2 – Содержание программ НИОКР США в области создания перспективных средств ДЗЗ



Рисунок 3 – Динамика изменения количества спектральных каналов съемки

Первая информация с изготовленной фирмой «Kesler Corp.» (США) экспериментальной гиперспектральной камеры FTHSI, установленной на КА «MightySat II.1», стала поступать на Землю в августе 2000 г.

Гиперспектральный метод наблюдения, по сравнению с обычной спектрометрией, позволяет полностью использовать рабочий диапазон чувствительности ФЭП. Согласно предварительной оценке, в период до 2025–2030 гг. ГСА позволит с высоты 450–500 км получать изображения с ЛРМ 5–10 м, а после 2030 г. ЛРМ должно быть улучшено до уровня 1–3 м. При разработке аппаратуры ГСА особое внимание уделяется следующим проблемам:

- повышению контрастной чувствительности аппаратуры;
- созданию процессоров обработки сигналов ГСА съемки на борту КА;
- созданию аппаратуры с числом спектральных каналов до нескольких сотен;
- методам обработки изображений ГСА.

Разработка гиперспектральной и усовершенствование многоспектральной оптико-электронной аппаратуры позволит значительно повысить информативность космических систем ДЗЗ.

В целях практической реализации много- и гиперспектральных систем съемки в США проводятся исследования, направленные на создание адаптивных средств, которые будут обладать возможностью изменения параметров съемки в зависимости от решаемой задачи и условий применения. К числу основных изменяемых параметров относятся пространственное и спектральное разрешение.

Основными ограничениями по расширению количества спектральных каналов съемки на КА ДЗЗ являются объем бортового ЗУ и пропускная способность каналов передачи данных. Реализация режимов гиперспектральной съемки потребует создания высокопроизводительных бортовых систем обработки данных, новых алгоритмов сжатия информации, бортовых ЗУ большой емкости, увеличения пропускной способности каналов передачи данных, а также разработки технологий оценки качества видеоданных на борту с целью снижения их объема в случае несоответствия заданным требованиям.

Использование гиперспектральных изображений позволяет регистрировать сотни спектральных полос, отражающихся от растительного покрова. Факторы, влияющие на состояние растительного покрова, меняют и спектральную отражательную способность. Полученные снимки обрабатываются на специально разработанными программами, способными распознать сезонные уровни азота в растениях, урожайность, качество и итоговую экономическую отдачу от посевов. Концепции создания перспективных космических систем наблюдения. В настоящее время возрастает интерес к замене крупногабаритных КА малыми или группировками сверхмалых КА, которые наряду с удовлетворением требований к решению задач обладали бы высокой надежностью и экономичностью.

В настоящее время НАСА успешно проводят исследования в области создания перспективных КС ДЗЗ на основе МГКА. При этом НАСА в качестве одного из ключевых направлений исследований считает технологии интерферометрических (распределенных) оптических систем, в которых для съемки одного объекта используются одновременно несколько телескопов. Исследуются возможности размещения нескольких телескопов как на одном, так и на нескольких КА.

По оценке экспертов США, интерферометрические телескопы могут иметь разрешающую способность на порядок выше, чем одноапертурные. Также считается, что такие телескопы, могут стать более эффективными и недорогими по сравнению с одноапертурными оптическими системами. Проблемой при создании и использовании интерферометрических систем является необходимость точной синхронизации работы аппаратуры. На рисунке 4 приведены варианты интерферометрических оптических систем.

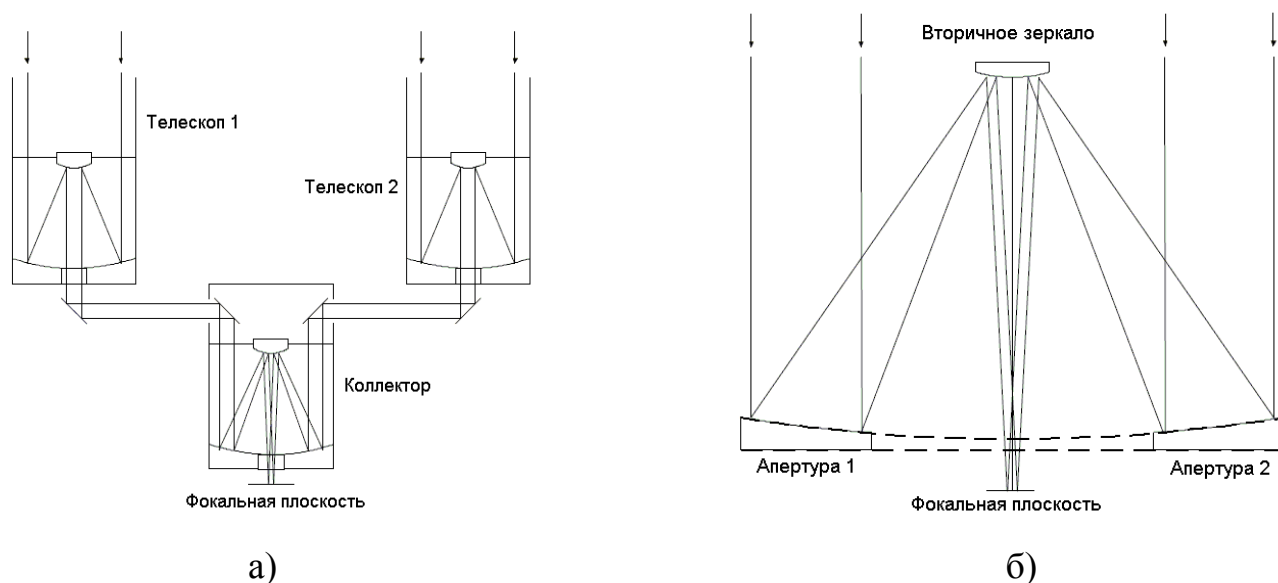


Рисунок 4 – Схемы интерферометрических оптических систем:

а) Майкельсона; б) Физо

В общем случае распределенные космические системы могут применяться для обеспечения резервирования КА в группировке, увеличения функциональных возможностей и повышения производительности систем за счет расширения зоны обслуживания, увеличения зоны охвата или/и временного повышения эффективности работы системы в районе интересов, повышения информативности полученных данных за счет стереосъемки при перекрытии зон обслуживания КА. Анализ результатов исследований, представленных в [65], показал, что при замене главного зеркала целостной (монолитной) конструкции на множество малых зеркал эквивалентной апертуры можно добиться существенного снижения массы оптических элементов телескопа. Эти малые

апертуры могут быть установлены как на отдельных КА, так и распределены на одном аппарате с помощью опорной конструкции. Однако, для решения задач ДЗЗ с помощью распределенного КА необходима сверхвысокая точность стабилизации его оптических элементов, для чего потребуется большое количество дополнительных элементов обеспечивающих подсистем (например, элементов системы стабилизация и т.д.), что в свою очередь может привести к увеличению общей массы системы.

Современные задачи мониторинга требуют от оптико-электронных систем все большей информативности. Это приводит к необходимости существенного повышения чувствительности при одновременном увеличении полей обзора и улучшении разрешающей способности.

Массогабаритные ограничения КА не позволяют существенно увеличить размер апертуры оптической системы. Последние разработки в области ДЗЗ свидетельствуют, что в скором времени усовершенствование ОЭС упрется в дифракционный предел (рисунок 5). Дальнейшее усовершенствование будет направленно на снижение массогабаритных характеристик космических ОЭС.

Основные исследования в области повышения эффективности работы фоторегистрирующих устройств ОЭС КА направлены на улучшение их спектральных, радиометрических и геометрических характеристик (табл. 2).

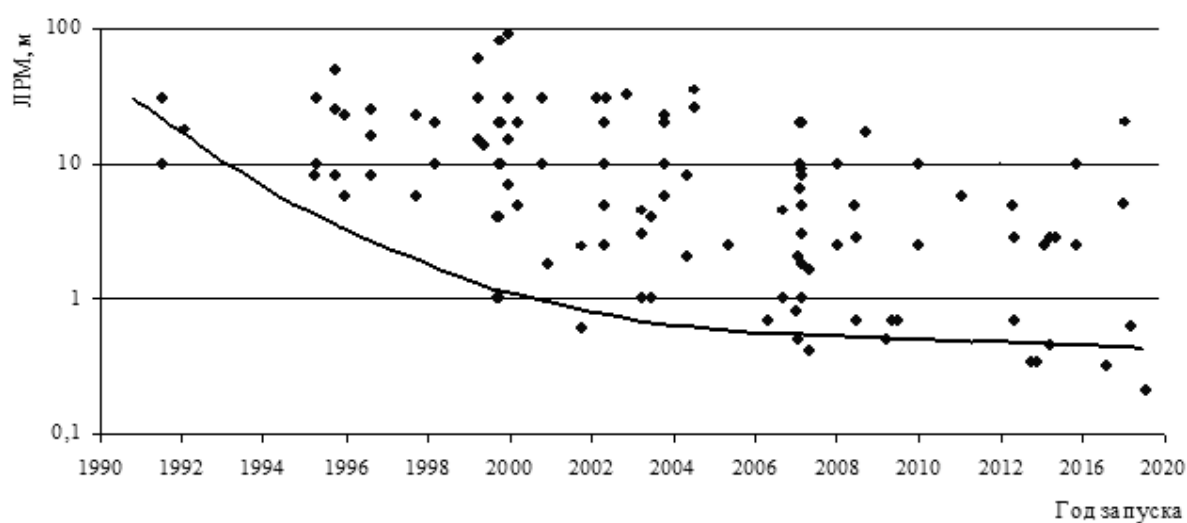


Рисунок 5 – Динамика изменения максимального ЛРМ космических оптико-электронных средств

Таблица 2 – Характеристики оптических датчиков

Группа характеристик	Наименование характеристики
Спектральные	Спектральный диапазон съемки (диапазон ЭМИ)
	Центральная длина волны в диапазоне съемки
	Спектральная чувствительность в диапазоне съемки
	Спектральная чувствительность вне диапазона съемки
	Чувствительность к поляризации
	Отношение между спектральной чувствительностью в различных диапазонах
Радиометрические	Отношение сигнал/шум
	Динамический диапазон – диапазон чувствительности датчика (отношение максимальной к минимальной яркости регистрируемого излучения)
	Уровень квантования (уровень дискретизации) – количество градаций яркости (радиометрическое разрешение), в битах
	Отношение максимального уровня сигнала на выходе чувствительного элемента к минимальному
	Линейность входных/выходных характеристик ЧЭ
	Эквивалентная мощность шума – мощность входного сигнала, при которой уровень выходного сигнала эквивалентен уровню шума
Геометрические	Угол поля зрения оптической системы
	Мгновенный угол поля зрения – угол поля зрения, образуемый одним чувствительным элементом
	Геометрическое искажение, вызванное съемкой в различных спектральных диапазонах
	Функция передаточной модуляции датчика, определяющая его мгновенный угол поля зрения
	Оптические искажения

Немаловажное значение придается развитию космических оптико-электронных систем наблюдения в ИК-диапазоне.

Развитие систем управления КА идет по пути перехода части функций по обработке и анализу результатов съемки, планированию процессов доставки информации на Землю и планированию зондирования требуемых регионов или объектов из центра обработки информации зондирования в БКУ [16].

Этот переход связан с устранением задержек в цикле управления КА, определяемых длительностью функционирования обратных связей по

управлению «через Землю». Такой переход подготовлен развитием бортовых вычислительных средств и появлением специализированных бортовых средств и алгоритмов обработки изображений. Таким образом, развитие систем управления КА в значительной степени определяется возможностями используемых вычислительных средств по обработке и логическому анализу больших объемов информации.

Одним из направлений повышения эффективности функционирования БКУ является внедрение нейросетевых технологий. Применение нейросетевых методов и средств обработки данных на борту КА нацелено на дальнейшее развитие одного из важнейших свойств БКУ – автономности его функционирования, т.е. способности решать задачи управления полетом КА и работой бортовых систем без связи с НКУ или другими орбитальными средствами [35].

Анализ перспективных технологий миниатюризации КА ДЗЗ.

Технологии не стоят на месте еще в недалеком прошлом получить снимки со столь высокими показателями ЛРМ не могли и 20 тонные КА поэтому миниатюризация элементной базы, а, следовательно, приборов и оптических систем является одной из главных задач, поставленных перед НИИ современного общества [5].

Программы разработки новых технологий снижения массы и габаритов перспективных КА можно разделить на два направления:

- снижение массы целевой аппаратуры (телескопа);
- уменьшение массы и габаритов обеспечивающих подсистем КА.

Снижение массы оптических элементов КА. Значительную долю массы КА составляет масса оптической системы, особенно для систем высокого разрешения, где требуется большая апертура. На пример, зеркало диаметром 2,4 м на космическом телескопе «Хаббл» весит 826 кг. Для тяжелых зеркал, зеркал композиционного типа (имеющих пористую или ячеичную структуру), а также других типов зеркал, форма которых поддерживается за счет жесткости конструкции, масса зеркала пропорциональна четвертой степени его диаметра.

где C_m – есть постоянная, зависящая от технологии, по которой выполнено зеркало, и имеет размерность $[\text{кг}/\text{м}^4]$.

Данные расчеты справедливы для простых пассивных зеркал и не учитывают опорные элементы конструкции и любые другие компоненты оптической системы.

Технология, по которой выполнено зеркало, может быть описана с помощью постоянного коэффициента массы. Этот коэффициент может быть точно определен по известным данным массы и диаметра существующих зеркал. Он зависит от типа зеркала и ограничений по жесткости. Масса главного зеркала оптической системы КА «Iconos» диаметром 0,7 м составляет 13,4 кг. Данное зеркало имеет пористую конструкцию, и его коэффициент массы составляет 56 $\text{кг}/\text{м}^4$; для сравнения зеркало сплошного типа имеет расчетный коэффициент массы равный около 1000 $\text{кг}/\text{м}^4$. Некоторые характерные данные приведены в табл. 3 [62].

Таблица 3 — Характеристики главных зеркал различных оптических систем

Зеркало	Диаметр, м	Масса, кг	Коэффициент массы (C_m), $\text{кг}/\text{м}^4$	Удельная плотность, $\text{кг}/\text{м}^2$
Сплошное	1	1000	1000	1273
«Хаббл»	2,4	826	25	183
«Айконос»	0,7	13,4	56	35
«IRIS», Япония	0,7	8,2	34	21,3
«ATLID», ECA/Япония	0,63	6	38	19,2
HSO, ECA	3,5 (сегм.)	300	2	31,2

Зеркала ОС КА «Хаббл» и «Айконос» выглядят высокотехнологичными по сравнению со сплошным зеркалом. Различия в коэффициенте C_m могут быть связаны с технологией производства зеркала (например, облегченная конструкция с полостями), с заданным коэффициентом остаточной деформации или зависеть от типа опорной конструкции. Сравнительные характеристики оптических материалов [77].

Таблица 4 — Характеристики основных оптических материалов

Тип	Удельная плотн., г/см ³	Модуль Юнга (упругости), ГПа	Коэффициент теплового расширения, 10 ⁻⁶ /К	Удельная теплопроводность, Вт/мК	Удельная теплоемкость, Дж/(кг·К)
ULE	2,20	68	< 0,03	1,31	776
Pyrex	2,23	64	3,2	1,3	726
Zerodur	2,53	92	< 0,05	1,46	821
Borofloat	2,23	63	3,2	1,1	830
Silica	2,20	73	0,52	1,38	703
SiC	3,05	466	2,37	240	660
C/SiC	2,65	250	1,8	130	700

Проведенный анализ позволяет сделать вывод о том, что для увеличения апертуры телескопа необходимо существенное усовершенствование технологий производства зеркал, что повлечет за собой снижение коэффициента C_m и, следовательно, массы оптической системы, большая часть которой приходится на зеркала. С другой стороны, большая масса главного зеркала является причиной поиска новых подходов к построению систем формирования изображения, возможно, нетрадиционного типа.

В США ведутся исследования, направленные на разработку зеркал из нетрадиционных для оптики материалов, металлов, композиционных материалов и сплавов. В качестве материалов используется бериллий, алюминиевые сплавы и кремний. Из известных материалов бериллий обладает наибольшей жесткостью и наименьшей плотностью, что позволяет создавать из него легкие зеркала с высокой степенью жесткости. Однако из-за недостаточных теплофизических свойств и высокой стоимости производства он сегодня уступил первенство карбиду кремния. Этот материал значительно дешевле, обладает достаточными жесткостью, удельной плотностью и прекрасными теплофизическими характеристиками. Удельная плотность зеркал, созданных из этого материала, в зависимости от рабочей области длин волн составляет 35–45 кг/м² [56].

Одним из последних разработок является создание оптических систем, где в роли зеркала выступает пьезоэлектрическая полимерная пленка. Физические свойства подобной пленки позволяют ей принимать различные формы в зависимости от приложенного к ним электрического напряжения, что позволяет изменять и калибровать оптическую поверхность после вывода КА на орбиту. Кроме этого использование подобных конструкций позволит сократить на порядок массу главного зеркала, а значит существенно увеличить диаметр апертуры оптической системы.

Существенным минусом подобных систем является быстрое потеря своих свойств в условиях открытого космоса. Американские ученые заявляют, что им удалось создать пленку способную на более длительное нахождение в космосе. Подобная разработка открывает возможности для производства КА ДЗЗ нового поколения с гораздо меньшей массой и близкой к дифракционным пределам качеством ЛРМ. В университете штата Аризона имеется экспериментальное зеркало диаметром 0,5 м. которое имеет массу чуть больше кг. [70].

Влияние микро- и нанотехнологий на развитие космических систем ДЗЗ. Фундаментальные исследования и практические работы в области создания микро- и наносистем по спектру их применение получили значительный размах не только в США, но во многих других ведущих зарубежных странах. Микро- и нанотехнологии применяются при разработке и создании космических систем различного целевого назначения, в том числе средств ДЗЗ на базе малых КА. К преимуществам малых КА можно отнести [9]:

- сокращение сроков создания КА с 8–10 до 2–3 лет;
- снижение стоимости эксплуатации на 20–30% в год;
- оперативность восполнения орбитальной группировки КА из-за малых сроков изготовления КА и их подготовки к запуску;
- значительно меньшие потери в случае отказов КА;
- существенное снижение затрат на выведение аппаратов за счет использования средств воздушного старта, конверсионных ракет и попутного выведения КА.

В целях создания перспективных систем на базе сверхмалых КА основные усилия разработчиков направлены на решение ряда научно-технических и технологических проблем, основными из которых являются следующие:

- разработка базовых элементов систем энергообеспечения перспективных КА: высокоэнергетических первичных источников тока, аккумуляторов и батарей, аппаратуры регулирования и контроля;
- поиск перспективных конструктивно-технологических решений и технологических процессов производства элементов систем энергообеспечения;
- создание системы контрольно-измерительных приборов нового поколения;
- разработка технологий радиоэлектронных устройств нового поколения на основе тонкопленочных гибридных интегральных микросхем;
- поддержание и развитие микроэлектронной базы;
- создание новых конструкционных материалов;
- экспериментальная отработка КА с учетом особенностей их проектных решений и конструкций, характеризующихся использованием новых физических принципов и эффектов;
- обеспечение стойкости малых КА к воздействию факторов космического пространства;
- разработка новых технологий в области оптики, систем связи, способов передачи, приема и обработки больших массивов информации.

Значительное влияние на облик перспективных КА окажут технологии МЭМС. Миниатюризация изделий происходит повсеместно так, например, производители процессоров выходят на новые технологии, позволяющие применять транзисторы до 7 нанометров. Использование таких маленьких технологий в открытом космосе пока не представляется возможным в силу воздействия космической радиации и прочих неблагоприятных факторов, но разработки идут и в скором времени это позволит применять их и в космической сфере [62, 66, 70].

Применение МЭМС существенно уменьшит массу всех бортовых приборов таких как гироскопы, приборы точного позиционирования бортовые вычислительные машин, звездные датчики, цифровые акселерометры и прочие.

Одним из «прорывных направлений» фундаментальной науки являются исследования в области нано технологий. С успехами в этой области связывается возможность повышения критически важных параметров изделий высокотехнологических отраслей промышленности, в том числе ракетно-космической.

Таким образом, уменьшение элементной базы бортовых систем КА является безусловно тенденцией будущего. Трудности возникают, когда речь идет о надежности и эффективности подобных систем. сторону миниатюризации технический объект может потерять свою функциональность, показатели эффективности и надежности. Для каждого прибора или элемента есть предел миниатюризации при котором могут быть достигнуты оптимальные значения характеристик при максимальном сохранении надежности. Кроме того, малые КА имеют ограничения по энергетике, поэтому не могут часто снимать и использовать высокоскоростную радиолинию для сброса информации на пункт передачи данных на пункты приема информации (ППИ) чаще, чем заряжается их батарея, а узкая полоса захвата делает производительность еще меньше.

Таким образом, основным условием рационального применения сверхмалых КА является применение в большой по численности ОГ от 12 спутников и выше.

1.3 Анализ технических требований, предъявляемых к перспективным космическим аппаратам дистанционного зондирования Земли

Требования к баллистическим параметрам орбиты. Наилучшей для ДЗЗ является солнечно-синхронная орбита, плоскость которой не меняет своего углового положения к Солнцу, благодаря чему КА имеет возможность пересекать одну и ту же широту в одно и то же местное время, а значит – при тех же условиях освещенности. Наклонение i солнечно-синхронной орбиты определяется выражением:

$$i = \arccos \frac{2\pi T}{T_c C}, \quad C = -\frac{888,796}{(1-e^2)T\sqrt[3]{T}}, \quad (1)$$

где T – период обращения КА, с; $T_g = 365,2422$ суток – продолжительность тропического года; отсюда следует, что наклонение солнечно-синхронной орбиты будет разным для орбит, отличающихся периодом обращения. Также на выбор наклонения оказывает влияние стремление минимизировать изменения положения орбиты, которое вызывается возмущениями из-за несферичности Земли. Наиболее существенными по величине возмущениями являются прецессии долготы восходящего узла и аргумента перигея, которые определяются выражениями:

$$\Delta\Omega = -\frac{2\pi}{a^2(1+e^2)^2} \frac{\varepsilon_3}{\mu} \cos i; \quad (2)$$

$$\Delta\omega = \frac{\pi}{a^2(1-e^2)^2} \frac{\mu}{\varepsilon_3} (5\cos^2 i - 1), \quad (3)$$

где $\mu = 3,986 \cdot 10^5$ км³/с² – гравитационный параметр Земли, $\varepsilon = 2,634 \cdot 10^5$ км⁵/с² – константа.

Период кратной орбиты т.е. повторяемость прохождения одной и той же трассы через целое число витков определяется выражением:

$$T = \frac{m}{n} T_0 \left(1 + \frac{\Delta\Omega}{2\pi} \frac{n}{m}\right),$$

где $T_0 = 86164,099$ с (23 часа 56 минут) – продолжительность звездных суток (время полного оборота Земли в пространстве); m – число оборотов Земли; n – число оборотов КА в сутки; соотношение называется коэффициентом синхронизации, где m и n – целые числа.

Выбор долготы восходящего узла орбиты определяет условия освещенности районов под спутником, что является важным условием эффективной работы специальной аппаратуры в видимом оптическом диапазоне. Необходимое значение долготы восходящего узла задается выбором времени пуска РН, поэтому запуски КА производятся в заранее предусмотренное время в пределах так называемых "стартовых окон".

Рассмотрим КА ДЗЗ как систему для исследования. Выполнение задач наблюдения предполагает взаимодействие созданной КС с потребителем информации, наблюдаемыми объектами и планетой Земля (гравитационным полем, рельефом и атмосферой). В соответствии с принципами системного подхода подобное представление позволяет выделить для исследования систему, изучение которой позволит установить требуемые свойства КС, которые проявляются во взаимодействии ДЗЗ с иными объектами. Далее перейдем к рассмотрению требований предъявляемым к перспективным КА.

Требование к сроку активного существования. Если говорить о тяжелых КА ДЗЗ сверхвысокого разрешения или картографические КА ДЗЗ, то срок активного существования (САС) может составлять 8-10 лет и 5-8 лет соответственно, что обусловлено, временем на их разработку и изготовление в основном. Если же брать в расчет малые КА, для которых срок производства может составлять от 1 до 2 лет, то в силу того, что с каждым годом технологии устаревают САС должен составлять от 3 до 5 лет чтобы иметь возможность запустить более совершенные прототипы.

Требование к пространственному разрешению. Входным параметром здесь является отношение характерного пространственного размера объекта видового наблюдения к линейному размеру пространственного разрешения на изображении, по которому осуществляется распознавание данного объекта. Основные геометрические характеристики объектов, которые могут наблюдаться в процессе космического мониторинга, априорно известны практически для всех существенных ситуаций. Поэтому, исходя из свойств аппаратуры и планируемых условий наблюдения, можно заранее оценить результат по одному из основных показателей качества видовой съемки – вероятности распознавания объекта.

Критерии Джонсона, представлены в таблице 5., подтверждены экспериментально. Отмечается, что уровень 13...26 полупериодов (элементов пространственного разрешения) на минимальный размер объекта при уровне сигнал/шум лучше 0,5 достаточен для решения любой задачи опознавания.

Таблица 5 – Критерии Джонсона

Уровень видения	Число разрешаемых элементов на минимальный размер объекта
Обнаружение	1,5...3
Определение ориентации и формы	2,4...3,6
Классификация (оператор различает класс объекта)	7,6...9,6
Опознавание (оператор в пределах своих априорных знаний устанавливает вид или тип объекта)	12,6...13,1

Известны простые математические соотношения, позволяющие связать вероятность распознавания объекта P , его размер L и пространственное разрешение на местности l [10, 14, 32].

$$P = 1 - \exp\left(-k \frac{L}{l}\right), \quad (4)$$

или

$$P = \exp\left(-b \frac{l^2}{S_{\Pi}}\right). \quad (5)$$

Коэффициенты k и b в формуле 5 зависят от формы объекта и контраста объект/фон на снимке. Для приближенного решения оценочных задач можно принять значение коэффициента k , как $k = (0,3 \dots 0,5) C$, где C – контраст.

Коэффициент b может быть оценен из соотношения

$$b = \frac{\text{Pr} \cdot \tilde{R}}{S_{\Pi}}, \quad (6)$$

где Pr – периметр, рассчитываемый по контуру объекта,

$$\tilde{R} = \frac{R + r}{2}, \quad (7)$$

где R , r – радиусы, описанной вокруг контура и вписанной в контур объекта окружностей; S_{Π} – площадь объекта.

Отметим, что вероятность распознавания, оцениваемая по упрощенным состояниям (4) и (5) повышается при увеличении размера объекта L , а также при уменьшении значения элемента пространственного разрешения на местности l .

Напротив, при достаточно малом L или значительном Δ , экспоненциальные зависимости (4), (5) дадут практически нулевую вероятность распознавания [10].

Требования мирового рынка к ЛРМ снимков таковы: около 30% с сверхвысоким ЛРМ лучше 1 м., 20% с ЛРМ хуже 2 м., 50% с ЛРМ около 1 м. причем большая часть заказчиков заинтересована в получении информации больших территорий, которые невозможно снять за один пролет.

Требование к полосе захвата и полосе обзора. Оптические КА ДЗЗ ограничены в выборе рабочей высоты полета H над земной поверхностью (высоты, с которой производится наблюдение). С одной стороны, высота не должна быть большой, так как это приводит к ухудшению детальности наблюдения [30]:

$$H = lr_{anf},$$

где H – высота полета КА, км; r_{an} – разрешающая способность аппаратуры, линий/мм (для оптико-электронных систем – 50 ... 120 лин/мм); f – фокусное расстояние оптической системы, мм; l – требуемое ЛРМ, м (у КА сверхвысокого разрешения – 0,15 ... 1 м, КА картографии – более 1 м). Из формулы следует, что для сохранения заданных малых значений разрешающей способности на местности при увеличении высоты полета необходимо либо существенно улучшать качество аппаратуры наблюдения, либо увеличивать габариты оптической системы. Пространственное разрешение и полоса захвата являются требованиями, взаимозависящими друг от друга, и влияют на выбор чувствительного элемента прибора, характеристик его оптической системы (рис. 6).

С другой стороны, уменьшению высоты препятствуют как возрастание сопротивления атмосферы (на высоте менее 100 км практически ни один КА не может совершить полный виток вокруг Земли), так и необходимость соблюдать требования по захвату местности. Высота орбиты при этом прямо пропорциональна полосе захвата и может быть выражена как:

$$H = \frac{S}{\pi g^2 \gamma},$$

где S – площадь полосы захвата, км²; $\pi=3,14\dots$; γ – полуугол раствора оптической системы (для линзовых телескопов – $10^\circ\dots 15^\circ$, для зеркально-линзовых $3^\circ\dots 5^\circ$, для зеркальных $0,5^\circ\dots 1,5^\circ$).

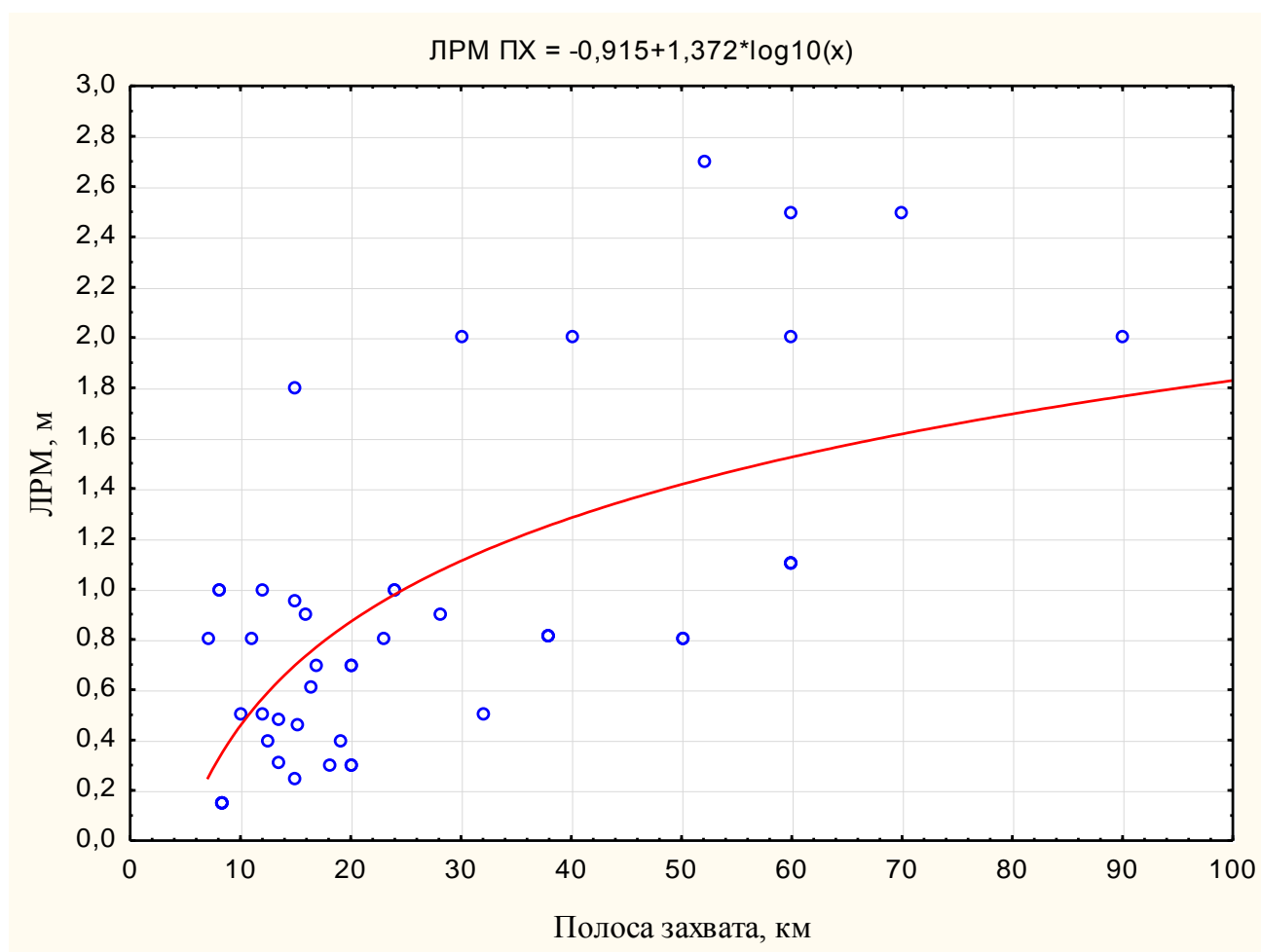


Рисунок 6. Зависимость линейного разрешения от полосы захвата

Заданная полоса обзора может быть достигнута за счет перенацеливания на нужный район наблюдения оптической оси ОЭС, что определяет его конструктивную схему и требования по динамике стабилизации КА в целях погашения возможных возмущающих факторов. Второй вариант получения полосы обзора – это поворот всего КА, что накладывает требования на бортовой комплекс управления КА, систему ориентации и стабилизации корпуса КА и конструкцию КА в целом.

Требование к обеспечению высокоточной географической привязки снимка на местности. Точность геодезической привязки важна при выполнении народно-хозяйственных задач (кадастровые и др.). Для этого при проектировании необходимо оценить точность линейных элементов внешнего ориентирования и

угловых элементов внешнего ориентирования получаемых с бортовых навигационных систем. Возможно уделить внимание наземной постобработки служебной информации в целях уточнения данных и как результат получения более точной геопривязки на наземных средствах. Достижение качественных показателей космической системы требует учета взаимосвязи и взаимовлияния конструктивных особенностей и деформаций упругих элементов КА, индивидуальных точностных характеристик бортовых измерительных систем. [2, 3, 36] Вопросы интеграции комплексов и подсистем КС на основе исследования системных связей и закономерностей их функционирования более подробно рассматривается в методологии координатной привязки снимков.

Требование к радиометрическому разрешению и спектральным диапазонам. Требование к радиометрическому разрешению влияет на структуру обработки сигнала и задает количество уровней квантования сигнала, что в свою очередь также влияет на информативность ОЭС и приводит к выставлению требований к КА.

Требования к номиналам спектральных диапазонов и их количеству влияют на выбор типа измерительного прибора и типов чувствительных элементов, характеристики оптического тракта. С другой стороны, эти характеристики связаны с информативностью ОЭС и определяют требования к системе ППИ и, как следствие, требования по энергетике и конструкции КА.

Требование к производительности КА ДЗЗ. Требования к производительности зависят от многих факторов, от производительности оптической системы (ограничение работы ЦА в сутки), пропускной способности бортовой высокоскоростной радиолинии (ВРЛ), объему запоминающего устройства (ЗУ) а также способность системы электропитания (СЭП) выдерживать разрядку при сбросе информации на заданное количество развернутых ППИ. Требования к современным системам подробно описаны в [45].

Требование к координатам района наблюдения. Обычно, координаты района наблюдения целесообразно задавать в виде широт интересов наблюдения

для спутников на околокруговой солнечно-синхронной орбите с наклоном от 97 до 98 почти нет никаких ограничений по широтам, единственное что нужно рассчитать, чтобы КА пролетал над зонами интереса при хорошей освещенности. Для КА на высокоэллиптической орбите с наклонами около 64 и 112, уже нужно основательней подойти к моделированию баллистического построения так, чтобы зону интереса съемки совпадала с пролетом КА по перигеи орбиты для достижения наивысшего качества снимка.

Требование к баллистическому построению системы. Многие из приведенных выше требований нельзя достичь без грамотного построения ОГ. От параметров рабочей орбиты КА наблюдения зависят многие факторы, определяющие качество решения задач космической системы ДЗЗ.

Требуемая детальность наблюдения обеспечивается разрешающей способностью аппаратуры, зависящей от типа и качества фокусирующей системы и приемника излучений, в соответствии с выражением

$$l = \frac{H}{f \cdot r_{an}}, \quad (8)$$

где l – требуемое ЛРМ оптической аппаратуры наблюдения, мм;

r_{an} – разрешающая способность аппаратуры, линий/мм;

f – фокусное расстояние оптической системы, мм;

H – высота наблюдения с КА, км.

В качестве приемников в большинстве современных оптико-электронных систем используют приборы с зарядовой связью (ПЗС). Разрешающая способность оптико-электронной аппаратуры r_{an} зависит от размера элементарного приемника информации l_3 , в соответствии с выражением

$$r_{an} = \frac{1}{l_3}. \quad (9)$$

Современные технологии позволяют создавать матрицы или линейки ПЗС с размером элементарного приемника информации $l_3=15\dots7$ мкм, что соответствует $r_{an}=60\dots140$ лин/мм. Возможностям фотопленок это уступает, но ПЗС позволяют получать изображение в виде набора электронных кодированных сигналов,

которые можно накапливать в бортовом запоминающем устройстве, либо немедленно передавать по линиям радиосвязи. Это определяет главное преимущество оптико-электронных систем – оперативность доставки информации.

При проектировании отдельная роль уделяется выбору высоты H орбиты КА, так как для получения, заданного ЛРМ при большей высоте необходимо это компенсировать увеличением фокусного расстояния, а его увеличение ведет за собой ограничение на освещенность, при которой будет выполнена съемка и массогабаритным показателям системы в целом.

Из формулы 8 следует, что для сохранения заданных малых значений разрешающей способности на местности при увеличении высоты полета необходимо либо существенно улучшать качество аппаратуры наблюдения, либо увеличить габариты оптической системы.

С другой стороны, уменьшению высоты препятствует возрастание сопротивления атмосферы, что негативно отражается на сроке активного существования (на высоте менее 90 км практически ни один КА не может совершить полный виток вокруг Земли), так и необходимость соблюдать требования по обзорности (возможности наблюдать одномоментно район площадью, не менее заданной).

Для подавляющего большинства КА ДЗЗ выбирают круговые орбиты, которые обеспечивает одинаковую высоту, с которой проводятся наблюдения, а, следовательно, для одной и той же ЦА – одинаковую обзорность и ЛРМ космических снимков.

Требование к периодичности наблюдения и оперативности получения информации. Требуемая периодичность наблюдения объектов определяется длительностью проявления природных явлений и составляет от нескольких часов для пожаров, наводнений, и прочих катаклизмов и несколько суток для сельскохозяйственных задач. Некоторые территории нужно постоянно просматривать с определенной периодичностью примером может служить разливы рек или таяние льдов для прокладки оптимальных маршрутов для

ледоколов. Расчет периодичности должен включать параметры орбиты, а также ширину полосы обзора при пролете КА т. е. возможность снимать, отклонившись на определенный угол от надира. Поэтому при проектировании КА нужно уделить внимание не только баллистическим параметрам, но системы ориентации, стабилизации и системе управлением движением (СУД) в целом. Современные КС ДЗЗ имеют периодичность съемки от 2 до 5 раз в сутки.

Для расчета оперативности и периодичность важной характеристикой является период обращения КА T :

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{a^3}{\mu}} \quad (10)$$

где $\mu = 3,986 \cdot 10^5 \text{ [км}^3/\text{с}^2]$ – гравитационная постоянная Земли;

a – большая полуось орбиты, км,

$$a = H + R_3, \quad (11)$$

где $R_3 = 6371 \text{ км}$ – радиус Земли, км.

Угол наклона орбиты i обеспечивает обзор земной поверхности в необходимом диапазоне значений максимальной широты φ (широтном поясе $\pm \varphi_{max}$). От угла наклона плоскости орбиты зависит изменение прямого восхождения долготы восходящего узла. Для орбиты с прямым наклоном ($i < 90^\circ$) прецессия прямого восхождения идет в сторону обратную угловому движению плоскости терминатора (граница светового пятна). Для орбит с обратным наклоном ($i > 90^\circ$) прецессия прямого восхождения сонаправлена с угловым движением плоскости терминатора (то есть они имеют один знак изменения значений), поэтому можно подобрать такое i для заданной высоты орбиты КА, чтобы выполнялось условие. Солнечно-синхронности представлены на рисунке 7. Это дает практически постоянное значение зенитного угла Солнца над определенной точкой Земли (имеет зависимость зенитного угла от времени года). Следовательно, будут постоянными и условия освещения земной поверхности по трассе КА. Сохраняются неизменными размеры теней объектов,

уровень и спектральные характеристики освещения местности. Все это существенно облегчает сравнение снимков и выявление возникших за период съемки изменений территорий интереса. Эта орбита характеризуется постоянным углом между плоскостью солнечно-синхронной орбиты и направлением на солнце. Подробные требования по баллистическому обеспечению описаны в [10].

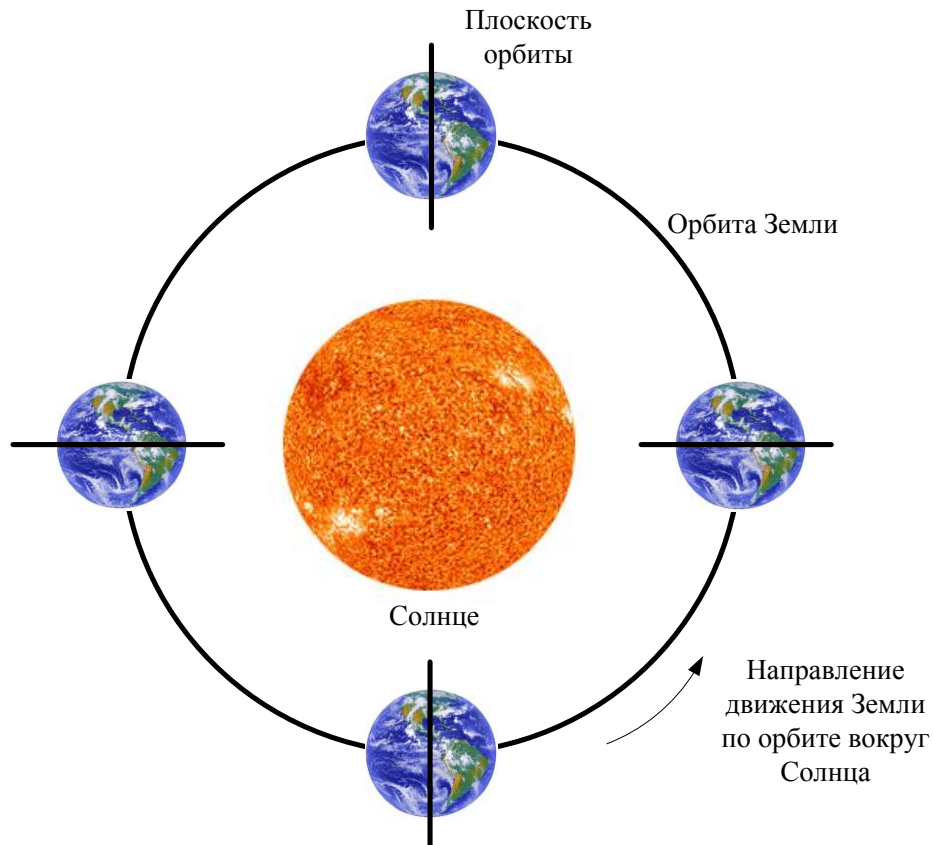


Рисунок 7 – Плоскость Земли во время движения вокруг солнца

1.4 Постановка задачи

Анализ технических требований, предъявляемых к КА ДЗЗ, а также перспективных НИОКР, направленных на их реализацию, показал, что заказчики информации не в полной мере удовлетворены предоставляемыми услугами по предоставлению космических снимков. Проектирование происходит по усредненным требованиям без дифференцирования заказчиков по конкретным системам. В итоге такого усреднения одни заказчики не получают информацию вовремя другие получают, но не соответствующую по качеству. Методы информационно-логического прогнозирования на основе нормативного и

поискового подходов позволяют выявить основные направления развития КС ДЗЗ и ряд требований к характеристикам перспективных КА.

1. В составе перспективных систем ДЗЗ выделяется три основных составляющих:

- КА сверхвысокого разрешения – это тяжелые высокопроизводительные высокоманевренные спутники типа Ресурс-ПМ имеющие большую полосу захвата не имеющие существенных ограничений по энергетике и ЗУ (рис 8, а);
- КС нового поколения высокого и сверхвысокого разрешения на основе малых КА. Планируется использовать массовые группировки малых КА. Подобные системы являются современной тенденцией и дешевой альтернативой существующим тяжелым КА (рис 8, б);
- КА картографические высокого разрешения (используются для построения матрицы рельефа местности, картографии, кадастров и прочих задач, где требуется не только хорошее линейное разрешение около 1 м., но и покрытие больших территорий от 40 км. в ширину снимка за один пролет) оснащённые двумя или тремя телескопами для возможности съемки стереоизображений (рис 8, в).

Основные требования к перспективным средствам ДЗЗ выделенных классов представлены в таблице 6.

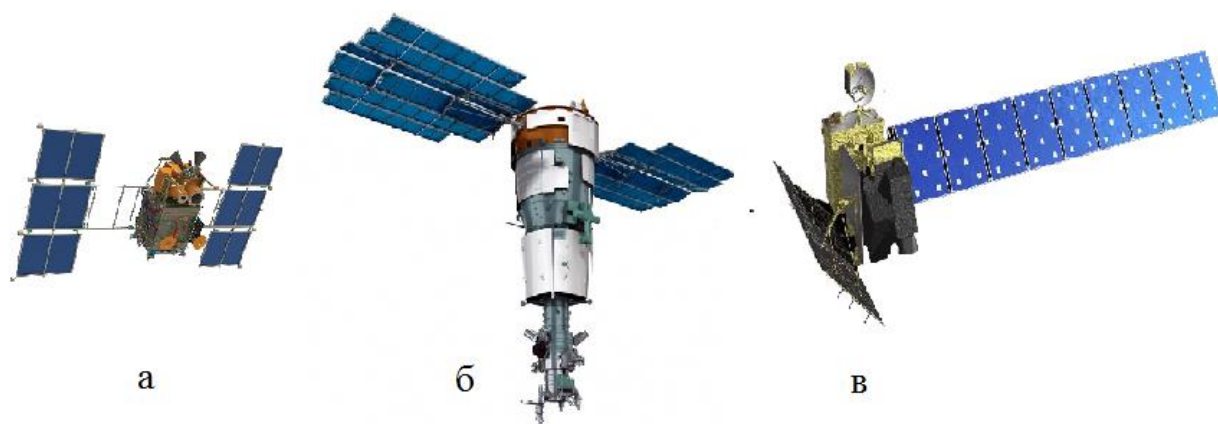


Рисунок 8 – типы перспективных спутников: а – малые КА, б – КА сверхвысокого разрешения, в – картографические спутники

2. При разработке КА ДЗЗ нового поколения основной целью разработчиков является снижение стоимостных и массогабаритных параметров КА при сохранении высоких целевых показателей. Значительную долю общей массы КА составляет масса ОЭС. В целях снижения массогабаритных параметров ОЭС ведутся разработки в области создания новых материалов для получения сверхлегких зеркал; исследуются новые оптические схемы, позволяющие уменьшить габариты ОЭС и всего КА; широко применяются передовые достижения в области микроэлектроники и элементной базы.

Таблица 6 — Требования к характеристикам перспективных КС ДЗЗ

Характеристика	КА сверхвысокого разрешения	Малые КА	Картографические КА
Год развертывания	2020–2030	2020–2030	2020–2030
Количество КА в системе	3–4	8–24	3–5
Масса КА, кг	до 7000	300–800	до 4000
САС, лет	10–12	1–5	10–12
Спектральный диапазон, мкм	ПХ, МС, ГСА ближний ИК	ПХ, МС	ПХ, МС
Стоимость образца, млн дол.	80–120	20–30	100
Стоимость выведения, млн дол.	40–60	20–30	30–50

3. Значительного повышения информативности космических средств ДЗЗ ожидается получить за счет разработки гиперспектральной и усовершенствования многоспектральной оптико-электронной аппаратуры. Перед разработчиками стоит задача создания средств съемки земной поверхности в спектральном диапазоне 0,4–2,4 мкм при сочетании высокого пространственного разрешения (1–5 м) и высокого спектрального разрешения (5–10 нм) в десятках и даже сотнях спектральных каналов.

Реализация режимов гиперспектральной съемки потребует создания высокопроизводительных бортовых систем обработки данных, новых алгоритмов сжатия информации, бортовых ЗУ большой емкости, увеличения пропускной

способности каналов передачи данных, а также разработки технологий оценки качества видеоданных на борту с целью снижения их объема в случае несоответствия заданным требованиям.

4. Одним из недостатков, существующих малых КА ДЗЗ США является узкая полоса захвата. К перспективным спутниками ДЗЗ детальной съемки предъявляется требование увеличения полосы захвата до 18 км.

5. Перспективные системы должны обеспечивать получение изображений с ЛРМ не хуже существующего уровня (таблица 7).

Таблица 7 — Требования к качеству изображения

Режим съемки	Линейное разрешение на местности, м		
	КА сверхвысокого разрешения	Малые КА	Картографические КА
Панхроматический	0,2–0,5	Не хуже 1,0	1–2,5
Многоспектральный	Лучше 1,8	Не хуже 3,0	2–6

6. Повышение производительности и информативности перспективных комплексов потребует разработки бортовых ЗУ повышенной емкости — от 60 Гбит для малых КА до 3 Тбит для КА сверхвысокого разрешения. Кроме того, для передачи большого объема данных с борта КА на наземный ППИ требуется внедрение новых алгоритмов сжатия информации (до 7–10 раз без существенной потери качества) и повышение пропускной способности каналов передачи данных — до 1800–2000 Мбит/с.

Информационно-логический подход не позволяет оценить значения всего перечня характеристик КА, в том числе и некоторых ключевых. Таким образом, необходимо разработать специальный методический аппарат, позволяющий уточнить выявленные значения характеристик и оценить недостающие ключевые параметры КА ДЗЗ.

Сложность поставленной задачи требует разработки комплексной методики, основанной на использовании различных методов оценки характеристик

перспективных КА ДЗЗ, его ТО. На первом этапе требуется разработать информационно-аналитическую модель, в которой должны быть учтены теоретические основы применения космических средств с оптико-электронной аппаратурой съемки земной поверхности. Разработанная модель позволит оценить ряд параметров КА.

В силу значительного количества параметров, которыми описывается КА, и отсутствия информации по многим из них задача формирования (прогнозирования ТО) решается довольно сложно. В связи с этим пространство характеристик необходимо сократить и из всего перечня параметров выбрать наиболее значимые характеристики при минимальной потере информативности результата оценки и прогноза.

Существует множество методов снижения размерности описаний сложных объектов, однако большинство из них носят общий характер. С целью снижения размерности описания КА ДЗЗ необходима разработка специализированной методики, учитывающей специфику объекта исследования – КА ДЗЗ, информация о характеристиках которых носит неполный и противоречивый характер.

Далее, исходя из требований, предъявляемых к перспективным КА ДЗЗ, требуется провести оценку его ТО, т.е. наиболее значимых характеристик, а также проверить соответствие полученных данных возможностям технической и технологической. Для решения этой задачи требуется также разработка методики.

В соответствии с поставленной целью и задачами исследования, предлагается следующая структура проведения исследований (рис. 9).



Рисунок 9. – Общая схема проведения исследований

1.5 Выводы по главе 1

1. Существующая отечественная ОГ КА ДЗЗ не в полной мере отвечает требованиям, предъявляемым к ним со стороны заказчика по ЛРМ точностью геопривязки, производительности и оперативности доставки информации. Кроме того, существенным недостатком существующих КА является большая масса по сравнению с зарубежными аналогами что обуславливает долгий процесс разработки и модификации и как следствие высокую стоимость создания и выведения на орбиту.

2. Анализ основных направлений развития КА ДЗЗ показал, что объёмы запрошенной информации с каждым годом растут и уже сейчас существующая ОГ не справляется со всеми заказами. Такая ситуация складывается не только из-за малого количества спутников в группировке, но и из-за не рационального распределения систем по различным задачам. В связи с этим целесообразно разделить перспективные КА ДЗЗ на три различных типа по выполнению ими различных задач, а именно на КА сверхвысокого разрешения КА картографии высокого разрешения и малые КА высокого и сверхвысокого разрешения. Такой подход при проектировании позволит к 2030 г. оптимально распределять ресурс ОГ и решать не только бюджетные задачи, возлагаемые Федеральными органами РФ, но и коммерческие. Это позволит частично окупить ОГ, а также выделить сэкономленные средства на совершенствование элементной базы.

3. Основными требованиями, предъявляемыми к перспективным КА ДЗЗ, являются: снижение массы КА; снижение стоимости разработки, создания и эксплуатации орбитальной группировки; повышение информативности и производительности космических средств ДЗЗ.

4. Снижения массы перспективных КА планируется достичь за счет использования новых материалов и новых технических решений (сегментные зеркала) при создании оптических элементов телескопа, применения композиционных материалов в конструкции КА, перехода на новую элементную базу. При этом планируется достичь снижения массы ОЭС КА в 10 раз, а общей массы КА – в 3 раза.

5. Повышения информативности перспективных КС ДЗЗ планируется достичь за счет расширения количества спектральных каналов съемки, повышения спектрального и радиометрического разрешения чувствительных элементов. Особое внимание уделяется разработке гиперспектральных средств съемки.

6. Формирование технического облика перспективных КА ДЗЗ представляет собой сложную научно-техническую задачу, решение которой, помимо детального анализа тактико-технических требований, предъявляемых к перспективным КА, и направленных на реализацию этих требований НИОКР, требует разработки специального научно-методического аппарата, позволяющего расчетным путем получить оценку основных характеристик перспективных КА ДЗЗ для своевременного выделить проблемные технические и технологические решения.

2 Комплексная методика формирования технического облика перспективных космических аппаратов дистанционного зондирования Земли

Формализуем постановку задачи прогнозирования технического облика перспективных КА ДЗЗ.

Дано:

X — требования, предъявляемых к КА ДЗЗ, формируемых на основе задач, возлагаемых на систему космического наблюдения;

N — технологий и технические решения, готовые к внедрению на КА ДЗЗ к заданному моменту (периоду) времени;

Y — множество характеристик КА ДЗЗ;

Z — варианты технического облика КА ДЗЗ;

T — различные моменты времени оценки ТО КА ДЗЗ.

Требуется найти: оптимальный вариант технического облика КА ДЗЗ на допустимом множестве решений поискового и нормативного прогнозирования для заданного временного периода:

$$z^* = F(X, N, Y, T), z^* \subset Z,$$

где z^* — варианты ТО КА ДЗЗ, удовлетворяющие предъявляемым к ним требованиям, при достигнутом уровне реализации технологий и технических решений.

Для решения поставленной задачи необходимо:

1. Найти оператор φ , реализующий отображение вида

$$\varphi: Y \rightarrow Y^*, \tag{18}$$

где Y^* — информативный набор параметров, под которым понимается совокупность характеристик, описывающих КА ДЗЗ и процесс его функционирования с достаточной для решения задачи прогнозирования ТО степенью.

На данном этапе должна быть решена задача выбора такого перечня подлежащих оценке характеристик КА ДЗЗ, который обеспечивал бы наилучшее описание его ТО с точки зрения выбранного критерия.

2. Найти оператор ξ , реализующий отображение

$$\xi: X \times Y^* \times N \rightarrow z^*. \quad (19)$$

На данном этапе должна быть решена задача оценки значений параметров множества Y^* на основе требований, предъявляемым к ним, с учетом возможностей технологической базы, необходимой для реализации этих требований для заданного периода времени.

С целью решения поставленной задачи разработана комплексная методика, обеспечивающая проведение взаимосвязанных аналитических исследований и математических расчетов и включающая частные методы:

- метод формирования информативного набора параметров, характеризующих технический облик КА ДЗЗ – решается задача нахождения оператора φ ;
- метод оценки основных параметров перспективных КА ДЗЗ – решается задача нахождения оператора ξ .

2.1 Информационно-аналитическая модель процесса функционирования космических аппаратов ДЗЗ

В соответствии с общей схемой исследования (рис. 9) начальным этапом разработки методического аппарата является разработка информационно-аналитической модели КА ДЗЗ и процесса его функционирования. Целью данного этапа является системное описание КА ДЗЗ в пространстве его характеристик, логических и функциональных связей между ними, что позволит воссоздавать неизвестные (недостающие) значения показателей и проводить оценку функциональных возможностей КА.

При построении информационных и информационно-аналитических моделей целью исследований является не рассмотрение функционирования вполне определенных объектов в конкретных условиях, а оценка путей анализа всей совокупности имеющихся данных и знаний, параметров адекватной модели исследуемых объектов в целях воссоздания априорно неизвестного сильно «размытого» из-за недостаточности исходной информации образа

рассматриваемых зарубежных КС ДЗЗ, выявления показателей и параметров, объективно присущих данным объектам [6].

КА является сложной технической системой, он представляет собой совокупность конструкции, обеспечивающих систем и целевой аппаратуры (рис. 10) [10]. Ряд бортовых систем оказывает слабое влияние на облик КА в целом, однако от характеристик некоторых из них может весьма существенно зависеть функционирование КА. К таким бортовым системам относятся, например, целевая аппаратура, система ориентации и стабилизации, система управления движением (система коррекции), система терморегулирования и др.



Рисунок 10 – Структурная декомпозиция типового КА ДЗЗ

Каждая из подсистем КА характеризуется широким набором параметров. Структура системы параметров, характеризующих наиболее важные подсистемы КА ДЗЗ, представлена на рисунках 11, 12.

На рисунках представлены технические характеристики КА, оценить же возможности аппарата можно по его функциональным параметрам, которые характеризуют процесс и результат функционирования КА, другими словами – это частные показатели эффективности. Структура системы функциональных характеристик представлена на (рис. 13).

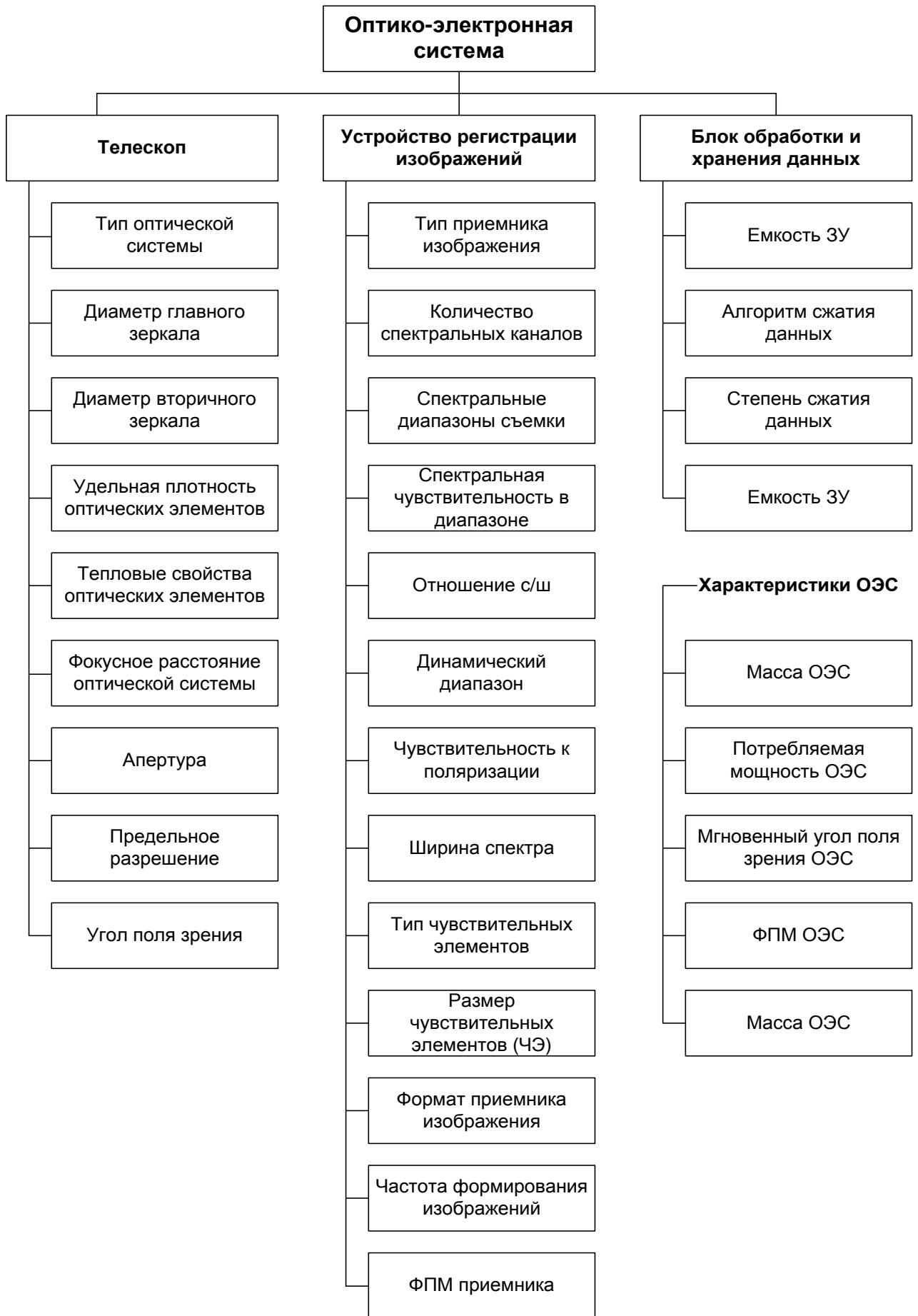


Рисунок 11 – Структурная схема характеристик ОЭС



Рисунок 12 – Схема характеристик основных обеспечивающих подсистем КА



Рисунок 13 – Структурная схема функциональных характеристик КА

Для оценки ряда характеристик КА используются соотношения, составляющие теоретическую основу процесса целевого функционирования КА – получения изображений с помощью ОЭС.

Количество чувствительных элементов (ЧЭ) в строке приемника изображения $N_{чЭ}$ оценивается с помощью выражения

$$N_{чЭ} = L_{захв} / R_o, \quad (20)$$

где $L_{захв}$ – полоса захвата ОЭС;

R_o – линейное разрешение на местности.

Угол поля зрения β ОЭС КА можно определить из выражения

$$\beta = 2 \arctan \left(\frac{L_{захв}}{2H} \right), \quad (21)$$

где H – высота съемки.

Мгновенный угол поля зрения γ ОЭС (угловой размер чувствительного элемента приемника изображения) измеряется в мкрад и определяется с помощью выражений

$$\gamma = \frac{R_o}{H} 10^3, \quad (22)$$

$$\gamma = \frac{\beta}{N_{чЭ}} \frac{\pi}{180} 10^6. \quad (23)$$

При наличии информации о фокусном расстоянии f ОЭС можно рассчитать размер чувствительного элемента δ :

$$\delta = \frac{R_o f}{H}. \quad (24)$$

Главными параметрами, определяющими возможности оптики и характеризующими оптическую систему КА, являются диаметр апертуры и фокусное расстояние. Введем дополнительную характеристику, по которой можно судить о потенциальных возможностях оптической системы КА —

предельная пространственная частота пропускания объектива ОЭС ν_{np}^0 , которая определяется:

$$\nu_{np}^0 = \frac{D_{an}}{\lambda f}. \quad (25)$$

Линейное разрешение определяется рабочей частотой пропускания объектива, предельное значение которой определяется частотой Найквиста [32]:

$$\nu_p^H = \frac{H}{2R_o f}, \quad \nu_{np}^H = \frac{1}{2\delta}, \quad (\nu_p^H < \nu_{np}^H). \quad (26)$$

Введем характеристику «Нормированная частота пропускания ОЭС», равную отношению рабочей частоты к предельной:

$$\nu_{норм} = \frac{\nu_p^H}{\nu_{np}^0} = \left(\frac{H}{2R_o f} \right) / \left(\frac{D_{an}}{\lambda f} \right) = \frac{\lambda H}{2R_o D_{an}}. \quad (27)$$

Эффективность функционирования КА ДЗЗ оценивается по целому ряду показателей (рис. 14). Анализ работ в области исследования эффективности функционирования космических систем [2, 18, 19, 32, 39, 47] показал, что основными показателями являются информативность получаемых данных, производительность системы и оперативность доставки информации.

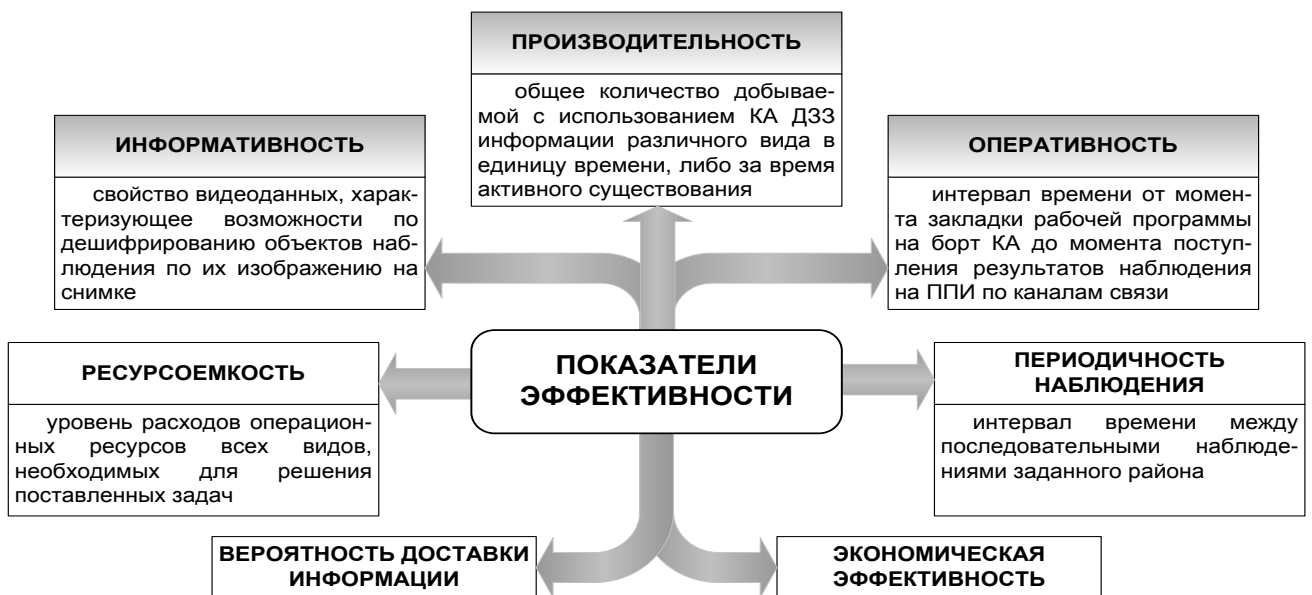


Рисунок 14 – Показатели эффективности функционирования КА ДЗЗ

Информативность характеризуется качеством информации зондирования, которое существенно зависит от обеспечивающих систем КА, параметров целевой аппаратуры, устройств приема информации, а также высоты орбиты КА [21].

Важнейшим показателем качества изображения является линейное разрешение на местности. Для частного случая съемки в надир ЛРМ определяется из соотношения

$$R_0 = \frac{H}{2v_p^n f}. \quad (28)$$

При отклонении оптической оси в плоскости крена на угол ε имеем

$$R_0 = \frac{H}{2v_p^n f \cos \varepsilon}. \quad (29)$$

В данном случае для низких орбит сферичность земли не учитывается.

Приведенные выше показатели, описывающие разрешающие свойства системы, являются фундаментальными.

Обобщающим параметром космической информации является скорость поступления (передачи) цифровой информации, которая измеряется в бит/сек и определяется совокупностью показателей:

- суммарным числом спектральных поддиапазонов,
- геометрическим разрешением,
- полосой захвата,
- числом уровней квантования сигнала n , обеспечивающим заданную радиометрическую точность.

В качестве обобщенного показателя информативности будем использовать информационный поток P , который определяется из выражения:

$$P = \frac{L_{захв}}{R_0^2} \frac{\sqrt{\mu R_3}}{\sqrt{(R_3 + H)^3}} n N_s, \quad (1)$$

где $\mu = 3,986 \cdot 10^5 \text{ км}^3/\text{с}^2$.

Кроме того, введем показатель удельной информационной емкости изображения η , который определяет объем информации, приходящейся на 1 км^2 изображения:

$$\eta = \left(\frac{1000}{R_0} \right)^2 n N_s. \quad (2)$$

Уровни этих характеристик напрямую связаны с массогабаритными параметрами КА. Внедрение новых технологий позволяет снижать эти параметры КА, однако существуют пределы совершенствования информационных характеристик оптико-электронных систем КА.

Если информативность в первую очередь определяется характеристиками бортовой ЦА, то производительность и оперативность наблюдения в существенной степени определяется тем, насколько рационально организован процесс управления движением аппарата и функционированием его бортового оборудования.

В данной работе интерес представляет не производительность конкретного типа КА с учетом влияния на этот показатель всех факторов и внешних условий функционирования, а определение влияния на производительность параметров целевой аппаратуры и обеспечивающих систем при некоторых фиксированных условиях полета. Таким образом, рассматривается **потенциальная производительность**, при этом не учитывается влияние такого фактора, как облачность, хотя для оценки реальной производительности конкретного типа КА не учет этого фактора приводит к ошибке.

Производительность КА будем оценивать площадью, зондируемой за единицу времени активного существования $T_{a.c}$:

$$Q = \langle Z(T_{a.c}) \rangle L_{захв}, \quad (3)$$

где $\langle Z(T_{a.c}) \rangle$ — математическое ожидание сумм длин всех районов, прослеженных на поверхности Земли за время $T_{a.c}$.

$$\langle Z(t) \rangle = \eta t \langle S \rangle, \quad (4)$$

где η — интенсивность потока зондируемых районов (среднее число районов, зондируемых в единицу «сжатого» времени);

$\langle S \rangle$ — математическое ожидание случайной величины S (длина района съемки);

$t = T(T_{a.c})$ — функция единицы времени активного существования КА (учитывает промежутки времени полета КА над территориями, на которых заведомо могут отсутствовать районы, подлежащие зондированию, где аппаратура не включается).

При малых значениях $T_{a.c}$ процесс накопления информации можно рассматривать без учета ее старения. При этом получим удельную производительность КА.

Учитывая, что

$$L_{закв} = 2H \operatorname{tg} \beta = Hb_{\text{ФПМ}} / f ,$$

где $b_{\text{ФПМ}}$ — ширина фотоприемной матрицы; β — половина угла поля зрения целевой аппаратуры; H — высота полета КА; f — фокусное расстояние объектива,

то с учетом (16) получим:

$$Q(T_{a.c}, H, f) = \eta T(T_{a.c}) \langle S \rangle H b_{\text{ФПМ}} / f . \quad (5)$$

Здесь параметры b, f должны иметь одну и ту же размерность (например, мм). Если H и $\langle S \rangle$ заданы в км, то Q имеет размерность км².

Оперативность КА $\tau_{\text{оп}}$ можно рассматривать как интервал времени от момента закладки рабочей программы на борт КА до момента поступления результатов наблюдения на ППИ по каналам связи. Тогда для $\tau_{\text{оп}}$ можно записать:

$$\tau_{\text{оп}} = \tau_{\text{рн}} + \tau_{\text{ап}} + \tau_{\text{ож}} + \tau_{\text{пер}} , \quad (6)$$

где $\tau_{\text{рн}}$ — время выхода КА в район наблюдения; $\tau_{\text{ап}}$ — интервал времени от начала наблюдения заданного района (объекта) регистрирующей аппаратурой t_0 до момента готовности информации к передаче или записи в БЗУ t_1 ; $\tau_{\text{ож}}$ — интервал времени от момента t_1 до начала передачи информации на ППИ t_2 ; $\tau_{\text{пер}}$ — время передачи информации на ППИ по каналам связи.

С использованием некоторых данных из [29, 30, 31] проведем анализ каждой из составляющих выражения (35) и определим, какие из них зависят непосредственно от характеристик КА и его подсистем, а какие – от условий эксплуатации и других внешних факторов. Проведем приблизительную численную оценку каждой составляющей.

Время выхода КА в район наблюдения $\tau_{\text{рн}}$ определяется, прежде всего, взаимным положением данного района и КА, зависящим от вектора его орбитальных параметров. Кроме того, эта составляющая оперативности зависит от характеристик аппаратуры КА – ширины полосы обзора и захвата. Для КА эта величина может составлять от 0,5–1,0 часа до нескольких суток.

Время $\tau_{\text{ап}}$ для КА как источника информации определяется, прежде всего, характеристиками целевой аппаратуры. В настоящее время на большинстве КА ДЗЗ установлены ОЭС, общие характеристики и принципы построения которых позволяют разработать единую методику оценки их оперативности. Скорость движения КА относительно поверхности Земли вдоль трассы полета определяется из выражения

$$V_{\text{КА}} = \frac{2\pi R_3}{T} = \frac{\sqrt{\mu} R_3}{(R_3 + H)^{3/2}}, \quad (7)$$

где T — период обращения КА по орбите, R_3 — радиус Земли.

Время сканирования одного элемента разрешения на местности $L_1=R_0$ по направлению движения КА τ_L может быть определено из условия

$$\tau_L = \frac{L_1}{V_{\text{КА}}} = \frac{R_0 (R_3 + H)^{3/2}}{\sqrt{\mu} R_3}. \quad (8)$$

С учетом (24) для времени получения одного элемента изображения можно записать:

$$\tau_1 = \frac{\delta H (R_3 + H)^{3/2}}{f \sqrt{\mu} R_3}. \quad (38)$$

Если принять, что для распознавания и идентификации объекта на снимке он должен быть накрыт 10–20 строками, то время, необходимое для получения информации, достаточной для идентификации объекта ($R_{ид} = 10R_0$), определится как

$$\tau_{ид} = 10\tau_1 = \frac{10\delta H}{f} \frac{(R_3 + H)^{3/2}}{\sqrt{\mu} R_3}. \quad (9)$$

Именно это время и можно принять за меру оперативности аппаратуры, т.е. $\tau_{ап} = \tau_{ид}$. Оно составляет несколько секунд.

Рассмотрим теперь следующую составляющую в выражении (35) — время ожидания передачи информации $\tau_{ож}$, которое определяется как интервал времени от момента готовности информации КА к передаче $t_r = t_0 + \tau_{ап}$ до момента передачи t_n , т.е. $t_{ож}^{КА} = t_n - t_r$.

Для КА это время определяется взаимным положением района наблюдения $B_{РН}$, пунктов приема информации $B_{ППИ}$ и КА, зависящего от вектора его орбитальных параметров \mathbf{x} .

Таким образом,

$$\tau_{ож} = f(\mathbf{x}, B_{РН}, B_{ППИ}).$$

Задача по оценке $\tau_{ож}$ состоит в том, чтобы, учитывая неравномерность расположения на временной оси участков приема и передачи информации, оценить время ожидания каждой единицы информации, а также найти способ для оценки времени ожидания $\tau_{ож}$ для КА на рассматриваемом интервале времени.

Время передачи одной заявки на ППИ $\tau_{пер}$ зависит от пропускной способности радиолинии и скорости передачи информации в ней. В случае непосредственной передачи информации она также будет зависеть от скорости ее получения.

Анализ составляющих показателя оперативности показывает, что большинство из них зависят не только от характеристик КА и бортовой

аппаратуры, но и от параметров внешних условий функционирования — орбитальных параметров, расположения территории наблюдения, КА и ППИ.

Разработанную информационно-аналитическую модель предполагается использовать для воссоздания недостающих характеристик существующих средств, а также некоторых параметров перспективных КА.

2.2 Формирования информационного набора параметров, КА ДЗЗ с учетом выполнения целевых задач

Системный подход к прогнозированию сложных объектов требует максимально возможного учета совокупности переменных, характеризующих объект, и взаимосвязей между ними. В процессе исследования нередко возникает задача выбора компромиссного варианта между числом переменных в описании объекта и сложностью, и трудоемкостью анализа и прогноза. К тому же задача значительно усложняется, если большинство или все из этих переменных имеют стохастический характер.

Методы снижения размерности описаний сложных объектов являются весьма актуальными для прогностики. Для этого используются достижения теории информации, корреляционного анализа, распознавания образов, теории измерений и ряда других наук и их областей. Большинство методов требует знания значений исследуемых параметров (наличия некоторой статистики), что при прогнозировании перспективных космических средств не всегда возможно.

Под **информативным набором параметров** будем понимать совокупность характеристик, описывающих КА ДЗЗ и процесс его функционирования с достаточной для решения задачи прогнозирования ТО степенью.

КА сложная техническая система и ее ТО описывает множество параметров. Решение настолько многомерной задачи требуют больших затрат времени поэтому целесообразнее уменьшить рассматриваемое число переменных без потери для результата. Такое сокращение может сделать эксперт, убрав из рассмотрения задачи параметры менее всего влияющие на результат или возможен другой подход, при котором начальный набор исходных данных заменяют меньшим числом факторов.

На рисунке 15 представлена общая схема реализации метода, предполагающего для выявления значимых характеристик использовать качественный подход на основе результатов экспертного опроса, а для преобразования исходного набора характеристик – методы факторного анализа и информационно-аналитическую модель.

Результатом практической реализации предлагаемого метода является информативный набор параметров, используемый в качестве исходных данных в дальнейших исследованиях по выявлению технического облика перспективных КА ДЗЗ.

2.2.1 Метод выявления характеристик КА ДЗЗ, оказывающих наибольшее влияние на эффективность его функционирования

КА является сложной технической системой и описывается конечным числом характеристик, определяющих эффективность его функционирования. С целью снижения размерности пространства исследуемых параметров КА из всего множества характеристик необходимо выбрать наиболее значимые. В качестве критерия выбора характеристик предлагается использовать эффективность функционирования КА.

В общем случае на эффективность функционирования КА оказывают влияние характеристики всех подсистем КА – целевой аппаратуры и обеспечивающих систем, а также формы/способы их применения и условия эксплуатации.

Отсутствие полной и достоверной информации о существующих и перспективных КА ДЗЗ ограничивает возможности количественного анализа их характеристик. В связи с этим для анализа характеристик КА и выявления наиболее значимых из них предлагается использовать метод экспертной оценки, суть которого заключается в ранжировании анализируемых характеристик КА ДЗЗ по степени их влияния на эффективность функционирования КА. Обработка результатов экспертных оценок проводится методом ранговой корреляции.

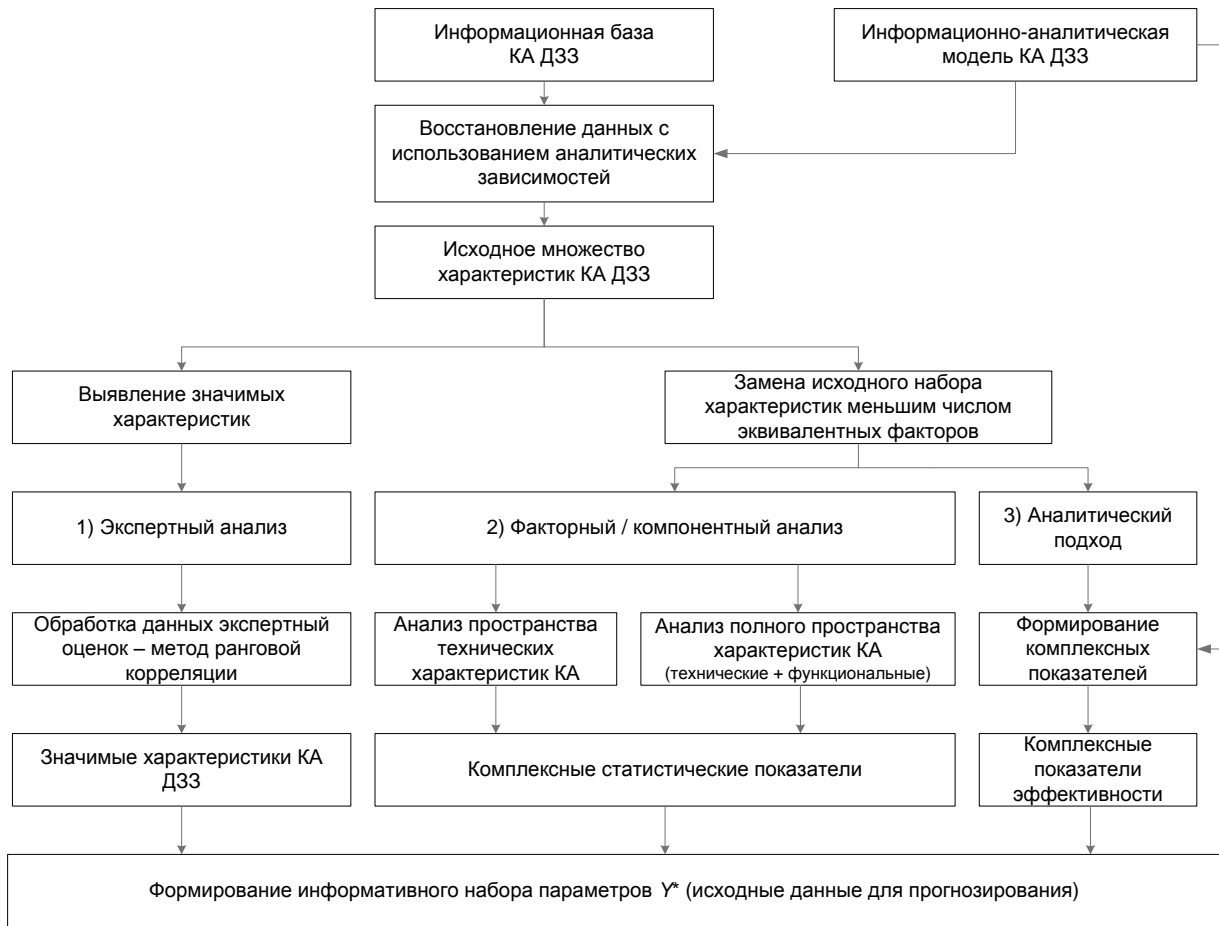


Рисунок 15 — Схема реализации метода формирования информативного набора параметров

Каждому эксперту дается высказать свое мнение по поводу значимости n исследуемых параметров. Для этого им дается возможность поставить оценку каждому параметру от 1 до n , где 1 означает максимальную по значимости оценку, а n минимально возможную.

Во время экспертной оценки необходимо проверить согласованность мнений экспертов для этого вычисляем коэффициент конкордации, который будет указывать на согласованность при $W=1$ или же, наоборот, $W=0$ на полное отсутствие общего мнения экспертов. Коэффициент конкордации W может принимать значение от нуля до единицы и рассчитывается следующим образом:

$$W = \frac{12 \sum_{j=1}^m d_j^2}{n^2(m^3 - m) - n \sum_{i=1}^n T_i}, \quad (10)$$

где T_i – показатель связности рангов:

$$T_i = \sum_{l=1}^L (t_l^3 - t_l), \quad (11)$$

$d_j = S_j - \bar{S}$ – отклонение суммы рангов j -го параметра

Сумма рангов S_j , назначенная экспертами характеристике j ($j = 1, \dots, m$;

m – число исследуемых направлений), определяется по формуле:

$$S_j = \sum_{i=1}^n R_{ij},$$

где R_{ij} – ранг оценки, данной i -м экспертом j -ой характеристике.

Вычислив коэффициент парной корреляции между мнениями различных экспертов получим 1 для экспертов полностью имеющие одинаковое мнение и -1 для экспертов у которых мнение полностью расходится.

Итоговая ранговая оценка ω_j для j -ой характеристики можно определяется:

$$\omega_j = 2 \frac{n(m+1) - S_j}{mn(m+1)}, \quad (12)$$

при этом $\sum_{j=1}^m \omega_j = 1$.

Для выявления q наиболее значимых характеристик вводится критерий \mathcal{G} и используется следующее соотношение:

$$\min \sum_{j=1}^q \omega_j > \mathcal{G}. \quad (13)$$

То есть, необходимо выделить минимальное количество характеристик, сумма весовых коэффициентов которых будет больше заданного значения \mathcal{G} .

2.2.2 Метод снижения размерности пространства исследуемых параметров на основе применения статистических методов

Наличие большого массива статистических данных о характеристиках КА ДЗЗ для выявления зависимостей между параметрами КА позволяет использовать методы регрессионного анализа в сочетании с факторным анализом. Опираясь на

эти параметры можно выявления значимые параметры и на их основе сформировать технический облик будущего КА. При этом факторный анализ будем использовать для уменьшения размерности нашего исследования и поиска более емких характеристик, которые будут включать в себя данные всех рассматриваемых параметров. Также интересен и актуален для заполнения неизвестных нам в силу разных обстоятельств статистических данных.

Основное предположение факторного анализа заключается в том, что каждый исходный параметр КА можно выразить заменить на меньшее количество факторов (новых искусственных параметров). Это позволяет сохранить максимум исходных данных в минимальном количестве переменных. Значения фактора как правило, содержит ключевую информацию.

Методы факторного анализа применяются для сокращения числа переменных, измерения неизмеримого, наглядное представление многомерных наблюдений, преодоление мультиколлинеарности параметров, заполнение пропущенных значений и прочее. Считается плохой статистикой, но новые варианты его использования делают его применение интересным важным осмысленным [17, 48].

Предположим, что имеется статистика по n спутников, каждый из них можно описать при помощи множества параметров m . Если принять за x_{ij} значение j -го параметра для i -го КА, то исходная информация можно быть записать в виде матрицы данных, имеющей n строк (по числу спутников) и m столбцов (по числу параметров). Получим матрицу где каждой строке будет соответствовать КА, а в каждом столбце будет записан параметр, характеризующий его технический облик.

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1j} & \dots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2j} & \dots & x_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{i1} & x_{i2} & \dots & x_{ij} & \dots & x_{im} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nj} & \dots & x_{nm} \end{bmatrix}.$$

Первое что нужно рассчитать это всевозможные комбинации парные коэффициентов корреляции этих параметров. Полученной матрица корреляции показывает влияние параметров друг на друга и их корреляцию. В процессе анализа требуется исключить из рассмотрения сильно коррелирующие между собой параметры оставив минимальное число k параметров, которые оказывают большее влияние на исследуемый нами фактор. Можно воспользоваться критерием Стьюдента или исходить из заданного коэффициента корреляции.

Математическая модель при факторном анализе будет представлена в виде набора факторных нагрузок и факторных весов.

$$\begin{aligned} X_1 &= a_{11}F_1 + a_{12}F_2 + \dots + a_{1k}F_k + d_1U_1 \\ &\vdots \\ X_m &= a_{m1}F_1 + a_{m2}F_2 + \dots + a_{mk}F_k + d_mU_m \end{aligned}, \quad (14)$$

где F_1, F_2, \dots, F_k — факторы;

U_1, U_2, \dots, U_m — постоянные факторы выражают особенные свойства параметра X_j , которые не могут быть описаны через обычные факторы;

a_{ij} ($i = \overline{1, m}; j = \overline{1, k}$) — факторный вес;

d_{ij} ($i = \overline{1, m}$) — степень влияния фактор U_j на X_j .

Факторные веса позволяют сделать выводы об степени влияния исходного параметра в структуре каждого фактора. Схема реализации процедуры факторного анализа представлена на рисунке 16.

Для выражения исходных параметров через факторы используем **методом главных компонент (МГК)**. Одним из условий применения МГК является то, что число факторов равно числу исходных признаков ($k=m$), а постоянными факторы настолько малы что ими можно пренебречь.

$$\begin{aligned} X_1 &= a_{11}F_1 + a_{12}F_2 + \dots + a_{1m}F_m \\ &\vdots \\ X_m &= a_{m1}F_1 + a_{m2}F_2 + \dots + a_{mm}F_m \end{aligned}. \quad (15)$$

Метод главных компонент создает нам новые переменные из старых по сути уравнения линейной регрессии (45) позволяет нам представить начальные

параметры через набор факторов. Цель выбрать максимально изменчивые переменные и исключить зависимые. Первая главная компонента F_1 имеет максимальную выборочную дисперсию, т.е. нужно так подобрать веса чтобы разброс первой главной компоненты был максимально возможным при условии, что сумма квадратов весов, входящих в первую F_1 компоненту равно 1. После этого мы можем сформировать вторую главную компоненту F_2 для этого нужно подобрать веса с одной стороны, чтобы F_2 была не коррелирована с F_1 , а с другой стороны F_2 должна иметь максимально возможную дисперсию. Затем подбираются веса F_3 так чтобы она не коррелировалась с F_1, F_2 и имела при этих двух условиях максимальную дисперсию, и т.д. вплоть до m -й главной компоненты F_m .

Поиск главных компонент осуществляется в порядке убывания их дисперсии. Это означает что факторы, входящие в первую главную компоненту F_1 , оказывают максимально возможное влияние на объект исследования. При этом достаточное количество рассматриваемых для анализа компонент выбирается из начальных условий, а именно какой процент дисперсии должны они в себе сосредоточить (обычно для достоверности это 80-90%).

Расчет конечных результатов происходит путем ортогонального преобразования факторных весов при помощи Varimax-критерия, который определяется как максимум сумм дисперсии квадратов соответствующих факторных весам $V = \sum_j V_j \rightarrow \max$.

$$V = \sum_j \left\{ \left[n \sum_i (a_{ij}^2 / h_i^2) - \left(\sum_i a_{ij}^2 / h_i^2 \right)^2 \right] / n^2 \right\} \rightarrow \max, \quad (16)$$

решение ищется в виде $A = A_0 T$,

где A_0 — матрица факторных нагрузок;

T — ортогональная преобразующая матрица.

Поиск собственных векторов матрицы R_0 по МГК осуществляется в программных комплексах, например Excel или Statistica 10.

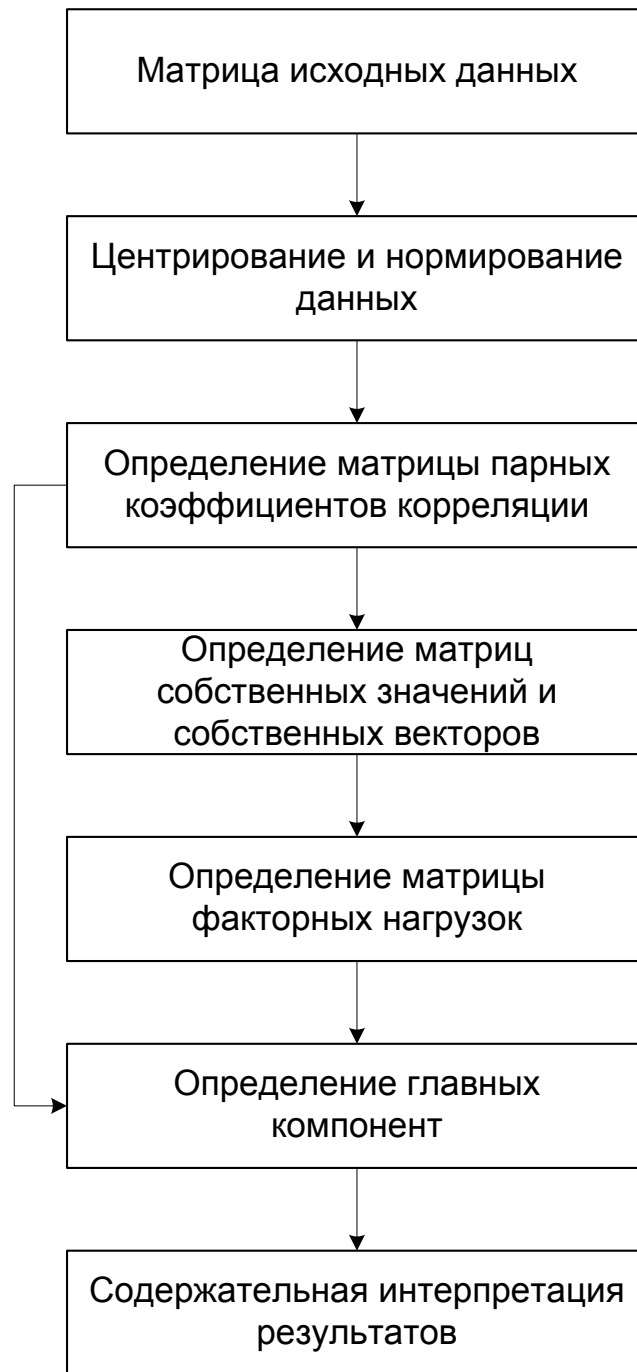


Рисунок 16 — Схема реализации факторного анализа

Некоторые компоненты, не попавшие в заданную дисперсию 80–90% отбрасываются. В математической модели останется намного меньше главных компонент, чем начального число параметров ($k \ll n$). При выборе наиболее значимых факторов пользуемся следующим критерием:

$$\eta_k = \left(\frac{\sum_{r=1}^k \lambda_r}{\sum_{r=1}^n \lambda_r} \right) \cdot 100\% > \alpha,$$

где α — задаваемый порог на долю суммарной дисперсии, приходящейся на k главных компонент.

Ниже представлен алгоритм реализации частного анализа

Рассмотрим алгоритм реализации компонентного анализа, как наиболее простого с точки зрения объема вычислений.

Начальными данными будем считать набор n векторов характеристик для N КА, которые можно представить в виде матрицы:

$$\bar{Y}_{(n)} = \langle \bar{y}_1 \dots \bar{y}_n \rangle.$$

Математическое ожидание здесь будет выступать в роли случайного вектора и будет описывать независимые от факторов константы.

$$\bar{Y} = (\bar{y}_1, \dots, \bar{y}_n)$$

Для получения матрицы корреляции и их коэффициентов нужно рассчитать корреляцию между всеми характеристиками всех КА:

$$K_{[n]} = \|k_{ij}\|_n^n,$$

$$R_{[n]} = \|r_{ij}\|_n^n,$$

где $r_{ij} = \frac{k_{ij}}{\sigma_i \sigma_j}$.

Затем описанным выше способом происходит выявление главных векторов методом факторного анализа [65].

Полученная математическая модель позволяет представить j -тую характеристику в виде уравнения состоящего из векторов главных компонент F_1, F_2, \dots, F_n и их весов a_{ij} :

$$z_j = a_{1j}F_1 + a_{2j}F_2 + \dots + a_{nj}F_n,$$

Как описывалось ранее, каждая вектор главной компоненты F_j вычисляются так чтобы быть ортогональным к предыдущему вектору главной компоненты и ее можно записать в виде:

$$F_j = a_{j1}z_1 + a_{j2}z_2 + \dots + a_{jn}z_n.$$

В итоге поиск последующих компонент продолжается по принципу что каждая последующая главная компонента описывает все меньшее количество дисперсии:

$$\sigma^2(F_1) \geq \sigma^2(F_2) \geq \dots \geq \sigma^2(F_n).$$

Фактически же нам нужно получить из исходной матрицы параметров новую матрицу, где каждый элемент диагонали матрицы будет описывать дисперсию главной компоненты

$$F_{[n]}^T F_{[n]} = \begin{vmatrix} \sigma^2(F_1) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma^2(F_2) & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \sigma^2(F_n) \end{vmatrix}.$$

Для подомной матрицы уместно следующие условия, а именно сумма квадратов дисперсии n-главной компоненты равна сумме квадратов дисперсии j-тых характеристик

$$\sum_{i=1}^n \sigma^2(F_i) = \sum_{j=1}^n \sigma^2(z_j).$$

Также уравнение можно представить в следующей форме:

$$z_{\langle n \rangle} = F_{\langle n \rangle} A_{[n]}^T,$$

где $z_{\langle n \rangle} = \langle z_j \rangle_n = \langle z_1, z_2, \dots, z_n \rangle$ — нормированный вектор статистических данных собранных по исследуемым параметрам;

$F_{\langle n \rangle} = \langle F_i \rangle_n = \langle F_1, F_2, \dots, F_n \rangle$ — найденные вектора главных компонент;

$A_{[n]}$ — ортогонально преобразованная матрица.

$$A_{[n]} = \left\| a_{ij} \right\|_n = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1i} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2i} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{j1} & a_{j1} & \dots & a_{ji} & \dots & a_{jn} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{ni} & \dots & a_{nn} \end{vmatrix}.$$

Из этого следует следующее:

$$F_{\langle n \rangle} = z_{\langle n \rangle} A_{[n]}.$$

дисперсию главной компоненты $F_{\langle n \rangle}$ можно рассчитать при помощи следующего уравнения:

$$D(F_{\langle n \rangle}) = D[z_{\langle n \rangle} A_{[n]}] = A_{[n]}^T D[z_{\langle n \rangle}] A_{[n]} = A_{[n]}^T k_{[n]} A_{[n]}.$$

Подобные задачи можно решить с помощью функции Лагранжа:

$$\psi = A_{[n]}^T k_{[n]} A_{[n]} - \lambda (A_{[n]}^T A_{[n]} - 1),$$

где λ — множитель Лагранжа.

Вектор частных производных имеет вид:

$$\frac{\partial \psi}{\partial A_{[n]}} = 2k_{[n]} A_{[n]} - 2\lambda A_{[n]}.$$

Тогда уравнение будет иметь вид:

$$(k_{[n]} - \lambda I_{[n]}) A_{[n]} = 0. \quad (17)$$

Оно имеет решения, отличные от нуля, если матрица $k_{[n]} - \lambda I_{[n]}$ — вырожденная, то есть $k_{[n]} - \lambda I_{[n]} = 0$.

Характеристические корни матрицы $k_{[n]}$ можно записать: $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_n$.

Умножив формулу (30) слева на $A_{[n]}^T$, получим:

$$A_{[n]}^T k_{[n]} A_{[n]} = \lambda.$$

$A_{[n]}^T k_{[n]} A_{[n]}$ является дисперсией вектора $F_{\langle n \rangle}$. Таким образом, чтобы максимизировать дисперсию, необходимо взять наибольший характеристический корень корреляционной матрицы k . Тогда первая главная компонента представлена уравнением:

$$F_{\langle n \rangle_1} = z_{\langle n \rangle_1} A_1$$

с дисперсией λ_1 и т.д.

Цель описанной метода определение главных компонент описывающих максимальную дисперсию тем самым исключение параметров не играющей большой роли при прогнозировании ТО КА ДЗЗ. Существует множество методов расчет собственных чисел и собственных векторов регрессионной модели (ротаций, максимального правдоподобия и др.) [48]. Для облегчения вычислений был использован программное обеспечение STATISTICA 10.

2.3 Оценка основных параметров перспективных космических аппаратов дистанционного зондирования Земли

С целью решения задачи прогнозирования технического облика перспективных КА ДЗЗ разработан метод оценки основных параметров КА, в основе которой используются методы регрессионного и факторного анализ. Общая схема реализации методики представлена на рисунке 17.

Исходными данными в разработанном подходе являются информативных набор параметров, выявленный с использованием описанного в п. 2.2 методического аппарата, и требования к характеристикам перспективных КА ДЗЗ, сформулированные в результате анализа НИОКР перспектив развития КС ДЗЗ и требований потребителей к качеству космической информации (гл. 1).



Рисунок 17 – Общая схема метода оценки основных параметров КА ДЗЗ

2.3.1 Прогнозирование характеристик КА ДЗЗ на основе выявления временных тенденций изменения комплексных показателей эффективности и комплексных статистических показателей

При анализе развития зарубежных КА ДЗЗ выявляются закономерности изменения ряда параметров КА в зависимости от времени его разработки и запуска. Это объясняется эволюционным развитием техники за счет ее усовершенствования, внедрения новых технологий и технических решений. Отсутствие полноценной информации о разработках, проводимых за рубежом в

области развития технологий космических средств ДЗЗ, затрудняет оценку характеристик перспективных средств. Кроме того, даже при наличии достоверной и полноценной информации о передовых технологиях оценить их влияние на изменение основных параметров КА довольно сложно (требуется узкоспециализированные знания). Если основываться на предположении о сохранении в будущем прошлых и настоящих тенденций развития объекта исследования (КА ДЗЗ), то для оценки характеристик перспективных средств можно воспользоваться экстраполяционными методами прогнозирования, основу которых составляет изучение временных рядов – трендов.

Сперва необходимо выбрать оптимальную функцию, которая максимально приближено описывает разброс значений исследуемых параметров. Воспользуемся одним из популярнейших методом наименьших квадратов (МНК). При этом методе возникает такое понятие как ошибка прогноза это разница между y_i — фактические значения исходного параметра и \hat{y}_i — расчетные значения исходного параметра. При подсчете суммарной ошибки для того чтобы ошибки не компенсировали друг друга одна в плюс другая в минус подсчитывается сумма квадратов ошибки прогноза. Суть взять такую модель, при которой суммарная ошибка минимальна:

$$S = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2 \rightarrow \min, \quad (48)$$

Получить прогноз мы можем, построив математическую модель. Модель это некая формула, которая связывает объясняемую переменную \hat{y}_i и объясняющие переменные (регрессоры) x_i .

$$\hat{y} = f(x_i; a_1, a_2, \dots, a_k, t),$$

где t — время; Первой шаг придумать адекватную модель далее метод, который по исходному набору точек позволит найти неизвестные параметры a_1, a_2, \dots, a_k .

Обязательно при построении модели необходимо представлять данные в графическом виде, так как при просто графическом анализе можно выявить то, что увидеть вслепую без графика эконометрический очень сложно.

Для определения неизвестных коэффициентов необходимо решить задачу минимизации, а именно приравняем производную от каждого коэффициента к нулю получив экстремумы.

Важным моментом получения прогноза с помощью МНК является оценка достоверности полученного результата. Для этой цели используется целый ряд статистических характеристик:

1. Оценка стандартной ошибки:

$$S_{1.f(x)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [y_i - f(x_i)]^2}{n - p}}, \quad (18)$$

где n — число наблюдений; p — число определяемых коэффициентов модели.

2. Средняя относительная ошибка оценки:

$$\bar{m}_\alpha = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{y_i - f(x_i)}{y_i} \cdot 100\%. \quad (19)$$

3. Среднее линейное отклонение:

$$B = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - f(x_i)|}{\sqrt{n(n-1)}}. \quad (51)$$

Критерии (49, 50, 51) показывают степень приближения модели к реальным наблюдениям за процессом. Важным критерием оценки надежности модели является корреляционное отношение:

$$\eta = \sqrt{\frac{1 - S_{1.f(x)}^2}{S_1^2}},$$

где S_1^2 — полная дисперсия зависимой переменной, которая вычисляется по формуле:

$$S_1^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \bar{y})^2}{n-1},$$

где \bar{y} — средняя арифметическая зависимой переменной, вычисленная по эмпирическим данным ряда.

Поскольку $0 < \eta < 1$, то близость коэффициента множественной корреляции к единице позволяет судить одновременно о надежности модели и существенности связи между переменными. Степень существенности связи между переменными дает возможность оценить достоверность выбранной модели через значимость индекса корреляции по Z -критерию Фишера:

$$Z = \frac{1}{2} \ln \frac{\eta^2}{1 - \eta^2} \cdot \frac{n - p}{p - 1} \geq Z_p,$$

где Z_p — табличное значение z при заданной доверительной вероятности p .

Для получения надежных оценок уровень доверительной вероятности примем не ниже 90–95%, т.е. $p \geq 0,9 \dots 0,95$. Цель оценки существенности индекса корреляции состоит в проверке гипотезы об отсутствии связи между переменными.

Оценка значимости уравнения регрессии происходит с помощью F -критерий Фишера. На первом этапе выдвигается гипотеза коэффициент регрессии равен нулю, а значит фактор не оказывает влияние на результирующий показатель. Мы должны либо принять, либо опровергнуть эту гипотезу. F -критерий Фишера это есть отношение сумма квадратов отклонения факторной дисперсии к сумме квадратов остаточной дисперсии:

$$F = \frac{S_1^2}{S_{1.f(x)}^2} \geq F_{1-\alpha},$$

После получения значения критерия Фишера мы сравниваем его с табличным значением $F_{1-\alpha}$ критерия. Если фактическое значение больше табличного значит гипотеза, выдвинутая ранее отвергается. Т.е. уравнение регрессии статически значимо, а значит фактор оказывает влияние на результирующий показатель. Если же наоборот, то мы подтверждаем ранее высказанную гипотезу.

Помимо прогнозирования методом регрессионного анализа развития собственных характеристик и комплексных показателей КА целесообразно исследовать тенденции развития **главных факторов** (метод выявления главных

факторов (компонент) представлен в п. 2.2.2) в качестве некоторых обобщенных показателей.

Модель компонентного анализа (45) можно представить, как

$$X = AF. \quad (20)$$

Путем ретроспективного анализа n -мерного случайного вектора X определяется матрица факторных нагрузок A размером $n \times n$. Далее необходимо выявить k факторов, причем ($k < n$), определяющих сущность развития объекта исследования, описываемого вектором характеристик X .

Отобрав соответствующие k столбцов матрицы A , получим матрицу A_1 размером $n \times k$. Ей будет соответствовать равенство

$$X = A_1 F. \quad (53)$$

Определим матрицу A^{-1} , обращенную по отношению к A так, что $A^{-1}A = 1$. Умножим левую часть уравнения (52) на A^{-1} : $A^{-1}X = F$. Получим матрицу значений F размером $n \times t$, где t — число замеров вектора X в ретроспективный период. Из этой матрицы выделим строки, соответствующие главным факторам, и получим подматрицу F_1 . Каждой строкой этой подматрицы будет определяться процесс развития во времени некоторой обобщенной ненаблюдаемой характеристики f_1 объекта исследования при условии, если все t замеров представляли бы собой последовательность во времени. Исходя из основного положения факторного анализа, именно эти k характеристик ($k < n$) определяют процесс в целом достаточно полно с учетом всех внутренних статистических связей.

Согласно основному принципу поискового прогнозирования, предполагаем, что статистическая структура прогнозируемой системы сохраняется на отрезке времени упреждения $T(A = const)$ и основные тенденции развития факторов также.

Методами экстраполяции прогнозируется развитие каждого из факторов на заданное время упреждения T . В результате получим описания дополнительно q

значений F_1 , где $q = \frac{T}{\Delta t_p}$, а Δt_p — шаг измерений в ретроспективном периоде.

Тогда матрица F_1 с новыми q столбцами примет вид F_2 размером $k \times (m + q)$. Подставив F_2 в формулу (53), получим значения X в ретроспективный и будущий период T :

$$X_{p+T} = A_1 F_2. \quad (21)$$

Первые m столбцов матрицы (8) дадут нам оценки всех показателей \hat{x}_i для прошлых m замеров и могут быть использованы для проверки точности аппроксимации. Последние q столбцов выражения (54) дадут прогнозируемые значения параметров \hat{x}_i в различные моменты периода упреждения.

Если рассчитывать ретроспективные значения X не имеет смысла, то будущие значения можно рассчитывать по формуле $X_T = A_1 F_{2q}$, где F_{2q} — матрица, состоящая из последних q столбцов матрицы F_2 .

Основным преимуществом прогнозирования развития факторов, а не отдельных переменных является даже не то, что это существенно уменьшает размерность задачи ($k \ll n$), а то, что в процессе прогнозирования факторов автоматически решается задача синтеза и увязки прогнозов отдельных показателей.

2.3.2 Математические модели функциональных связей между основными параметрами КА

Метод выявления функциональных зависимостей между основными параметрами построена на принципах регрессионного анализа [41]. Анализ будет подвергаться зависимость одного параметра от нескольких других независимых друг от друга. Большая выборка накопленных данных позволяет использовать такой метод для выявления зависимостей между параметрами КА ДЗЗ и исследовать прогнозные значения параметров перспективных КА формируя при этом его ТО. ТО описывается множеством параметров, поэтому выбор из них некоррелированных является одним из обязательного условия для корректного

анализа. Количество исследуемых прототипов спутников должно превышать число параметров исследуемой математической модели иначе полученные результаты будут недостаточно правдивы. Пробелы в статистике по не основным параметрам могут быть рассчитаны при помощи факторного анализа данных описанного выше или усреднены для динамически не изменяемых параметров. Подробная схема данного метода выявления функциональных связей между параметрами КА представлена на рисунке 18. Выбор функциональной зависимости для каждого конкретного случая должен быть индивидуальным и описывать происходящий процесс с наименьшим отклонением от реальных значений.

Процесс построения математической модели можно разделить на следующие пункты:

1. Выбор системы факторов X_i , наиболее влияющих на показатель Y , на основе теоретического и логического анализа задачи.
2. Накопление или обобщение статистических наблюдений на исследуемом промежутке времени.
3. Выбор типа функциональной зависимости которая имеет минимальные расхождения с реальными данными наблюдений.
4. Оценка качества выбора функциональной зависимости математической модели по разным критериям.
5. Формирование прогнозных значений искомого показателя Y .

При построении уравнений множественной регрессии используются экстраполяционные методы на основе обработки статистических данных по прототипам КА.

Поиск компромиссных решения осуществляется методом релаксации, представленным на рисунке 19, который сводится к следующим действиям:

пусть требуется выбрать параметры КА P_1, P_2, \dots, P_k такие, которые минимизируют некоторую функцию $S(P_1, P_2, \dots, P_k)$.

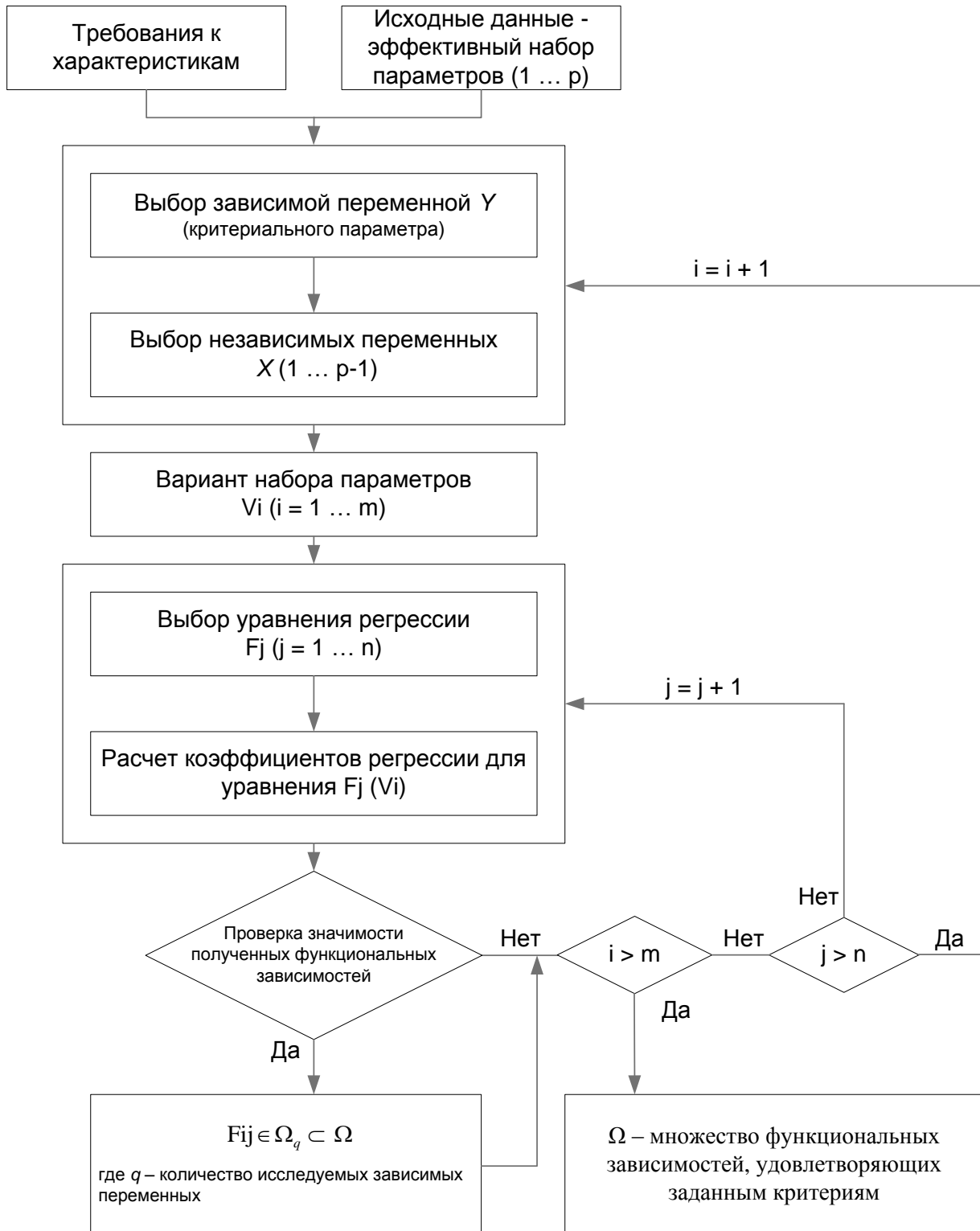


Рисунок 18 – Общая схема метода выявления функциональных связей между параметрами КА.

Пусть параметры выбираются из соответствующих множеств $P_j^H \leq P_j \leq P_j^B$, $j = 1, 2, \dots, k$. Тогда в k – мерном пространстве выбираем точку $P_1^0, P_2^0, \dots, P_k^0$, принадлежащую множеству $P_j^H \leq P_j \leq P_j^B$, $j=1, k$. Значение функции в этой точке равно $C(P_1^0, P_2^0, \dots, P_k^0)$. Эту точку будем называть точкой нулевого приближения,

а значение $C(P_1^0, P_2^0, \dots, P_k^0)$ будем обозначать C^0 . Отправляясь от этой точки, используем итерационную процедуру покомпонентной минимизации величины C как функции одной переменной. При этом будем ослаблять связи, позволяя поочередно изменяться каждому параметру. Сначала изменим первый из них P_1 , оставив другим прежние значения и будем осуществлять одномерный поиск по P_1 , пока не наткнёмся на минимум $C(P_1^0, P_2^0, \dots, P_k^0)$ по направлению этой оси в области значения $P_j^H \leq P_j \leq P_j^B$. В этой точке с координатами $P_1^0, P_2^0, \dots, P_k^0$ остановимся, после чего «ослабим» второй параметр и позволим точке двигаться по оси второго параметра вплоть до минимума функции по P_2 при закреплённых других параметрах (параметр P_1 имеет значение $P_1^{(1)}$ определенное на предшествующем шаге). В результате фиксируется точка $C(P_1^{(1)}, P_2^{(1)}, \dots, P_k^{(1)})$. Эта процедура повторяется k раз, за которые мы по очереди расслабим все k параметров. Таким образом полученная в первой итерации точка $P_1^{(1)}, P_2^{(1)}, \dots, P_k^{(1)}$ называется точкой первого приближения, а значение $C(P_1^{(1)}, P_2^{(1)}, \dots, P_k^{(1)})$ обозначается C^1 . Исходя из точки первого приближения, начинаем строить точку второго приближения. Для этого находим $P_1^H \leq P_1^{(2)} \leq P_1^B$ такое, что $C(P_1, P_2^{(1)}, \dots, P_k^{(1)})$ имеет минимум при $P_1 = P_1^{(2)}$, а затем $P_2^H \leq P_2^{(1)} \leq P_2^B$ из условия минимума $C(P_1, P_2^{(1)}, \dots, P_k^{(1)})$ при $P_2 = P_2^{(2)}$ и т.д. Остановка процедуры произойдет тогда, когда очередная точка окажется точкой минимума по всем параметрам. Таким образом, поставим n приближений, мы примем к соотношению

$$C^0 \geq C^1 \geq C^2 \geq \dots \geq C^n \rightarrow \min C(P_1, P_2, \dots, P_k) \quad P_j^H \leq P_j \leq P_j^B, \quad j = 1, 2, \dots, k.$$

Минимизация функции C по каждой переменной может быть проведена различными способами. Метод последовательных уступок исходит из предположения, что показатели эффективности могут быть расположены в порядке убывающей важности ψ_1, ψ_2, \dots . Будем считать, что каждый из показателей нужно обратить в минимум. Если это не так, достаточно изменить знак показателя. Поиск компромиссного решения ведется в следующей

последовательности: находят решение, обращающее в минимум главный показатель эффективности ψ_1 ; исходя из практических соображений, назначается уступка $\Delta\psi_1$, которую мы согласны допустить для того, чтобы обратиться в минимум показатель ψ_2 ; при условии $\psi'_1 \leq \psi_1 + \Delta\psi_1$ находят минимум второго показателя ψ_2 ; назначают уступку второго показателя $\Delta\psi_2$, ценой которого можно минимизировать ψ_3 и т.д.

Минимальное значение критерия $\Delta\psi_m$ при выбранных $\Delta\psi_1, \Delta\psi_2, \dots, \Delta\psi_{m-1}$ определяет оптимальную величину варьируемого параметра. С точки зрения формальной логики схема метода последовательного анализа вариантов сводится к следующей последовательности повторения преобразований:

а) разбиение множества вариантов решений задачи на несколько подмножеств, каждое из которых обладает дополнительными специфическими свойствами и оценивается соответствующими показателями;

б) использование этих свойств для поиска логических противоречий в описании отдельных подмножеств;

в) исключение из дальнейшего рассмотрения тех подмножеств вариантов решения, в описании которых имеются логические противоречия.

При этом метод последовательного развития анализа и отбора вариантов состоит в таком способе развития вариантов и таком способе построения операторов их анализа, которые позволяют отсеивать невыгодные начальные части вариантов до их полного построения – по мере того как эту бесперспективность удаётся обнаружить. Поскольку при отсеивании бесперспективных начальных частей вариантов отсеивается тем самым все множество их продолжений, то происходит значительная экономия в вычислительной процедуре, причем эта экономия является тем более существенной, чем больше специфических свойств системы использовано для построения операторов анализа и отсева.

Общая процедура поиска компромиссного варианта космического аппарата (КА), реализующая предложенный метод, предполагает проведение независимого

исследования характера изменения частных критериев в функции основных параметров КА.

С одной стороны, такое исследование позволяет сделать более обоснованным выбор метода получения компромиссного варианта; с другой стороны – исследование необходимо для установления степени объективности того или иного компромиссного решения, так как результат исследования зависит не только от применяемого метода, но и от вида конкретных критериальных функций.

$$\psi_1(P), 1 = \overline{1, m}$$

Формирование компромиссного варианта КА осуществляется в процессе выполнения процедуры метода релаксации с использованием метода последовательных уступок и метода последовательного анализа вариантов. Процедура имеет следующие особенности:

а) в каждой итерации одномерный поиск каждого параметра осуществляется не по максимуму (минимуму) одного показателя, а по их совокупности, поскольку решаемая задача является многокритериальной.

б) в каждом цикле каждой итерации одномерный поиск параметров осуществляется с использованием метода последовательных уступок;

в) в каждой итерации достоверность решения по методу последовательных уступок обеспечивается применением метода последовательного анализа вариантов, предполагающего при необходимости более углубленное исследование и использование дополнительных наиболее информативных частных критериев для выработки решения.

В результате выполнения поисковой релаксационной процедуры мы получаем ранжированный по предпочтительности ряд вариантов КА

$$\omega_{КА}^{(1)} > \omega_{КА}^{(2)} > \omega_{КА}^{(3)} > \dots > \omega_{КА}^{(u)} = \omega_{КА}^{opt}$$

Лучшим будет вариант КА $\omega_{КА}^{(u)}$, который будет предпочтительнее всех предшествующих и в сущности не будет противоречить выбранной модели решения. В итоге данный метод позволяет, исходя из выбранных критериев, определить технический облик будущего прототипа КА при заданных

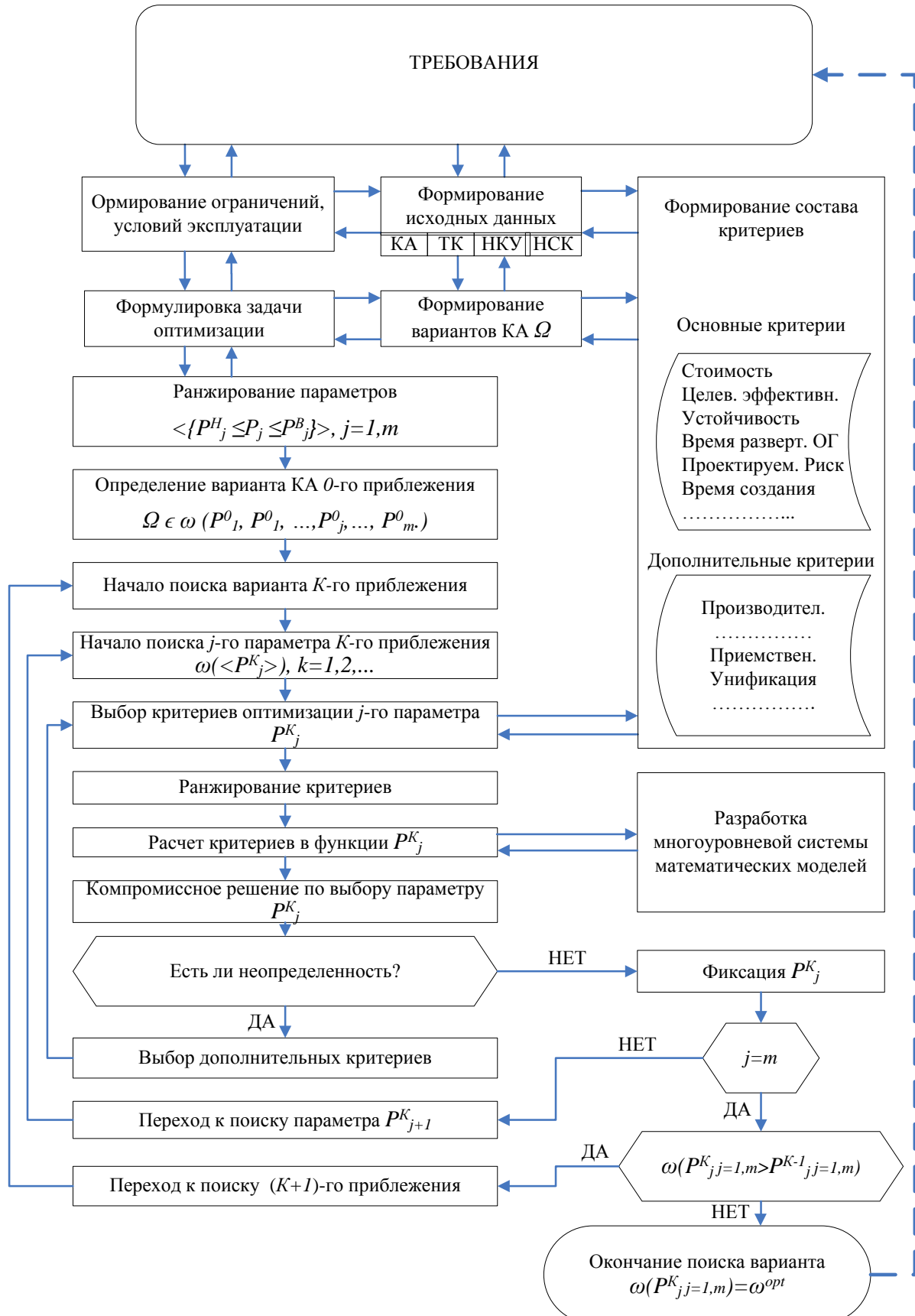


Рисунок 19. Схема поиска компромиссного варианта КА.

показателях эффективности, например, исходя из задачи обеспечения приемлемой стоимости и в рамках определенного времени реализации той или иной концепции.

Известно большое количество вариантов такого анализа, опирающихся на различные допущения о структуре экспериментальных данных и свойствах регрессионной модели [17, 41].

Для эффективного прогнозирования возможно сочетание факторного анализа с аналитическими моделями регрессионного анализа. При этом мы исследуем не сами характеристики КА, а только выбранные факторы, полученные методом главных компонент, описанным выше [38].

Вектор зависимых переменных Y равен произведению факторов записанных в виде матрицы F и вектора коэффициента регрессии Γ . Если решить полученное уравнение вида $Y = F\Gamma$, то мы получим следующее выражение:

$$\Gamma = (m-1)^{-1} \Lambda^{-1}(FY) \text{ или } \gamma_r = (m-1)^{-1} \lambda_r^{-1} \sum_{i=1}^m f_{ri} y_i,$$

где m — объем исходной выборки;

f_{ri} — значение r -й главной компоненты в i -й точке;

λ_r — дисперсия r -й главной компоненты.

Погрешности коэффициентов регрессии определяются как

$$\sigma(\gamma_r) = |\gamma_r| (m-1)^{-1/2} S(y),$$

где $S(y)$ — стандартное отклонение y для фиксированного x .

Коэффициенты корреляции между главными компонентами и y можно вычислить по формуле $r(y, f_r) = \lambda_r^{1/2} \sigma^{-1}(y) \gamma_r$, где $\sigma(y)$ — среднеквадратическое отклонение y от общего среднего y по всей выборке.

При построении подобных регрессионных моделей мы не рассматриваем всю совокупность исходных параметров, а только те, которые вносят значительный вклад в прогнозируемый результат, кроме этого происходит исключение взаимно

коррелируемых параметров чем самым снижается размерность нашего исследования. Такой подход позволяет упростить решение подобной задачи.

Для того чтобы считать нашу модель достоверной нужно чтобы количество исследуемых объектов или наблюдений было минимум в три раза больше чем рассмотренных факторов $n > 3k$. Найдя коэффициент детерминации (R^2) мы сможем оценить построенную модель, а именно если выполняется условие $R^2 > 0,8$ модель множественной регрессии является достаточно точной.

Коэффициент детерминации R^2 при этом вычисляется:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}, \quad \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i. \quad (22)$$

Взяв квадратный корень из данного выражения, мы можем найти коэффициент корреляции:

$$R = \sqrt{R^2}.$$

3. Скорректированный коэффициент детерминации:

$$R_c^2 = 1 - (1 - R^2) \frac{n-1}{n-k-1}.$$

4. Стандартная ошибка:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n-k-1}}.$$

5. Оценка значимости модели осуществляется по F -критерию Фишера. По наблюдаемым значениям определяется значение

$$F_{набл} = \frac{R^2(n-k-1)}{(1-R^2)k}.$$

Если $F_{набл} > F_{кр} = F_{табл}(0,95; n-1; n-k-1)$, где 0,95 – уровень доверительной вероятности, $(n-1)$ и $(n-k-1)$ степени свободы модели, то модель считается значимой.

Таким образом, в итоге реализации данного метода формируется множество функциональных зависимостей Ω , удовлетворяющих заданным критериям.

Общая схема реализации комплексной методики прогнозирования ТО КА ДЗЗ представлена на рисунке 20.

Расчет основных характеристик перспективных КА ДЗЗ проводится на основе сформированного множества функций, исходными данными для которых являются требования к характеристикам перспективных КА.

Использование нескольких вариантов функциональных зависимостей (от разного состава переменных) позволяет повысить точность прогнозной оценки.

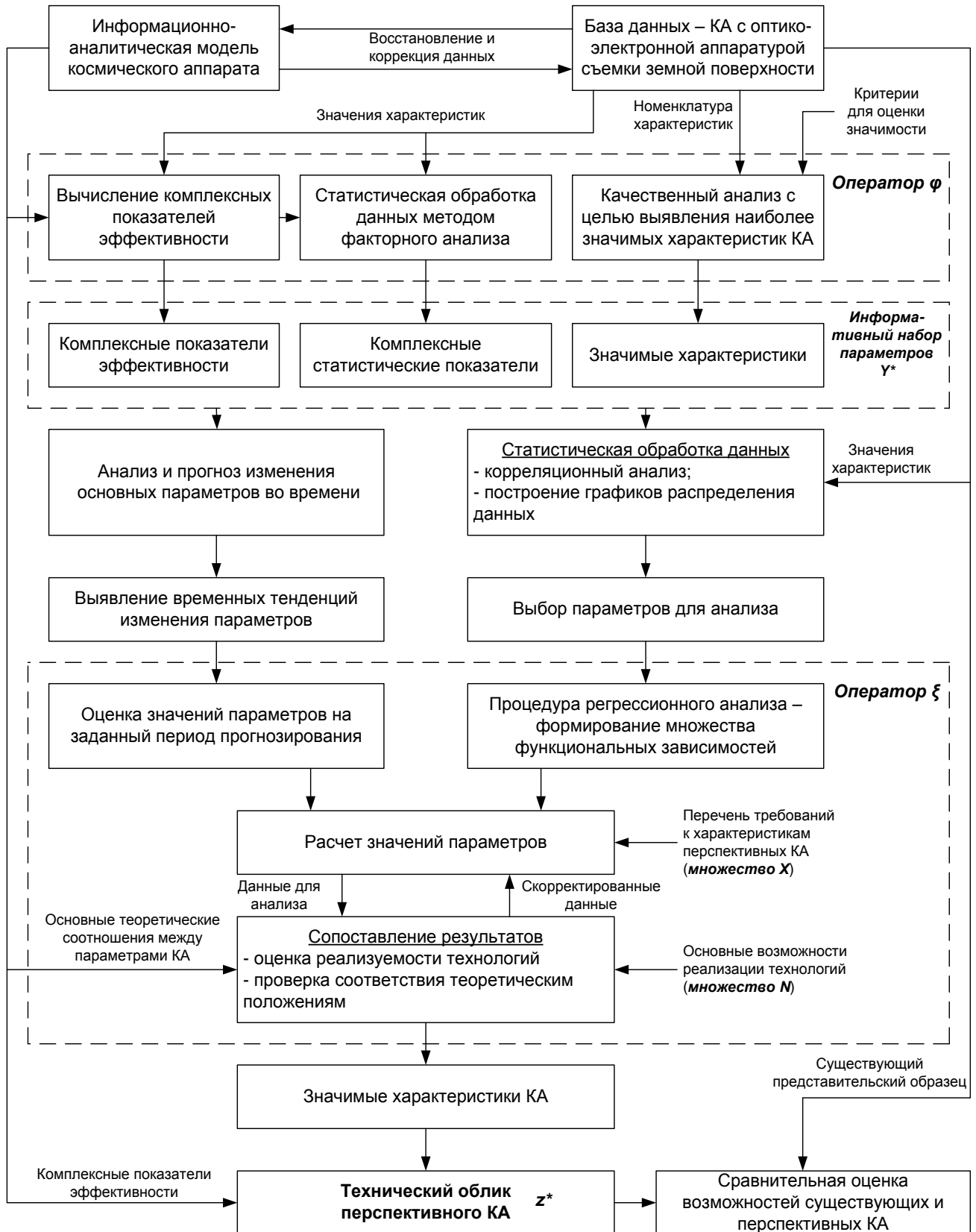


Рисунок 20 – Общая схема алгоритма реализации комплексной методики формирования технического облика перспективных КА ДЗЗ

2.4 Выводы по главе 2

1. В целях прогнозирования технического облика перспективных КА ДЗЗ разработана комплексная методика, базирующаяся на использовании методов последовательных уступок, релаксации, статистического, регрессионного, факторного и компонентного анализов, представляющая собой совокупность взаимосвязанных методов, обеспечивающих решение поставленных задач исследования.

2. Разработана информационно-аналитическая модель КА ДЗЗ и процесса его функционирования, позволяющая проводить оценку ряда характеристик КА. Разработаны модели основных показателей эффективности функционирования КА – информативности, производительности и оперативности. Введены комплексные показатели эффективности.

3. Разработана метод формирования исходных данных, позволяющая выявить информативный набор параметров, характеризующих технический облик КА ДЗЗ. В рамках методики применяется три направления – выявление наиболее значимых характеристик КА ДЗЗ, формирование комплексных показателей эффективности, факторизация исходного множества характеристик с целью выявления комплексных статистических показателей.

4. Для выявления наиболее значимых характеристик КА ДЗЗ предложен подход, основанный на экспертном анализе, суть которого заключается в ранжировании анализируемых характеристик КА ДЗЗ по степени их влияния на эффективность функционирования КА.

5. Для выявления комплексных статистических показателей предложено использовать один из методов факторного анализа — метод главных компонент, который позволяет сконцентрировать исходную информацию путем выражения большого числа рассматриваемых признаков через меньшее число более емких и существенных внутренних характеристик объекта.

6. Разработан метод формирования ТО перспективных КА ДЗЗ, в основе которой используются методы регрессионного анализа. Выделены два направления реализации метода: анализ временных трендов и анализ

функциональных связей между основными характеристиками КА, которые реализуются на базе общего подхода. Выбраны критерии оценки качества моделей.

7. Возможности разработанной методики не ограничиваются рамками проведенной работы. Комплексная методика может использоваться как для формирования технического облика перспективных КА, так и для сравнительной оценки эффективности существующих КА ДЗЗ. Разработанный методический аппарат может применяться для формирования ТО космических или сложных систем, а также для решения некоторых видов других многокритериальных задач.

3 Экспериментальное исследование комплексной методики по формированию технического облика перспективных космических аппаратов дистанционного зондирования Земли

На основе разработанной в гл. 2 комплексной методики, с использованием данных, полученных в результате применения методов проектного анализа, определим ТО перспективных КА ДЗЗ. Для этого на первом этапе определим информативный набор параметров, описывающих ТО КА.

3.1 Результаты выявления информативного набора параметров, характеризующих технический облик КА ДЗЗ

Разработанный в п. 2.2 метод позволяет подготовить исходные данные для прогнозирования технического облика КА ДЗЗ. В соответствии с методом формирования эффективного набора параметров проводится в два этапа. На первом этапе проводится оценка наиболее значимых характеристик КА ДЗЗ, определяющих эффективность его функционирования. Здесь используются методы экспертного анализа. На втором этапе с помощью методов статистического анализа исходный массив параметров (как значимых, так и незначимых) преобразуется к массиву альтернативных параметров меньшей размерности. В результате формируется информативный набор показателей.

3.1.1 Определение основных характеристик КА ДЗЗ, влияющих на эффективность его функционирования

На основе анализа отечественных и зарубежных источников с использованием данных информационно-аналитической модели был сформирован перечень из 30 основных характеристик КА ДЗЗ и условий функционирования (таблица 8).

Для удобства проведения экспертного опроса весь перечень характеристик был разделен на 5 групп:

- 1) геометрические характеристики ОЭС;
- 2) спектральные и фотометрические характеристики ОЭС;
- 3) бортовое радиоэлектронное оборудование;
- 4) характеристики обеспечивающих систем КА;
- 5) внешние условия.

Таблица 8 – Перечень основных характеристик КА ДЗЗ

Разрешающая способность ОЭС	Производительность бортовых вычислительных систем
Диаметр апертуры	Алгоритм сжатия / степень сжатия данных на борту КА
Фокусное расстояние оптической системы	Емкость бортового запоминающего устройства
Угол поля зрения ОЭС	Пропускная способность каналов связи
Размер элементов фотоприемного устройства (ФПУ)	Точность системы автономной навигации
Формат ФПУ	Точность системы ориентации и управления движением КА
Мгновенный угол поля зрения	Допустимые углы и скорость программных поворотов КА
Спектральный диапазон съемки	Мощность системы энергообеспечения
Количество одновременно работающих спектр. каналов	Характеристики системы терморегулирования
Уровень дискретизации изоб.	Орбитальные параметры
Динамический диапазон ОЭС	Условия освещенности
Спектральная чувствительность элементов ФПУ	Метеоусловия
Отношение сигнал/шум	Характеристики объекта наблюдения
Алгоритмы обработки данных на борту	Характеристики ППИ

В качестве показателей эффективности функционирования КА использовались информативность, производительность и оперативность. Экспертам было предложено расположить составленный перечень параметров в порядке убывания степени их влияния на показатели эффективности. Причем, экспертная оценка проводилась в два этапа. На первом этапе оценивалось влияние групп параметров, а на втором — значимость характеристик в каждой группе.

Результаты экспертного опроса представлены в приложении 2.

Гистограмма результатов ранжирования групп характеристик по степени их влияния на информативность, представлена на рисунке 21 а).

К наиболее существенным группам параметров, влияющим на эффективность функционирования КА ДЗЗ по критерию информативности специалисты относят: геометрические и спектральные характеристики ОЭС, бортовое РЭО. На эти группы приходится 88% суммарных ранговых оценок.

Гистограмма результатов ранжирования групп характеристик по степени их влияния на производительность, представлена на рисунке 21 б). К наиболее существенным группам параметров, влияющим на эффективность функционирования КА по критерию производительности специалисты относят: геометрические и спектральные характеристики ОЭС, а также внешние условия. На эти группы приходится 87% суммарных ранговых оценок.

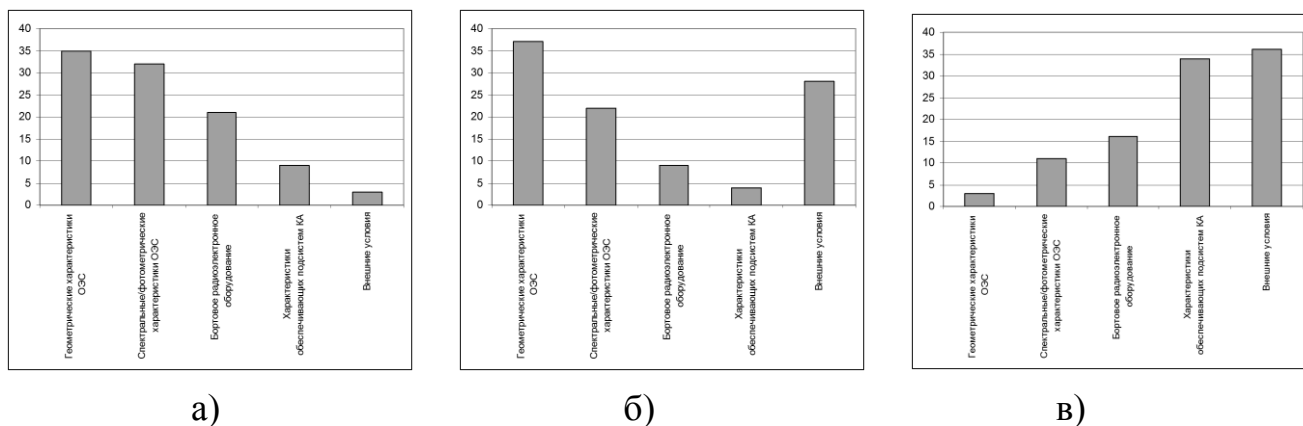


Рисунок 21 – Результаты первого этапа опроса экспертов

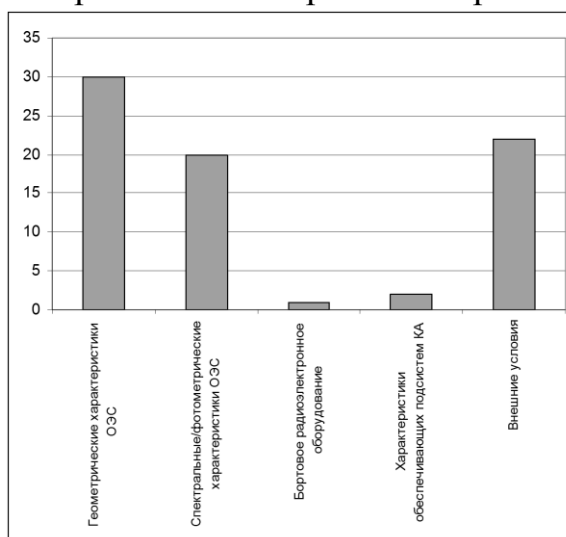


Рисунок 22 – Результаты ранжирования групп характеристик

Аналогично была проведена оценка влияния групп характеристик на оперативность КА. Результаты представлены на рисунке 16 в). К наиболее существенным группам параметров, влияющим на эффективность функционирования КА ДЗЗ по критерию оперативности специалисты относят: внешние условия и характеристик обеспечивающих систем, на которые приходится 70% суммарных ранговых оценок. Группы характеристик БРЭО и

характеристик ОЭС отнесены к менее значимым. Итоговая гистограмма представлена на рис. 22.

Таким образом, по мнению экспертов, наибольшее влияние на эффективность функционирования КА ДЗЗ оказывают три группы факторов:

- геометрические характеристики ОЭС;
- спектральные характеристики ОЭС;
- внешние условия.

На эти группы приходится около 95% суммарных оценок.

Внешние условия оказывают влияние на эффективность функционирования КА ДЗЗ, но не являются характеристикой самого КА (его технического облика). В связи с этим, при анализе значимости характеристик в каждой группе принято решение в дальнейшем **группу характеристик внешних условий не рассматривать.**

Таким образом, основными параметрами, влияющими на эффективность КА, по мнению экспертов, являются характеристики его ОЭС, которые и определяют технический облик КА.

Определение наиболее значимых характеристик ОЭС проводилось в рамках второго этапа опроса экспертов. Итоговые гистограммы результатов ранжирования представлены на рисунке 23.

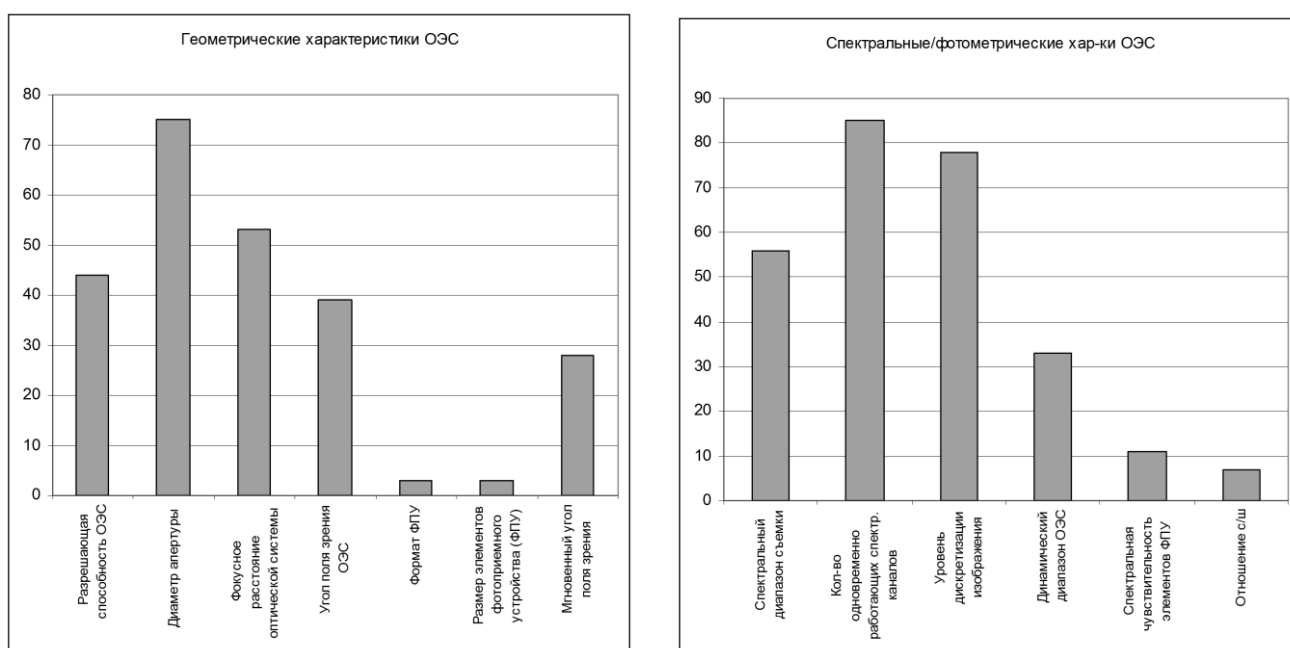


Рисунок 23 – Результаты ранжирования

Таким образом, по мнению экспертов, наибольшее влияние на эффективность функционирования КА ДЗЗ оказывают следующие параметры:

1. Диаметр апертуры;
2. Фокусное расстояние оптической системы;
3. Разрешающая способность ОЭС;
4. Угол поля зрения оптической системы;
5. Мгновенный угол поля зрения;
6. Количество одновременно работающих спектральных каналов;
7. Уровень дискретизации изображений;
8. Спектральный диапазон съемки;
9. Динамический диапазон ОЭС.

На эти параметры приходится 98% (для геометрических характеристик) и 93% (для спектральных характеристик) суммарных ранговых оценок соответственно.

На основе полученных результатов экспертного опроса можно сделать вывод о том, что наиболее значимыми характеристиками КА ДЗЗ являются девять перечисленных параметров, получивших наивысшие ранговые оценки. Выявление направлений совершенствования ОЭС в области улучшения данных характеристик позволит оценить ТО перспективных КА ДЗЗ.

3.1.2 Определение комплексных статистических показателей

Анализ характеристик КА ДЗЗ проведем в два этапа.

1. На первом этапе в качестве исходных данных будем использовать общие характеристики КА, к которым относятся дата запуска, срок активного существования, высота орбиты, масса КА стартовая, масса целевой аппаратуры, длина КА, диаметр КА, точность наведения, точность определения положения, стабилизация, мощность СЭО, объем бортового ЗУ, скорость передачи данных, стоимость КА.

2. На втором этапе в качестве исходных данных используются характеристики целевой аппаратуры, а именно: масса целевой аппаратуры, фокус,

апертура, угол поля зрения, количество спектральных каналов, ширина спектра, размер чувствительного элемента, количество ЧЭ в строке, мгновенный угол поля зрения, дискретизация.

Анализ будем проводить методом главных компонент с использование программного пакета STATISTICA 10.0.

Этап 1. Матрица парных коэффициентов корреляции, которая является исходными данными для анализа, представлена в табл. 9. Выделены коэффициенты корреляции, превышающие значение $\pm 0,5$, с уровнем значимости $p < 0,05$ (ошибка не более 5%).

Таблица 9 – Парные коэффициенты корреляции общих характеристик КА

	Дата запуска	САС	Высота орбиты	Масса КА	Длина	Диаметр	Точность наведения	Точность определения положения	Стабилизация	Мощность СЭО	Объем ЗУ	Скорость передачи данных	Стоимость
Дата запуска	1,00												
САС	-0,10	1,00											
Высота орбиты	0,15	0,08	1,00										
Масса КА	-0,44	0,07	-0,54	1,00									
Длина	-0,10	-0,13	0,24	0,92	1,00								
Диаметр	-0,17	-0,28	0,37	0,96	0,87	1,00							
Точность наведения	-0,26	-0,58	0,45	0,36	0,32	0,28	1,00						
Точность определения положения	-0,32	-0,38	0,12	-0,41	-0,47	-0,46	0,99	1,00					
Стабилизация	-0,74	-0,40	0,03	0,00	-0,15	0,08	0,76	0,76	1,00				
Мощность СЭО	-0,06	-0,33	0,33	0,75	0,94	0,92	0,93	-0,52	-0,11	1,00			
Объем ЗУ	0,36	0,37	0,05	0,36	0,48	0,63	0,64	0,29	-	0,47	1,00		
Скорость передачи данных	0,43	0,18	-0,19	0,12	0,42	0,65	-0,48	-0,83	-0,96	0,24	0,78	1,00	
Стоимость	-0,45	-0,20	0,27	0,81	0,66	0,84	0,89	-	0,93	0,69	-0,18	-0,32	1,00

Анализ показывает, что высокая степень корреляции наблюдается между массогабаритными параметрами и мощностью системы энергообеспечения, а также объемом бортового ЗУ, скоростью передачи данных и стоимостью КА.

Характеристики системы ориентации и стабилизации КА не имеют значимых коэффициентов парной корреляции из-за недостаточного объема статистических данных, в связи с чем исключаются из дальнейшего анализа.

На основе представленного в п. 2.2.2 алгоритма с использованием программного пакета вычислены факторные нагрузки (табл. 10).

Таблица 10 – Факторные нагрузки

Характеристики	Фактор 1	Фактор 2
Масса КА	0,949311	0,119400
Длина КА	0,890738	0,352394
Диаметр КА	0,918878	0,471617
Мощность СЭО	0,886472	0,269863
Объем ЗУ	0,223154	0,915070
Скорость передачи данных	0,059468	0,969756
Стоимость КА	0,938640	-0,376961
<i>Вклад фактора</i>	<i>4,259155</i>	<i>2,353567</i>
<i>Процент исходной общности</i>	<i>0,608451</i>	<i>0,336224</i>

Таким образом, выделяем два фактора, описывающих более 94% общей дисперсии. Первый фактор описывает массогабаритные и энергетические параметры КА, а также стоимостной показатель – интегральный массо-энергетический параметр. Физический смысл второго фактора состоит в описании возможностей КА по хранению и передаче данных.

В дальнейших исследованиях вместо представленных в таблице семи характеристик КА можно использовать значения двух факторов, рассчитанные для каждого аппарата.

Этап 2. Рассчитаем парные коэффициенты корреляции характеристик целевой аппаратуры КА, причем значения ЛРМ, размера ЧЭ, формата матрицы, МУПЗ и дискретизации возьмем для панхроматического режима съемки. Результаты расчетов представлены в табл. 11.

Таблица 11 – Парные коэффициенты корреляции характеристик ЦА КА

	Масса ЦА	Фокус	Апертура	Угол поля зрения	Мощность	Полоса захвата	ЛРМ	Размер ЧЭ	Формат матрицы	МУПЗ	Дискретизация
Масса ЦА	1,00										
Фокус	0,18	1,00									
Апертура	0,21	0,83	1,00								
Угол поля зрения	0,57	-0,38	-0,44	1,00							
Мощность	0,84	0,66	0,52	0,35	1,00						
Полоса захвата	0,58	-0,41	-0,45	0,99	0,31	1,00					
ЛРМ	0,42	-0,60	-0,60	0,92	-0,11	0,90	1,00				
Размер ЧЭ	0,59	0,08	0,06	0,24	0,61	0,18	0,20	1,00			
Формат матрицы	0,27	0,83	0,71	-0,10	0,64	-0,11	-0,28	0,01	1,00		
МУПЗ	0,37	-0,60	-0,61	0,87	-0,13	0,87	0,99	0,24	-0,36	1,00	
Дискретизация	-0,27	0,48	0,43	-0,47	0,08	-0,51	-0,31	-0,01	0,23	-0,18	1,00

Как видно из таблицы высокая корреляция наблюдается между массогабаритными параметрами целевой аппаратуры (масса, фокус и апертура) и характеристиками приемника изображения ОЭС. В ходе обработки полученных данных с целью получения наилучшего факторного решения из анализа были исключены характеристики «Размер ЧЭ» и «Формат матрицы чувствительных элементов». В результате выявлено два фактора, описывающие 92% общей дисперсии (таблица 12).

Смысловая интерпретация данных факторов заключается в следующем. Фактор 1 описывает габаритные характеристики аппаратуры (фокус, апертура), угловые параметры (УПЗ, полоса захвата, МУПЗ) и функциональный параметр (ЛРМ). Совокупность этих параметров можно охарактеризовать как функциональное качество ОЭС. Фактор 2 описывает две характеристики – массу и энергопотребление аппаратуры, таким образом, данный фактор можно определить, как удельная энергоемкость.

По данным показателям можно проводить сравнение различных ОЭС съемки земной поверхности и использовать значения этих факторов, вычисленные для каждого КА, в дальнейшем анализе.

Таблица 12 – Факторные нагрузки

Характеристики	Фактор 1	Фактор 2
Масса ЦА	0,083854	-0,925878
Фокус	0,822151	-0,435169
Апертура	0,839598	-0,203237
Угол поля зрения	-0,898599	-0,397192
Мощность	0,637133	-0,764890
Полоса захвата	-0,895084	-0,415126
ЛРМ	-0,955142	-0,231055
МУПЗ	-0,980774	-0,147035
<i>Вклад фактора</i>	5,276694	2,078081
<i>Процент исходной общности</i>	0,659587	0,259760

3.2 Анализ временных тенденций и прогноз развития характеристик космических аппаратов ДЗЗ

На основе, разработанного в 2.3.1 метода проведем анализ временных тенденций изменений основных характеристик КА. На рис. 24 и 26 представлены закономерности изменения некоторых параметров – количества спектральных каналов съемки (это направление характеризует развитие технологий гиперспектральной съемки) и ЛРМ получаемых изображений. Что касается ЛРМ, то этот параметр является важнейшим показателем эффективности функционирования КА ДЗЗ. В настоящее время разработчиками ОЭС КА достигнуто минимальное, близкое к теоретическому, значение этого параметра. Относительно временных тенденций улучшения в этом направлении можно отметить снижение массогабаритных параметров аппаратуры и КА в целом при сохранении высокого (требуемого) ЛРМ и в целом качества получаемой информации.

Как было отмечено ранее, основными характеристиками, определяющими массогабаритные параметры ОЭС (и КА в целом), являются фокусное расстояние и диаметр апертуры телескопа. Эти же характеристики главным образом определяют функциональные возможности оптики, для оценки которых введен

показатель предельной пространственной частоты пропускания объектива ОЭС $\nu_{пр}^0$. Вычислим значения $\nu_{пр}^0$ для панхроматического диапазона съемки со средней длиной волны 0,65 мкм и проведем анализ динамики изменения этого показателя.

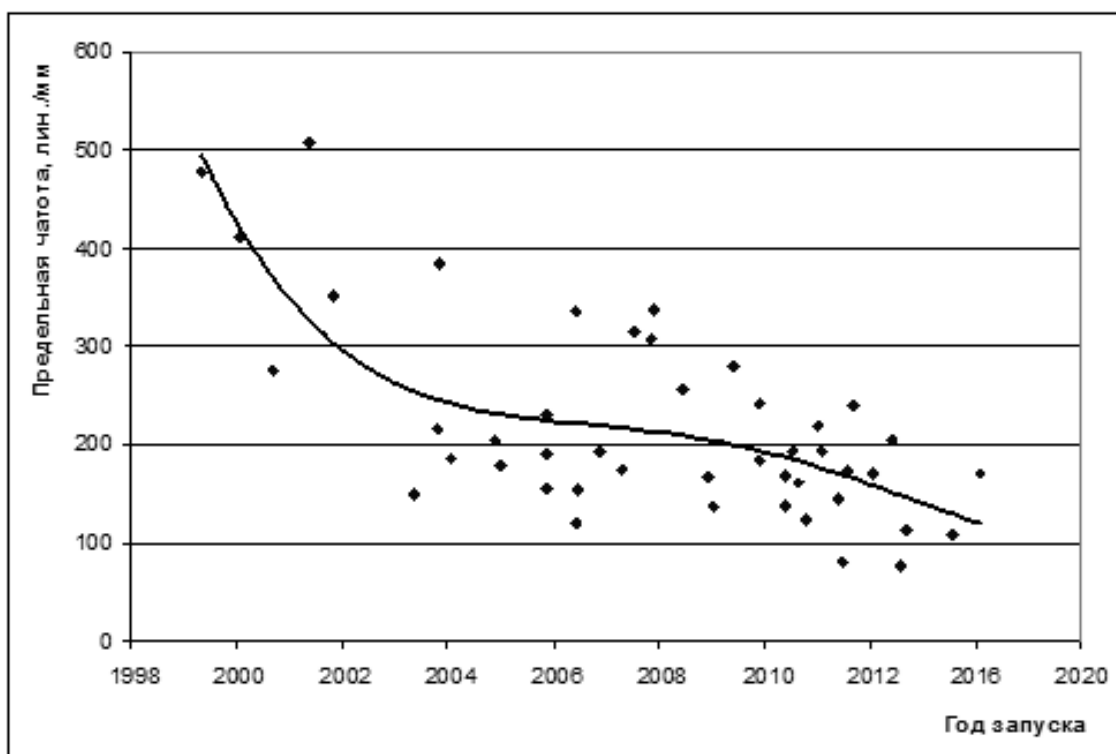


Рисунок 24 – Динамика изменения предельной частоты пропускания ОС

На диаграмме (рис. 25) представлены значения предельной частоты пропускания оптики для 26 КА. Прослеживается тенденция уменьшения предельного разрешения. Максимальное разрешение согласно диаграмме имеет аппаратура КА «Spot-4, -5», «Gaofen», минимальное значение — ОЭС КА высокого и сверхвысокого разрешения («Pleiada», «Eros», «WorldView», «QuickBird», «Iconos»). Таким образом, получаем, что ОЭС с высокой предельной частотой пропускания оптики обеспечивают худшее ЛРМ по сравнению с системами, предельная разрешающая способность которых ниже. Данную зависимость рассмотрим ниже.

Проведем анализ изменения показателя рабочей частоты ОЭС. Она выбирается путем оптимизации параметров ОЭС с целью достижения требуемого линейного разрешения для заданной высоты орбиты и зависит от фокусного

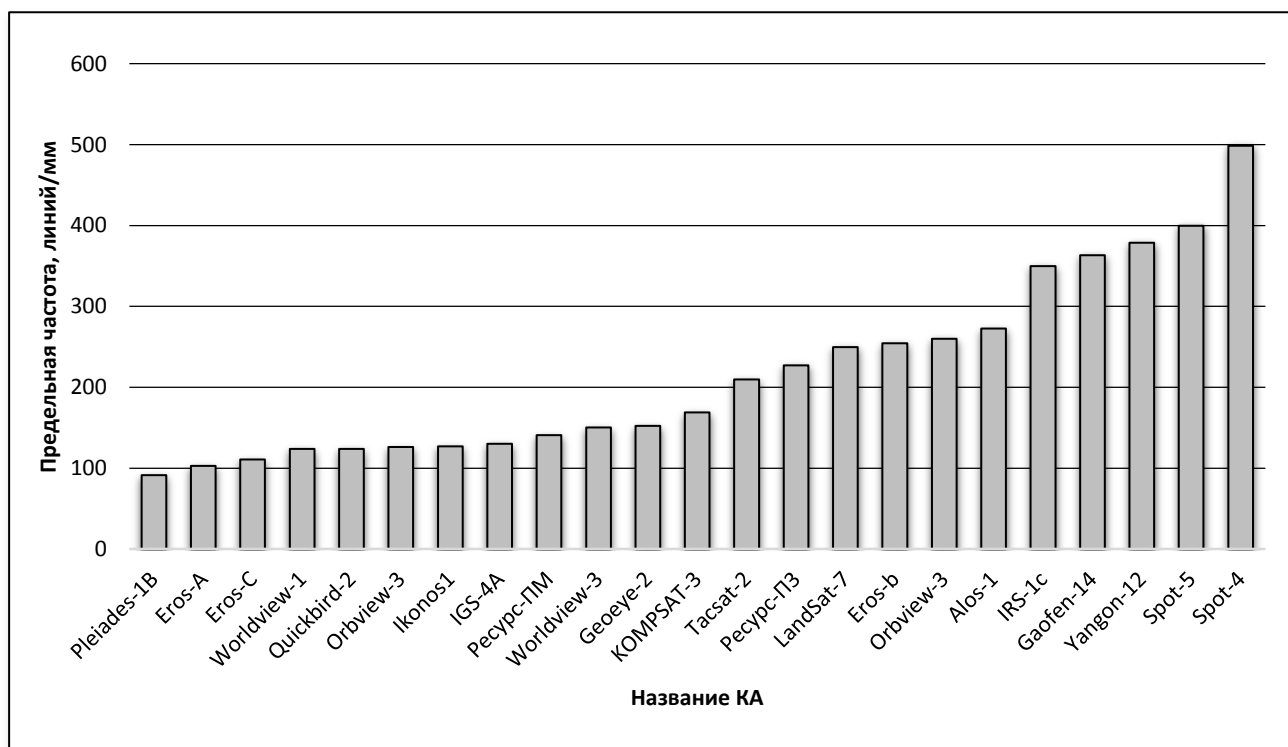


Рисунок 25 – Предельная частота пропускания ОС КА

расстояния оптической системы. Предельная рабочая частота определяется по критерию Найквиста (формула 26), с учетом которого выбирается размер элемента приемника изображения.

Статистика не показывает определенных тенденций в изменении рабочей частоты ОЭС. Разброс значений представлен на рис. 26.

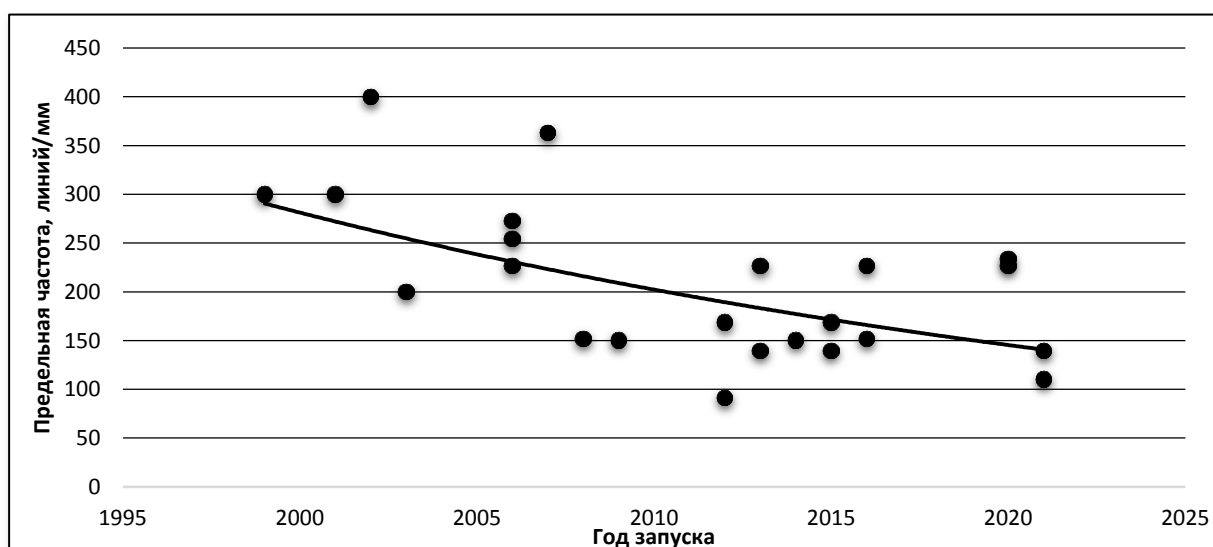


Рисунок 26 – Разброс значений рабочей частоты ОЭС

Проведем анализ изменения нормированной частоты пропускания ОЭС, которая определяется с помощью выражения (44). Этот параметр показывает

насколько рабочая частота приближается к предельной. Стоит ожидать увеличение значения данного показателя со временем. Разброс значений $\nu_{\text{норм}}$ для панхроматического диапазона съемки для средней длины волны $\lambda = 0,65 \text{ мкм}$ представлен на рисунке 27.

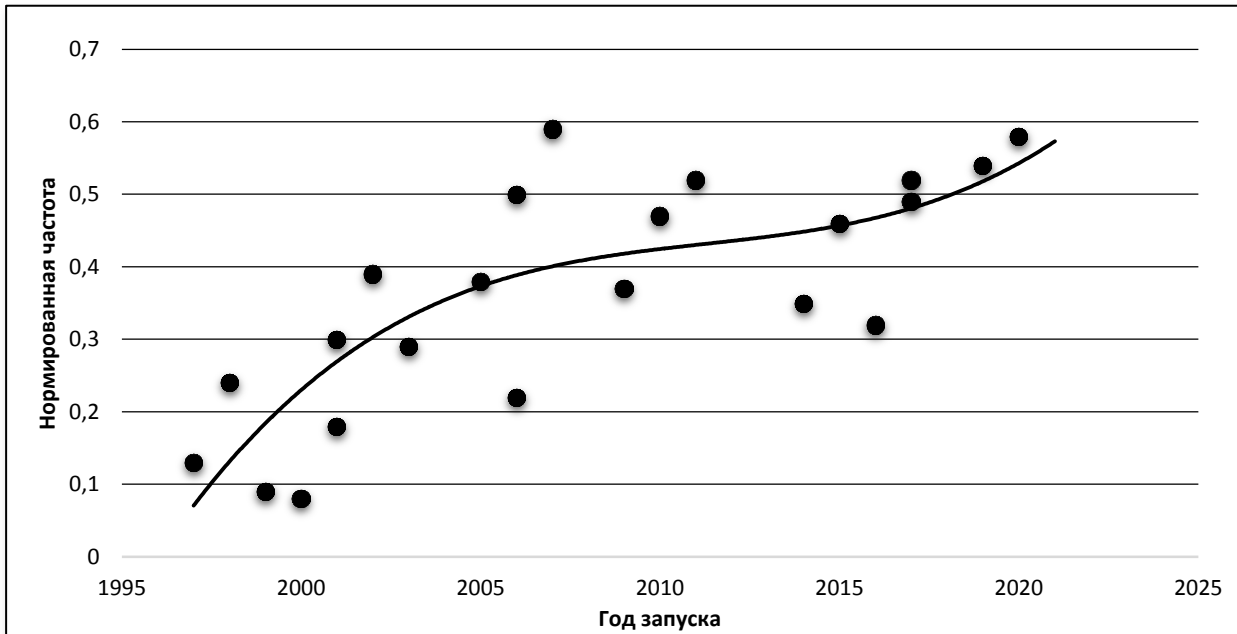


Рисунок 27 – Тенденция изменения нормированной частоты

Данную тенденцию можно описать полиномом 4 степени

$$y = -18982,44 + 1,9722x - 7,6763 \cdot 10^{-5} x^2 + 1,3265 \cdot 10^{-9} x^3 - 8,5863 \cdot 10^{-15} x^4.$$

На 1999–2001 гг. приходится первый пик. Это объясняется запусками в этот период высокотехнологичных аппаратов высокого разрешения «Айконос-2», «Эрос-А» и «Квикберд-2». Далее подъем наблюдается с 2006 г. В этот период осуществляются запуски КА «Топсат», «Эрос-В», «Картосат-2». Второй условный пик приходится на 2011–2013 гг., в этот период осуществлены запуски КА нового поколения «Ресурс-П», «Уорлдвью-3», «Плеяды».

Можно предположить, что тенденция развития КА ДЗЗ в дальнейшем сохранится. До 2025 г. возможны запуски КА, схожих по характеристикам с первым поколением КА детальной съемки («Айконос», «Квикберд»). В этот же период будут разрабатываться КА нового поколения, запуск которых можно ожидать в 2023–2028 гг. Среди зарубежных стран к 2025 г. КА нового 3-го поколения существенно меньшей массы будут запущены в США, Южной Корее и

Китае. В Израиле, Европе (Франция, Германия) в связи с предпочтениями развивать радиолокационные КА, а не оптико-электронные можно ожидать запуска похожих КА с небольшим опозданием.

В п. 2.1 были введены комплексные показатели, характеризующие информативность КА – «информационный поток» (30) и «удельная информационная емкость изображения» (31). Тенденции изменения данных показателей представлены на рисунке 28.

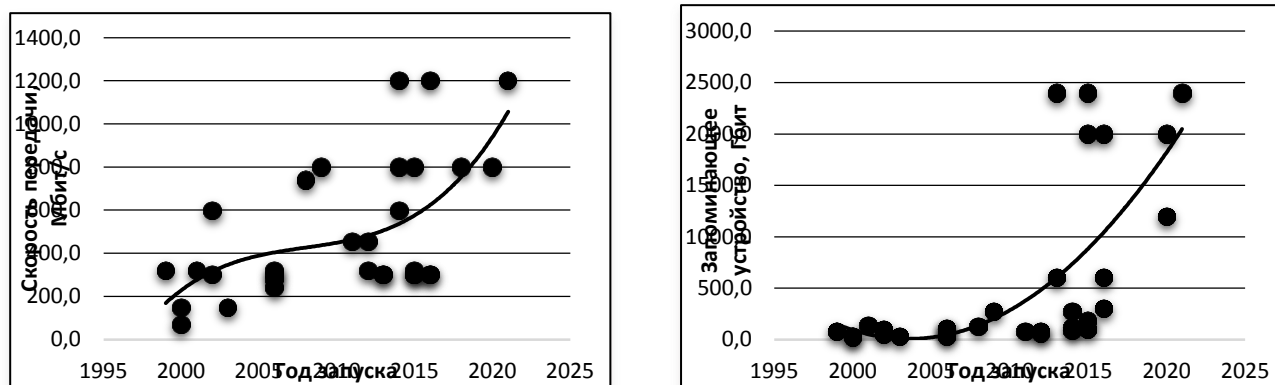


Рисунок 28 – Тенденции изменения комплексных показателей информативности

На графиках видно, оба показателя имеют тенденцию к резкому увеличению, что говорит о значительном повышении информативности и производительности перспективных средств ДЗЗ. При сохранении тенденции следующий «скачек» можно ожидать в период после 2023 г., когда возможен запуск малых КА следующего поколения, уже сейчас некоторые из них ждут старта в монтажно-испытательных корпусах космодрома.

3.3 Формирование функциональных зависимостей и математических моделей для получения численных оценок основных параметров КА ДЗЗ

О наличии зависимости между отдельными характеристиками КА можно судить по значению парных коэффициентов корреляции. В первом приближении коэффициент корреляции может быть использован для оценивания степени нелинейной зависимости, если она несущественно отличается от линейной. Проведем анализ зависимости между параметрами, значение коэффициента корреляции между которыми находится в пределах $\pm(0,6-0,9)$.

Предварительный анализ матрицы парных коэффициентов корреляции (табл. 9, 11) показывает наличие следующих связей (табл. 13, 14).

Графики распределения данных представлены в приложении 3.

Для каждой из принятых к дальнейшему рассмотрению связи между параметрами необходимо выбрать вид функциональной зависимости – регрессионной модели (допускается выбор нескольких вариантов), и определить коэффициенты регрессии. Рассмотрим три подхода к решению данной задачи:

1. При выявлении зависимости заданного параметра от одной переменной (однофакторная модель) воспользуемся программным пакетом **CurveExpert 2.1**, который на основе статистического набора данных позволяет путем перебора значительного количества различных типов зависимостей выявить модель, удовлетворяющую заданным критериям. В качестве критерия отбора используется коэффициент корреляции R и стандартная ошибка.

Таблица 13 – Основные связи между параметрами КА

№ п/п	Зависимый параметр	Независимые переменные	Решение о дальнейшем рассмотрении*
	Масса КА	Длина КА Диаметр КА	Рассматривается зависимость отдельно от каждого параметра
	Диаметр КА	Длина КА	Рассматривается
	Мощность СЭО	Масса КА Длина КА Диаметр КА Точность наведения (0,93)	Не рассматривается
	Стоимость КА	Масса КА Диаметр КА Мощность СЭО	Не рассматривается (ограничено рамками диссертации)
	Объем ЗУ	Диаметр КА	Не рассматривается
	Скорость передачи данных	Объем ЗУ Стабилизация Диаметр КА	Рассматривается Не рассматривается (недостаток статистических данных)

* Прим.: решение о зависимости одних параметров от других принимается на основе содержательного представления об исследуемом объекте

Таблица 14 – Основные связи между параметрами целевой аппаратуры КА

№ п/п	Зависимый параметр	Независимые переменные	Решение о дальнейшем рассмотрении
	Масса ЦА	Угол поля зрения Мощность Полоса захвата Размер ЧЭ	Рассматриваются как отдельные связи, так и комплексное влияние независимых переменных (за исключением полосы захвата) на исследуемый параметр
	ЛРМ	Фокус Апертура Угол поля зрения Полоса захвата Мгновенный УПЗ	Рассматриваются как отдельные связи, так и комплексное влияние независимых переменных на исследуемый параметр Не рассматривается Не рассматривается, известна функциональная зависимость
	Фокус	Апертура Формат матрицы Мгновенный УПЗ	Рассматривается
	Полоса захвата	Угол поля зрения Мгновенный УПЗ	Не рассматривается, существует четкая функциональная зависимость (для известной высоты полета КА) Рассматривается
	Мощность	Размер ЧЭ Формат матрицы	Не рассматривается
	МУПЗ	Апертура Угол поля зрения	Рассматривается

2. При выявлении зависимости исследуемого параметра от двух переменных (двухфакторная модель) можно воспользоваться программным пакетом **TableCurve 3D v4**, который также позволяет выявить модели, удовлетворяющие заданным критериям.

3. При построении многофакторной регрессионной модели (более двух переменных) вид функциональной зависимости задается самостоятельно. На основе метода наименьших квадратов с использованием программного пакета STATISTICA 10.0 вычисляются коэффициенты модели, рассчитывается

множественный коэффициент детерминации R^2 , F -критерий Фишера для проверки значимости R^2 . Кроме того, данный программный продукт можно использовать для контроля расчетов, полученных с помощью первых двух подходов.

Определим зависимость массы КА от его длины. В результате анализа получен ряд выражений с коэффициентом корреляции 0,950–0,957. Перечень выявленных функциональных выражений представлен в приложении 4.

В результате анализа зависимости массы КА от его диаметра получены выражения с коэффициентом корреляции $R=0,95–0,96$.

Зависимость диаметра от длины КА также имеет высокую степень корреляции, что логично объясняется пропорциональностью габаритов КА. В результате анализа получены соотношения с $R \approx 0,96$.

Одними из показательных характеристик, отражающих уровень развития технологий бортовой системы хранения, обработки и передачи данных является емкость ЗУ $N_{ЗУ}$ и скорость передачи данных V . Выявленные соотношения между этими показателями также представлены в приложении 4.

Критериальным параметром ОЭС является ее массогабаритные характеристики. Масса целевой аппаратуры $M_{ЦА}$ в первую очередь определяет общую массу КА ДЗЗ. Для оценки массы ЦА выявим ее зависимость от фокусного расстояния оптической системы f . В результате получены соотношения с $R=0,92–0,93$.

Из теории известно, что разрешающая способность оптической системы при прочих равных условиях определяется размером апертуры входного зрачка. Для предварительной оценки размера апертуры ОЭС, диаметра ее главного зеркала, необходимого для обеспечения получения изображений с заданным линейным разрешением найдем зависимость диаметра апертуры $D_{ап}$ от ЛРМ R_0 .

Получим зависимость вида $y = 0,54x^{-0,69268914}$. При расчетах коэффициентов регрессии использовались данные нормированного значения ЛРМ (для панхроматического режима съемки) для высоты съемки 600 км, следовательно,

для оценки реального значения апертуры преобразуем полученное выражение к виду:

$$D_{\text{ап}} = \frac{0,54}{(600R_0/H_n)^{0,69268914}} \cdot \quad (23)$$

При анализе зависимости ЛРМ от габаритных характеристик ОЭС выявлена высокая степень корреляции между ЛРМ и фокусным расстоянием оптической системы (рисунок 29).

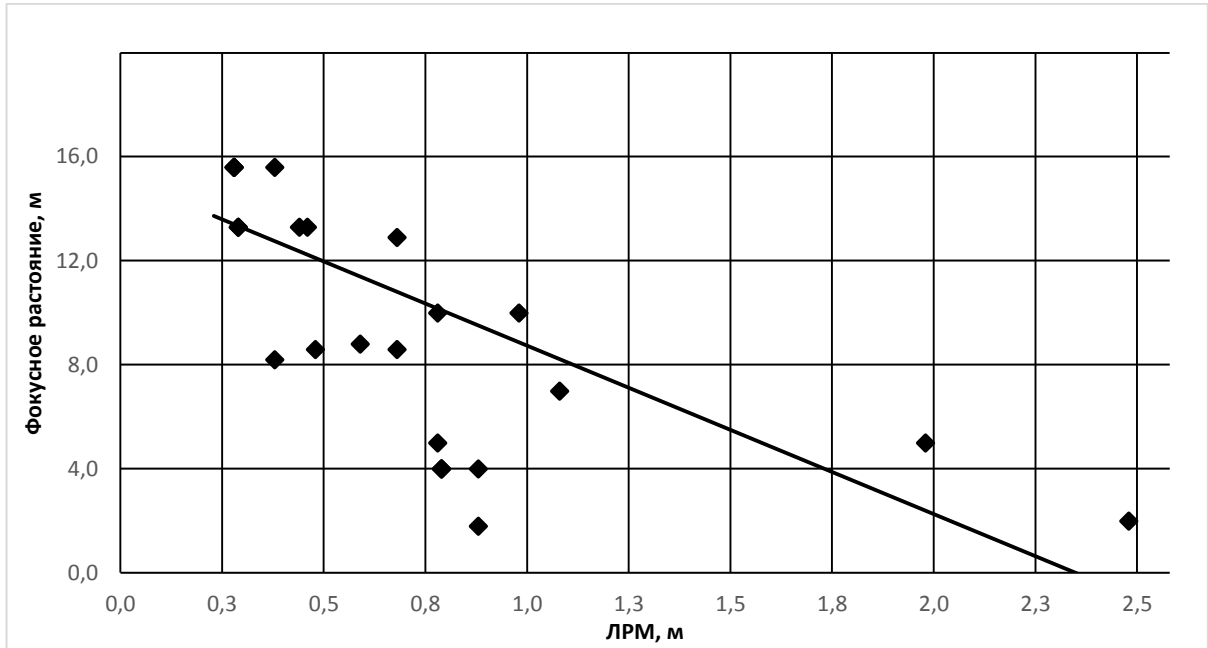


Рисунок 29 — Соотношение между фокусным расстоянием и ЛРМ

Согласно рис. 29 соотношение между фокусом и ЛРМ является степенной зависимостью. Выборка в данном случае включает значения ЛРМ в панхроматическом режиме съемки (28 значений). Выявлена функциональная зависимость вида:

$$f = 5,7619R_0^{-0,829} \quad (24)$$

При расчетах коэффициентов регрессии использовались данный нормированного значения ЛРМ (для панхроматического режима съемки) для высоты съемки 625 км, для оценки реального значения фокусного расстояния преобразуем полученное выражение к виду:

$$f = \frac{5,7619}{(R_0 \cdot 625/H_n)^{0,829}} \quad (25)$$

Соотношение между фокусным расстоянием ОС и апертурой выбирается путем оптимизации с учетом всех параметров ОЭС. Наличие статистических данных позволяет описать эту зависимость упрощенным выражением, которое можно использовать для оценки одного из параметров при неизвестном другом. Зависимость апертуры ОС от фокусного расстояния описывается полиномом 4 степени:

$$D_{an} = 0,0053 + 0,2467f - 0,0419f^2 + 0,0032f^3 - 8 \cdot 10^{-5} f^4. \quad (26)$$

Зависимость фокусного расстояния от апертуры (для значений апертуры не более 0,8 м) описывается следующими выражениями:

$$f = 0,32076947 \cdot 128,04911^{D_{an}}, \quad (27)$$

$$f = 188,41986 \cdot \exp\left(-\frac{(2,144086 - D_{an})^2}{0,693080655}\right). \quad (28)$$

Для значений апертуры более 0,8 м используются выражение:

$$f = 22,5473 \cdot 0,552495^{D_{an}} D_{an}^{1,8336}. \quad (29)$$

Ряд выражений представлен в приложении 4.

Линейное разрешение изображений зависит от угловой разрешающей способности оптической системы, а применительно к ОЭС – мгновенного угла поля зрения, и определяется дальностью до объекта наблюдения. В этой связи проведем исследование соотношений основных параметров КА и ОЭС с величиной мгновенного угла поля зрения (МУПЗ).

Зависимость фокуса от МУПЗ определяется из выражений:

$$f = 9,5201\gamma^{-1,0221}, \quad (30)$$

$$f = 1/(-0,1525597 + 0,25885178\gamma^{0,58049802}). \quad (31)$$

Соотношение между апертурой и мгновенным углом поля зрения представлено на рис. 30 и определяется выражением:

$$D_{an} = 0,7699\gamma^{-0,6669}. \quad (32)$$

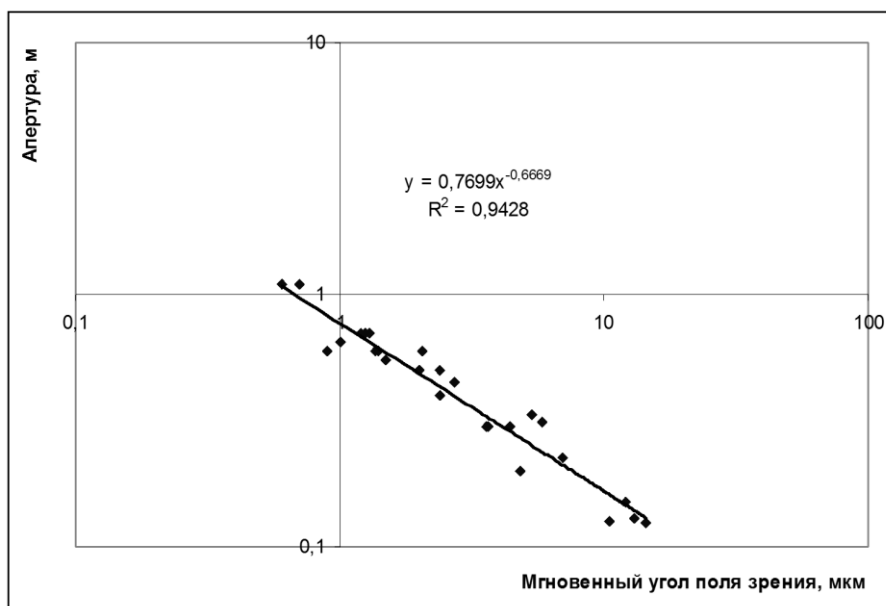


Рисунок 30— Соотношение между апертурой и мгновенным углом поля зрения

Одним из важных параметров, определяющих производительность КА, является полоса захвата, которая определяется углом поля зрения ОС (УПЗ). В результате анализа зависимости УПЗ β от МУПЗ γ получены соотношения с высоким значением коэффициента корреляции $R=0,97-0,98$.

Выявлена зависимость угла поля зрения от фокусного расстояния оптической системы (см. приложение 4).

Проведем анализ влияния габаритов ОЭС, определяемых апертурой и фокусным расстоянием ОС, на качество получаемых изображений по критерию мгновенного угла поля зрения ОЭС, который определяет ЛРМ.

Будем искать функциональную зависимость вида:

$$\gamma = aD_{an}^b f^c.$$

На основе выборки из 45 измерений (характеристик КА) методом наименьших квадратов с использованием программы STATISTICA 10.0 найдем коэффициенты регрессии:

$$a = 1,575288;$$

$$b = -0,960663;$$

$$c = -0,309795.$$

Таким образом, функциональная зависимость примет вид:

$$\gamma = \frac{1,575288}{D_{an}^{0,960663} f^{0,309795}} . \quad (33)$$

Множественный коэффициент детерминации $R^2 = 0,977$, коэффициент множественной корреляции $R = 0,9885$.

Размер чувствительного элемента приемника изображения должен зависеть от светосилы объектива, определяемой отношением $\frac{D_{an}}{f}$. График распределения статистических данных представлен на рис. 31.

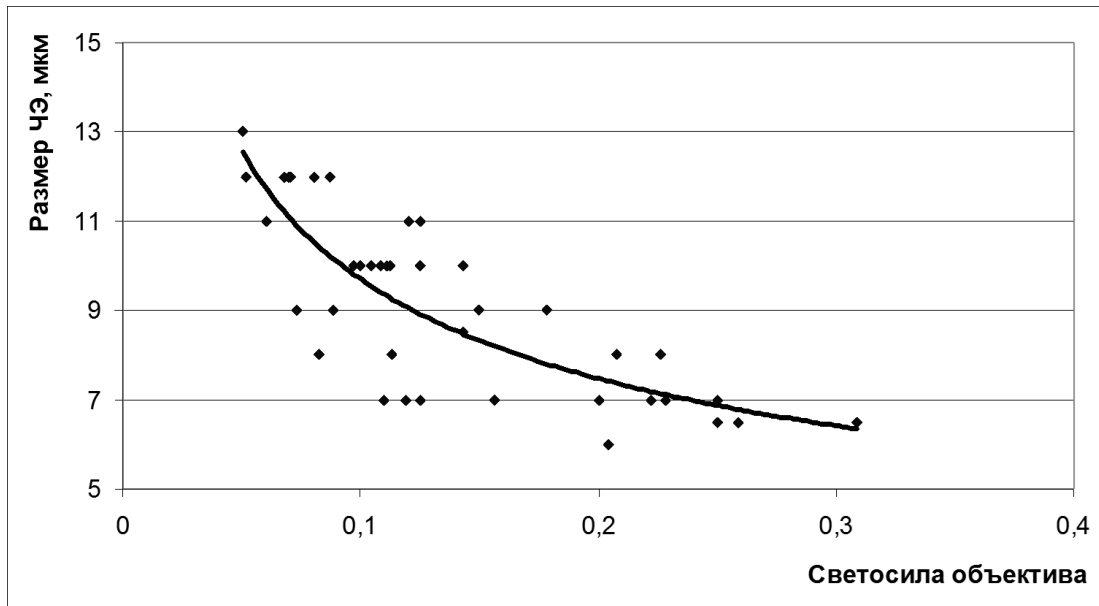


Рисунок 31 — Соотношение между размером чувствительного элемента и светосилой объектива

Несмотря на то, что зависимость имеет явный характер, коэффициент R принимает значение 0,78–0,8. Для получения модели с большим приближением исследуем зависимость размера ЧЭ от двух параметров – фокуса и апертуры. Как и в предыдущем случае будем искать функциональную зависимость вида

$$\delta = a_1 D_{an}^{a_2} f^{a_3} .$$

В результате вычисления коэффициентов регрессии получим следующее выражение для расчета размера чувствительного элемента:

$$\delta = \frac{3,021853 f^{0,471149}}{D_{an}^{0,574299}} ,$$

при этом значение коэффициента множественной корреляции $R=0,9$.

На рис. 32 представлены данные по нормированной частоте пропускания оптики КА в зависимости от мгновенного угла поля зрения ОЭС.

$$\nu_{\text{норм}} = 0,4191\gamma^{-0,3451}.$$

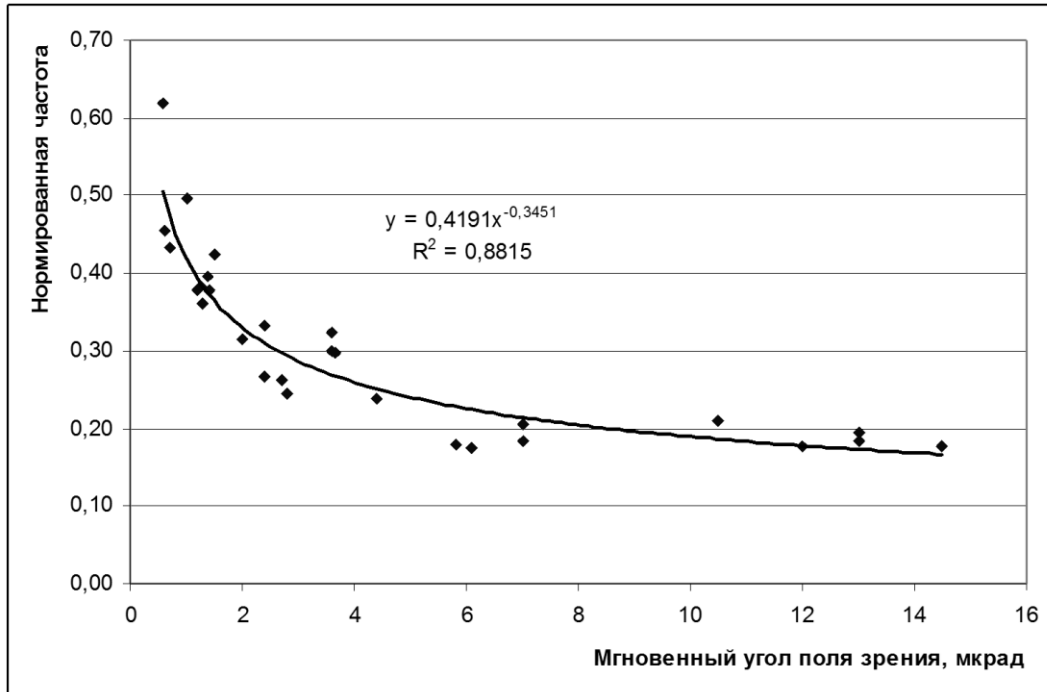


Рисунок 32 — Соотношение нормированной частоты и МУПЗ

Оценить массу целевой аппаратуры $M_{\text{ЦА}}$ по известным значениям мгновенного угла поля зрения оптической системы γ можно с помощью выражения:

$$M_{\text{ЦА}} = \frac{1}{0,00288748 + 0,002768 \cdot \gamma^{1,276198}}. \quad (34)$$

Для оценки ЛРМ будем использовать мгновенный угол поля зрения, который и определяет величину линейного разрешения. Определим зависимость мгновенного угла поля зрения γ от предельной разрешающей способности оптической системы КА $\nu_{\text{пр}}^0$. Получены выражения с коэффициентом корреляции $R=0,93-0,95$.

На ЛРМ оказывают влияние множество различных факторов, начиная с объекта съемки (геометрические и спектральные характеристики объекта съемки,

освещенность объекта), характеристики атмосферы, и заканчивая характеристикой оптико-электронного тракта и др. Из теории известно, что максимальное ЛРМ определяется диаметром апертуры оптической системы и зависит от высоты съемки. С помощью методов регрессионного анализа найдем зависимость ЛРМ от диаметра апертуры ОС и высоты орбиты КА, используя статистические данные.

Будем искать выражение вида $R_0 = aH/D_{an}^b$, где a и b – неизвестные коэффициенты регрессии. Графически зависимость представлена на рис. 33.

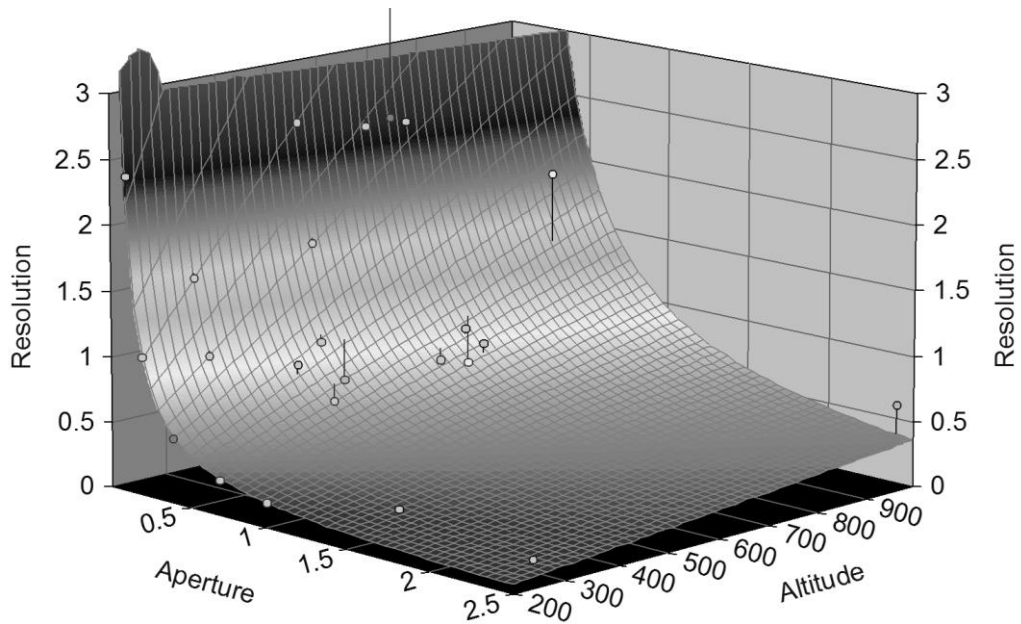


Рисунок 33 1– Соотношение между ЛРМ, диаметром апертуры и высотой съемки

В результате расчетов получим следующую функциональную зависимость:

$$R_0 = \frac{9,6270966 \cdot 10^{-4} H}{D_{an}^{1,0662521}}, \quad (35)$$

где высота измеряется в км, диаметр апертуры и ЛРМ – в метрах, $R^2 = 0,95$.

Для получения более точного приближения модели к реальным значениям параметров воспользуемся программным продуктом, позволяющим находить функциональные зависимости различного вида и выбирать оптимальные выражения по различным критериям. Выберем по критерию R^2 ($R^2 = 0,97$) функциональную зависимость вида:

$$\ln R_0 = a + b \ln D_{an} + cH^{0,5}, \quad (36)$$

где $a=-3,100039$, $b=-1,0648789$, $c=0,10466158$.

Получим выражение

$$R_0 = \exp(-3,100039 - 1,0648789 \ln D_{an} + 0,10466158H^{0,5}). \quad (37)$$

Наиболее сложным параметром оценки ТО является масса КА. Этот параметр зависит от характеристик всех основных подсистем КА. Прежде всего, его величину определяет оптико-электронная система – ее масса и габариты. Для оценки массы КА будем использовать следующее соотношение, полученное на основе анализа статистических данных по существующим КА, на которых установлена одна ОЭС:

$$0,15 \leq \frac{M_{ЦА}}{M_{КА}} \leq 0,20. \quad (38)$$

Анализ зависимости массы КА от фокусного расстояния и диаметра апертуры ОЭС позволил выявить следующее выражение для оценки массы:

$$M_{КА} = 1132,293 \cdot f^{0,15062} D_{an}^{1,464241} (R=0,94). \quad (39)$$

Таким образом, сформировано множество функциональных зависимостей, которые согласно разработанному алгоритму используются для получения численных оценок основных параметров КА.

3.4 Расчет технического облика перспективных КА ДЗЗ на заданный период времени

На основе сформированного массива функциональных зависимостей между отдельными характеристиками КА и ОЭС на основе требований к перспективным КА ДЗЗ проводится оценка характеристик, определяющих его технический облик. Проводится частичная корректировка данных, полученных в результате нормативного и поискового прогнозирования, осуществляется проверка расчетных данных на соответствие теоретическим положениям информационно-аналитической модели.

На основе выявленных в п. 3.2 и 3.3 закономерностей изменения основных параметров КА и функциональных зависимостей между ними проводится расчет значений основных характеристик перспективных КА ДЗЗ.

На основе требований к ЛРМ с использованием выражений (56), (58) проводится предварительная оценка значений фокусного расстояния и апертуры ОЭС. Данные о ЛРМ позволяют также оценить требуемое угловое разрешение ОС для заданной высоты орбиты. Таким образом, определяется мгновенный угол поля зрения ОС.

По данным МУПЗ с использованием полученных выражений проводится оценка угла поля зрения, фокусного расстояния и апертуры ОС.

По вычисленным значениям показателей фокусного расстояния и апертуры проводится оценка размера чувствительного элемента приемника изображения.

По значению МУПЗ с использованием выражения (67) проводится оценка массы целевой аппаратуры КА.

Предварительную оценку массы КА можно провести с использованием соотношения (71). По известным значениям фокусного расстояния и апертуры с использованием выражения (72) вычисляется масса КА.

Используя выражение (69), построим график для оценки высоты съемки и апертуры, необходимых для получения требуемого значения ЛРМ (рисунок 34).

Из (69) получим:

$$H = \left(\frac{\ln R_0 + 3,100039 + 1,0648789 \ln D_{an}}{0,10466158} \right)^2. \quad (40)$$

Размер чувствительных элементов приемника изображения зависит от спектральной чувствительности и выбирается путем оптимизации параметров ОЭС и пропорционален фокусному расстоянию ОС. С целью снижения габаритов ОЭС и КА в целом необходимо уменьшение фокусного расстояния ОС. При этом разработчики стремятся сохранить качество получаемых изображений. При существующих технологиях уменьшение размеров ЧЭ невозможно без снижения качества изображений. Однако, проводимые НИОКР в области материалов ЧЭ

позволят повысить их чувствительность и уменьшить размер. На рис. 35 представлена комплексная диаграмма, позволяющая для различных значений ЛРМ и размеров чувствительного элемента приемника изображения оценить требуемое фокусное расстояние оптической системы.

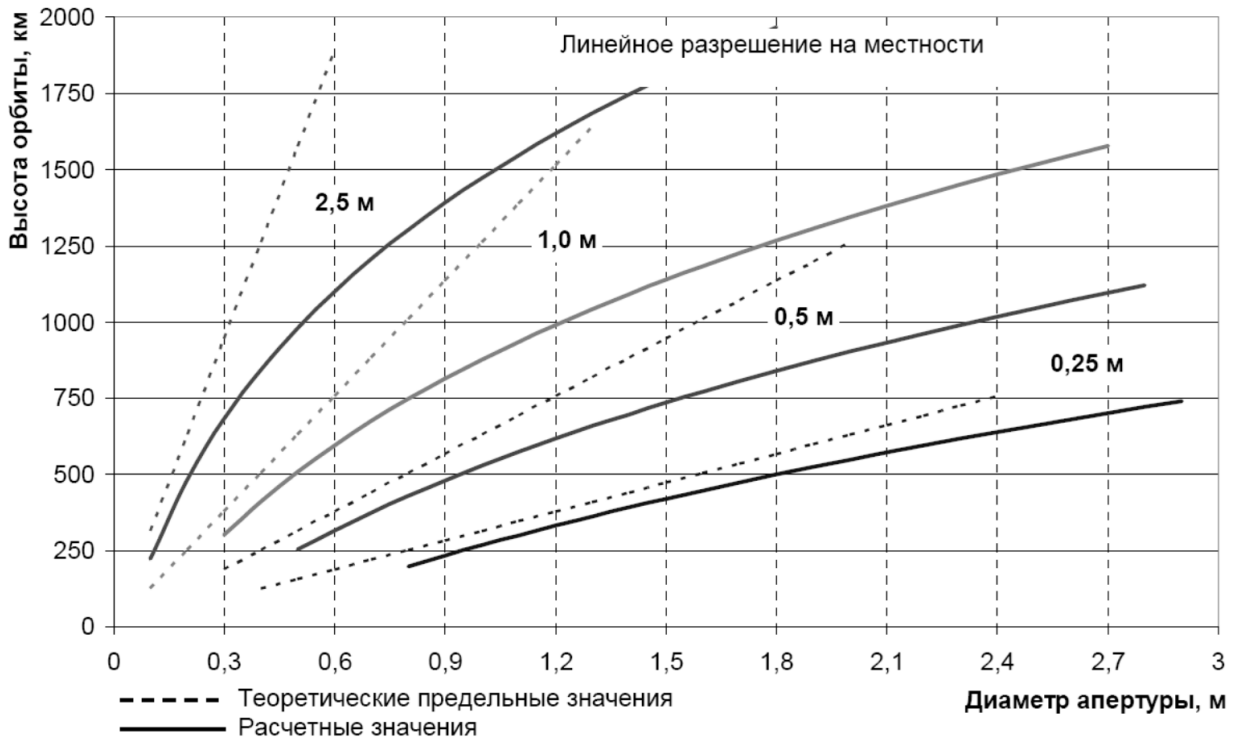


Рисунок 34 – Зависимость высоты орбиты КА от диаметра апертуры ОС для различных значений ЛРМ

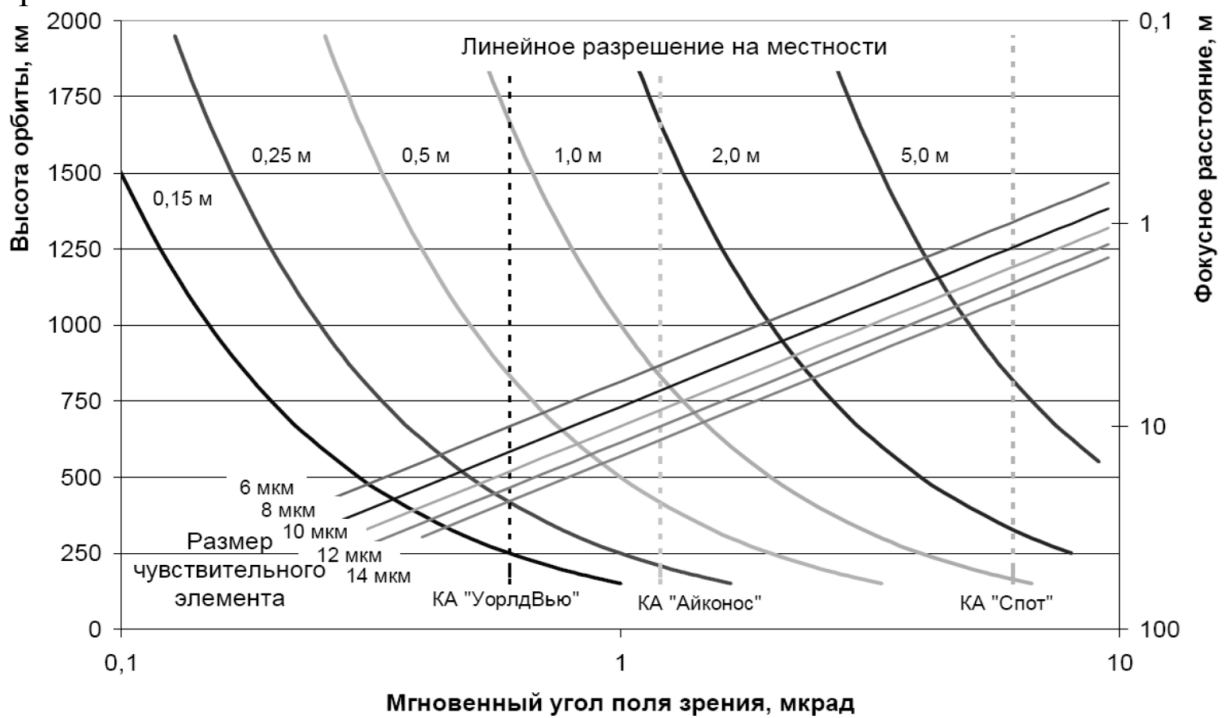


Рисунок 35 – Соотношения между параметрами целевой аппаратуры и функциональными характеристиками КА

На основе выявленной зависимости (72) составлена диаграмма для оценки массы КА в зависимости от фокусного расстояния ОС при фиксированных значениях апертуры (рисунок 36).

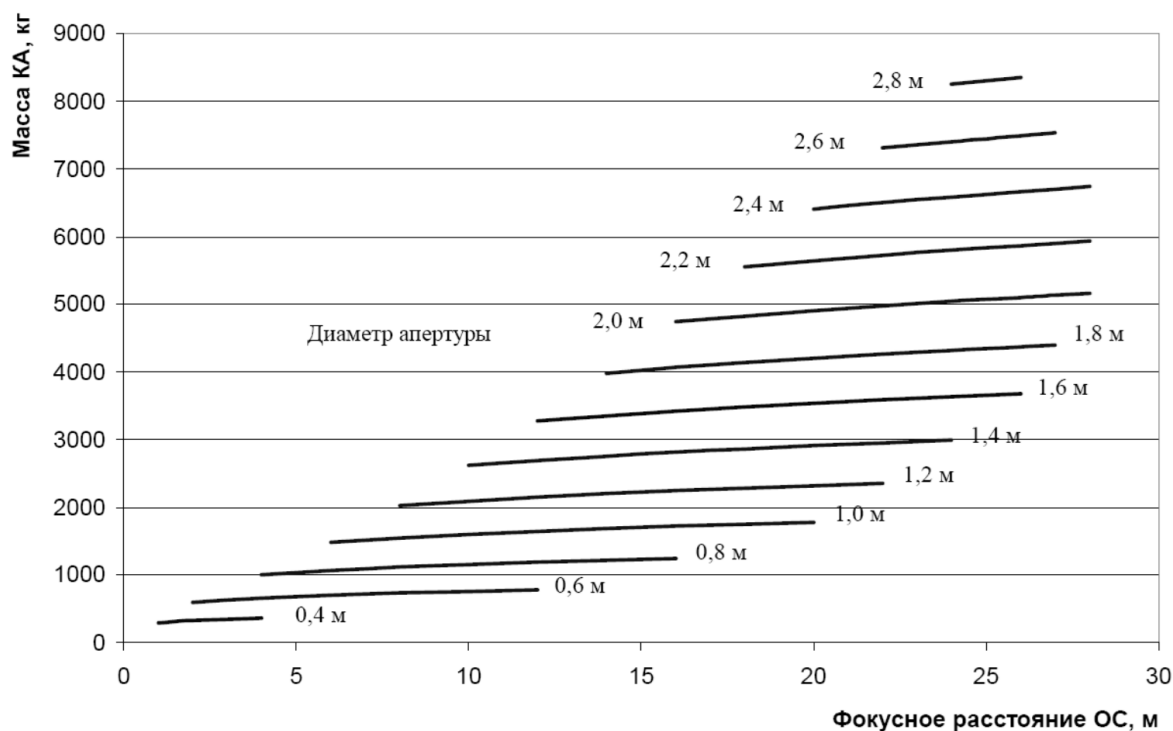


Рисунок 36 – Соотношение между массой КА и геометрическими характеристиками ОЭС

В диаграмме учтены соотношения апертуры и фокуса, обеспечивающие светосилу оптической системы в диапазоне 0,05–0,3.

Используя выявленную зависимость фокусного расстояния от диаметра апертуры, получим следующее выражение для оценки массы КА:

$$M_{КА} = 959,61 \cdot \zeta^{0,15062} D_{an}^{1,464241},$$

где

$$\zeta = 22,547 \cdot 0,5525^{D_{an}} D_{an}^{1,8336} + \frac{0,8317 + 36,018 D_{an}^{1,9718}}{1,92 + D_{an}^{1,9718}} + 18,169 \cdot 0,6571^{1/D_{an}} D_{an}^{0,6718}.$$

Упрощенная зависимость с высокой степенью приближения имеет вид:

$$M_{КА} = 1755,3569 \cdot 0,94155343^{D_{an}} D_{an}^{1,6971124}.$$

С учетом данных, полученных на основе информационно-логического подхода к оценке технического облика, основанного на анализе НИОКР, с

помощью разработанного метода рассчитаны основные параметры перспективных КА ДЗЗ. Результаты расчетов представлены в табл. 15.

Как было выявлено ранее, в структуре перспективной космической системы ДЗЗ будут использоваться три составляющие – детальные сверхвысокого разрешения, обзорные высокого разрешения и малые КА высокого разрешения, но малой производительности.

Особенностью КА сверхвысокого разрешения будет значительное снижение массогабаритных параметров по сравнению с существующими средствами (КА типа «Ресурс-ПМ» и «Ресурс-П»), масса КА составит 4000–5500 кг, однако ожидаемое существенное снижение стоимости КА достигнуто не будет. На КА планируется внедрить передовые технологии, отработка которых в полной мере не проведена, поэтому следует ожидать сохранения стоимости КА на уровне 30–90 млн. дол., а снижение массы позволит уменьшить стоимость выведения.

На КА будет внедрен режим многоспектральной съемки в 5–7 диапазонах, обеспечивающий получение изображений с максимальным ЛРМ 0,8 м. После 2028 г. возможно внедрения режима гиперспектральной съемки в 124–250 диапазонах, при этом будет обеспечиваться ЛРМ порядка 5 м.

На перспективных КА ширина полосы захвата составит 16–40 км в зависимости от высоты съемки и ЛРМ.

Сравнительный анализ характеристик, существующих КА типа «Ресурс-П» и перспективного отечественного КА ДЗЗ представлен на рис. 37.

Особенностью малых КА высокого разрешения является их относительно малая масса и непродолжительный срок активного существования (1–3 г.). Массогабаритные ограничения, накладываемые на КА данного класса, сказываются и на качестве получаемой информации. В частности, аппаратура КА позволит получать изображения земной поверхности с ЛРМ около 0,5 м в панхроматическом режиме и 1,5 м – в многоспектральном.

Улучшить этот показатель планируется за счет размещения КА на низкой орбите высотой около 275–350 км. Проведен сравнительный анализ

характеристик существующего КА «Канопус» и экспериментального КА «Аист-2Д». Результаты анализа представлены на рисунке 38.

Таблица 15 — Основные характеристики перспективных КА ДЗЗ

Характеристика	КА сверхвысокого разрешения	Малые КА высокого разрешения	Картографическое КА высокого разрешения
Год развертывания	2020–2030	2020–2025	2020–2030
Период эксплуатации	2020–2040	2022–2028	2020–2030
Количество КА в системе	3	8–24	2–3
Масса КА, кг	4000–5500	400–970	3000–5000
Высота орбиты, км	350–1000	275–350	450–600
САС, лет	7–10	2–4	5–8
Спектральные диапазоны съемки, количество спектр. каналов	1 ПХ, 5 (МСС), [124–250 (ГСА) после 2028 г.]	1 ПХ, 4 (МСС)	1 ПХ, 10 (МСС)
Дискретизация, бит/пикс.	8–12	8	8–12
Линейное разрешение на местности, м	0,2–0,5 (ПАН); 0,8–1,5 (МСС); [до 5 (ГСА) после 2028 г.]	0,5–1,2 (ПАН); 1,5–3 (МСС)	0,9–1,8 (ПАН); 2–6 (МСС)
Полоса захвата, км	16–40	10–18	45–65
Мгновенный угол поля зрения ОС, мкрад	0,45–0,5 (ПАН); 2,2–2,3 (МСС)	2,2 (ПАН); 8,3–8,5 (ПАН)	0,55 (ПАН); 2,3 (МСС)
Размер ЧЭ, мкм	6–9 (ПАН); 12–18 (МСС)	3,5 (ПАН); 6 (МСС)	9 (ПАН); 18 (МСС)
Угол поля зрения, град.	0,9–1,0	2	1,5–2
Разрешающая способность ОЭС, лин./мм	100–134	300	164–200
Апертура телескопа, м	2,1	0,6–0,8	1,1–1,5
Фокусное расстояние, м	18–24	2–3	4–18
Информационный поток, Мбит/с	22000 – ПАН, 3650 – МСС	1100 – ПАН, 900 – МСС	13500 – ПАН, 8500 – МСС
Удельная информационная емкость изображений, Мбит/кв.км	300 – ПАН 93– МСС	32 – ПАН 14,5 – МСС	100 – ПАН 83– МСС

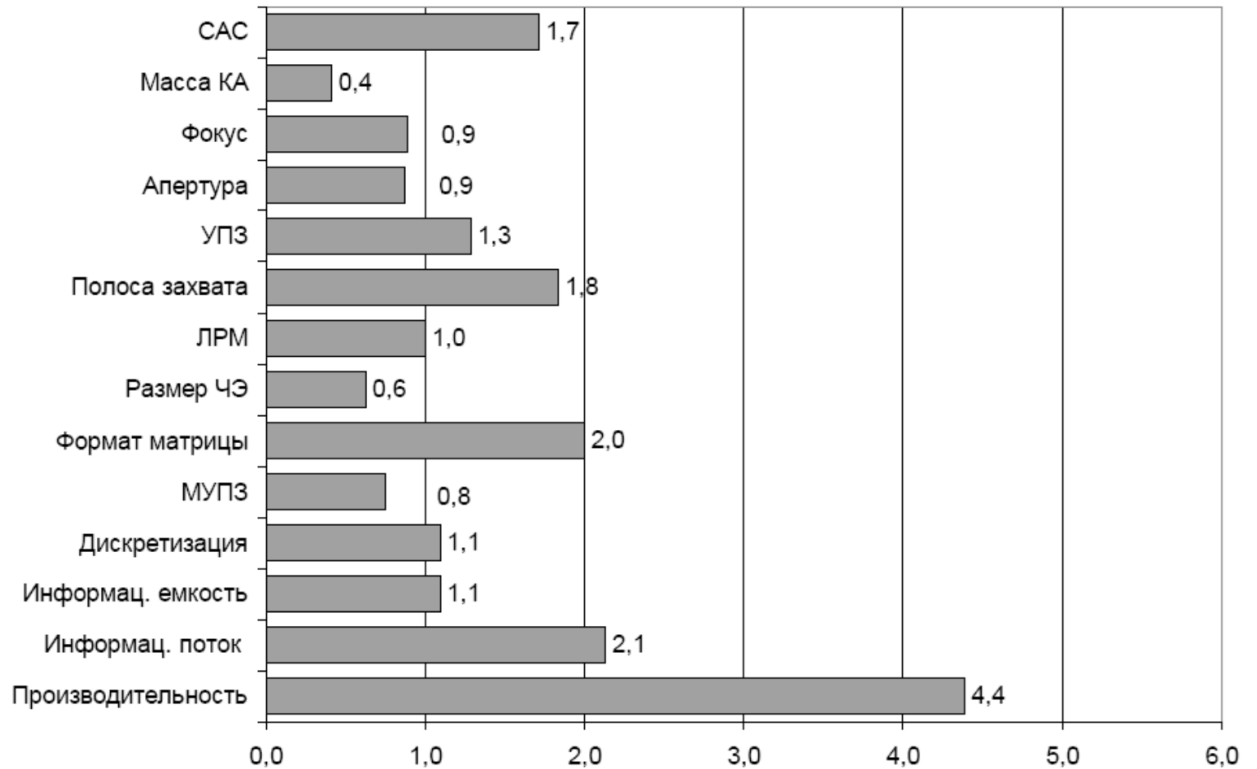


Рисунок 37 – Сравнительный анализ характеристик, существующих и перспективных КА сверхвысокого разрешения

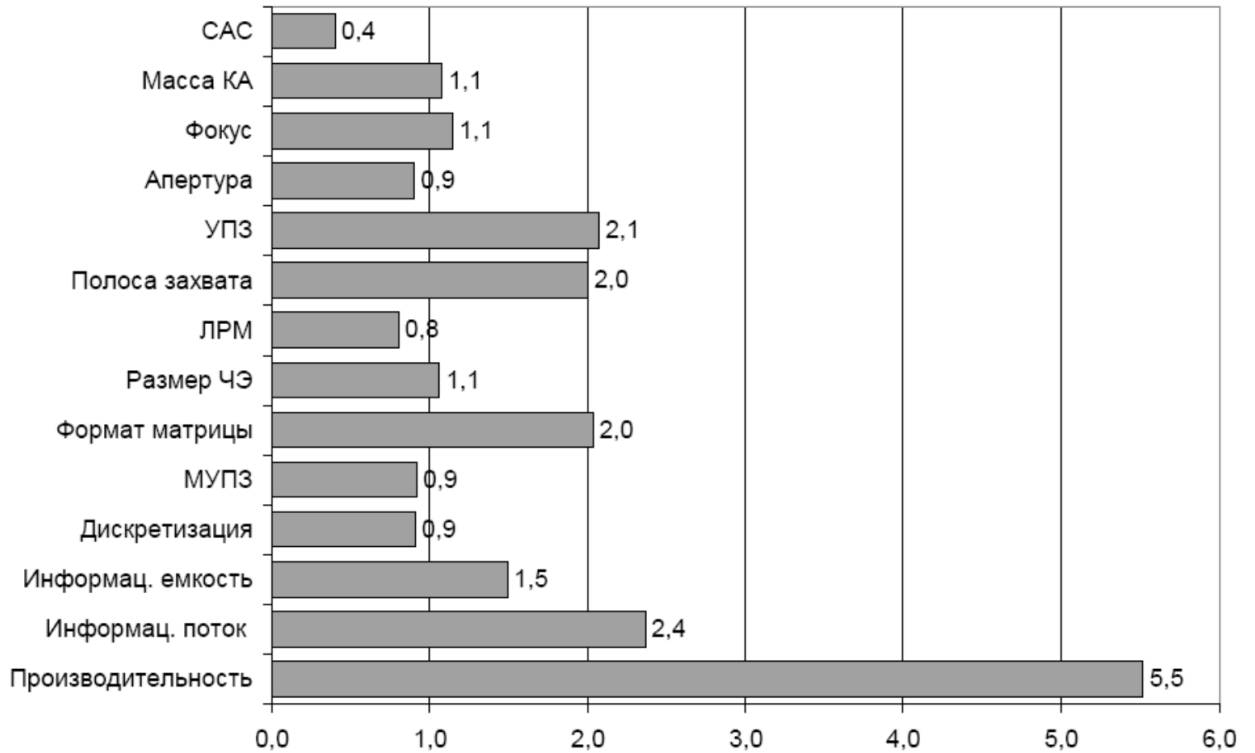


Рисунок 38 – Сравнительный анализ характеристик существующих и перспективных малых КА

Картографические КА нового поколения будут введены в эксплуатацию в период 2020–2030 гг. Основной особенностью КА данного класса будет возможность произведение стереосъемки большой площади с ЛРМ 0,9–1,8 м. Для этого возможно использовать два или три телескопа размещенных на одном КА по типу КА «Alos». Внедрение новых технологий значительно повысит производительность и информативность КА, что потребует в дальнейшем разработки новых алгоритмов обработки данных, алгоритмов сжатия и кодирования. Для передачи большого массива информации потребуется усовершенствование приемо-передающего контура. Сравнительный анализ характеристик представлен на рисунке 39.

Анализ и расчеты показывают, что перспективные КА ДЗЗ в сравнении с существующими средствами наблюдения будут обладать более высокими возможностями. В частности, более чем в 4 раза увеличится производительность КА, в 3–4 раза повысится информативность систем.

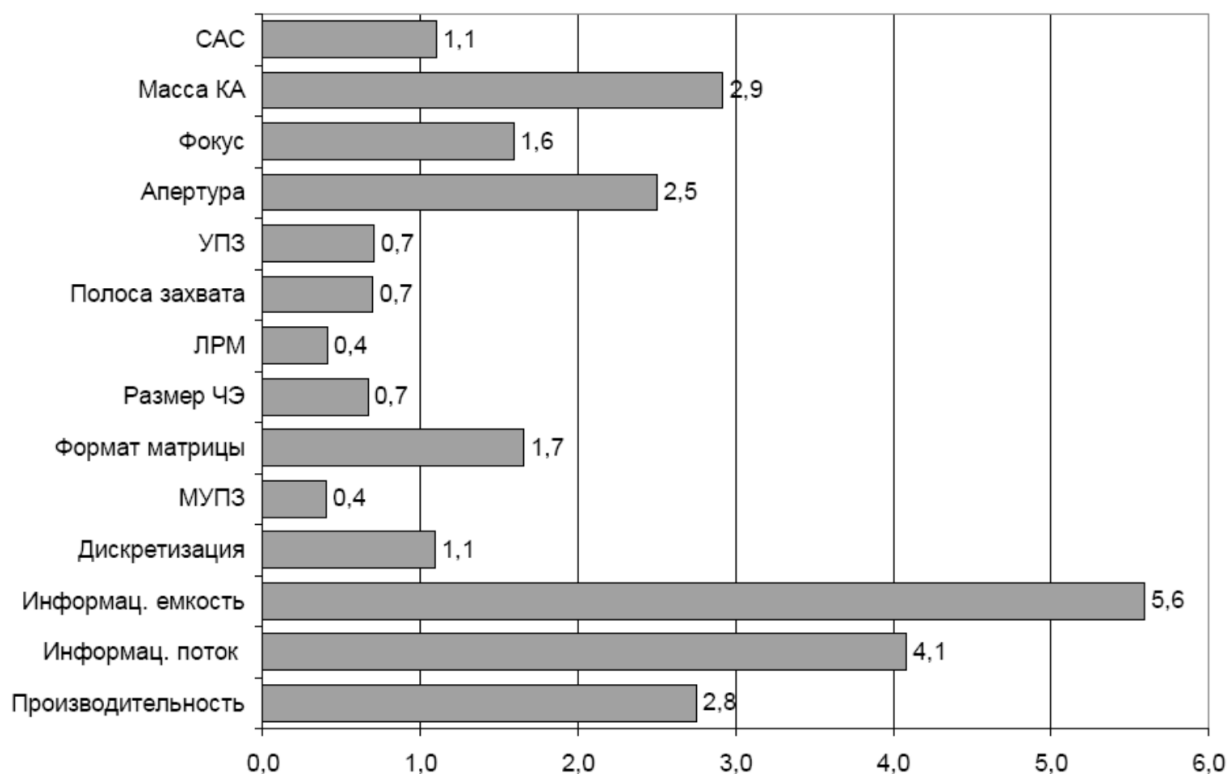


Рисунок 39 – Сравнительный анализ характеристик КА «Gaofen-14» и перспективных картографических КА

3.5 Выводы по главе 3

1. В результате проведенных исследований с помощью разработанной методики были выявлены наиболее значимые характеристики КА ДЗЗ, определяющие эффективность его функционирования по показателям информативности, производительности и оперативности.

2. На основе применения методов компонентного анализа проведена статистическая обработка данных по характеристикам КА ДЗЗ, в результате которой выявлены комплексные статистические показатели. Для расчетов использовался программный пакет STATISTICA 10.0, позволяющий для различного набора исходных параметров вычислять факторные нагрузки и, с целью получения интерпретируемых результатов, применять различные методы ортогонального преобразования.

3. Выявлены тенденции изменения основных параметров КА и составлен прогноз их развития. В частности, выявлены тенденции изменения нормированной частоты пропускания ОЭС КА, значений комплексных показателей удельной информационной емкости изображения и информационного потока.

4. Проведен анализ функциональных связей между основными параметрами информативного набора. Сформировано множество из более, чем 60 зависимостей между основными техническими характеристиками КА, характеристиками аппаратуры и функциональными характеристиками КА в различных вариантах.

5. Проведен расчет основных характеристик перспективных КА ДЗЗ. Выявлены основные технологии и технические решения, которые при сохранении существующих тенденций развития могут быть внедрены после 2030 г.

6. Технический облик перспективных КА ДЗЗ сверхвысокого разрешения будет характеризоваться следующими основными ТХ: масса КА составит 4000–5500 кг; КА обеспечит получение изображений земной поверхности в панхроматическом режиме с максимальным линейным разрешением 0,2–0,5 м в панхроматическом режиме с высоты 600 км, в мультиспектральном режиме – 0,8–1,5 м. в полосе захвата 16–40 км. После 2028 г. возможно внедрения режима

гиперспектральной съемки в 124–250 диапазонах, при этом будет обеспечиваться ЛРМ порядка 3–5 м. Угловая разрешающая способность ОЭС КА данного типа будет улучшена до 0,45–0,5 мкрад.

7. Технический облик перспективных малых КА ДЗЗ будет характеризоваться следующими основными ТХ: масса КА составит 400–930 кг; КА обеспечит получение изображений земной поверхности в панхроматическом режиме с максимальным линейным разрешением 0,5–1,2 м, в многоспектральном режиме – 1,5–3 м в полосе захвата 10–18 км. КА будут функционировать на низкой орбите высотой 300–350 км и иметь непродолжительный срок активного существования – 1–3 года. Диаметр апертуры ОЭС составит 0,6–0,8 м.

8. Технический облик перспективных картографических КА ДЗЗ будет характеризоваться следующими основными ТХ: масса КА составит 3000–5000 кг; КА обеспечит получение изображений земной поверхности в панхроматическом режиме с максимальным линейным разрешением 0,9 м, в многоспектральном режиме – 2 м и обеспечит съемку в полосе 45–60 км с высоты орбиты 470–700 км. Главной особенностью данных аппаратов будет возможность съемки стереоизображений большой площади, для этого на аппарате будет размещаться не одна, а сразу две или три оптических системы.

9. Перспективные КА ДЗЗ в сравнении с существующими средствами наблюдения будут обладать более высокими возможностями. В частности, более чем в 4 раза увеличится производительность КА, в 3–4 раза повысится информативность систем, такие показатели достигаются:

– для малых КА уменьшение массы оптической системы с одновременным увеличением ЛРМ будет достигаться, за счет уменьшения размера ЧЭ матрицы, а также снижением высоты орбиты, при этом уменьшение САС, не является критичным из-за снижения стоимости разработки и запуска малых КА, показатели производительности и оперативности будут обеспечиваться за счет наращивания ОГ;

– увеличение информативности КА сверхвысокого разрешения во многом будет зависеть от возможности применения ОС с большим диаметром апертуры, а

также использование полупроводников с большей потенциальной ямой в качестве ЧЭ матриц, уменьшение массы возможно за счет применение композитных материалов конструкции;

– процесс дегазации в условиях открытого космоса не представляет возможным применение композитных материалов в КА картографии в связи с необходимостью увязки высокой точности приборов ориентирования и навигации с системой координат оптической системы, снижение массы в таком случае может быть достигнуто внедрением элементной базы высокоскоростной радиолинии.

10. Достоверность прогноза подтверждена непротиворечивостью результатов исследования с данными, полученными в других организациях.

11. Результаты исследований могут быть использованы при прогнозировании (оценке) возможностей перспективных зарубежных космических систем, а также для обоснования требований к разрабатываемым отечественным космическим средствам ДЗЗ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате произведенного исследования разработана методика формирования технического облика перспективных КА ДЗЗ с учетом влияния функциональных ограничений (технологических ограничений, дополнительных условий заказчика, связанных с реализацией и продвижением проекта). Методика позволяет исследовать влияние фактора времени на характеристики и технический облик изделий.

Практическая значимость работы подтверждена внедрением результатов исследований в АО «Научный центр оперативного мониторинга Земли», где разработанная методика была успешно применена на практике для экспертной оценки перспективных КА ДЗЗ и ряда других прикладных задач.

1. В результате анализа развития космических систем ДЗЗ была проведена классификация перспективных КА ДЗЗ на три различных типа по функциональным особенностям, а именно на КА сверхвысокого разрешения КА, картографии высокого разрешения и малые КА высокого и сверхвысокого разрешения. Определены и обоснованы требования по массе КА, сроку активного существования и ЛРМ для каждого типа перспективных КА ДЗЗ.

2. Разработана комплексная методика формирования ТО КА ДЗЗ, которая позволяет на ранних этапах проектирования определить технический облик перспективных космических аппаратов и учесть особенности реализации проекта. Возможности разработанной методики не ограничиваются рамками проведенной работы. Методика может использоваться как для формирования технического облика перспективных КА, так и для сравнительной оценки эффективности существующих КА ДЗЗ. Разработанный методический аппарат может применяться для формирования ТО космических или сложных систем, а также для решения некоторых видов других многокритериальных задач.

3. В ходе экспериментальной отработки методики были получены следующие результаты:

– определены наиболее значимые характеристики КА ДЗЗ, определяющие эффективность его функционирования по показателям информативности, производительности и оперативности;

– на основе применения методов компонентного анализа проведена статистическая обработка данных по характеристикам существующих КА ДЗЗ, в результате которой определены комплексные статистические показатели;

– выявлены тенденции изменения основных параметров КА и составлен прогноз их развития, в частности, выявлены тенденций изменения нормированной частоты пропускания ОЭС КА, значений комплексных показателей удельной информационной емкости изображения и информационного потока.

– проведен анализ функциональных связей между основными параметрами информативного набора;

– сформировано множество из более, чем 60 зависимостей между основными техническими характеристиками КА, характеристиками аппаратуры и функциональными характеристиками КА в различных вариантах;

– проведен сравнительный анализ основных характеристик перспективных и существующих КА ДЗЗ, который показал, что основные усилия необходимо направить на несколько направлений: а) создание сверхлегких оптических систем на основе полимерных пленок; б) исследования в области баллистического обеспечения для обоснования возможности сохранения орбиты на низких высотах; в) исследования процессов дегазации в условиях открытого космоса для применения композитных материалов конструкции КА; г) совершенствование элементной базы и приборостроения в целом.

Таким образом, все поставленные задачи исследования решены, и общая цель проведенных исследований достигнута.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

- БКУ — бортовой комплекс управления
- ГСА — гиперспектральная аппаратура
- ДЗЗ — дистанционное зондирование Земли
- ЗУ — запоминающее устройство
- КА — космический аппарат
- ЛРМ — линейное разрешение на местности
- МНК — метод наименьших квадратов
- МСС — многоспектральная съемка
- МТО — материально-техническое обеспечение
- МУПЗ — мгновенный угол поля зрения
- МЭМС — микроэлектромеханическая система
- НАСА — Национальное управление по авиации и исследованию космического пространства
- НИОКР — научно-исследовательские работы и опытно-конструкторские разработки
- НИР — научно-исследовательская работа
- НТБ — научно-техническая база
- ОЭС — оптико-электронная система
- ПХ — съемка в панхроматическом режиме
- ПЗС — прибор с зарядовой связью
- ППИ — пункт приема информации
- РН — ракета-носитель
- САС — срок активного существования
- СЭО — система энергообеспечения
- ТО — технический облик
- ТХ — технические характеристики
- УПЗ — угол поля зрения
- ФЭП — фотоэлектрический преобразователь
- ЧЭ — чувствительный элемент

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ахметов Р.Н., Еремеев В.В., Кузнецов А.Е., Мятлов Г.Н., Пошехонов В.И., Стратилатов Н.Р. – Высокоточная геодезическая привязка изображений земной поверхности от КА «Ресурс-П» // Журнал Президиума РАН Исследование Земли из космоса. 2017 №1. С. 44-53.
2. Ахметов Р.Н., Зинина И.И., Еремеев В.В. Точностные характеристики выходной продукции высокого разрешения КА "РЕСУРС-П". – Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 3. С. 41-47. с.
3. Ахметов Р.Н., Аншаков Г.П., Шилов М. Г. и др. Система управления движением КА "РЕСУРС-П". В сборнике: Управление движением и навигация летательных аппаратов. Сборник трудов XVII Всероссийского семинара по управлению движением и навигации летательных аппаратов. Научный редактор Балакин В. Л., 2015. С. 32-35.
4. Бакланов А.И. Системы наблюдения и мониторинга: учебное пособие. – М.: БИНОМ; Лаборатория знаний, 2009. – 234 с.
5. Белый Р.В., Мовляв А.С. Анализ перспективных технологий миниатюризации космических аппаратов дистанционного зондирования Земли. // Том 179. «Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ», №6, 2020, научно-технический журнал. – Москва: Изд-во. Корпорация "ВНИИЭМ", 2020г. – С. 23-27
6. Белый Р.В., Харланов А.С., Харламов М.М. и др. Инновационное развитие и космос: военные аспекты стратегии и экономики. // Монография – Москва: РУСАЙНС, 2020 г. – 88 с.
7. Белый Р.В., Мовляв А.С. Методика формирования информационного набора параметров оказывающего наибольшее влияние на функционирование КА ДЗЗ с учетом выбранных критериев эффективности. // Том 179. «Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ», №6, 2020, научно-технический журнал. – Москва: Изд-во. Корпорация "ВНИИЭМ", 2020г. – С. 42-46
8. Белый Р.В. Формирования информационного набора параметров, характеризующих технический облик космических аппаратов ДЗЗ. // Тезисы докладов Восьмой международной научно-технической конференции

- «Актуальные проблемы создания космических систем ДЗЗ». – М.: АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2020 г. – С. 4-5.
9. Белый Р.В., Харланов А.С. Концепция сетецентрической войны. Состояние, перспектива развития и опыт применения космических средств наблюдения США. // Научно-практический журнал «Образование. Наука. Научные кадры. №2 2020» научный журнал №2 – М.: Изд-во. Юнити-Дана, 2020 г. – С. 118-121.
10. Белый Р.В., Мовляв А.С. Требования к построению орбитальной группировки при проектировании перспективных космических аппаратов дистанционного зондирования Земли. // Том 182. «Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ», №3, 2021, научно-технический журнал. – Москва: Изд-во. Корпорация "ВНИИЭМ", 2021г. – С. 26-32.
11. Белый Р.В. и др. Анализ глобальных угроз России при развитии систем космического вооружения США как построение системы тотального военного доминирования. // Научно-практический журнал «Образование. Наука. Научные кадры. №1 2020» научный журнал №1 – М.: Изд-во. Юнити-Дана, 2020 г. – С. 85-91.
12. Белый Р.В., Ламзин В.А. Вопросы рационального планирования целевой аппаратуры и распределения ресурса КС ДЗЗ. // Сборник тезисов докладов «53-х Научных чтений памяти К.Э.Циолковского». – Калуга, 2018 г. – С. 323-324.
13. Белый Р.В. и др. Состояние и направление развития военных оптико-электронных и радиолокационных космических систем наблюдения США. // Сборник научных трудов конференции «Мировая экономика в условиях глобальной неопределенности трендов развития и рисков.» – М.: Изд-во. «Сам полиграфист», 2020 г. – С. 47-57.
14. Борисов А.В. Ерощко М.В. Концептуальные сценарии развития наземной космической инфраструктуры приёма целевой информации перспективной орбитальной группировки дистанционного зондирования земли. Журнал «Космическая техника и технологии» №2 (33) 2021. – М.: РКК «Энергия», 2021 г. – С. 119-129.

15. Борисов А.В. Выбор орбитальных структур космических систем дистанционного исследования Земли с учетом управления ориентацией линий визирования аппаратуры наблюдения: Диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук: 05.07.12.— Самара, 1994.— 162 с.: ил.
16. Бююль А., Цёфель П. Искусство обработки информации. Анализ статистических данных и восстановление скрытых закономерностей. — СПб.: ООО «ДиаСофтЮП», 2002. — 603 с.
17. Выгодчикова, И. Ю. Алгоритм оценки параметров линейной множественной модели регрессии по минимаксному критерию - М.: Синергия, 2019. - 216 с.
18. Городецкий В.И., Карсаев О.В. Самоорганизация группового поведения кластера малых спутников распределенной системы наблюдения. // Известия ЮФУ. Технические науки. №2 Т.187, 2017г. – С. 234-247.
19. Горбунов А.В. Методы разработки космических аппаратов для обеспечения качества информации дистанционного зондирования Земли: Диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук: 05.13.01. — М., 2003. — 157 с.
20. Гущин В.Н. Основы устройства космических аппаратов. — М.: Машиностроение, 2003. — 272 с.
21. Дарнопых В.В. Оптимальное планирование целевого функционирования низкоорбитальных космических систем связи и наблюдения: Диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук: 05.13.14.— М., 1999.— 214 с.: ил.
22. Ерофейчев В.Г. Инфракрасные фокальные матрицы // Оптический журнал. — 1996. — № 6. — С. 4–17.
23. Карасев В.И., Бакланов А.И., Коёкин А.И. Предельные информационные возможности оптико-электронных комплексов наблюдения для нано- и микроспутников / Материалы конференции VI Международного форума «Высокие технологии XXI века». — М.: Российский Фонд развития высоких технологий, 2005. — С. 186–187.
24. Кириченко А.С. Организация конструкторско-технологической подготовки производства малых космических аппаратов: Диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук: 05.02.22. — Самара: СГАУ. 2016. — 118 С.

25. Космические аппараты систем зондирования поверхности Земли: Математические модели повышения эффективности КА / А.В. Соллогуб, Г.П. Аншаков, В.В. Данилов. — М.: Машиностроение, 1993. — 368 с.:
26. Ламзин В.А., Матвеев Ю.А. и др. Метод прогнозных исследований эффективности модификаций КА при комплексной замене подсистем. Научно-технический журнал «Вестник НПО имени С.А. Лавочкина». 2015. №4(30). С. 53–59
27. Ламзин В.А. Методические основы прогнозных исследований модификаций космических аппаратов. Журнал «Труды МАИ». 2016. № 86. С. 1–24.
28. Ламзин В.В., Матвеев Ю.А. и др. Конструктивный метод прогнозных исследований космических систем дистанционного зондирования Земли.
29. Общероссийский научно-технический журнал «Полет». 2016. № 1. С. 12 – 19
30. Лебедев А.А., Нестеренко О.П. Космические системы наблюдения: Синтез и моделирование. — М.: Машиностроение, 1991. — 224 с.
31. Макаренко Д.М., Потюпкин А.Ю. Современное состояние и перспективы развития космических систем. — М.: ВА РВСН, 2005.— 117с.
32. Макаренко Д.М., Потюпкин А.Ю., Системный анализ космических аппаратов, - М.: МО РФ, 2007. — 329с.
33. Маламед Е.Р. Конструирование оптических приборов космического базирования / Учеб. пособие. — СПб.: СПбГИТМО(ТУ), 2002. — 291 с.
34. Матвеев Ю.А., Ламзин В.В. Метод выбора проектных параметров модификаций космических аппаратов дистанционного зондирования Земли при наличии ограничений//Вестник МАИ, 2008. Т.15. №1. С. 44 - 55.
35. Матвеев Ю.А., Ламзин В.В. Методика прогнозных исследований перспективных космических систем дистанционного зондирования Земли// Общероссийский научно-технический журнал «Полет». № 9. 2010. С. 18 - 26.
36. Петровский Г.Т., Гоголев Ю.А., Любарский С.В. Новые технологии в Космической оптике // Юбилейная научно-практическая конференция, посвященная 40-летию первого полета человека в космос: Доклад ВНЦ «ГОИ им. С.И. Вавилова». — СПб., 2001.
37. Полищук Г.М., Макриденко Л.А., Викторов А.С. и др. Состояние и перспективы создания бортовой аппаратуры наблюдения Земли для

- малоразмерных спутников. Труды 4-ой Международной конференции-выставки «Малые спутники, новые технологии, миниатюризация, области эффективного применения в XXI веке». - г. Королев, 2004. С. 307 - 322.
- 38.Полищук Г.М, Пичхадзе К.М., Моишеев А.А., и др. Новая серия космических аппаратов «Аркон»// Общероссийский научно-технический журнал «Полет». № 11. 2006. С. 3 – 6.
- 39.Рыков А.С. Системный анализ: модели и методы принятия решений и поисковой оптимизации. – М. : МИСиС, 2009. – 608 с.
- 40.Савиных В.П., Соломатин В.А. Оптико-электронные системы дистанционного зондирования: Учеб. для вузов. — М.: Недра, 1995. — 315 с.
- 41.Скребушевский Б.С. Управление полетом беспилотных космических аппаратов. — М.: «Владмо», 2003. — 436 с.
- 42.Смирнов, В. Д. Методы корреляционно-регрессионного анализа в эконометрических исследованиях: учебное пособие / В.Д. Смирнов. - М.: Белокопытов Алексей Вячеславович, 2018. - 951 с
- 43.Спутниковые системы мониторинга. Под ред. В.В. Малышева. - М.: МАИ, 2000, 568 с.
- 44.Стратилатова Н.Р., Куренков В.И., Кучеров А.С. Методика сравнительной оценки эффективности космических аппаратов дистанционного зондирования Земли с различными оптико-электронными комплексами. Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета 2016. №2. т.15. С.80-89.
- 45.Стратилатова Н.Р., Космодемьянский Е.В., Бакланов А.И. и др. Основные проектные характеристики малых космических аппаратов научного и прикладного назначений на базе унифицированной платформы «аист-2» Журнал «Космическая техника и технологии» №4 (31) 2020. – М.: РКК «Энергия», 2020 г. – С. 5-20.
- 46.Стратилатов Н.Р., Кузнецов А.Е., Мятлов Г.Н., и др. – Высокоточная геодезическая привязка изображений земной поверхности от КА «Ресурс-П» // Журнал Президиума РАН Исследование Земли из космоса. 2017 №1. С. 44-53.

- 47.Тарасов Е.В., Балык В.М. Методы проектирования летательных аппаратов. Учебное пособие. - М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2008. 268 с.
- 48.Трифонов Ю.В., Горбунов А.В., Чуркин А.Л. Основные направления развития средств дистанционного зондирования Земли из космоса. – В ФГУП "НПП ВНИИЭМ". Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2008. Т. 105. С. 29-39
- 49.Харман Г. Современный факторный анализ. — М.: Статистика, 1972. — 488 с.
- 50.Хижниченко В.И. Разработка метода и технологии автоматизированной обработки данных дистанционного зондирования в оперативных космических системах наблюдения земной поверхности: Диссертация на соискание ученой степени д-ра техн. наук: 05.24.02.— М., 1997.— 340 с
- 51.Хижниченко В.И. Состояние и ближайшие перспективы развития космических средств дистанционного зондирования Земли за рубежом // Дистанционное зондирование Земли: Обзор. информация. – Вып. 1, Санкт-Петербург. — 2000. — 81 с.
- 52.Шанда Э. Физические основы дистанционного зондирования / Пер. с англ. И.А. Столярова. — М.: Недра, 1990. — 208 с.: ил.
- 53.Air Force PB 2017. RDT&E Budget Item Justification. February 2016. http://www.globalsecurity.org/military/library/budget/fy2016/usaf-peds/pe0602601f_pb_2016.pdf
- 54.Ann M. Florini, "The Opening Skies: Third Party Imaging Satellites and U.S. Security," International Security, Vol. 13, No. 2 (Fall 1988), p. 98.
- 55.Aviation Week and Space Technology. — 2000. — 14/VIII. — Vol. 153. — N 7. — p. 57.
- 56.Correll J. Warfare in the Information Age. «Air Force Magazine». December 1996, — p. 3.
- 57.Ferster W. New imaging satellites planned; construction orders not yet firm // Space News. — 2001. — 27/VIII. — Vol. 12. — № 32. — P. 8.
- 58.Griffin, Michael D. Space vehicle design. — 2nd ed.— AIAA, 2005. — 665 p.
- 59.Henderson S. The Third Battle: Is The U.S. Ready to Wage The Next Conflict in Space? — USAF, 2004. — 88 p.

60. Herbert J. Kramer, *Observation of the Earth and its Environment – Survey of Missions and Sensors // Earth Observation History of Technology Introduction*. — Verlag, Berlin, 2006
61. Iannotta B. *Space imagery firms shift ground stations approach // Space News*. — 2001. — 21/V. — Vol. 12. — № 20. — P. 1, 18.
62. *Implications of Emerging Micro- and Nanotechnologies*. — National Academy of Sciences, 2003 — 243 p.
63. Joshua S. Levi, Peter D. Washabaugh, *A Feasibility Study of Micro-Satellites for Earth Observation // The 15th AIAA/USU Conference on Small Satellites*, 2001
64. Killough R., McLelland M., *Designing Command and Telemetry Systems Using MIL-STD-1553 and CCSDS // The 14th AIAA/USU Conference on Small Satellites*, 2000
65. Lambeth B. *NATO's Air War for Kosovo: A Strategic and Operational Assessment*. RAND, Santa Monica, 2001.
66. *MEMS: Powerhouse for Growth in Sensors, Actuators, and Control Systems — 2nd Edition* — Frost & Sullivan, 2001. — 221 p.
67. *Microengineering aerospace systems / Henry Helvajin* — The Aerospace Corporation, 1999. — 707 p.
68. *Militarily Critical Technologies List. // Sec. 19: Space Systems Technology*. — USA, DoD, 2005. — 169 p.
69. Morain S., Budge A. *High spatial resolution commercial imagery workshop (report) // High Lights*. — 2001. — Vol. 6. — № 2. — P. 14–15.
70. Morgan T., *Jane's Space Directory*. — 14th ed. — Jane's Information Group Ltd., UK, 1998. — 560 p.
71. *NGST mirror system demonstrator from the University of Arizona // Optical Manufacturing and Testing IV: Proc. SPIE Vol. 4451, p. 27–38*. — USA, 2001.
72. *Observation from Orbit // Jane's Defense Review*. — December 2003. — p. 32.
73. *Quadrennial Defense Review Report*. — USA, Department of Defense, 2006. — 113 p.
74. Rai-Choudhury, P. *MEMS & MOEMS: technology and applications*. — SPIE, 2000. — 520 p.

- 75.RDT&E FY2003 Budget Estimates, Defense Advanced Research Projects Agency. — USA, 2002. — 373 p.
- 76.RDT&E FY2005 Budget Estimates, Department Of The Air Force. — USA, 2004. — 2061 p.
- 77.Secrets for Sale: How Commercial Satellite Imagery Will Change the World. — Carnegie Endowment for International Peace. — USA, 2000. — 56 p.
- 78.Space Technology Guide / Department of Defense, FY2000–01. — Office of the Secretary of Defense, 2000. — 77 p.
- 79.Strategic Master Plan FY06 and Beyond. — USA, Air Force Space Command, 2003. — 46 p.
- 80.TRW's Hyperion images begins transmitting // Space News. — 2001.— 12/II. — Vol. 12. — № 6. — P. 12.
- 81.U.S. National Space Policy / Office of Science and Technology Policy — October 6, 2006 — <http://www.ostp.gov>
- 82.United States Military Space: Into the Twenty-First Century. — USAF, Air University Press, 2002. — 168 p.
- 83.Watts B. The Military Use of Space: A Diagnostic Assessment. — USA, Center for Strategic and Budgetary Assessments, 2001. — 161 p.
- 84.Wilkinson, Mark. The Changing Paradigms of Satellite Reconnaissance, Creating Opportunities in the Small Satellite Industry // The 20th AIAA/USU Conference on Small Satellites, 2006.

ПРИЛОЖЕНИЕ А.

Результаты анализа программ НИОКР, проводимых в области создания перспективных КА ДЗЗ

Технологическая область	Содержание и цели работ	Ожидаемый результат	Планируемый год реализации
Целевая аппаратура	<p>Разработка технологий повышения чувствительности датчиков:</p> <ul style="list-style-type: none"> – совершенствование методов компенсации атмосферных искажений; – разработка новых алгоритмов распознавания целей для многоспектральных и гиперспектральных систем 	Повышение качества изображений, информативности.	2025–2030
	<p>Разработка перспективных технологий ИК-систем:</p> <ul style="list-style-type: none"> – создание многокаскадных и межзонных полупроводниковых ИК-источников лазерного излучения 	Повышение эффективности работы ОЭА при зондировании поверхности – источником ИК-излучения	2025–2030
	<p>Совершенствование ОЭС, работающих в много-, гиперспектральном режимах и ближнем ИК-диапазоне:</p> <p>разработка технологий производства материалов для чувствительных элементов много- и ультраспектральных систем</p>	Улучшение разрешающей способности многоспектральных и гиперспектральных систем.	2030
	<p>Разработка технологии производства больших матриц чувствительных элементов фокальной плоскости ОЭС:</p> <ul style="list-style-type: none"> – матрицы чувствительных элементов для многоспектральных систем; – интегральные считывающие микросхемы; – ИК-фотодиоды с квантовыми ямами 	Повышение информативности систем во время ночной съемки и при малых углах Солнца	2020
	<p>Разработка устройств компенсации атмосферных искажений и управления лучом для лазерных систем:</p> <ul style="list-style-type: none"> – оптическое сопряжение фаз; – адаптивная лазерная оптика; 	Повышение качества изображений за счет постобработки на Земле	2025

Технологическая область	Содержание и цели работ	Ожидаемый результат	Планируемый год реализации
	– пространственное управление на орбите; – компенсация вибраций		
	Разработка лазера, лидара (лазерного локатора) или отражающих зеркал для оптических систем дистанционного зондирования Земли: – создание легких широкоапертурных модульных разворачиваемых мембранных (пленочных) зеркал / линз и опорных конструкций / конструкционных материалов	Снижение массы ОЭС; повышение разрешающей способности ОЭС за счет увеличения апертуры	2025–2030
	Разработка зеркальных покрытий с изменяемым коэффициентом излучения	Повышение эффективности работы ОЭС для различных спектральных областей	2025
	Разработка и производство прочных тонкопленочных материалов для мембран, покрытий и др.	Снижение массы, повышение надежности	2020–2025
БРЭО	Разработка высокопроизводительных, радиационно-стойких электронных устройств малой потребляемой мощности, МЭМС, электронных компоновочных схем для создания высокопроизводительного электронного оборудования нового поколения.	Уменьшение массы, размеров и потребляемой мощности электронного оборудования Увеличение производительности и надежности БРЭО	2020-2025
	Исследования в области улучшения характеристик материалов, применяемых при изготовлении элементной базы для микроэлектронных устройств, путем применения материалов с полупроводниковой структурой «кремний на диэлектрике» и халькогенидных материалов.		

Технологическая область	Содержание и цели работ	Ожидаемый результат	Планируемый год реализации
	Испытание монолитных интегрированных устройств на основе кремния. Расширение свойств новых радиационностойких энергонезависимых цифровых модулей памяти и оптических датчиков – радиационно-стойкая цифровая флэш-память (например, SiC)		
	Производство энергонезависимых аналоговых ЗУ. Создание энергонезависимых аналоговых компоновочных схем с изменяемой конфигурацией. Разработка перспективного радиационно-стойкого электронного оборудования – процессоров и модулей памяти		
	Разработка технологий улучшения оптических линий связи путем внедрения светодиодов с улучшенными характеристиками, лазерных диодов и оптических МЭМС	Увеличение скорости передачи данных до 1600 Мбит/с	2020–2025
	<p>Разработка микроэлектронных устройств, в которые будут включены радиационностойкие преобразователи сигналов и модули памяти сверхвысокой плотности, а также компоненты МЭМС</p> <p>Полномасштабное внедрение программируемых элементов памяти на халькогенидном стекле в чипы высокой плотности. Исследования в области внедрения халькогенидов в другие компоненты.</p>	Создание универсального бортового встроенного процессора, выполняющего 1500 млн команд в секунду, разработка цифровых преобразователей сигналов, выполняющих 1 млрд операций/сек	2020–2030

Технологическая область	Содержание и цели работ	Ожидаемый результат	Планируемый год реализации
Обеспечение защиты КА и элементов оборудования	Разработка систем демпфирования вибрационных нагрузок при запуске и системы первичной и вторичной изоляции КА	Уменьшение массы КА и степени его повреждений при выведении и в процессе эксплуатации	2025–2035
	Создание новых радиационно-стойких и защитных материалов: – радиационно-стойкие композиционные материалы; – высокотемпературные радиационно-стойкие материалы для электронных приборов	Повышение надежности элементов БРЭО	
	Разработка композиционных материалов для платформ КА и применение при создании системы тепловой защиты и космических антенн	Снижение массы и стоимости конструкции, одновременно с улучшением конструктивных свойств	2020–2025
Конструкция КА	Разработка системы активного акустического подавления, разработка и демонстрация системы пассивного акустического подавления. Разработка механизмов автономной стыковки и развертывания КА		2020–2025
	Создание легких конструкционных материалов и конструкций	Снижение массы КА	2025–2030
	Разработка технологий объединенной инерциальной системы накопления энергии и управления ориентацией КА, которая использует неэлектромеханическое накопление энергии. Повышение надежности маховиков инерциальной системы	Уменьшение массы аккумуляторных батарей. Замена отдельных элементов системы управления ориентацией КА	2025

Технологическая область	Содержание и цели работ	Ожидаемый результат	Планируемый год реализации
Энергообеспечение	Разработка микромаховиков. Разработка технологий многопереходных ФЭП, усовершенствованных тонкопленочных ФЭП, легких, гибких СБ на основе тонкопленочных элементов, и модулей радиационно-стойких ФЭП	Создание многопереходных ФЭП с КПД 35% и тонкопленочных элементов с КПД 12%	2025
	Разработка солнечных батарей с высоким КПД, аккумуляторных батарей (термоэлектронных генераторов и термоэлектрических преобразователей): – литиевые ионные/полимерные гибридные АБ; – материалы для СБ и их производство	Создание легких, недорогих, компактных солнечных батарей, обладающих высокой степенью живучести и увеличенным КПД. Создание легких никель-водородных (NiH ₂) и серно-натриевых (NaS) АБ, а также механических инерциальных систем накопления энергии для продления САС КА на 5–10 лет.	2025–2025
	Разработка и демонстрация технологий создания малогабаритных систем выработки энергии для КА, ее накопления и распределения	Создание легких, недорогих, компактных солнечных батарей, обладающих высокой степенью живучести и увеличенным КПД.	2025–2030

Технологическая область	Содержание и цели работ	Ожидаемый результат	Планируемый год реализации
	Работы в области систем распределения энергии направлены на разработку легких, высокоэффективных, унифицированных шин питания для использования в будущих космических системах	Создание легких никель-водородных (NiH ₂) и серно-натриевых (NaS) АБ, а также механических инерциальных систем накопления энергии для продления САС КА на 5–10 лет.	2020–2025
	Разработка технологий эффективных легких механических криогенных охладителей с длительным сроком эксплуатации и низким уровнем вибраций для применения в космических системах в диапазонах температур 10–150К.	Увеличение срока эксплуатации космических систем ИК наблюдения, а также увеличение рабочего интервала, срока эксплуатации и надежности ИК датчиков, работающих в длинноволновом диапазоне	2025–2030
Терморегулирование	Разработка многоступенчатого криогенного охладителя с радиационно-стойкой электронной аппаратурой управления	Увеличение срока эксплуатации космических систем ИК наблюдения, а также увеличение рабочего интервала, срока эксплуатации и надежности ИК датчиков, работающих в длинноволновом диапазоне	2025
	Разработка перспективных миниатюрных высокопроизводительных криогенных охладителей для космической техники: более эффективных накопителей криогенного водорода; перспективных регенеративных / фазорегулирующих материалов		
	Разработка новых принципов кодирования данных Объединение и стандартизация алгоритмов обработки данных	Увеличение производительности космических средств ДЗЗ	2020–2025

Технологическая область	Содержание и цели работ	Ожидаемый результат	Планируемый год реализации
Обработка и хранение данных	Увеличение производительности бортовых вычислительных систем (процессоров) и объема памяти ЗУ для своевременной (оперативной) доставки данных (энергонезависимые ОЗУ)	Увеличение производительности космических средств ДЗЗ Повышение надежности передачи данных	2025–2035
	Разработка высокопроизводительных процессоров обработки сигналов для гиперспектральных систем с малой потребляемой мощностью		
	Разработка перспективных высокочастотных/широкополосных приемопередающих устройств низкой стоимости		
Система передачи информации	Совершенствование методов шумоподавления для радиочастотных систем	Повышение надежности передачи данных	2025
	Разработка перспективных методов сжатия сигналов		
	Разработка перспективных технологий лазерной, оптической и микроволновой связи с космическими, воздушными и наземными объектами: развитие технологий информационных сетей и кодирования данных		

ПРИЛОЖЕНИЕ Б.
Экспертный анализ

Всего было опрошено 10 специалистов. Результаты первого этапа опроса экспертов представлены в таблице — матрице рангов, где для каждого параметра указывается место, занимаемое им в анкете специалиста. Первое место соответствует параметру, оказывающему наибольшее влияние на эффективность КА.

Таблица 2.1 — Информативность

№ п/п	Перечень характеристик космического аппарата ДЗЗ и внешних условий его функционирования	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Геометрические характеристики ОЭС	1	2	1	2	1	2	1	2	2	1
2	Спектральные/фотометрические характеристики ОЭС	2	1	3	1	2	1	3	1	1	3
3	Бортовое радиоэлектронное оборудование	4	3	2	3	4	3	2	3	3	2
4	Характеристики обеспечивающих подсистем КА	3	5	4	4	3	5	4	4	5	4
5	Внешние условия	5	4	5	5	5	4	5	5	4	5

Таблица 2.2 — Производительность

№ п/п	Перечень характеристик космического аппарата ДЗЗ и внешних условий его функционирования	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Геометрические характеристики ОЭС	1	2	1	1	2	1	1	1	2	1
2	Спектральные/фотометрические характеристики ОЭС	3	4	2	3	4	2	2	3	3	2
3	Бортовое радиоэлектронное оборудование	4	3	4	5	3	4	5	4	4	5
4	Характеристики обеспечивающих подсистем КА	5	5	5	4	5	5	3	5	5	4
5	Внешние условия	2	1	3	2	1	3	4	2	1	3

Таблица 2.3 — Оперативность

№ п/п	Перечень характеристик космического аппарата ДЗЗ и внешних условий его функционирования	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Геометрические характеристики ОЭС	4	5	5	4	5	5	5	4	5	5
2	Спектральные/фотометрические характеристики ОЭС	5	4	3	5	4	3	3	5	4	3
3	Бортовое радиоэлектронное оборудование	3	3	4	3	3	4	4	3	3	4
4	Характеристики обеспечивающих подсистем КА	2	1	2	1	2	2	1	2	1	2
5	Внешние условия	1	2	1	2	1	1	2	1	2	1

Информативность. Расчет коэффициента конкордации при 5 параметрах и 10 экспертах дает значение $W=0,78$. Расчетное значение критерия $\chi^2_{\text{расч}} = 31,2$. На

уровне значимости (вероятности) $\alpha = 0,01$ при 5 степенях свободы получаем, что табличное значение $\chi^2_{\text{табл}} = 15,1$. Поскольку $\chi^2_{\text{расч}} > \chi^2_{\text{табл}}$ принимается гипотеза о высокой степени согласованности мнений экспертов. Гистограмма результатов ранжирования представлена на рисунке 2.1.

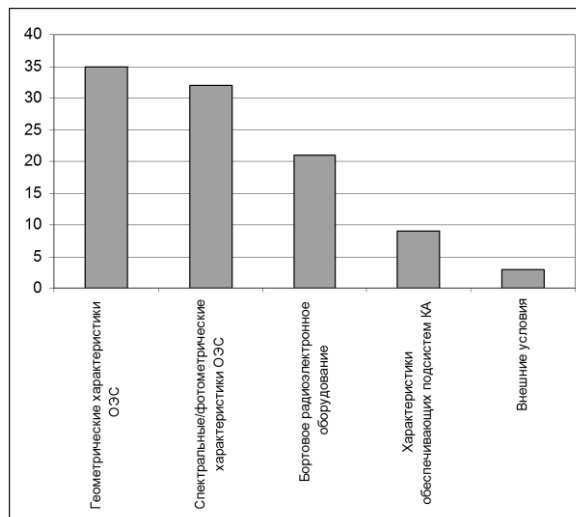


Рисунок 2.1 – Гистограмма результатов ранжирования групп характеристик по степени их влияния на информативность

К наиболее существенным группам параметров специалисты относят: геометрические и спектральные характеристики ОЭС, бортовое РЭО. На эти группы приходится 88% суммарных ранговых оценок. Группы характеристик обеспечивающих систем и внешних условий отнесены к менее значимым.

Производительность. Расчет коэффициента конкордации при 5 параметрах и 10 экспертах дает значение $W=0,73$. Расчетное значение критерия $\chi^2_{\text{расч}} = 29,4$. На уровне значимости $\alpha = 0,01$ при 5 степенях свободы получаем табличное значение $\chi^2_{\text{табл}} = 15,1$. Поскольку $\chi^2_{\text{расч}} > \chi^2_{\text{табл}}$ принимается гипотеза о высокой степени согласованности мнений экспертов. Гистограмма результатов ранжирования представлена на рисунке 2.2.

К наиболее существенным группам параметров специалисты относят: геометрические и спектральные характеристики ОЭС, а также внешние условия. На эти группы приходится 87% суммарных ранговых оценок. Группы характеристик БРЭО и обеспечивающих систем отнесены к менее значимым.

Оперативность. Расчет коэффициента конкордации при 5 параметрах и 10 экспертах дает значение $W=0,84$. Расчетное значение критерия $\chi^2_{\text{расч}} = 33,5$. На уровне значимости (вероятности) $\alpha = 0,01$ при 5 степенях свободы получаем, что

табличное значение $\chi^2_{\text{табл}} = 15,1$. Поскольку $\chi^2_{\text{расч}} > \chi^2_{\text{табл}}$ принимается гипотеза о высокой степени согласованности мнений экспертов.

Гистограмма результатов ранжирования, соответствующих данным таблицы, представлена на рисунке 2.3.

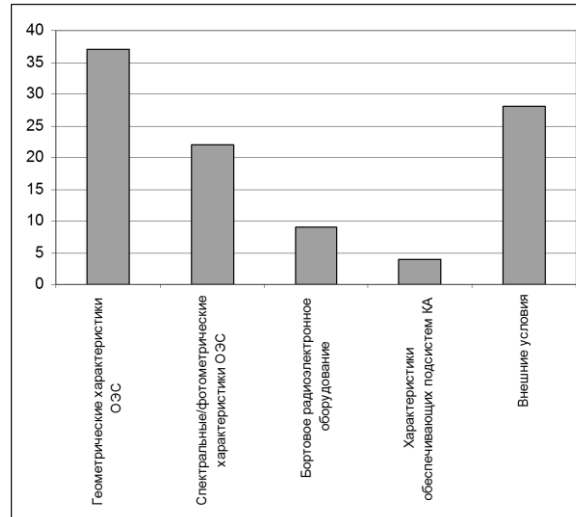


Рисунок 2.2 – Гистограмма результатов ранжирования групп характеристик по степени их влияния на производительность

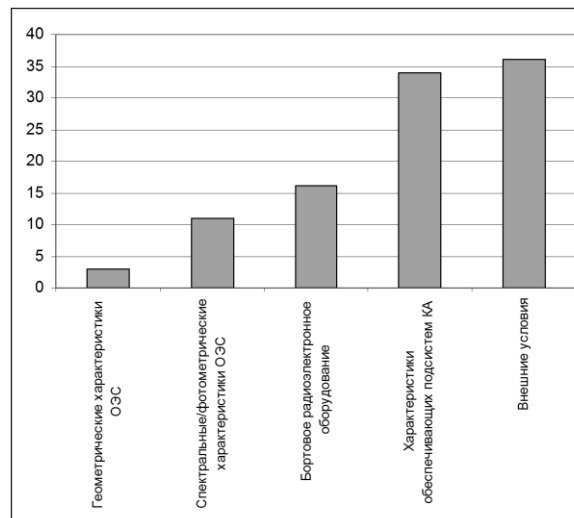


Рисунок 2.3 – Гистограмма результатов ранжирования групп характеристик по степени их влияния на оперативность

К наиболее существенным группам параметров, влияющим на эффективность функционирования КА ДЗЗ по показателю оперативности специалисты относят: внешние условия и характеристик обеспечивающих систем. На эти группы приходится 70%. Группы характеристик БРЭО и характеристик ОЭС отнесены к менее значимым. Итоговая гистограмма представлена на рисунке 2.4.

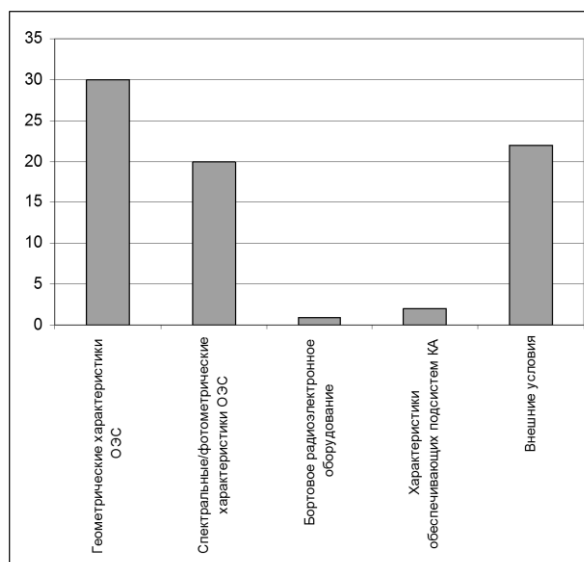


Рисунок 2.4 – Итоговая гистограмма результатов ранжирования

Таким образом, по мнению экспертов, наибольшее влияние на эффективность функционирование КА ДЗЗ оказывают три группы факторов: 1) геометрические характеристики ОЭС; 2) спектральные характеристики ОЭС; 3) внешние условия. На эти группы приходится около 95% суммарных ранговых оценок.

Определение наиболее значимых характеристик ОЭС проводилось в рамках второго этапа опроса экспертов. Результаты опроса представлены в таблицах 2.4, 2.5.

По мнению экспертов характеристики ОЭС не значительно сказываются на оперативности, этот показатель определяется внешними условиями функционирования КА. Соответственно, ограничимся оценкой влияния характеристик ОЭС на информативность и производительность.

Информативность. При оценке геометрических характеристик ОЭС расчет коэффициента конкордации при 7 параметрах и 10 экспертах дает значение $W=0,83$. Расчетное значение критерия $\chi^2_{\text{расч}} = 49,6$. На уровне значимости (вероятности) $\alpha = 0,01$ при 7 степенях свободы получаем, что табличное значение

$\chi^2_{\text{табл}} = 18,5$. Поскольку $\chi^2_{\text{расч}} > \chi^2_{\text{табл}}$ принимается гипотеза о высокой степени согласованности мнений экспертов.

Таблица 2.4 — Информативность

№ п/п	Перечень характеристик космического аппарата оптико-электронного наблюдения и внешних условий его функционирования										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Геометрические характеристики ОЭС											
1	Разрешающая способность ОЭС	1	3	2	1	3	2	2	1	3	2
2	Диаметр апертуры	3	1	3	3	1	3	3	3	1	3
3	Фокусное расстояние оптической системы	4	2	4	4	2	4	4	4	2	4
4	Угол поля зрения ОЭС	5	7	6	5	7	6	6	5	7	6
5	Формат ФПУ (количество строк, элементов в строке)	7	6	7	7	6	7	7	7	6	7
6	Размер элементов фотоприемного устройства (ФПУ)	6	5	5	6	5	5	5	6	5	5
7	Мгновенный угол поля зрения	2	4	1	2	4	1	1	2	4	1
Спектральные/фотометрические хар-ки ОЭС											
1	Спектральный диапазон съемки	4	3	1	4	3	1	3	1	4	3
2	Кол-во одновременно работающих спектр. каналов	1	2	2	1	2	2	2	2	1	2
3	Уровень дискретизации изображения	2	1	3	2	1	3	1	3	2	1
4	Динамический диапазон ОЭС	3	4	4	3	4	4	4	4	3	4
5	Спектральная чувствительность элементов ФПУ	5	6	5	5	6	5	6	5	5	6
6	Отношение с/ш	6	5	6	6	5	6	5	6	6	5

Таблица 2.5 — Производительность

№ п/п	Перечень характеристик космического аппарата оптико-электронного наблюдения и внешних условий его функционирования										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Геометрические характеристики ОЭС											
1	Разрешающая способность ОЭС	5	4	5	6	5	4	5	6	6	5
2	Диаметр апертуры	2	1	1	2	2	1	1	2	2	2
3	Фокусное расстояние оптической системы	3	3	2	3	3	3	2	3	3	3
4	Угол поля зрения ОЭС	1	2	3	1	1	2	3	1	1	1
5	Формат ФПУ (количество строк, элементов в строке)	4	5	4	5	4	5	4	5	5	4
6	Размер элементов фотоприемного устройства (ФПУ)	7	7	6	4	7	7	6	4	4	7
7	Мгновенный угол поля зрения	6	6	7	7	6	6	7	7	7	6
Спектральные/фотометрические хар-ки ОЭС											
1	Спектральный диапазон съемки	3	4	2	3	3	4	3	4	3	3
2	Кол-во одновременно работающих спектр. каналов	1	2	1	1	1	2	1	2	1	1
3	Уровень дискретизации изображения	2	1	3	2	2	1	2	1	2	2
4	Динамический диапазон ОЭС	4	3	6	4	4	3	5	6	4	6
5	Спектральная чувствительность элементов ФПУ	5	6	4	6	5	6	4	3	6	5
6	Отношение с/ш	6	5	5	5	6	5	6	5	5	4

При оценке спектральных характеристик ОЭС расчет коэффициента конкордации при 6 параметрах и 10 экспертах дает также значение $W=0,83$. Расчетное значение критерия $\chi^2_{\text{расч}} = 41,4$. На уровне значимости $\alpha = 0,01$ при 6 степенях свободы получаем, что табличное значение $\chi^2_{\text{табл}} = 16,8$. Поскольку $\chi^2_{\text{расч}} > \chi^2_{\text{табл}}$ принимается гипотеза о высокой степени согласованности мнений экспертов. Гистограммы результатов ранжирования, соответствующих данным таблицы, представлены на рисунке 2.5.

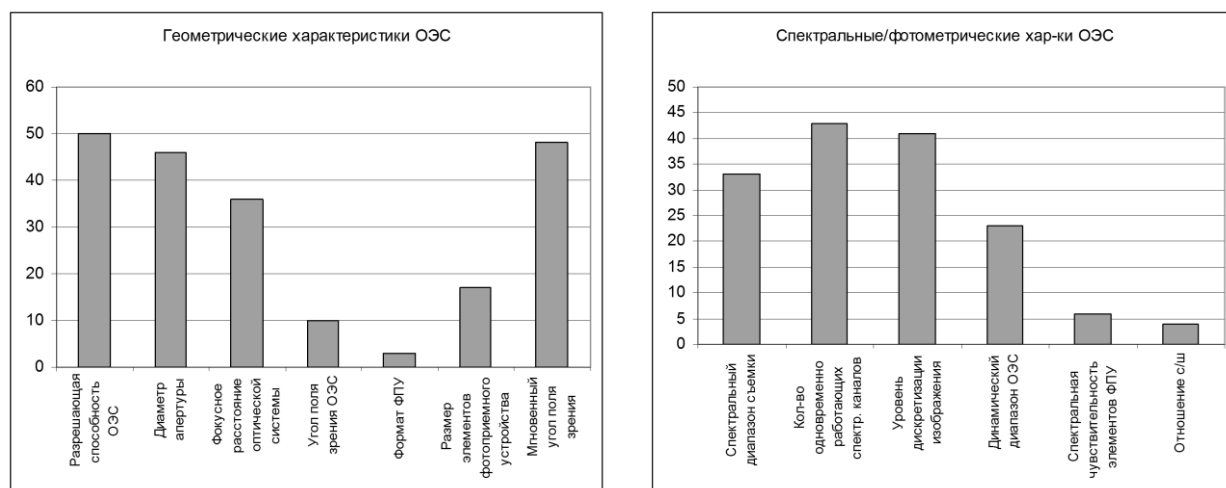


Рисунок 2.5 – Гистограмма результатов ранжирования характеристик ОЭС по степени их влияния на информативность

К наиболее существенным геометрическим характеристикам ОЭС, влияющим на эффективность функционирования КА ДЗЗ по критерию информативности, специалисты относят: разрешающую способность ОЭС, мгновенный угол поля зрения, диаметр апертуры и фокусное расстояние оптической системы. Доля этих характеристик составляет 86%.

К наиболее существенным спектральным характеристикам ОЭС, влияющим на информативность, специалисты относят: спектральный диапазон, количество спектральных каналов и уровень дискретизации изображения. Доля этих характеристик составляет 78%.

Производительность. При оценке геометрических характеристик ОЭС расчет коэффициента конкордации при 7 параметрах и 10 экспертах дает значение $W=0,87$. Расчетное значение критерия $\chi^2_{\text{расч}} = 52$. На уровне значимости (вероятности) $\alpha = 0,01$ при 7 степенях свободы получаем, что табличное значение

$\chi^2_{\text{табл}} = 18,5$. Поскольку $\chi^2_{\text{расч}} > \chi^2_{\text{табл}}$ принимается гипотеза о высокой степени согласованности мнений экспертов.

При оценке спектральных характеристик ОЭС расчет коэффициента конкордации при 6 параметрах и 10 экспертах дает также значение $W=0,8$. Расчетное значение критерия $\chi^2_{\text{расч}} = 39,9$. На уровне значимости (вероятности) $\alpha=0,01$ при 6 степенях свободы получаем, что табличное значение $\chi^2_{\text{табл}} = 16,8$. Поскольку $\chi^2_{\text{расч}} > \chi^2_{\text{табл}}$ принимается гипотеза о высокой степени согласованности мнений экспертов.

Гистограммы результатов ранжирования, соответствующих данным таблицы, представлены на рисунке 2.6.

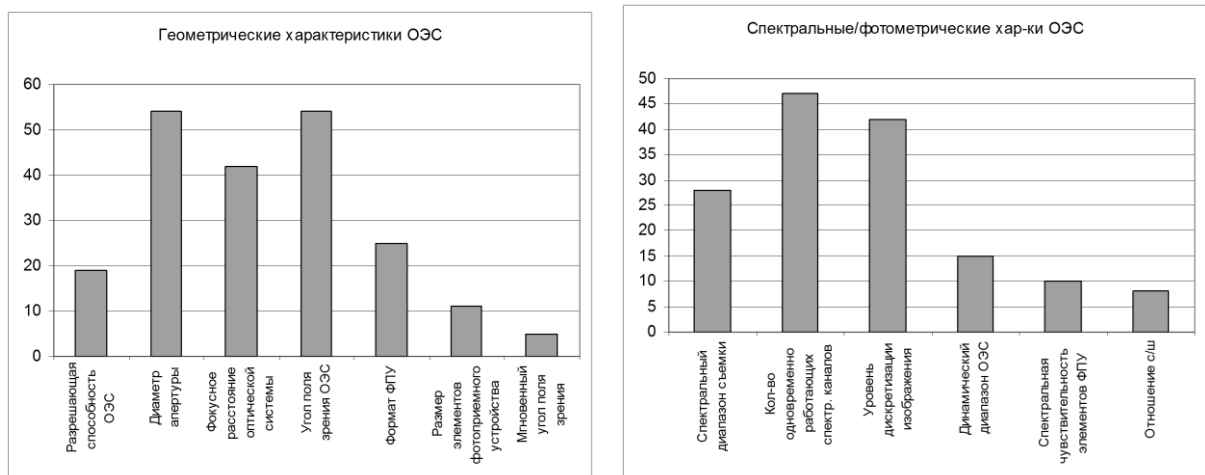


Рисунок 2.6 – Гистограмма результатов ранжирования характеристик ОЭС по степени их влияния на производительность

К наиболее существенным геометрическим характеристикам ОЭС, влияющим на эффективность функционирования КА ДЗЗ по критерию производительности, специалисты относят: диаметр апертуры, фокусное расстояние и угол поля зрения оптической системы. Доля этих характеристик составляет 71%.

К наиболее существенным спектральным характеристикам ОЭС, влияющим на производительность, специалисты относят: спектральный диапазон, количество спектральных каналов и уровень дискретизации изображения. Доля этих характеристик составляет 78%. Итоговые гистограммы представлены на рисунке 2.7.

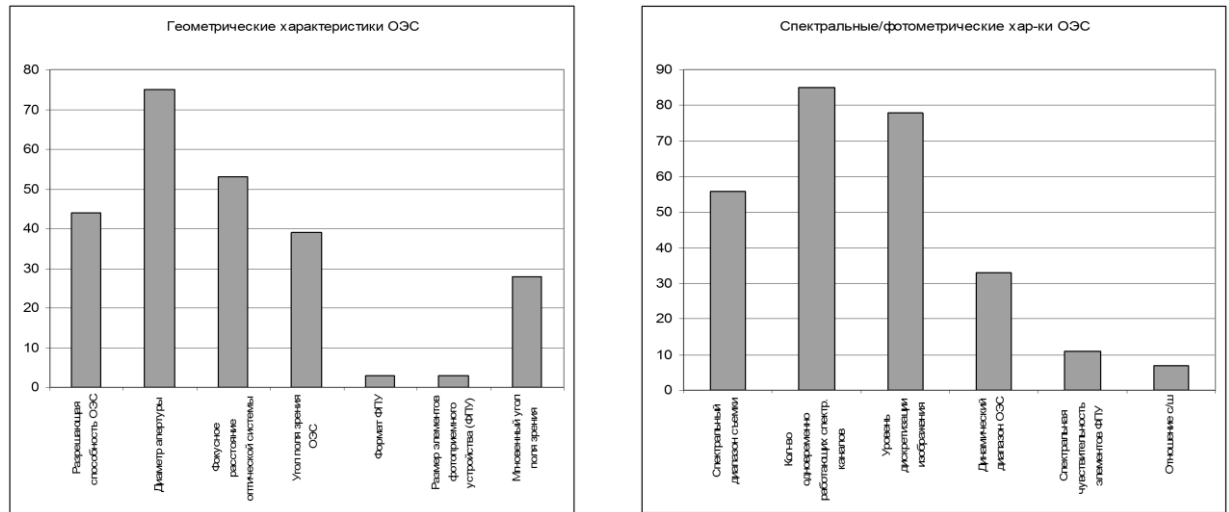
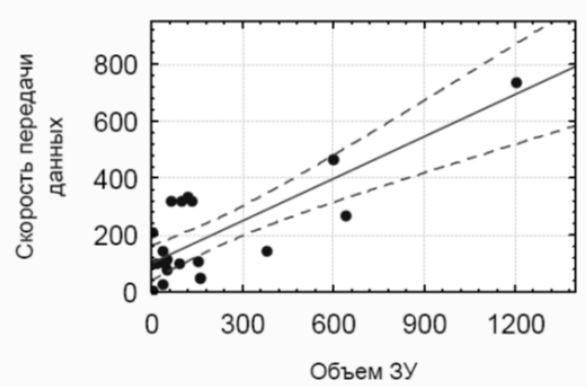
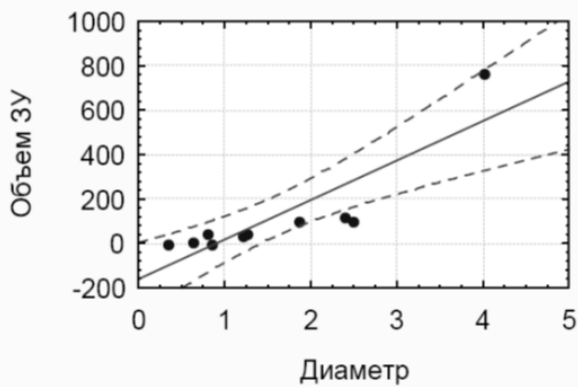
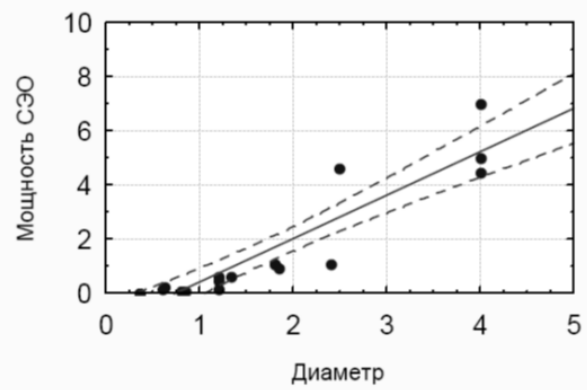
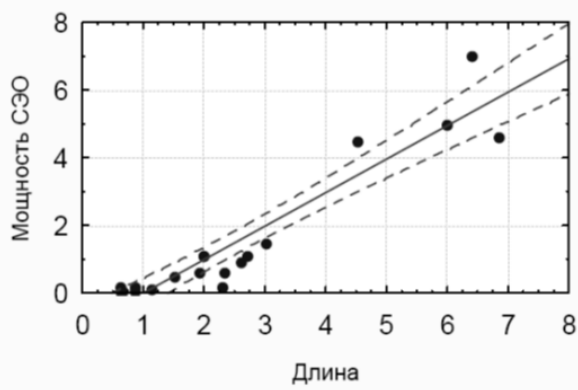
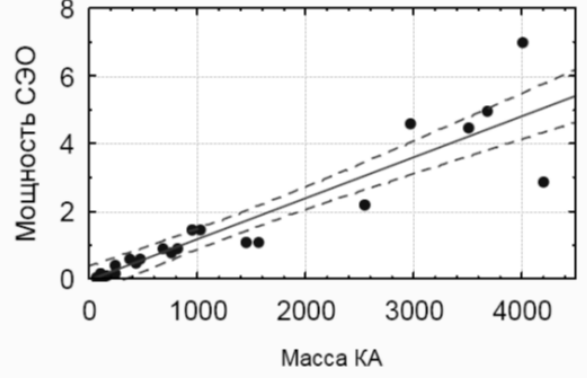
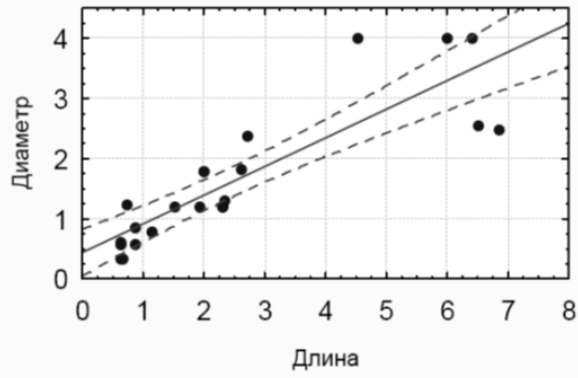
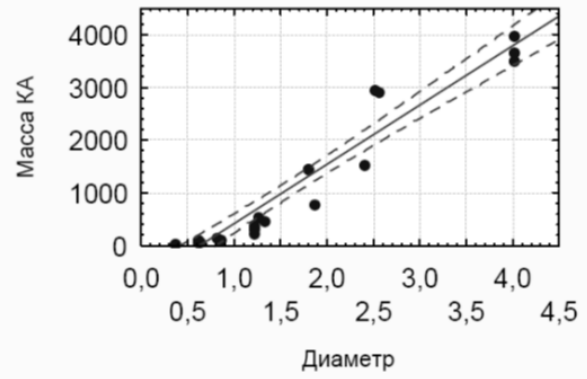
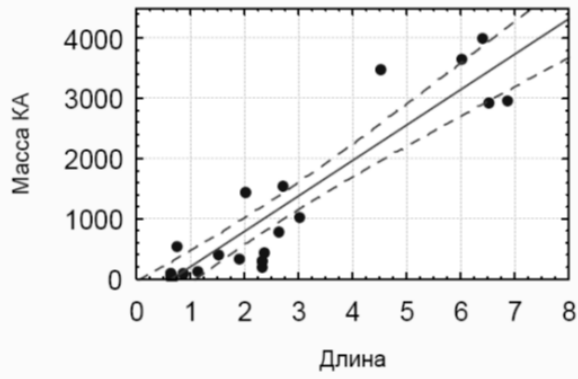


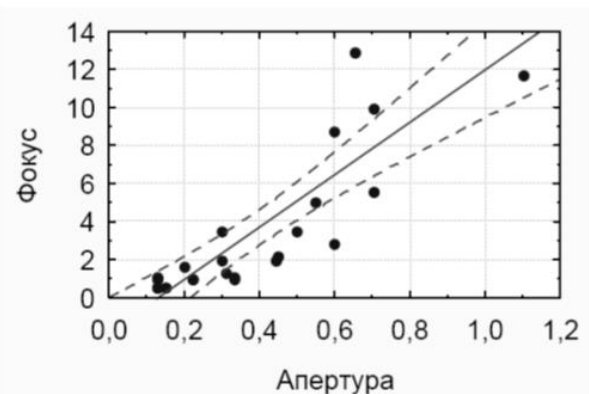
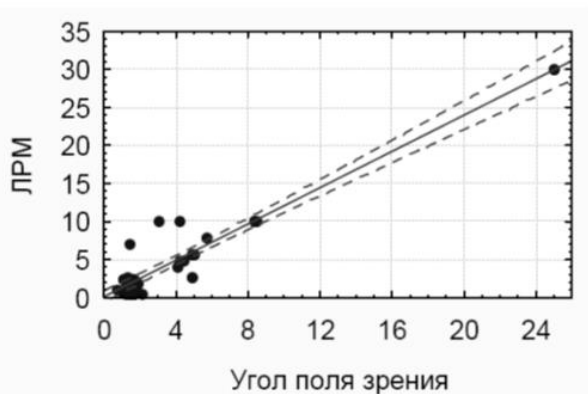
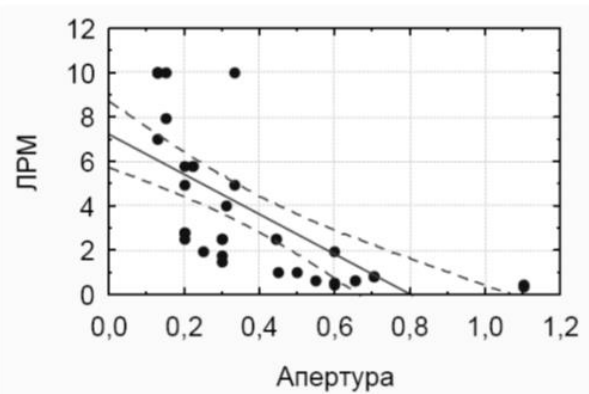
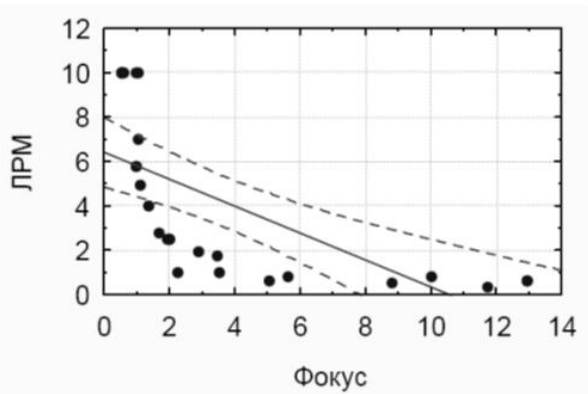
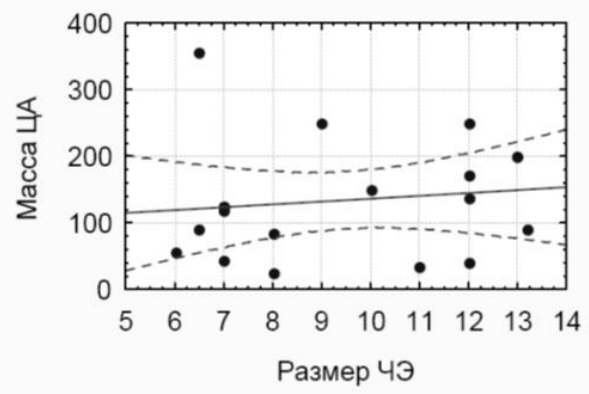
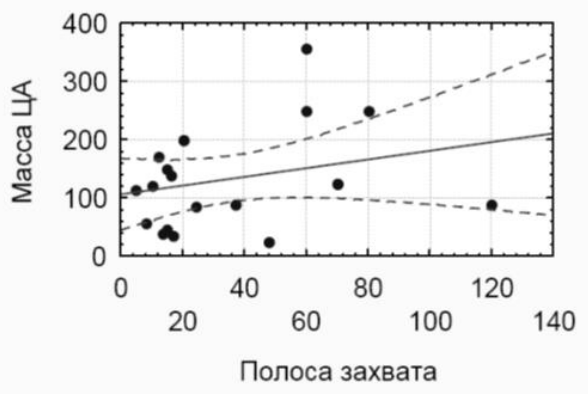
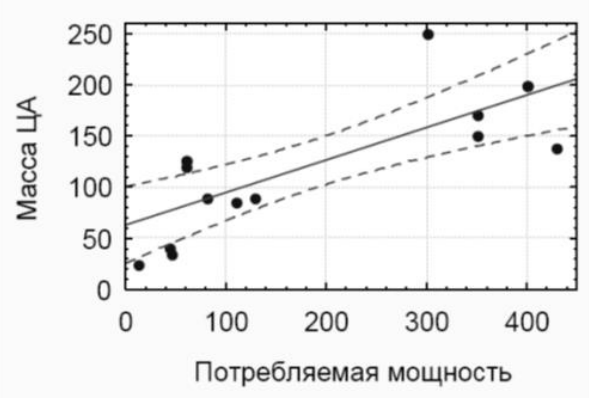
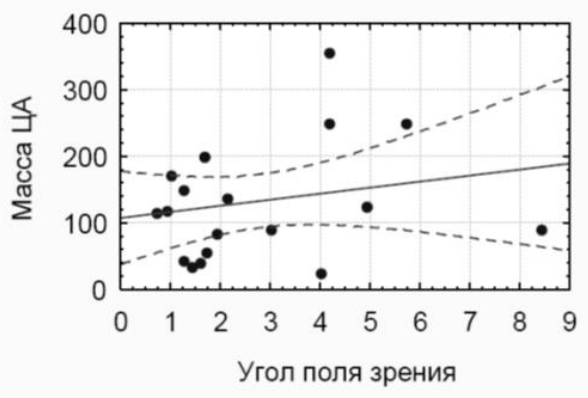
Рисунок 2.6 – Итоговая гистограмма результатов ранжирования характеристик ОЭС

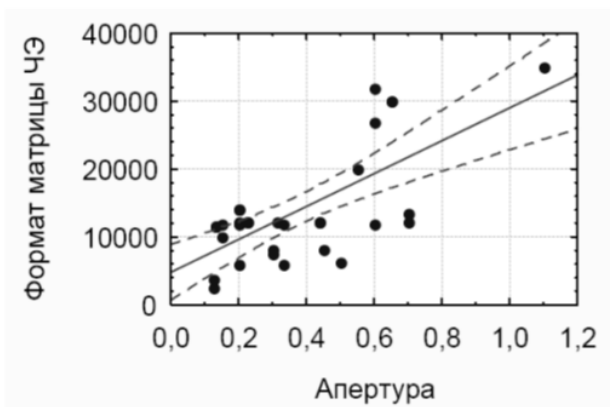
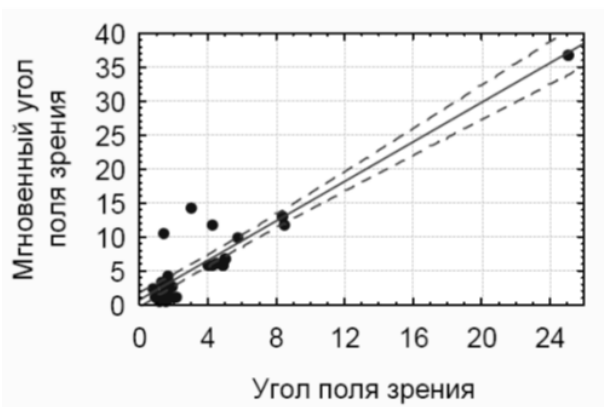
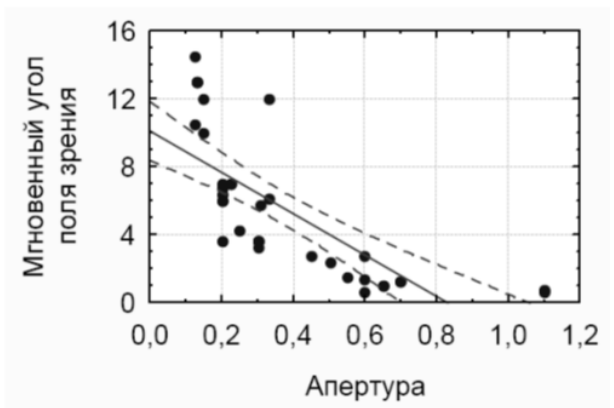
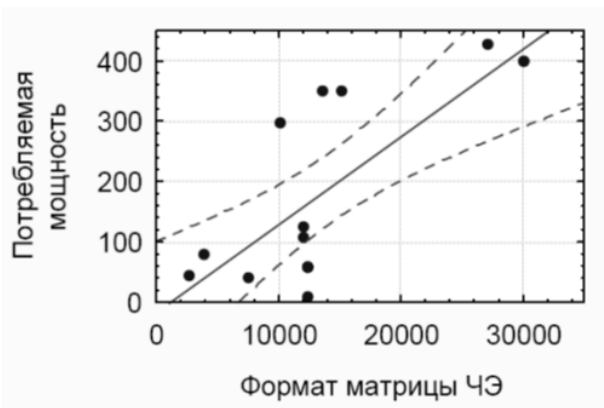
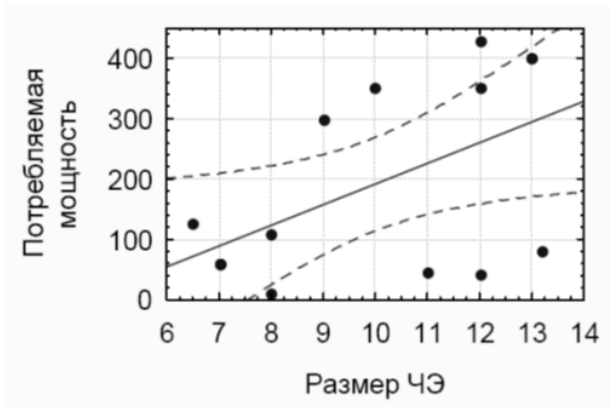
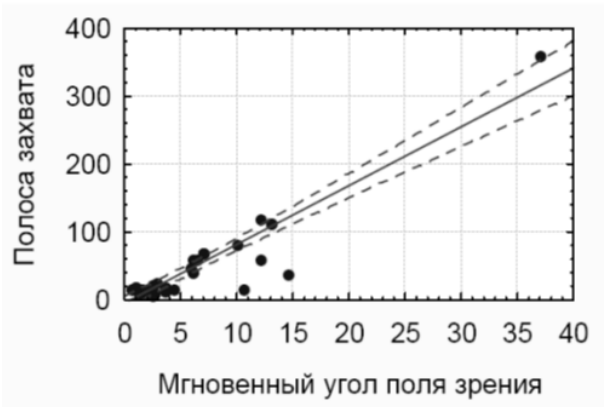
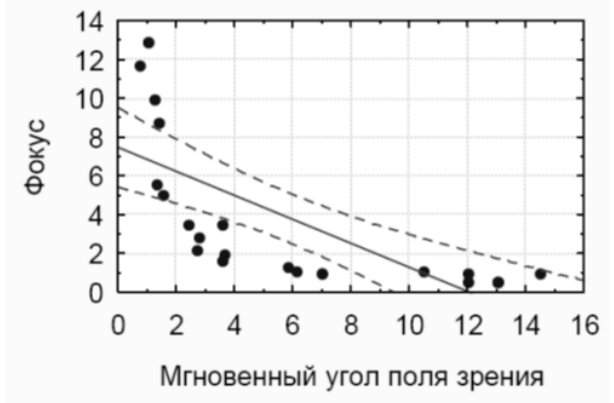
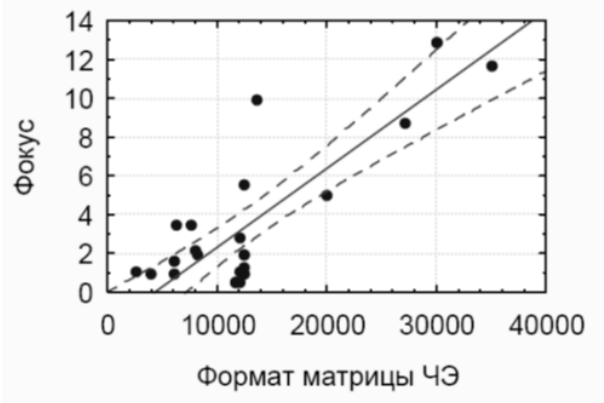
Таким образом, по мнению экспертов, наибольшее влияние на эффективность функционирования КА ДЗЗ оказывают следующие параметры:

1. Диаметр апертуры.
2. Фокусное расстояние оптической системы.
3. Разрешающая способность ОЭС.
4. Угол поля зрения оптической системы.
5. Мгновенный угол поля зрения.
6. Количество одновременно работающих спектральных каналов.
7. Уровень дискретизации изображений.
8. Спектральный диапазон съемки.
9. Динамический диапазон ОЭС.

ПРИЛОЖЕНИЕ В.
Графики разброса данных







ПРИЛОЖЕНИЕ Г.

Функциональные связи между основными параметрами КА ДЗЗ

$$M_{KA} = \frac{3694,6664}{1 + 41,73133 \cdot e^{-1,013578l}}, \quad S=351,0126138,$$

$$R=0,9575837.$$

$$M_{KA} = 4512 \cdot \exp(-e^{1,6230579-0,46110156 \cdot l}), \quad S=359,8253267,$$

$$R=0,9553768.$$

$$M_{KA} = 3608,8937 - 3454,8531 \cdot \exp(-0,017677784 \cdot l^{2,805431}), \quad S=360,5158403,$$

$$R=0,9569632.$$

$$M_{KA} = 169,48392 \cdot 0,72614127^l \cdot l^{2,7275508}, \quad S=364,3120473,$$

$$R=0,9542302.$$

$$M_{KA} = \frac{12138,83 + 4385,6281 \cdot l^{3,0354097}}{78,004722 + l^{3,0354097}}, \quad S=365,7074422,$$

$$R=0,9556858.$$

$$M_{KA} = 248,58783 \cdot l^{1,416796}, \quad S=370,7068412,$$

$$R=0,9506975.$$

$$M_{KA} = \frac{3755,2883}{1 + 141,82702 \cdot e^{-2,2092523d}}, \quad S=355,4875888,$$

$$R=0,9584153.$$

$$M_{KA} = 4126,7765 \cdot \exp(-e^{2,3384096-1,1576 \cdot d}), \quad S=365,2202148,$$

$$R=0,9560541.$$

$$M_{KA} = \frac{3683,571 + 4061,2647 \cdot l^{4,3050206}}{38,416367 + l^{4,3050206}}, \quad S=367,7892926,$$

$$R=0,9573182.$$

$$M_{KA} = e^{\frac{11,829883 - 7,2059776}{d} - 1,3039125 \cdot \ln d}, \quad S=370,8229452,$$

$$R=0,9546632.$$

$$M_{KA} = 10153,087 \cdot e^{-3,8674065/d}, \quad S=377,4659397,$$

$$R=0,9509745.$$

$$d = \frac{4,1308725}{1 + 9,6738406 \cdot e^{-0,83648339 \cdot l}}, \quad S=0,3231909,$$

$$R=0,9671509.$$

$$d = 7,5316275(1 - e^{-0,11716609 \cdot l}), \quad S=0,3377719,$$

$$R=0,9625982.$$

$$d = \frac{10,2154 + 4,7240559 \cdot l^{2,3724884}}{18,386142 + l^{2,3724884}}, \quad S=0,3379606,$$

$$R=0,9654875.$$

$$d = \frac{13,101783 \cdot l}{14,674911 + l}, \quad S=0,3387298,$$

$$R=0,9623816.$$

$$d = 0,0067377669 + 0,8612763 \cdot l - 0,038027417 \cdot l^2, \quad S=0,3419796,$$

$$R=0,9631454.$$

$$V = 24,403355 \cdot N_{3Y}^{0,45787189}, \quad S=84,2896705,$$

$$R=0,9020308.$$

$$V = 24,36(N_{3Y} + 0,10469)^{0,45812449}, \quad S=86,3686445,$$

$$R=0,9020369.$$

$$V = 24,378141 \cdot 1,0256^{1/N_{3Y}} \cdot N_{3Y}^{0,45801994}, \quad S=86,3693178,$$

$$R=0,9020353.$$

$$V = 7331,1581 - 7303,6359 \cdot \exp(-0,00229278 N_{3Y}^{0,5107}), \quad S=88,5055836,$$

$$R=0,9022856.$$

$$M_{\text{UA}} = \frac{22587,5658 + 213,0147 f^{3,169863}}{427,72974 + f^{3,169863}}, \quad S=25,3104806,$$

$$R=0,9303895.$$

$$M_{\text{UA}} = 36,255673 + 13,083517 f^f, \quad S=25,5340233,$$

$$R=0,9156283.$$

$$M_{\text{UA}} = 204,08565 - 152,55965 \cdot \exp(-0,00817275 f^{2,3231847}), \quad S=25,7908291,$$

$$R=0,9276183.$$

$$M_{\text{UA}} = \frac{247,96757}{1 + 5,0633 \cdot e^{-0,2426681 f}}, \quad S=25,7915499,$$

$$R=0,9207515.$$

$$M_{\mu A} = 213,8297 \cdot \exp\left(\frac{-(15,736461 - f)^2}{149,38}\right), \quad S=25,8596348,$$

$$R=0,9203144.$$

$$M_{\mu A} = \frac{219,3344}{1 + (\exp(3,52 - 0,39366f))^{1/2,1584}}, \quad S=26,8441991,$$

$$R=0,9213283.$$

$$f = 22,5473 \cdot 0,552495^{D_{an}} D_{an}^{1,8336}, \quad S=1,3458948,$$

$$R=0,9637975.$$

$$f = \frac{0,8317 + 36,0183 D_{an}^{1,9718}}{1,923 + D_{an}^{1,9718}}, \quad S=1,3509480,$$

$$R=0,9642940.$$

$$f = 18,1689 \cdot 0,657115^{1/D_{an}} D_{an}^{0,6718}, \quad S=1,3983219,$$

$$R=0,9608636.$$

$$f = 21,7234 \cdot \exp(-e^{1,4887-2,095D_{an}}), \quad S=1,3489417,$$

$$R=0,9363858.$$

$$f = 18,7728 \cdot 0,665585^{D_{an}} D_{an}^{1,7109}, \quad S=1,3591193,$$

$$R=0,9353890.$$

$$f = 18,1977 - 17,6244 \cdot e^{-1,1512 \cdot D_{an}^{2,1621}}, \quad S=1,3634395,$$

$$R=0,9363941.$$

$$\beta = \frac{184,651 + 10,707106 \cdot \gamma^{2,4013399}}{163,51211 + \gamma^{2,4013399}}, \quad S=0,4220353,$$

$$R=0,9825299.$$

$$\beta = 9,1882332 - 8,1310595 \cdot \exp(-0,012755623\gamma^2), \quad S=0,4316892,$$

$$R=0,9817140.$$

$$\beta = \frac{9,1488184}{1 + 10,174783 \cdot e^{-0,3487979\gamma}}, \quad S=0,4390631,$$

$$R=0,9803428.$$

$$\beta = 11,936541 \cdot \exp(-e^{1,0436367-0,16156322\gamma}), \quad S=0,4432397,$$

$$R=0,9799632.$$

$$\beta = \frac{0,69676154 + 0,30643642\gamma}{1 - 0,08576\gamma + 0,004\gamma^2}, \quad S=0,4611413,$$

$$R=0,9791062.$$

$$\beta = \frac{11,23 \cdot 10^7 - 35,369 \cdot 10^7 f^{-1,3928}}{-11,429 \cdot 10^7 + f^{-1,3928}}, \quad S=0,9007609,$$

$$R=0,9860978.$$

$$\beta = 141,444 - 140,41 \cdot \exp(-0,02172 f^{-1,463}), \quad S=0,9042704,$$

$$R=0,9859885.$$

$$\beta = 3,342 \cdot 1,28139^{1/f} \cdot f^{-0,63717}, \quad S=0,9165075,$$

$$R=0,9852413.$$

$$\beta = \exp\left(1,2065693 + \frac{0,24795}{f} - 0,637176 \ln f\right), \quad S=0,9165075,$$

$$R=0,9852413.$$

$$\gamma = \frac{1,575288}{D_{an}^{0,960663} f^{0,309795}}, \quad R^2 = 0,977.$$

$$\delta = \frac{3,021853 f^{0,471149}}{D_{an}^{0,574299}}, \quad R=0,9.$$

$$v_{norm} = 0,4191 \gamma^{-0,3451}, \quad R^2 = 0,8815.$$

$$M_{\text{ЦА}} = \frac{1}{0,00288748 + 0,002768 \cdot \gamma^{1,276198}}, \quad S=19,6361332,$$

$$R=0,9626698.$$

$$M_{\text{ЦА}} = \frac{1}{0,002043 + 0,0036442\gamma + 7,5779 \cdot 10^{-5} \gamma^2}, \quad S=20,2291774,$$

$$R=0,9603336.$$

$$M_{\text{ЦА}} = 167,9573 \gamma^{-0,75211}, \quad S=21,3680346,$$

$$R=0,9518449.$$

$$M_{\text{ЦА}} = 20,7575 + \frac{144,2357}{\gamma}, \quad S=23,8140443,$$

$$R=0,9398185.$$

$$\gamma = \frac{1}{3,258549 - 0,53261755 \cdot \ln(v_{np}^0)}, \quad S=1,0892270,$$

$$R=0,9550847.$$

$$\gamma = \frac{1}{9,78 - 6,987459 \cdot (v_{np}^0)^{0,054977}}, \quad S=1,1042285,$$

$$R=0,9551596.$$

$$\gamma = \frac{1}{-0,0017688 \cdot v_{np}^0 + 0,768816}, \quad S=1,1523416,$$

$$R=0,9495870.$$

$$\gamma = 0,34088189 \cdot 1,009082^{v_{np}^0}, \quad S=1,2820783,$$

$$R=0,9371974.$$

$$R_0 = \frac{9,6270966 \cdot 10^{-4} H}{D_{an}^{1,0662521}}, \quad R^2 = 0,95.$$

$$R_0 = \exp(-3,100039 - 1,0648789 \ln D_{an} + 0,10466158 H^{0,5}), \quad R^2 = 0,97.$$

$$M_{KA} = 1132,293 \cdot f^{0,15062} D_{an}^{1,464241}, \quad R=0,94.$$