

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

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2021

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

Научный руководитель к.т.н., доцент
Ламзин Владимир Алексеевич

Официальные оппоненты: Мятлов Геннадий Николаевич,
д.т.н., доцент,
Акционерное общество «Ракетно-космический
центр «Прогресс», заместитель главного
конструктора

Волоцув Владимир Валериевич,
к.т.н., доцент,
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования «Самарский национальный
исследовательский университет им. С.П.
Королева», доцент кафедры «Космического
машиностроения»

Ведущая организация Акционерное общество «Центральный научно-
исследовательский институт
машиностроения», г. Королев

Защита диссертации состоится 28 декабря 2021 года в 15 часов на заседании диссертационного совета Д212.125.10, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», Волоколамское ш., д. 4, г. Москва, А-80, ГСП-3, 125993

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», <https://mai.ru/events/defence>

Автореферат разослан «__» _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к.т.н., доцент



Денискина Антонина Робертовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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), 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. 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.

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 исследования 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 исследования 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 КА 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.

Структура и объем работы.

Диссертация изложена на 160 страницах и состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и приложений. Список литературы содержит 84 наименований. Работа иллюстрирована 39 рисунками и содержит 15 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, научная новизна и практическая значимость полученных результатов. Определены цель, задачи, объект и предмет исследования, степень разработанности темы. Сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В главе 1 – «Состояние и направление развития космических аппаратов дистанционного зондирования Земли» – проанализированы задачи, возлагаемые на космические системы ДЗЗ, и предъявляемые к ней требования, особенности научных концепций зарубежных стран. Выполнен обзор существующих и перспективных космических систем ДЗЗ. Проведен анализ НИОКР в области развития оптико-электронных систем и осуществлен синтез технического облика КА. Дана классификация. Приведена постановка задачи исследования.

Анализ основных направлений развития космических систем ДЗЗ указывает на то, что к 2025 г. количество малых КА ДЗЗ более чем в пять раз превысит численность традиционных спутников.

На данный момент технологический прогресс позволяет производить малые КА ДЗЗ массой до 700 кг с высокими показателями линейного разрешения (0,5 м) и качества снимков. Нужно отметить что данные КА имеют примитивную логику работы бортовых систем и по своим функциональным возможностям не в полной мере удовлетворяют предъявляемые к ним требованиям по производительности. Повышение этих показателей для малых КА, возможно, достичь путем количественного наращивания орбитальной группировки. В перспективе при проектировании картографических КА планируется достичь таких же показателей качественным путем, а именно увеличении полосы захвата (до 60 км) за счет применения современных технологий при разработке оптической аппаратуры. Подтверждением могут являться успешный запуск китайского картографического

КА «Gaofen-14». В итоге одну и ту же площадь могут покрыть либо 8 малых КА, либо 1 картографический КА.

Основным требованием к КА ДЗЗ нового поколения является снижение стоимостных и массогабаритных параметров КА при сохранении высоких целевых показателей. Для реализации требований проводятся НИОКР, направленные на создание новых материалов для платформы КА и целевой аппаратуры, сверхлегких зеркал, исследуются новые оптические схемы, позволяющие уменьшить габариты оптико-электронной системы (ОЭС) и КА в целом, широко применяются передовые достижения в области микроэлектроники и элементной базы.

При анализе НИОКР в области космических систем ДЗЗ особое внимание было уделено программам, проводимым в США, которые являются передовым государством в области развития технологий космических средств ДЗЗ. Проведен анализ уровня финансирования НИОКР

Перспективные системы должны обеспечивать получение изображений с линейным разрешением на местности (ЛРМ) не хуже существующего уровня. Анализ основных направлений развития отечественных космических аппаратов 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 за счет не оптимального применения ОГ. Решить это возможно разделив ресурс ОГ по функциональному признаку на несколько типов КА ДЗЗ.

Проведена классификация по признаку особенностей применения космических аппаратов и выявлены основные требования, предъявляемые к перспективным КА ДЗЗ представлены в табл. 1.

В заключительной части первой главы обоснована необходимость разработки специального научно-методического аппарата, предназначенного для оценки реализуемости предъявляемых к перспективным КА требований, необходимости и возможности реализации результатов НИОКР, а также формировании технического облика перспективных КА ДЗЗ в целом.

Таблица 1 — Требования к характеристикам перспективных КА ДЗЗ

Характеристика	КА сверхвысокого разрешения	Малые КА высокого разрешения	Картографические КА
Год развертывания	2020–2030	2020–2030	2020–2030
Масса КА, кг	до 7000	300–800	до 4000
Количество КА в системе	3–4	12–24	3–5
Срок активного существования, лет	10–12	1–5	10–12
Линейное разрешение на местности, м – панхроматический – многоспектральный	0,2–0,5; лучше 0,8	Не хуже 1,0; не хуже 3,0	1–2,5; 2–6
Стоимость образца, млн дол.	100–150	20–30	60–70

В главе 2 – «Комплексная методика формирования технического облика перспективных космических аппаратов дистанционного зондирования Земли» – разработан и обоснован научно-методический аппарат формирования технического облика КА ДЗЗ, разработаны частные методы.

Рассмотрим математическую постановку задачи формирования ТО КА ДЗЗ.

Дано:

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

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

Y — характеристики КА ДЗЗ;

Z — варианты технического облика КА ДЗЗ;

T — различные моменты времени формирования ТО КА ДЗЗ.

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

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

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

$$\varphi: Y \rightarrow Y^*, \quad (1)$$

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.

2. Найти оператор ξ , реализующий отображение

$$\xi: X \times Y^* \times N \rightarrow z^*. \quad (2)$$

Комплексный метод прогнозирования ТО КА ДЗЗ обеспечивает проведение взаимосвязанных аналитических исследований и математических расчетов и включает следующие 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).

Для решения задачи выявления информативного набора характеристик КА ДЗЗ использованы информационно-аналитическое моделирование, экспертные оценки, методы корреляционного и факторного анализов. При решении задачи оценки основных характеристик КА использованы методы регрессионного анализа.

С целью получения оценки ряда характеристик КА и его потенциальных функциональных возможностей разработана информационно-аналитическая модель КА ДЗЗ и процесса его функционирования. Разработаны модели основных

показателей эффективности функционирования КА – информативности, производительности и оперативности. Введены комплексные показатели эффективности.

В качестве обобщенного показателя **информативности** предложено использовать информационный поток P – количество информации, принимаемой или запоминаемой в единицу времени, который определяется суммарным числом спектральных каналов N_s , геометрическим разрешением R_0 , полосой захвата $L_{захв}$ и числом уровней квантования сигнала, обеспечивающим заданную радиометрическую точность n_r :

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

где $\mu = 3,986 \cdot 10^5 \text{ км}^3/\text{с}^2$; R_3 – радиус Земли; H – высота орбиты КА.

Введен показатель удельной информационной емкости изображения η , который равен объему информации, приходящейся на 1 км^2 изображения:

$$\eta = \left(\frac{1000}{R_0} \right)^2 n_r N_s. \quad (4)$$

Для оценки **потенциальной производительности** КА используется комплексный показатель

$$Q = \eta T(T_{a.c}) \langle S \rangle L_{захв}, \quad (5)$$

где η — интенсивность потока районов наблюдения;

$\langle S \rangle$ — длина района съемки;

$T(T_{a.c})$ — функция времени активного существования КА (учитывает промежутки времени полета КА над территориями, где аппаратура не включается).

Оперативность КА $\tau_{оп}$ определяется как интервал времени от момента закладки рабочей программы на борт КА до момента поступления результатов съемки на наземный пункт приема информации (ППИ) по каналам связи:

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

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

Анализ составляющих показателя оперативности показал, что существенная его часть зависит не столько от характеристик КА и бортовой аппаратуры, сколько от параметров внешних условий функционирования — орбитальных параметров, взаимного расположения объекта наблюдения, КА и ППИ. Непосредственно от характеристик КА зависит время $\tau_{ап}$, которое определяется как

$$\tau_{ап} = \frac{10 \delta H (R_3 + H)^{3/2}}{f \sqrt{\mu} R_3}, \quad (7)$$

где δ — размер чувствительного элемента приемника изображения; f — фокусное расстояние оптической системы.

Метод формирования информативного набора параметров, характеризующих технический облик КА ДЗЗ, основан на совместном использовании аналитических и статистических подходов, что обусловлено необходимостью комплексного учета разнородных факторов методического и статистического характера.

Выделены и рассмотрены два общих подхода к решению проблемы сокращения количества исходных переменных:

- отсеивание менее существенных факторов;

– замена исходного набора переменных меньшим числом эквивалентных факторов, полученных в результате преобразований исходного набора.

Общая схема реализации метода представлена на рисунке 1.

С целью реализации метода автором разработаны частные методы, соответствующие различным подходам к решению задачи снижения размерности исследуемого пространства характеристик:

1. Метод выявления характеристик космического аппарата ДЗЗ, оказывающих наибольшее влияние на эффективность его функционирования.

2. Метод снижения размерности пространства исследуемых параметров на основе применения статистических методов.

Для анализа характеристик КА и решения задачи выявления наиболее значимых из них предложен качественный подход на основе результатов экспертного опроса, 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, в ходе которой вычисляется коэффициент конкордации W , показывающий степень согласованности мнений экспертов по важности каждого из оцениваемых параметров. Уровень значимости коэффициента W определяется по критерию χ^2 .

При окончательной обработке результатов опроса n экспертов ранговая оценка ω_j для j – ой характеристики определяется из выражения

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

где S_j — сумма рангов, назначенная экспертами характеристике j ($j = 1, \dots, m$; m – число анализируемых характеристик).

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

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

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

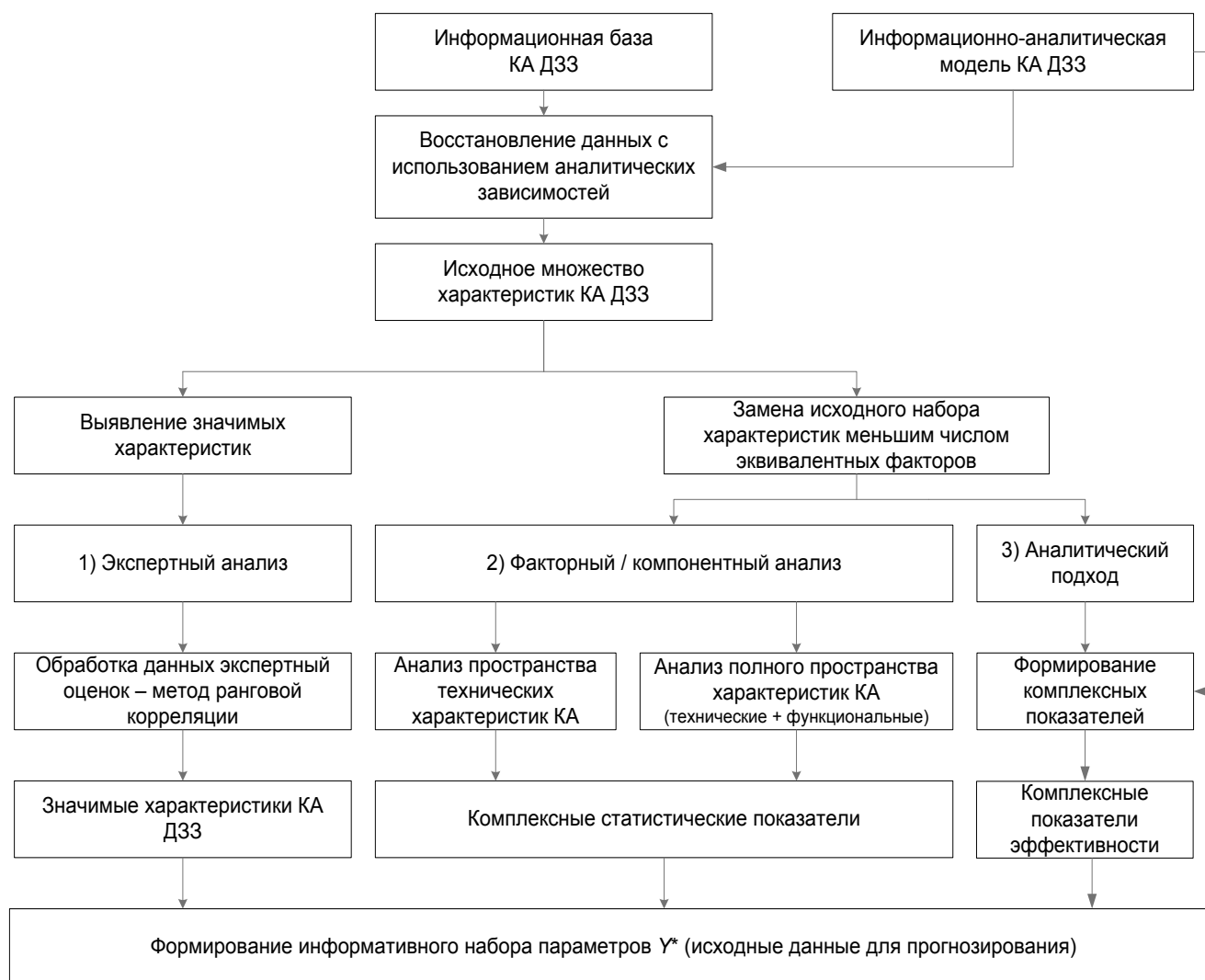


Рисунок 1 — Схема реализации метода формирования информативного набора параметров

Наличие ретроспективной информации об объектах исследования (КА ДЗЗ), их характеристиках, позволяет использовать количественные методы выявления значимых характеристик на основе статистической обработки имеющихся данных. Для этого предлагается 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 внутренних характеристик объекта; при этом

предполагается, что наиболее емкие характеристики (или факторы) окажутся одновременно и наиболее существенными, определяющими. В основе метода лежат предположения о допущении линейности связи исходных признаков с факторами, при этом число факторов (главных компонент) F равно числу исходных признаков X .

Задачу факторного анализа можно сформулировать следующим образом: определить минимальное число k таких факторов F_1, F_2, \dots, F_k , после учета которых все остаточные корреляции между исходными признаками должны стать незначимыми.

После определения факторных нагрузок, с целью получения интерпретируемых результатов, применяется ортогональное преобразование с использованием варимакс-критерия, который состоит в требовании максимизации сумм дисперсии квадратов соответствующих факторных нагрузок.

Выделение главных факторов в компонентной модели происходит по максимуму падающей на них дисперсии выборки, оставшиеся незначимые компоненты исключаются из рассмотрения.

Метод оценки основных параметров перспективных КА ДЗЗ основан на применении методов регрессионного анализа и включает два параллельных направления реализации: анализ временных трендов и анализ функциональных связей между основными характеристиками КА, которые реализуются на базе общего подхода.

Алгоритм построения регрессионной модели включает следующие этапы:

1. Выбор системы факторов X_i , влияющих на показатель Y , на основе содержательного анализа задачи (в случае построения временных трендов независимой переменной является временной параметр).
2. Сбор статистических данных.
3. Выбор и построение регрессионной модели.
4. Оценка качества модели.
5. Прогнозирование значений показателя Y .

Для обеспечения качества модели необходимо выполнение условия $n > 3k$, где n – количество наблюдений (количество объектов, КА), k – количество факторов (характеристик).

Схема реализации метода представлена на рисунке 2.

Модель множественной регрессии оценивается с помощью коэффициента детерминации R^2 и стандартной ошибки S . При $R^2 > 0,8$ модель считается точной. Оценка значимости модели осуществляется по F -критерию Фишера.

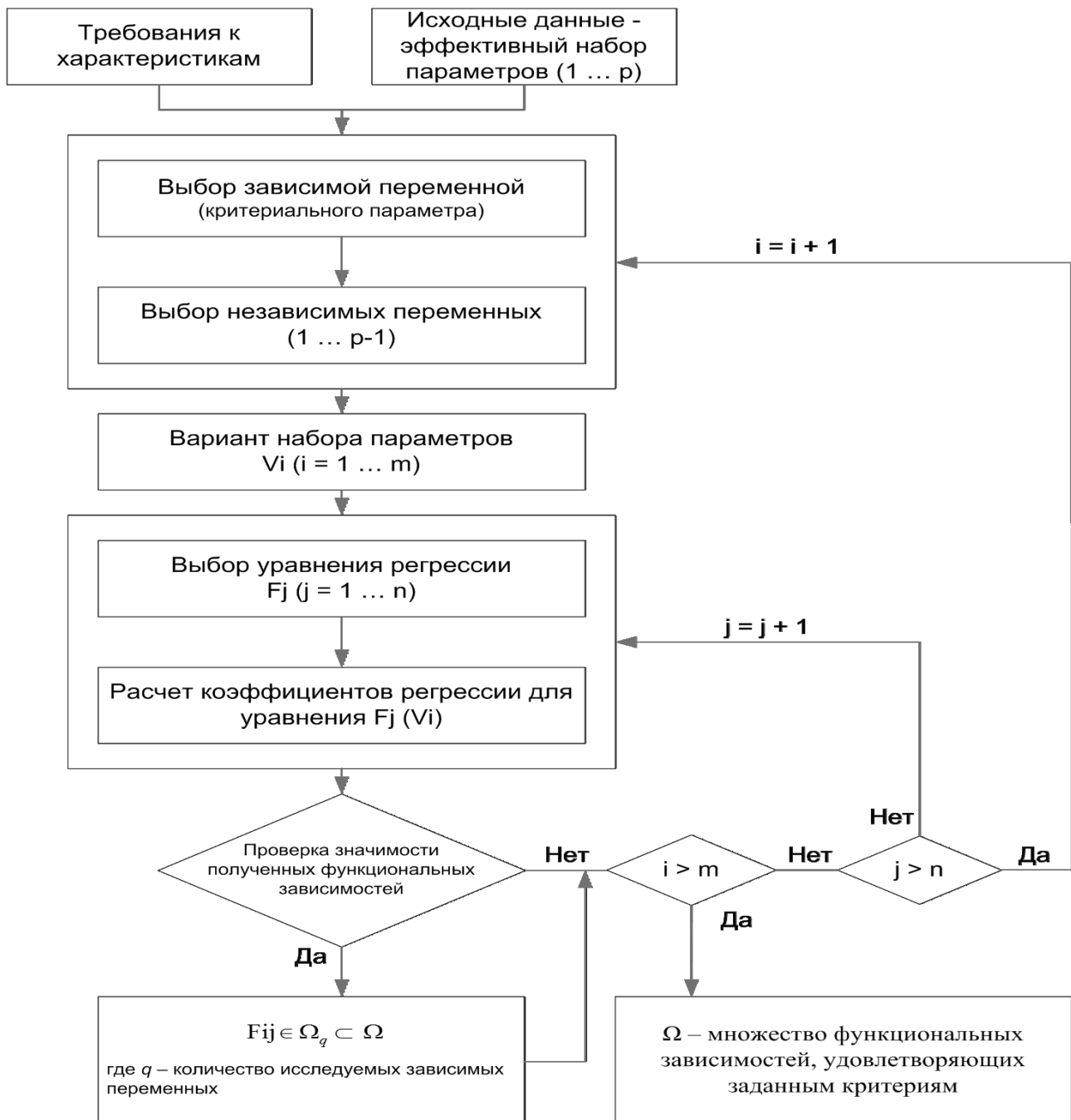


Рисунок 2 – Общая схема реализации метода выявления функциональных связей между параметрами КА

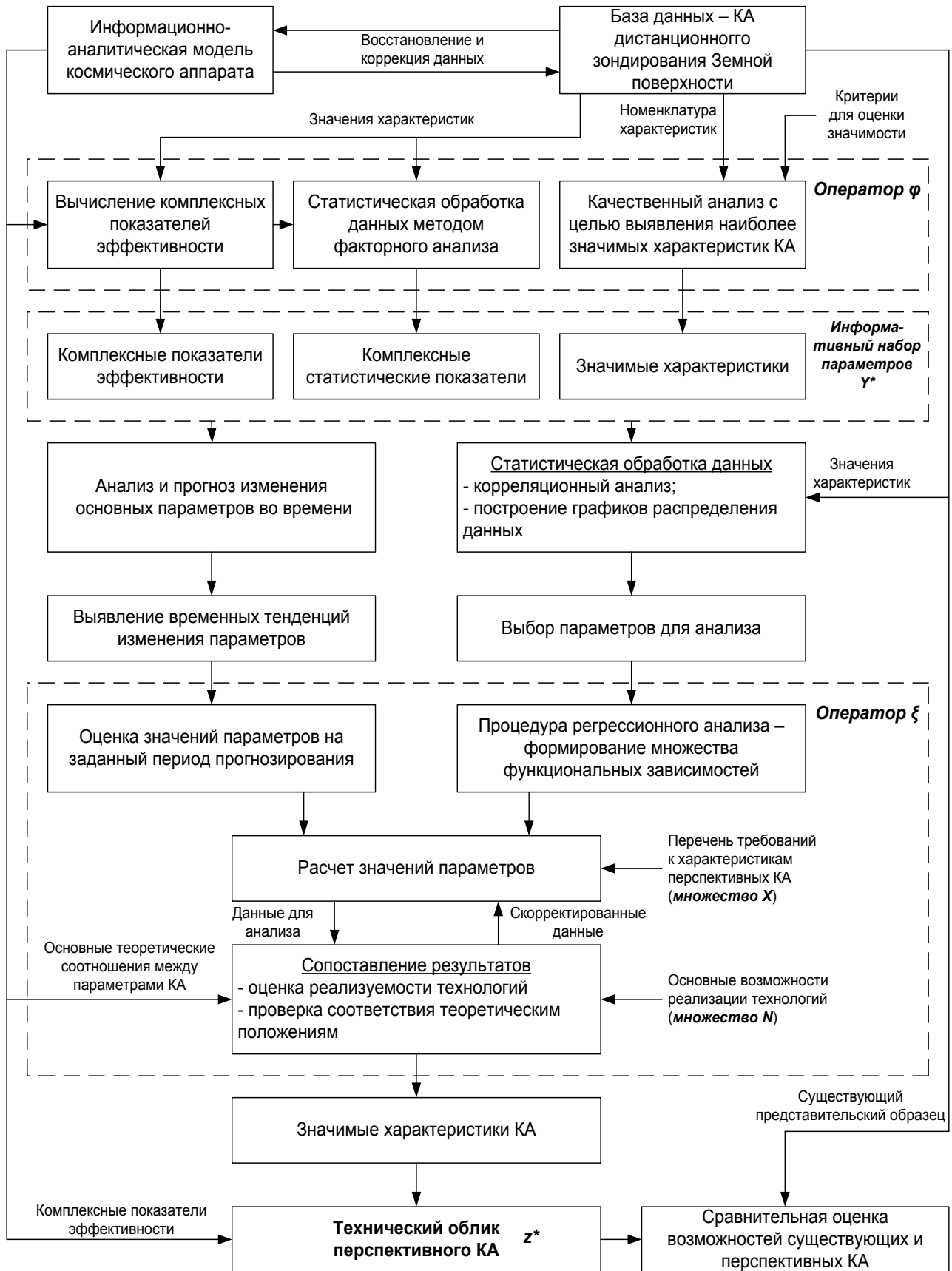


Рисунок 3 – Общая схема алгоритма реализации комплексной методики формирования технического облика перспективных КА ДЗЗ

Таким образом, в итоге реализации данного метода формируется множество функциональных зависимостей Ω , удовлетворяющих заданным критериям. Расчет основных характеристик перспективных КА ДЗЗ проводится на основе сформированного множества функций, исходными данными для которых являются требования к характеристикам перспективных аппаратов. Использование нескольких вариантов функциональных зависимостей (от разного состава переменных) позволяет повысить точность прогнозной оценки. Общий алгоритм прогнозирования представлен на рисунке 3.

В главе 3 – «Экспериментальное исследование комплексной методики по формированию технического облика перспективных космических аппаратов дистанционного зондирования Земли» – в соответствии с разработанной комплексной методикой получена количественная оценка основных характеристик перспективных КА ДЗЗ.

В результате реализации метода формирования информативного набора параметров выявлены наиболее значимые характеристики, определяющие эффективность функционирования КА ДЗЗ по показателям информативности, производительности и оперативности.

Множество анализируемых характеристик было разбито на пять групп. Экспертам было предложено ранжировать параметры в порядке убывания степени их влияния на показатели эффективности. Оценка проводилась в два этапа. На первом этапе оценивалось влияние групп параметров, а на втором — значимость характеристик в каждой группе.

В результате первого этапа опроса экспертов выявлено, что основными параметрами, влияющими на эффективность КА, являются характеристики его ОЭС, которые и определяют технический облик КА.

В ходе второго этапа по определению наиболее значимых характеристик ОЭС выявлены следующие параметры, оказывающие наибольшее влияние на эффективность функционирования КА ДЗЗ:

- фокусное расстояние и диаметр апертуры оптической системы;
- разрешающая способность ОЭС;

- угол поля зрения и мгновенный угол поля зрения оптической системы;
- количество одновременно работающих спектральных каналов;
- уровень дискретизации изображений;
- спектральный диапазон съемки и динамический диапазон ОЭС.

Таким образом, решена задача снижения размерности пространства исследуемых параметров КА без существенной потери информативности результатов исследования.

В результате применения **статистических методов** обработки данных по характеристикам КА ДЗЗ выявлены комплексные статистические показатели. Для расчетов использовался программный пакет STATISTICA 10.0, позволяющий применительно к настоящей задаче для различного набора исходных параметров вычислять факторные нагрузки и, с целью получения интерпретируемых результатов, применять различные методы ортогонального преобразования.

В результате обработки данных совокупности общих характеристик КА выделены два фактора, описывающие более 94% общей дисперсии:

- 1-й фактор – интегральный массоэнергетический параметр;
- 2-й фактор – эффективность хранения и передачи данных.

На этапе анализа характеристик целевой аппаратуры КА также выявлены два фактора:

1-й фактор описывает габаритные характеристики аппаратуры, угловые параметры и функциональный параметр (ЛРМ), совокупность которых можно охарактеризовать как функциональное качество ОЭС;

2-й фактор описывает две характеристики – массу и энергопотребление аппаратуры, данный фактор можно определить, как удельная энергоемкость.

По данным показателям проводится сравнение различных ОЭС съемки земной поверхности; значения этих факторов, вычисленные для каждого КА, используются в дальнейшем анализе.

В ходе первого этапа реализации разработанного метода оценки основных параметров перспективных космических аппаратов с оптико-электронной аппаратурой проведен анализ временных тенденций изменения основных

характеристик КА и составлен прогноз их развития. Так, выявлена тенденция изменения нормированной частоты пропускания ОЭС КА, сделан прогноз о том, что к 2035 г. значение данной величины составит 0,5–0,6. Выявлены тенденции изменения и сделан прогноз значений показателей удельной информационной емкости изображения и информационного потока, которые к 2025–2030 гг. составят 300–350 Мбит/км² и 20–25 Гбит/с соответственно.

В результате второго этапа реализации метода оценки основных параметров перспективных КА ДЗЗ получены более 60 функциональных зависимостей между основными техническими характеристиками КА, характеристиками аппаратуры и функциональными характеристиками КА в различных вариантах. Выявлены соотношения для оценки массы целевой аппаратуры в зависимости от параметров оптико-электронной системы, приводятся соотношения для оценки массы КА в зависимости от параметров КА и аппаратуры.

На основе полученных выражений построен график для оценки высоты съемки и апертуры, необходимых для получения требуемого значения ЛРМ в панхроматическом диапазоне для средней длины волны 0,65 мкм (рисунок 4).

На рисунке 5 представлена комплексная диаграмма, позволяющая для различных значений ЛРМ и размеров чувствительного элемента приемника изображения оценить требуемое фокусное расстояние оптической системы.

На основе выявленных зависимостей проведен расчет основных характеристик перспективных КА облика 2020–2030 гг. (таблица 2). Выявлены основные технологии и технические решения, которые при сохранении существующих тенденций развития могут быть внедрены после 2025 г.

Анализ технических и функциональных характеристик перспективных КА ДЗЗ показывает, что по сравнению с существующими системами ДЗЗ их возможности значительно возрастут. На рис. 6–8 представлены диаграммы, отражающие уровень изменения основных характеристик перспективных КА по сравнению с характеристиками существующих средств.

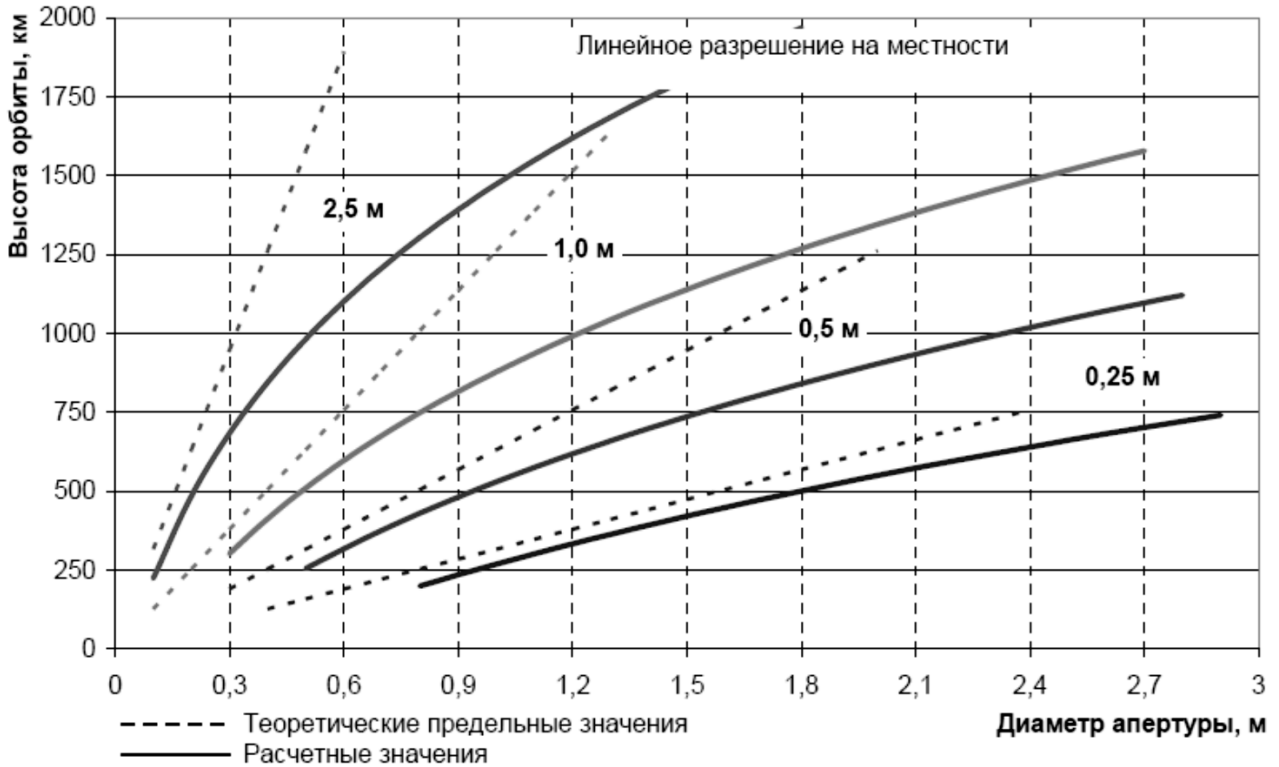


Рисунок 4 – Зависимость высоты орбиты КА от диаметра апертуры ОС для различных значений ЛРМ

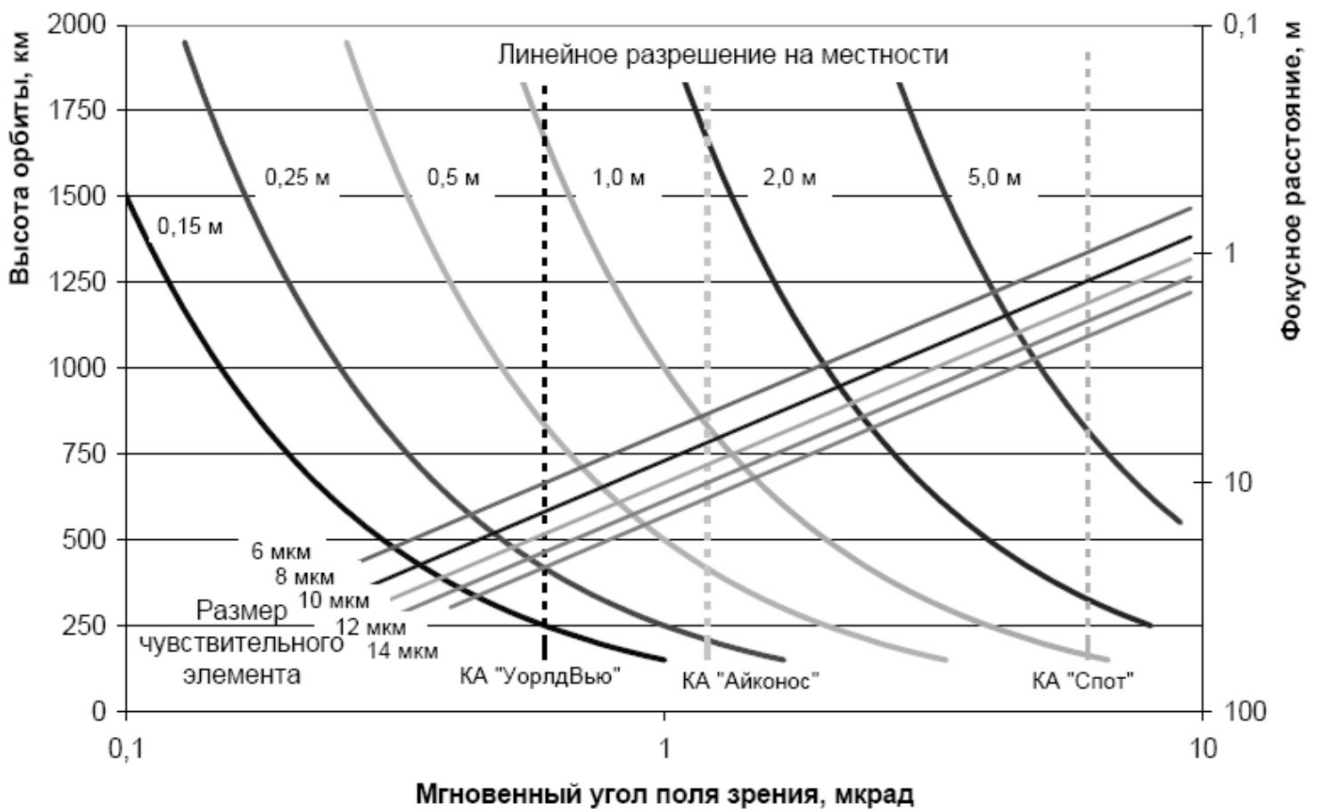


Рисунок 5 – Соотношения между параметрами целевой аппаратуры и функциональными характеристиками КА

Таблица 2 — Характеристики перспективных КА

Характеристика	КА сверхвысокого разрешения	Малые КА высокого разрешения	Картографические КА высокого разрешения
Год развертывания	2020–2030	2020–2025	2020–2030
Период эксплуатации	2020–2040	2022–2028	2020–2030
Масса КА, кг	4000-5500	400–970	3000–5000
Высота орбиты, км	350–1000	275–350	450–600
Срок активного существования, лет	7–10	2–4	5–8
Количество спектр. каналов	1 ПХ, 5 (МС), 124–250 (ГСА)	1 ПХ, 4 (МС)	1 ПХ, 10 (МС)
Дискретизация, бит/пикс.	8–12	8	8–12
ЛРМ, м – ПХ режим – МС режим – гиперспектр	0,2–0,5 0,8–1,5 до 5	0,5–1,2 1,5–3	0,9–1,8 2-6
Полоса захвата, км	16–40	10-18	45–65
Мгновенный угол поля зрения ОС, мкрад	0,45–0,5 (ПХ), 2,2–2,3 (МС)	2,2 (ПХ), 8,3–8,5 (МС)	0,55 (ПХ), 2,3 (МС)
Размер чувствительного элемента, мкм	6–9 (ПА) 12–18 (МС)	3,5 (ПХ); 6 (МС)	9 (ПХ); 18 (МС)
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 расстоян., 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/ км ²	300 – ПАН 93– МСС	32 – ПАН 14,5 – МСС	100 – ПАН 83– МСС

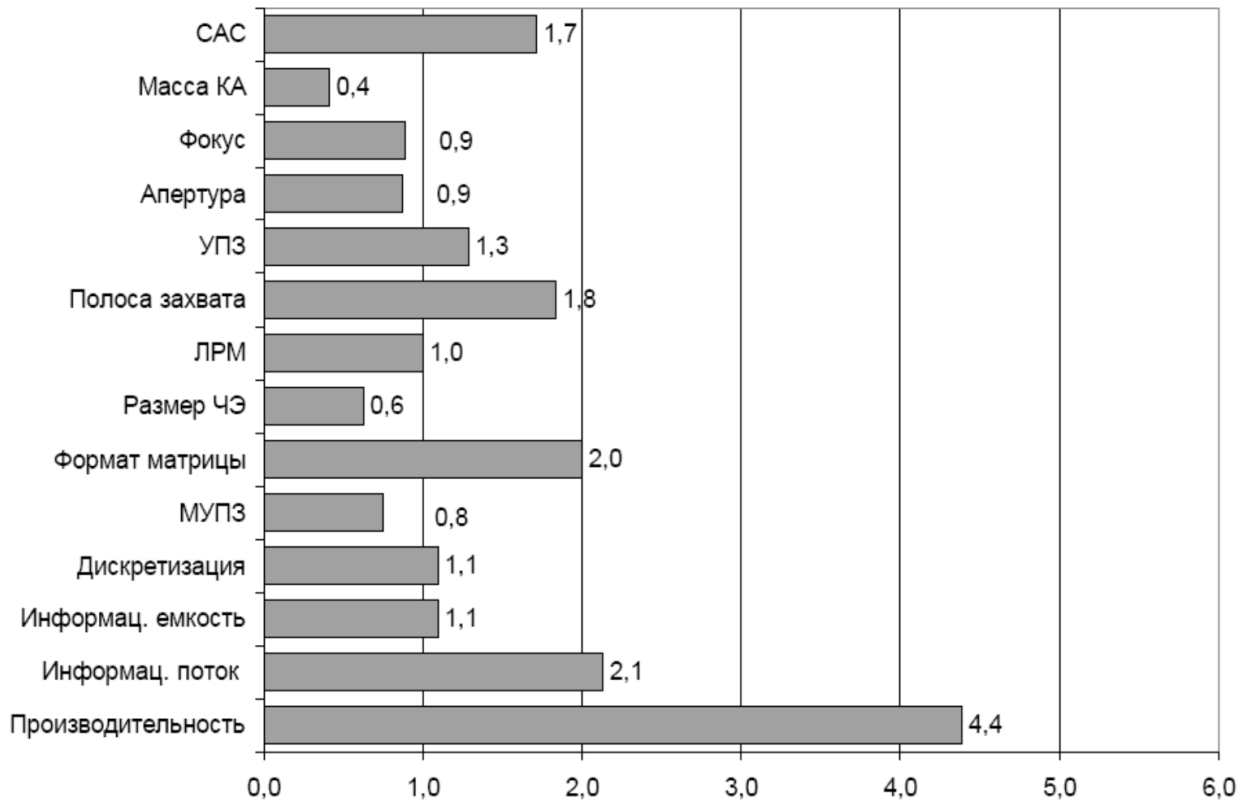


Рисунок 6 – Сравнительный анализ характеристик, существующих и перспективных КА сверхвысокого разрешения

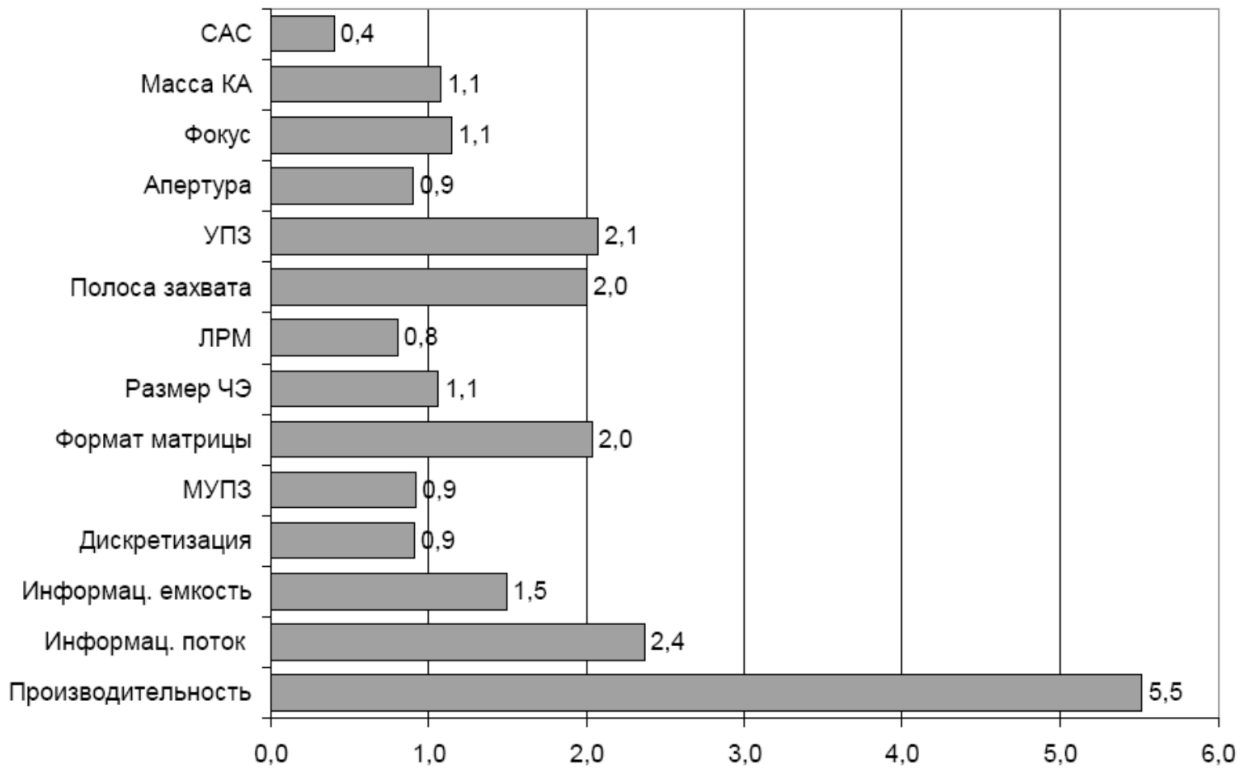


Рисунок 7 – Сравнительный анализ характеристик существующих и перспективных малых КА

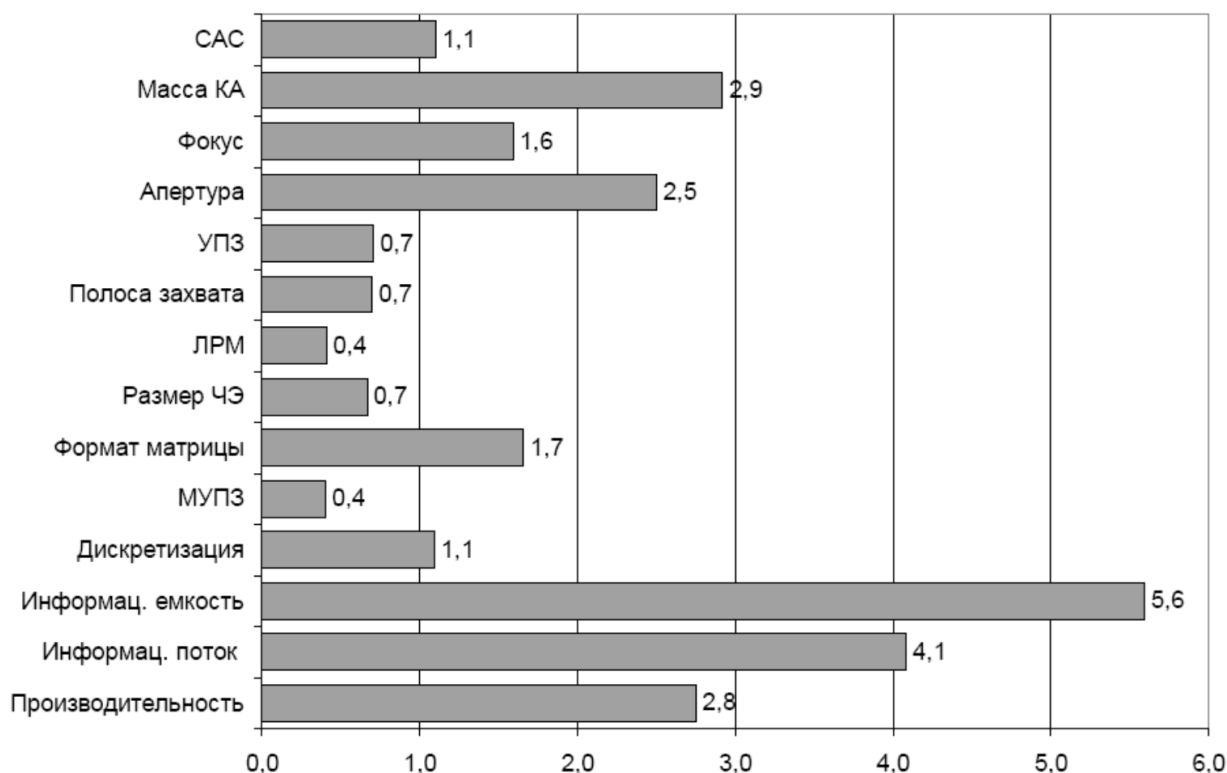


Рисунок 8 – Сравнительный анализ характеристик КА «Gaofen-14» и перспективных картографических КА

Исследованы потенциальные возможности перспективных КА, в ходе которого установлено следующее основу перспективной ОГ будут составлять малые КА. Показатель информативности возрастет в 3-4 раза за счет уменьшения массы оптической системы с одновременным увеличением ЛРМ. Это будет достигаться, за счет уменьшения размера ЧЭ матрицы, а также снижением высоты орбиты.

Увеличение информативности КА сверхвысокого разрешения во многом будет за счет оптических систем с большей апертурой, а также использование полупроводников с большей потенциальной ямой в качестве ЧЭ матриц. Уменьшить массу изделия позволит использование композиционных материалов в составе конструкции.

Картографические КА нового поколения будут введены в эксплуатацию уже в 2020–2030 гг. Основной особенностью КА данного класса будет возможность производство 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.

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 РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях:

1. 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.
2. 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.
3. 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.

Монографии:

4. 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.

Публикации в остальных изданиях:

5. 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.
6. Белый Р.В., Харланов А.С. 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.

7. Белый Р.В. Методика 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.

8. Белый Р.В., Харланов А.С. 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.