

На правах рукописи

ГЛАЗКОВА ИНЕССА АНАТОЛЬЕВНА

**РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНОЙ МЕТОДИКИ АНАЛИЗА
ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ
ЗЕМЛИ НА БАЗЕ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ**

Специальность 05.07.09

Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва
2010 г.

Работа выполнена на кафедре «Системный анализ и управление» Московского авиационного института (государственного технического университета, МАИ)

Научный руководитель:

заслуженный деятель науки РФ,
доктор технических наук, профессор
Малышев Вениамин Васильевич

Официальные оппоненты:

член-корреспондент РАН,
доктор технических наук, профессор
Чернявский Григорий Маркелович

доктор технических наук,
старший научный сотрудник
Максимов Валерий Георгиевич

Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное предприятие
«Государственный космический научно-
производственный центр имени М.В.Хруничева»
(ФГУП «ГКНПЦ имени М.В.Хруничева»)

Защита состоится «10» июня 2010 г. в 15.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.12 при Московском авиационном институте (государственном техническом университете, МАИ) по адресу: 125993, г.Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д.4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МАИ.

Автореферат разослан «07» мая 2010 г.

Отзывы, заверенные печатью, просьба направлять по адресу:
125993, г.Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д.4, Ученый совет МАИ.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.125.12,
кандидат технических наук, доцент

В.В.Дарных

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Космические средства дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) получили в настоящее время широкое применение во всем мире. Неуклонно растет разнообразие создаваемых типов космических аппаратов (КА) ДЗЗ и общее их количество. Получаемая ими космическая информация используется для решения многих хозяйственных и научных задач мониторинга окружающей среды. На этой основе достигается ощутимое повышение эффективности производственной деятельности в таких областях, как картографирование, землеустройство и землепользование, контроль источников загрязнения окружающей среды и наблюдение за экологической обстановкой, сельское хозяйство, лесозаготовки и лесовосстановление, планирование и поиск полезных ископаемых, прокладка рациональных маршрутов и т.д. Важнейшее значение имеют также многолетние ряды космических данных ДЗЗ для проведения климатологических исследований, изучения Земли как целостной экологической системы, обеспечения различных изысканий и работ в интересах океанологии и других отраслей экономики и науки.

Последние годы характеризуются резким ростом числа космических программ ДЗЗ, а также существенным изменением их технического, организационного, маркетингового характера. Заметен разрыв «сверхцентрализованных программ», связанных с запуском тяжелых космических платформ и эксплуатацией затратно емких приемных центров, от стремительно растущих программ запуска малых космических аппаратов, а также развивающейся распределенной инфраструктуры приема, хранения, распространения информации ДЗЗ. При этом начинают лидировать программы, демонстрирующие не только наибольшую технологическую, но и стратегическую (с точки зрения ценовой и маркетинговой политики) гибкость: граница открытого и бесплатного доступа смещается в сторону более высокого разрешения (NOAA – EOS). В централизованных программах (Landsat 7, Aster) конкурентоспособным преимуществом становится политика свободного распространения и копирования данных (copyright free), в коммерческих – открытость информационных интерфейсов и гибкость лицензионной политики (RADARSAT, IRS).

При разработке средств ДЗЗ необходимо учитывать, что качество решения социально-экономических задач зависит от информативности данных, формируемых бортовой целевой аппаратурой, периодичности наблюдения, оперативности передачи этих данных потребителю, а также эффективности способов их последующей обработки. Параметры технических средств к началу их практического использования должны удовлетворять требованиям потребителей и соответствовать техническому уровню, не уступающему уровню лучших зарубежных аналогов.

Одним из вариантов создания современной системы ДЗЗ является применение малых космических аппаратов (МКА) в ее орбитальной группировке, что позволяет обслужить большое число потребителей со своими требованиями к получаемой информации. Поэтому разработка принципов и методов создания систем ДЗЗ на базе МКА является актуальной научно-технической задачей, имеющей прикладное значение.

Объект исследования - система ДЗЗ на базе МКА с различными вариантами построения орбитальной группировки.

Предмет исследования - система ДЗЗ на базе МКА и анализ эффективности ее функционирования.

Целью работы является повышение эффективности функционирования систем ДЗЗ на базе МКА.

Методы исследования основаны на методах системного анализа, элементах теории вероятностей, имитационного моделирования, а также параметрического анализа.

Научная новизна результатов работы состоит в разработке комплексной методики анализа эффективности функционирования систем ДЗЗ на базе МКА, включающей методику оценки эффективности функционирования системы ДЗЗ по различным показателям (оперативность и периодичность наблюдения, производительность, время наблюдения заданной территории), методику расчета стоимости проектирования МКА ДЗЗ, методику расчета затрат на изготовление МКА ДЗЗ.

Практическая значимость результатов работы заключается в создании программно-методического обеспечения, позволяющего проводить комплексную оценку эффективности систем ДЗЗ на базе МКА, а также рекомендациях по созданию космических систем ДЗЗ на базе МКА, в том числе с использованием спутников «Метеор-3М №1» и «Монитор-Э» в различных комплектациях и проектируемых низкоорбитальных микроспутников для мониторинга заданных территорий Российской Федерации.

Результаты, представленные в работе, использованы при создании реальных проектов систем ДЗЗ на базе МКА в ФГУП «ГКНПЦ имени М.В.Хруничева», ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс»», ФГУП «НПО им. С.А.Лавочкина», ГУ «НИЦ «Планета»», а также в учебном процессе кафедры «Системный анализ и управление» МАИ. Внедрение (использование) результатов работы подтверждается соответствующими актами.

Достоверность полученных результатов подтверждается корректным использованием предлагаемых методов и моделей, а также их соответствием результатам разработки и эксплуатации известных космических систем ДЗЗ.

Апробация результатов работы. Основные результаты исследований опубликованы в 30 статьях и тезисах докладов, в том числе в 4 статьях [1-4] в изданиях из рекомендованного ВАК Минобрнауки России перечня, неоднократно представлялись автором и обсуждались на международных конгрессах, конференциях и симпозиумах, а также на научных семинарах кафедры «Системный анализ и управление» МАИ.

На защиту выносятся:

1. Комплексная методика анализа эффективности функционирования систем ДЗЗ на базе МКА по различным показателям (оперативность и периодичность наблюдения, производительность, время наблюдения заданной территории) с учетом стоимости на создание МКА ДЗЗ.

2. Программно-методическое обеспечение, позволяющее проводить комплексную оценку эффективности систем ДЗЗ на базе МКА.

3. Результаты сравнительного анализа эффективности целевого функционирования различных проектов систем ДЗЗ с применением предложенной методики и соответствующие рекомендации по созданию КС ДЗЗ на базе МКА.

Структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, 3 разделов, заключения, списка литературы из 82 наименований и 3 приложений. Объем основного текста диссертации составляет 102 страницы машинописного текста, включает 37 рисунков, 16 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность исследований принципов и методов создания космических систем ДЗЗ на базе МКА, формулируется цель работы, определяются объект и предмет исследований, характеризуется содержание работы, определяется научная новизна полученных в работе результатов и приводятся основные результаты, выносимые на защиту.

В первой главе проводится анализ основных направлений развития космических систем ДЗЗ (отечественных и зарубежных), в том числе на базе МКА, дается сравнительный анализ перспективных программ ДЗЗ, формулируется решаемая в работе научно-техническая задача.

Технические характеристики систем и КА ДЗЗ рассмотрены на примерах КА США, Франции, Европейского космического агентства, Индии и Японии. В качестве отечественных рассмотрены космические средства метеоназначения («Метеор-3М», «Электро»), оперативного наблюдения суши («Ресурс-01 №4», «Ресурс-ДК», «Монитор-Э»), фотонаблюдения суши («Ресурс-Ф», «Комета») и оперативного наблюдения океана («Океан-О»). Дан сравнительный анализ их характеристик. Приведен обзор МКА, применяющихся в системах ДЗЗ.

Обсуждаются перспективы использования МКА ДЗЗ различного назначения, определен состав задач мониторинга окружающей среды, для решения которых могут привлекаться МКА. Дан сравнительный анализ отечественных и зарубежных наземных космических комплексов ДЗЗ, который показывает, что с точки зрения использования космической информации перспективной является группа потребителей, получающая данные космических съемок на коммерческой основе. К этой группе потребителей могут быть отнесены как организации, так и частные пользователи. Кроме того, в связи с усилением самостоятельности отдельных регионов, возникает необходимость в информационном обеспечении органов управления территориями различного уровня (от федерального до местного), создании территориальных информационных систем. Представляется, что в ближайшие 3 - 5 лет потенциальный спрос этой группы потребителей может составить 50 - 60% от всего объема заказываемых съемок. Целевыми функциями потребителей этой группы являются охрана окружающей среды, улучшение экологической обстановки, обоснование и выбор более эффективного варианта размещения отдельных экономических и природоохраненных объектов.

Одним из путей расширения сферы применения космической информации и повышения ее эффективности является комплексирование разнородной информации для получения синтезированных изображений. Это направление получает все более широкое развитие в зарубежных технологиях создания информационных продуктов на базе космических данных. Например, национальный центр ДЗЗ NRSC (National Remote Sensing Centre) Великобритании планирует свою дальнейшую научно-техническую политику ориентировать на переход от использования отдельных космических съемок к комплексированию данных, получаемых из разных источников.

На рис.1 представлен прогноз объективных потребностей в материалах космических съемок на российском и мировом рынках.

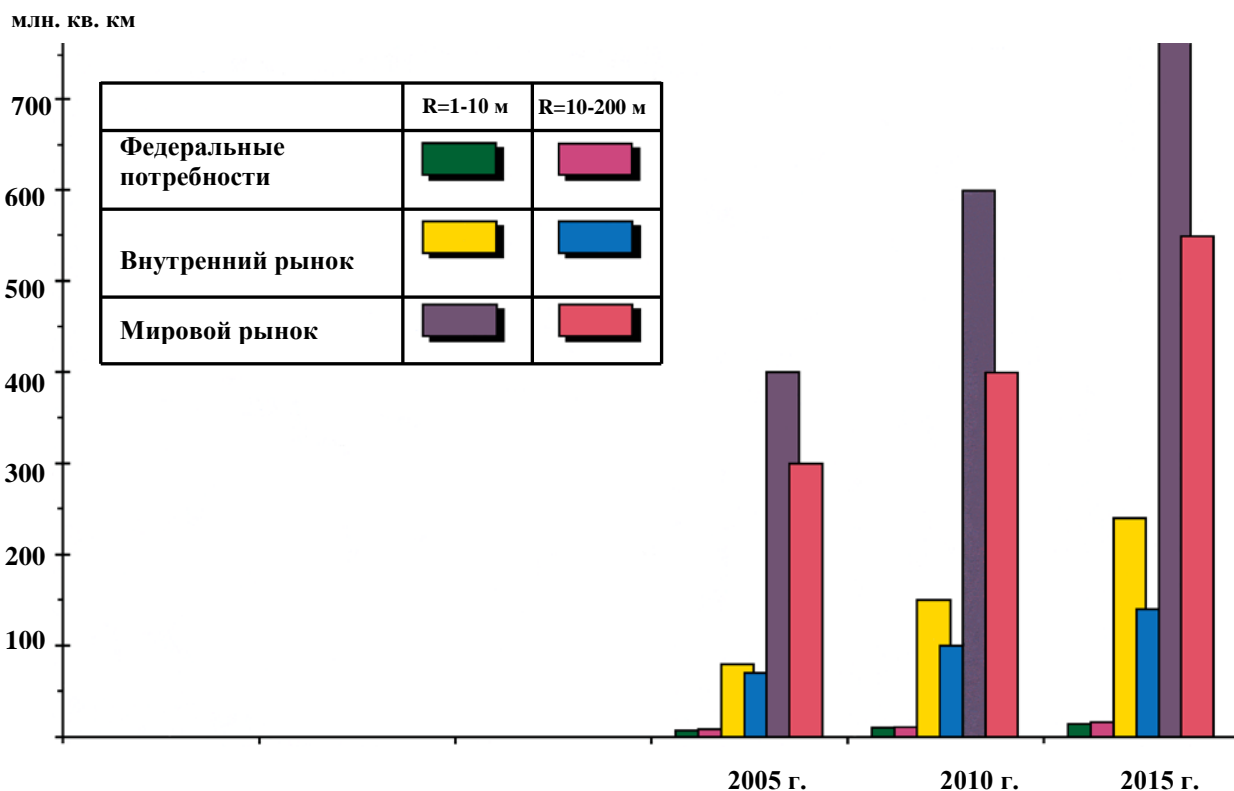


Рис.1. Прогноз объективных потребностей в материалах космических съемок на российском и мировом рынках

В работе анализируется состав задач мониторинга окружающей среды, решаемый группировкой МКА, возможный состав бортовой аппаратуры, предложена система показателей для оценки эффективности системы, сформированы варианты орбитальной группировки на базе МКА.

Методологической основой проектирования космической системы ДЗЗ служит системный подход, основные принципы которого сводятся к следующему: формулировка целей и задач, стоящих как перед системой в целом, так и перед отдельными ее компонентами; формирование показателей целевой и экономической эффективности; анализ требований к отдельным компонентам; формирование состава и структуры системы; формирование возможных альтернатив; декомпозиция системы, целей и задач при сохранении на каждом уровне иерархии как целей, стоящих непосредственно перед этим уровнем, так и целей вышестоящего уровня; выбор определяющих параметров системы; оптимизация структуры и ее параметров; выбор предпочтительного варианта, разработка системного проекта системы мониторинга окружающей среды.

Таким образом, при общем проектировании космической системы ДЗЗ должны быть выбраны: параметры орбитальной группировки (количество КА, орбитальные параметры); параметры КА и его основных бортовых систем (аппаратуры наблюдения, системы управления, включая систему ориентации и стабилизации, бортовой целевой радиолинии, надежность КА и его массогабаритные характеристики); алгоритмы управления орбитальной группировкой (развертыванием, поддерживанием, восполнением).

Постановка задачи. Показатели эффективности должны объективно, в количественной форме, характеризовать степень достижения целей, а также иметь достаточно простой физический смысл, быть наглядными для восприятия и анализа. Для многоцелевых систем вид и форма получения оценок отдельных показателей должны допускать их свертку в интегрированные, обобщенные по-

казатели, на базе которых могут формироваться критерии оценки и выбора альтернативных вариантов системы в целом или отдельных ее компонентов.

В данной работе за основу принят показатель, характеризующий эффективность орбитальной группировки \mathcal{E} и определяемый по формуле:

$$\mathcal{E} = \frac{1}{N_3} \sum_{i=1}^{N_3} P_i \quad (1)$$

где N_3 - полное число задач, решаемых для различных пользователей с использованием космической информации, поступающей от орбитальной группировки, i - номер задачи, P_i — вероятность решения i -ой задачи. Если каждая задача имеет свой приоритет по сравнению с другими, то для оценки эффективности орбитальной группировки можно использовать выражение

$$\mathcal{E} = \sum_{i=1}^{N_3} \alpha_i P_i, \quad \sum_{i=1}^{N_3} \alpha_i = 1, \quad (2)$$

где α_i - коэффициент важности i -й задачи. В случае равенства всех приоритетов формула (2) принимает вид (1).

Каждую задачу можно считать решенной, если одновременно выполнены все требования потребителя к космической информации. Тогда для вероятности решения i -й задачи P_i можно записать:

$$P_i = \prod_{j=1}^J P_j^i, \quad (3)$$

где j - номер требования, J - количество требований, P_j^i - показатель выполнения j -ого требования для i -ой задачи.

В работе при оценке эффективности орбитальной группировки учитываются следующие основные требования к космической информации:

1. Спектральный диапазон $\lambda\lambda$ аппаратуры наблюдения должен лежать в требуемых пределах, $\lambda\lambda \in \lambda\lambda^{mp}$.
2. Разрешение аппаратуры R должно быть не хуже требуемого, $R \leq R^{TP}$.
3. Периодичность наблюдения t_{nep} любой точки в заданном районе должна быть не ниже требуемой, т.е. $t_{nep} \leq t_{nep}^{TP}$.

Формально вероятность выполнения первого требования $P_{\lambda i}$ для i -ой задачи может быть определена из условия:

$$P_{\lambda i} = \begin{cases} 1, & \text{если } \lambda\lambda \in \lambda\lambda_i^{TP} \\ 0, & \text{если } \lambda\lambda \notin \lambda\lambda_i^{TP} \end{cases} \quad (4)$$

Выполнение этого требования зависит только от комплектации бортовой аппаратуры. Поэтому для оценки $P_{\lambda i}$ необходима полная информация о бортовой аппаратуре КА.

Аналогично может быть определена и вероятность P_{Ri} выполнения второго требования

$$P_{Ri} = \begin{cases} 1, & \text{если } R \leq R_i^{TP} \\ 0, & \text{если } R > R_i^{TP} \end{cases} \quad (5)$$

Для оценки P_{Ri} необходимы данные об аппаратуре наблюдения и высоте орбиты каждого КА.

Периодичность наблюдения различных точек заданного района является сложной, неоднозначной функцией. Она изменяется от точки к точке района наблюдения, от витка к витку орбиты КА. Для того чтобы получить какую-либо оценку периодичности наблюдения заданного района, следует получить оценки периодичности для множества точек обслуживаемого района, и только после этого можно вычислить ту или иную характеристику для района, например, максимальную периодичность, минимальную периодичность, среднюю периодичность (математическое ожидание) или вероятность того, что периодичность будет не хуже заданной. В дальнейшем в работе именно этот показатель

$$P_{ii} = P(t_{nep} \leq t_{nepi}^{TP}) \quad (6)$$

используется в качестве основного. Для вычисления вероятности P_{ii} необходимы данные о структуре орбитальной группировки и характеристиках аппаратуры наблюдения, прежде всего углах обзора. С учетом сказанного вероятность решения i -ой задачи (3) можно определить так:

$$P_i = P_{\lambda i} \cdot P_{Ri} \cdot P_{ii} \quad (7)$$

При выборе наилучшего варианта орбитальной группировки необходимо учитывать, по крайней мере, два показателя – эффективность \mathcal{E} и стоимость C . С одной стороны, желательно получить максимум эффективности системы, с другой стороны, желательно добиться этого при минимальной стоимости. Подобные задачи принято называть задачами векторной (или многокритериальной) оптимизации. Для решения таких задач и, следовательно, для преодоления возникшей неопределенности могут быть применены два основных подхода.

Первый подход предполагает введение дополнительных гипотез, позволяющих свести задачу многокритериальной оптимизации к задаче однокритериальной оптимизации. По существу речь идет о свертывании критериев. Второй подход предполагает сокращение множества исходных вариантов решений путем неформального анализа этих вариантов и построении, так называемого, множества Парето, или другими словами, множества неулучшаемых вариантов.

Для коммерческой системы ДЗЗ объективно существует также возможность свертки показателя эффективности и стоимости в одну обобщенную критериальную функцию – прибыль Π , которая представляет собой разность между доходом D от продажи космической информации и стоимостью системы C за весь срок ее функционирования, т.е.

$$\Pi = D - C \quad (8)$$

Таким образом, для коммерческой системы ДЗЗ в качестве критерия оптимальности может быть выбрана прибыль (8), которую и нужно максимизировать:

$$\Pi \rightarrow \max \quad (9)$$

Поскольку доход является функцией эффективности $D = D(\mathcal{E})$, то с учетом (1) - (3) и (8) задача оптимизации (9) трансформируется в задачу максимизации эффективности при заданной стоимости:

$$\mathcal{E} = \frac{1}{N_3} \sum_{i=1}^{N_3} P_i \rightarrow \max, \quad C \leq \bar{C} \quad (10)$$

где вероятность решения системой ДЗЗ i -ой задачи определяется по (4) – (8). Именно оптимизационная задача (10) и решается в работе применительно к рассматриваемым проектам систем ДЗЗ на базе МКА.

Во второй главе рассмотрены методические основы системного проектирования орбитального сегмента системы ДЗЗ.

Методика оценки эффективности системы ДЗЗ. Предполагаются известными типы и характеристики КА, входящие в состав орбитальной группировки. В рассматриваемом случае часть ее параметров предполагается известной. Это - количество КА в группировке, высота и наклонение орбиты для существующих КА. Поэтому указанные параметры должны быть определены лишь для вновь проектируемых КА. Другие же параметры орбитальной структуры, а именно, долгота восходящего узла и аргумент широты, должны быть определены для всех КА без исключения. Поскольку рассматривается стадия системного проектирования, то не рассматривается эволюция системы в целом, и, как следствие, вопросы поддержания и восполнения орбитальной группировки. Что касается состава аппаратуры наблюдения и ее параметров, то для существующих КА они известны, а для вновь проектируемых должны быть определены.

Таким образом, задача сравнительного анализа вариантов орбитальной группировки системы ДЗЗ на базе МКА может быть формализована в виде задачи определения наилучшей из них, состоящей из существующих и проектируемых КА, соответствующего состава бортовой аппаратуры для вновь проектируемых КА. Как показывает практика, в качестве показателей эффективности системы ДЗЗ целесообразно использовать совокупность следующих разноприродных индикаторов:

- оперативность получения информации о выбранном районе на заданном пункте приема информации (ППИ) $t_{оп}$ (отсчитывается от момента получения команды на борту КА на проведение съемки выбранного района);

- периодичность обновления информации о выбранном районе $t_{обн}$;

- производительность системы, задаваемая числом проконтролированных районов (объектов) за сутки $n_{ПП}$;

- качество информации, характеризуемое совокупностью частных показателей:

- разрешение на местности l_{PM} ;

- точность привязки получаемых изображений к земным координатам $\delta_{ПП}$;

- погрешность геометрических искажений в изображении наблюдаемого объекта или района $\delta_{ИС}$;

- время наблюдения заданной территории и необходимое минимальное время для ее полного накрытия.

Пусть орбитальная группировка системы ДЗЗ имеет следующие характеристики:

$X_{ОГ}$ - совокупность характеристик, включающая общее число КА в группировке и их орбитальные параметры;

$X_{КА}^{ОСН}$ - характеристики системы ориентации и стабилизации КА, а также системы автономной навигации;

$X_{ЦА}$ - совокупность характеристик бортовой целевой аппаратуры КА.

Наземные ППИ заданы совокупностью характеристик $X_{ППИ}$, а наблюдаемый район (районы) - совокупностью характеристик $X_{НР}$. Съемка производится в сезонно-погодных условиях, характеризуемых совокупностью параметров $X_{СПУ}$. Тогда, для введенных показателей эффективности системы ДЗЗ могут быть записаны функциональные зависимости общего вида:

$$\begin{aligned}
t_{OP} &= f_1 (X_{OG}, X_{KA}^{OCH}, X_{ЦА}, X_{ППИ}, X_{НР}, X_{СПУ}); \\
t_{ОБН} &= f_2 (X_{OG}, X_{KA}^{OCH}, X_{ЦА}, X_{ППИ}, X_{НР}, X_{СПУ}); \\
n_{ПР} &= f_3 (X_{OG}, X_{KA}^{OCH}, X_{ЦА}, X_{ППИ}, X_{НР}, X_{СПУ}); \\
l_{PM} &= f_4 (X_{OG}, X_{KA}^{OCH}, X_{ЦА}, X_{СПУ}); \\
\delta_{ПР} &= f_5 (X_{KA}^{OCH}, X_{ЦА}); \\
\delta_{ИС} &= f_6 (X_{KA}^{OCH}, X_{ЦА}).
\end{aligned} \tag{11}$$

Задачей оценки эффективности системы ДЗЗ является, во-первых, математическое моделирование целевого функционирования системы с целью получения зависимостей (11), а во-вторых, анализ на их основе вариантов построения системы ДЗЗ и нахождение альтернативы, удовлетворяющей требованиям заказчика по основным показателям эффективности системы.

В случае принятого в главе 1 стохастического подхода может быть сформулирован один обобщенный (агрегированный) показатель в форме вероятности успешного решения целевой задачи (3):

$$P_{Ц} = P [(t_{OP} \leq t_{OP}^*, t_{ОБН} \leq t_{ОБН}^*, \dots, \delta_{ИС} \leq \delta_{ИС}^*], \tag{12}$$

то есть вероятности того, что все частные показатели будут иметь значения не хуже требуемых.

Для нахождения вероятности (12) необходимо знать плотность распределения вероятности системы случайных показателей (t_{OP} , $t_{ОБН}$, ..., $\delta_{ИС}$), каждый из которых является функцией случайных аргументов из числа характеристик, входящих в X_{OG} , X_{KA}^{OCH} , ..., $X_{СПУ}$. При этом, выбор требуемого варианта орбитальной группировки системы ДЗЗ заключается в нахождении варианта, обеспечивающего $P_{Ц} \geq P_{Ц}^*$, где $P_{Ц}^*$ - требуемая вероятность успешного выполнения задачи наблюдения.

Структурная схема моделирования для оценки эффективности системы ДЗЗ приведена на рис.2.

Первые шесть блоков модели задают участвующие в моделировании параметры и характеристики, от которых зависят показатели эффективности системы. В блоках 7а и 7б содержатся данные со значениями следующих характеристик: характеристик стандартной миры, по которой определяется разрешение; отражательных характеристик фона, на котором расположены шпалы миры; альбедо земной поверхности и облаков; коэффициентов пропускания атмосферы и параметров ее турбулентности в заданном оптическом диапазоне; коэффициентов ослабления атмосферой радиоволн выбранного диапазона; характеристик облачности и др. Названные характеристик необходимы для определения разрешения на местности l_{PM} .

Собственно моделирование процессов нахождения показателей эффективности целевого функционирования системы ДЗЗ (11) с учетом перечисленных в блоках 1 - 7 характеристик формализовано в блоках 8 - 13 модели.

В блоке 8 формализована процедура нахождения разрешения на местности l_{PM} путем решения частотно-энергетического уравнения. При этом учитываются частотно-контрастные характеристики (ЧКХ) как собственно оптической системы, так и звеньев смаза изображения за счет вибраций и нескомпенсированной составляющей бега изображения, звена анализирующей дискретизации, апертуры элемента фотоприемного устройства (ФПУ), турбулентности атмосферы.

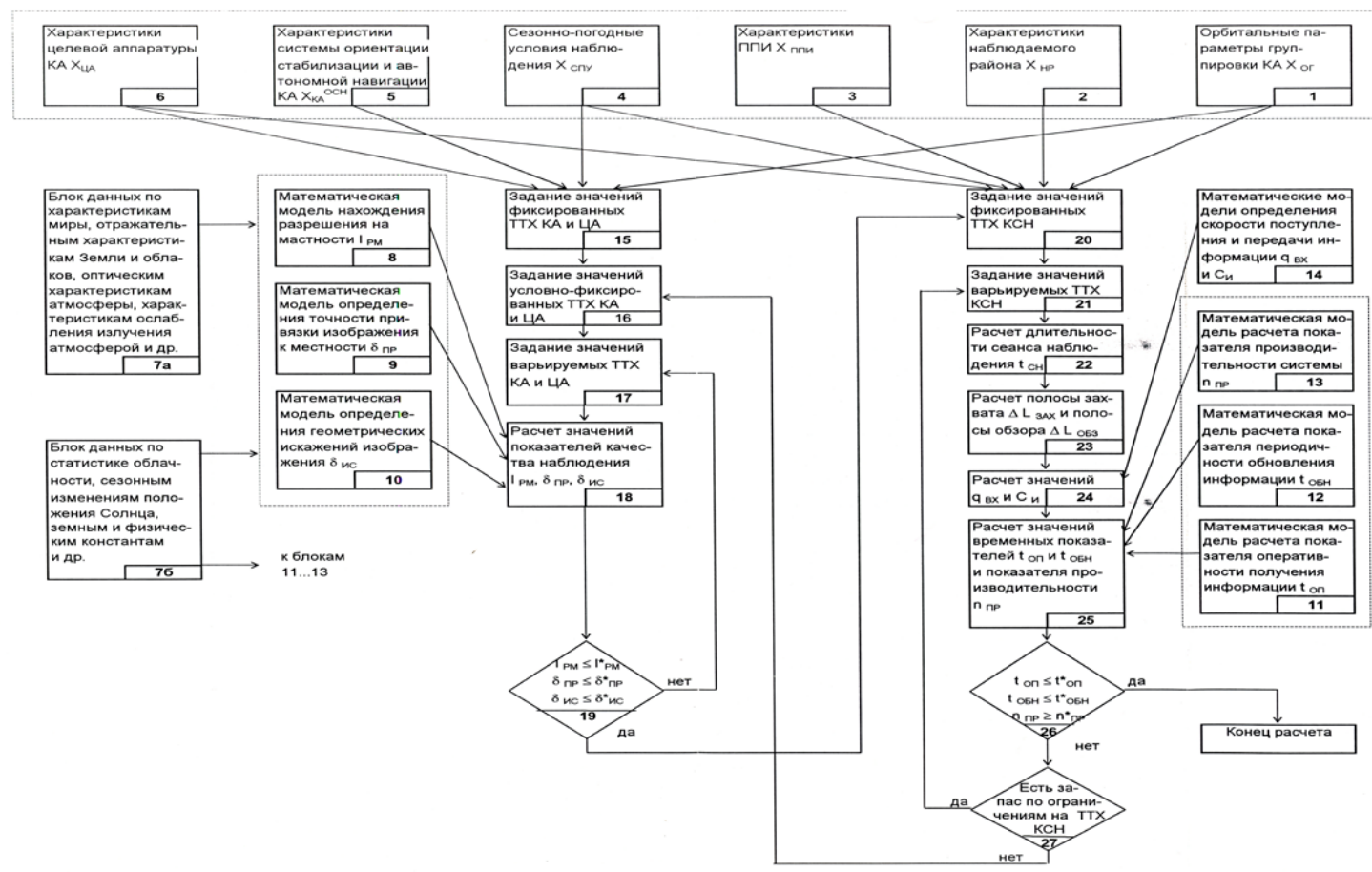


Рис.2. Структурная схема моделирования оценки эффективности системы ДЗЗ

В блоке 9 реализована статистическая модель определения ошибки «прицеливания» оси аппаратуры относительно выбранной точки на Земле с заданной широтой и долготой на момент начала съемки. При этом учитываются ошибки ориентации и стабилизации КА, а также ошибки навигационных измерений положения КА на орбите.

Математическая модель определения геометрических искажений изображения (блок 10) основана на моделировании во времени процессов считывания с ФПУ полученных фрагментов изображения с учетом угловых эволюций КА и кривизны Земли.

В блоке 11 реализована математическая модель расчета показателя оперативности получения информации $t_{оп}$. Оценка показателя осуществляется методом статистических испытаний имитационной модели процесса функционирования группировки КА при наблюдении заданного района. В модели имитируется движение всех КА группировки по заданным орбитам путем интегрирования уравнений движения. Случайными исходными данными для каждого прогона баллистической модели являются: долгота восходящего узла орбиты маркерной плоскости; величина аргумента перигея орбиты КА плоскости орбитальной группировки; начальная временная фаза, определяющая положение КА на орбите с заданным наклоном в маркерной плоскости орбитальной группировки; время суток на Гринвичском меридиане, определяющее положение наблюдаемого района и положение Солнца.

При оценивании $t_{он}$ в каждой реализации учитываются ограничения на съемку и передачу информации на ППИ: по условию попадания района наблюдения в полосу обзора и захвата целевой аппаратуры; по условию наличия облачности над районом в момент наблюдения бальностью выше критической; по условию допустимого угла Солнца над местным горизонтом во время наблюдения; по условию попадания КА в зону видимости ППИ при сбросе информации; по возможности сброса всей накопленной информации на ППИ при реализуемой скорости передачи информации.

По завершении всех реализаций в модели рассчитываются математическое ожидание и дисперсия показателя $t_{он}$, а также строится график функции распределения $F(t_{он})$ и плотности распределения $\varphi(t_{он})$.

Аналогичным образом построена модель определения периодичности обновления информации $t_{обн}$ (блок 12) с той лишь разницей, что если в первом случае прогон модели останавливается как только любой из КА проведет первое наблюдение района и сброс информации (начиная от команды на съемку), то во втором случае прогон модели продолжается в течение нескольких суток полета (до полутора - двух недель) и в каждом прогоне измеряется интервал между соседними сеансами наблюдения района. После этого интервалы усредняются по длине каждой реализации и по всем реализациям и находится среднее значение периодичности обновления информации $t_{обн}$.

В блоке 13 реализована математическая модель расчета производительности системы $n_{пр}$, который основан на решении маршрутной задачи наблюдения по заданным координатам районов. При этом учитываются скорости перенацеливания аппаратуры, ограничения на программные углы разворота, а также ограничения на возможности КА по приему и передаче информации.

Блок 14, хотя и не является непосредственно формализующим показатели эффективности системы ДЗЗ, но в нем заложен алгоритм расчета двух важных

характеристик целевой аппаратуры: потока информации на входе накопителя q_{BX} и скорости сброса информации на ППИ c_{II} . Обе эти характеристики совместно с емкостью запоминающего устройства (ЗУ) $Q_{ЗУ}$ участвуют при оценке показателей оперативности получения и периодичности обновления информации в виде ограничений на скорость прохождения информации от датчика целевой аппаратуры до ППИ. При расчете q_{BX} учитываются параметры движения КА, поле зрения аппаратуры, размеры элементов ФПУ и общее их количество, информационные затраты на сжатие информации и другие характеристики. При расчете скорости передачи информации на ППИ c_{II} учитываются характеристики радиотехнического комплекса целевой аппаратуры КА (мощность излучения, характеристики антенны, способ модуляции, значение несущей частоты и др.), характеристики трассы (дальность, величина ослабления радиоизлучения) и характеристики приемной части ППИ (размеры антенны, эквивалентная шумовая температура, требуемая достоверность приема цифрового сигнала и др.).

Порядок и последовательность проведения расчета показателей эффективности ДЗЗ задается блоками модели 15 - 27.

Схема расчета условно разбита на две ветви. В блоках 15 - 19 осуществляется расчет показателей качества информации, а в блоках 20 - 27 - показателей оперативности получения и периодичности обновления информации, а также показателя производительности системы.

Расчет начинается с задания фиксированных и условно-фиксированных тактико-технических характеристик (ТТХ) КА и целевой аппаратуры (блоки 15 и 16). Под условно-фиксированными характеристиками понимаются такие характеристики, которые являются необходимыми как при расчете показателей качества, так и показателя производительности и временных показателей. В частности, такими характеристиками являются: высота полета КА h , предельный угол Солнца α_0 , при котором еще допустимо наблюдение, а также максимальный программный угол разворота КА по крену γ_{\max} .

Далее в блоке 17 задаются значения варьируемых ТТХ КА и целевой аппаратуры, причем только тех характеристик, от которых зависят показатели качества информации.

В блоке 18 с привлечением математических моделей блоков 8, 9 и 10 осуществляется расчет разрешения на местности l_{PM} , точности привязки полученного на борту изображения района к местности $\delta_{ПР}$ и показателя геометрических искажений $\delta_{ИС}$ изображения. В блоке 19 рассчитанные значения показателей сравниваются с допустимыми и, если это требование не удовлетворяется, то осуществляется поиск новых значений варьируемых ТТХ. После того, как будут найдены значения ТТХ КА и целевой аппаратуры, обеспечивающие требуемые показатели качества съемки, осуществляется переход к блоку 20. В нем задаются значения фиксированных ТТХ системы ДЗЗ, которые необходимы для расчета показателя производительности и временных показателей. В блоке 21 осуществляется задание значений варьируемых (исследуемых) характеристик системы, которые участвуют в нахождении t_{OP} , $t_{OБН}$ и $n_{ПР}$. В блоке 22 производится расчет длительности сеанса наблюдения, который зависит от размеров

наблюдаемого района, способа накрытия района полем зрения целевой аппаратуры, орбитальной скорости КА. В блоке 23 с учетом характеристик поля зрения целевой аппаратуры, характеристик системы ориентации КА, а также высоты орбиты КА рассчитываются поля захвата и обзора при наблюдении.

В блоке 24 рассчитываются значения потока (скорости поступления) информации на входе накопителя q_{BX} и скорости передачи информации на ППИ c_{II} . В блоке 25 осуществляется собственно расчет временных показателей эффективности системы ДЗЗ t_{OP} , t_{OBN} , а также показателя производительности $n_{ПР}$. В блоке 26 рассчитанные значения показателей сравниваются с требуемыми и, если требования удовлетворяются, весь расчетный процесс завершается. Если же требования не удовлетворяются, то сначала проверяется условие нахождения варьируемых характеристик системы ДЗЗ в рамках ограничений (блок 27). Если есть запас по ограничениям на варьируемые ГТХ, то переходом в блок 21 выбираются новые их значения, и повторяется весь процесс расчета t_{OP} , t_{OBN} , $n_{ПР}$. Если же запас по ограничениям исчерпан, то можно попытаться изменением значений условно-фиксированных характеристик системы ДЗЗ (например, изменением высоты КА) добиться как удовлетворения требований по показателям качества, так и по временным показателям и производительности. В этом случае весь расчетный процесс повторяется, начиная с блока 16.

Методика определения стоимости проектирования МКА ДЗЗ. Стоимость орбитальной группировки системы ДЗЗ является одним из важнейших показателей, от которых зависит ее экономическая эффективность. В случае коммерческой системы ДЗЗ от нее непосредственно зависит прибыль, получаемая в процессе целевого функционирования. В связи с этим стоимость должна в той или иной форме учитываться в критерии оптимальности (10) при проектировании.

Для этапа проектирования системы ДЗЗ необходимы простые модели, которые бы, тем не менее, достаточно полно отражали зависимость стоимости системы от выходных ее характеристик, от основных проектных параметров, которые должны выбираться на этапе системного проектирования. Основным требованием выбора перспективного проекта оптимального варианта на предприятии является его технико-экономическая целесообразность. При рассмотрении создаваемого изделия на предмет его технико-экономического обоснования необходимо иметь представление о его техническом уровне, что особенно важно при сравнении альтернативных вариантов по методу «стоимость - эффективность».

Выходные технические параметры систем ДЗЗ на базе перспективных КА, характеризующие их технический уровень, оказывают существенное влияние на стоимостные показатели. Практика определения затрат по созданию средств ДЗЗ показывает, что улучшение технических параметров, в частности, использование новых технологий, переход к маломассогабаритным приборам и бортовым системам, негерметичному исполнению бортовой аппаратуры приводит к естественному возрастанию затрат на разработку и изготовление МКА ДЗЗ.

Следует отметить, что определение затрат на опытно-конструкторские работы (ОКР) и изготовление КА в зависимости от массы изделия, проводимое до сравнительно недавнего времени согласно разработанным межведомственным

методикам, в настоящее время представляется нецелесообразным. Расчет затрат на ОКР и изготовление современных наукоемких КА ДЗЗ в зависимости от его массы дает существенные отклонения от фактических значений, так как массовые характеристики не совсем точно реагируют на повышение технического уровня КА ДЗЗ (производительность, разрешение, полосу обзора, срок активного существования КА, оперативность доставки информации и т.д.), а также на изменение элементной базы, используемые технологии и материалы, применительно к маломассогабаритным изделиям.

В связи с этим, большую точность в расчетах обеспечивает метод определения затрат на создание системы ДЗЗ в зависимости от технического уровня КА. Использование этого метода приводит к необходимости обработки определенного объема статистических материалов, при этом находятся корреляционные зависимости, связывающие стоимостные показатели системы ДЗЗ с ее техническими параметрами. Предлагаемая методика предназначена для определения затрат на ОКР и изготовление маломассогабаритных КА ДЗЗ на стадиях: научно-исследовательских работ; разработки тактико-технического задания; разработки технических предложений; разработки эскизного проекта.

Под затратами на ОКР понимаются расходы в денежном выражении на выполнение всех мероприятий и работ, начиная с разработки технических предложений и заканчивая подготовкой эксплуатационной документации на образцы серийного производства МКА ДЗЗ, включая: технические предложения; эскизное проектирование; разработку рабочей документации; изготовление макетов; наземные испытания и корректировку рабочей документации; наземные комплексные и межведомственные испытания; летные испытания. В затраты на ОКР по созданию МКА ДЗЗ не включаются затраты на разработку наземного комплекса приема, обработки и распространения космической информации. В затраты на ОКР также не включаются капитальные вложения на развитие научно-исследовательской, проектно-конструкторской, испытательной и производственной баз.

Методика позволяет определять стоимостные показатели, предназначенные для решения основных задач: обоснования основных направлений развития ракетно-космической техники; разработки предложений в проекты программ развития средств космической техники ДЗЗ; разработки на ранних стадиях проектирования МКА ДЗЗ; обоснования лимитных цен на создание МКА ДЗЗ; проведения технико-экономических исследований в различных разрезах. Методика распространяется на МКА ДЗЗ следующих назначений: оптико-электронного наблюдения; радиолокационного наблюдения; метеорологии.

Методика разработана на базе анализа фактических и проектно-сметных данных по существующим и разрабатываемым МКА ДЗЗ и связи за период 1998 - 2008 годов. При разработке методик учитывались требования по их унификации, что нашло отражение как при формировании структуры затрат каждого стоимостного показателя, так и в содержании методики. Методика построена по единой структуре, включающей: стоимостной показатель; область применения методики; структуру затрат; перечень и структуру исходных данных, необходимых для расчетов; коэффициенты удорожания.

В качестве показателя точности в методике принято относительное среднеквадратическое отклонение фактических значений от значений, рассчитанных по эмпирическим зависимостям (в процентах). Методика не заменяет калькуляционно-сметных расчетов, выполняемых организациями-разработчиками МКА ДЗЗ. По мере накопления новых данных о затратах на МКА ДЗЗ методика подлежит периодической корректировке и уточнению.

Для расчета затрат на ОКР по созданию МКА требуется следующая исходная информация:

- целевое назначение МКА ДЗЗ (метеорологии, радиолокации, оптико-электронного наблюдения);
- облик МКА (масса МКА; масса платформы служебных систем; баллистические характеристики; масса целевой аппаратуры наблюдения; основные ТТХ специальной и служебной бортовой аппаратуры);
- степень унификации, т.е. насколько базовая платформа приспособлена для установки других типов аппаратуры наблюдения;
- сведения об удорожании разработки.

Затраты на ОКР по созданию МКА ДЗЗ на базе единой унифицированной платформы служебных систем ($C_{ОКР}$) предлагается определять по формуле:

$$C_{ОКР} = \left[3_{ОКР}^B + \sum_{i=1}^{n-1} (1 - K_{npi}) 3_{ОКР}^B + \sum_{i=1}^n 3_{окрi}^C \right] K_y \quad (13)$$

где: $3_{ОКР}^B$ - затраты на ОКР по созданию базовой унифицированной платформы служебных и обеспечивающих систем МКА, млн. руб.; $3_{окр}^C$ - затраты на ОКР по созданию целевой аппаратуры, млн.руб.; K_{npi} - коэффициент применяемости, характеризующий степень приспособленности базовой платформы служебных систем для установки целевой аппаратуры i -го типа без доработки (может принимать значения от 0 до 1 в зависимости от степени унификации базовой платформы служебных систем); K_y - коэффициент удорожания разработки МКА по отношению к ценам 2008 года; n - количество возможных типов аппаратуры наблюдения.

Коэффициент применяемости K_{np} определяется головным разработчиком экспертным путем. Его значение следует принимать равным: 1 - для унифицированных платформ, не требующих дополнительных доработок по установке других типов целевой аппаратуры; 0,9 ÷ 0,8 - для унифицированных платформ, требующих небольших доработок небольшой части обеспечивающих систем с улучшением технических характеристик по установке других типов аппаратуры наблюдения; 0,7 ÷ 0,5 - для унифицированных платформ, требующих доработок значительной части обеспечивающих систем по установке других типов целевой аппаратуры; 0,4 ÷ 0,2 - для унифицированных платформ, требующих доработок конструкции и значительной части обеспечивающих систем по установке других типов целевой аппаратуры.

Затраты на ОКР по созданию унифицированной платформы служебных и обеспечивающих систем МКА ДЗЗ определяются по следующей зависимости:

$$C_{ОКР}^B = K_t \cdot \bar{3} \cdot m, \quad (14)$$

где K_t - коэффициент, учитывающий увеличение стоимости ОКР по созданию

унифицированной платформы служебных систем за счет повышения конструктивно-технологической сложности МКА, применения более эффективных материалов и комплектующих изделий, ужесточения требований к наземной отработке; \bar{z} – удельная стоимость разработки унифицированной платформы служебных систем, $\frac{\text{млн.руб}}{\text{кг}}$ (удельная стоимость – $0,5 \frac{\text{млн.руб}}{\text{кг}}$); m – масса унифицированной платформы служебных систем (без целевой аппаратуры), кг. Значение коэффициента K_i определяется по формуле:

$$K_i = 1 + g (t_i - 2000), \quad (15)$$

где g – параметр, зависящий от целевого назначения МКА ДЗЗ (определяются эмпирически); t_i – год начала летных испытаний. Значение массы унифицированной платформы служебных систем имеет диапазон: $400 \text{ кг} \leq m \leq 1000 \text{ кг}$.

Методика определения затрат на изготовление МКА ДЗЗ. Для расчета затрат на изготовление МКА ДЗЗ на базе унифицированной платформы служебных систем требуется следующая информация: масса служебных систем платформы; массовая сводка состава и основные ТТХ аппаратуры платформы; масса целевой аппаратуры; сведения о наличии в составе платформы особо дорогостоящих комплектующих изделий и систем.

Затраты на изготовление *опытного образца* МКА на базе унифицированной платформы служебных систем определяются по формуле:

$$C_{\text{изг}i}^{\text{оп}} = K_{\text{СБ}} \left(\sum_{j=1}^L \bar{C}_j p_j + C_{\text{изг}i}^c \right), \quad (16)$$

где: $K_{\text{СБ}}$ – коэффициент, учитывающий затраты на сборку, испытания платформы служебных систем МКА, изготовление технологической оснастки, а также внепроизводственные расходы и начисления, $K_{\text{СБ}} = 1,25$; \bar{C}_j – удельная стоимость изготовления элементов платформы служебных систем МКА, $\frac{\text{млн.руб}}{\text{кг}}$; L – количество бортовых систем платформы; p_j – вес служебных систем платформы i -го типа, кг; $C_{\text{изг}i}^c$ – стоимость изготовления целевой аппаратуры i -го типа, млн. руб.

Стоимость производства *серийного образца* МКА на базе унифицированной платформы служебных систем с целевой аппаратурой i -го типа определяется через затраты на изготовление опытного образца МКА по следующей зависимости:

$$C \frac{c}{\text{изг.}} = D N^\alpha C_{\text{изг}i}^{\text{оп}}, \quad (17)$$

где D и α – статистические коэффициенты ($D = 0,8 - 0,9$; $\alpha = 0,2$); N – порядковый номер изделия.

Вторым методом затрат на изготовление серийного образца МКА ДЗЗ определяются по следующей зависимости

$$C \frac{c}{\text{изг.}} = C \frac{\text{оп}}{\text{изг.}} \cdot K_{\text{сер}j} \cdot N_j \eta, \quad (18)$$

где $C \frac{\text{оп}}{\text{изг.}}$ – стоимость изготовления опытного МКА ДЗЗ; $K_{\text{сер}j}$ – коэффициент,

выражающий соотношение затрат на первый серийный и опытный образцы МКА ДЗЗ ($K_{серj} = 0,90$); N_j - масштаб производства или программа выпуска МКА; η - коэффициент эластичности затрат по отношению к размеру изготовления МКА ($\eta = 0,12$).

Формула (18) используется при расчете затрат на серийное изготовление МКА ДЗЗ, по которым выполнялись ОКР и имеются данные по величине $C \frac{оп}{изг}$.

В данной главе работы приведен пример расчета затрат на ОКР по созданию МКА ДЗЗ по предложенным методикам. Аналогичные расчеты были проведены для каждого исследуемого в следующей главе проектного варианта системы ДЗЗ, принимая во внимание удовлетворение ограничений по стоимости в (10).

В третьей главе определяется облик космической системы ДЗЗ на базе МКА путем проведения сравнительного анализа приведенных ниже проектных вариантов построения орбитальной группировки и определения предпочтительного из них в соответствии с предложенной методикой.

Проектный вариант системы 1.

Рассматриваются два способа орбитального построения системы: система 1-го этапа, включающая существующий тяжелый КА «Метеор-3М №1» и МКА «Монитор-Э», и система 2-го этапа, которая подразумевает наращивание орбитальной группировки МКА серии «Монитор».

При расчетах рассматривался обобщенный показатель эффективности (12), учитывающий (6), (7), а также надежность функционирования КА на орбите

$$P_{\Sigma} = P_B(t_M)P_{оп}(t_{оп} < T^*) \quad (19)$$

Первый сомножитель $P_B(t_M)$ характеризует вероятность безотказной работы КА системы ДЗЗ на выбранном интервале моделирования. В работе показано, что в середине срока активного существования рассматриваемых КА $P_B(t_M) = 0,95$. Второй сомножитель $P_{оп}(t_{оп} < T^*)$ характеризует оперативность наблюдения заданного района системой, то есть вероятность того, что информация о заданном районе будет получена за время $t_{оп}$ не более заданного T^* .

Оценка вероятности $P_{оп}(t_{оп} < T^*)$ проводилась по изложенной выше методике. Моделирование по рассматриваемому проектному варианту проводилось при следующих исходных данных и допущениях:

1) Орбитальные параметры группировки: КА «Метеор-3М №1»: - высота орбиты – 1018 км; - наклонение – 99,63°, солнечно-синхронная орбита (ССО); КА «Монитор-Э»: - высота орбиты – 542 км; - наклонение – 97,54° (ССО); Местное солнечное (абсолютное) время прохождения экватора: для КА «Метеор-3М № 1» - 9 ч. 30 ±20 мин в восходящем узле; для КА «Монитор-Э» - 10 ч. 30 ±20 мин в нисходящем узле.

2) Район съемки для расчетного случая $\varphi_p = 52,72$; $\lambda_p = 110,17$.

3) Место расположения ППИ - г. Москва, разрешенный угол радиовидимости ППИ при сбросе ЦИ - $\geq 7^\circ$.

4) Условия наблюдения: 23.03.2009 г. Угол Солнца при съемке $> 10^\circ$.

5) Полоса обзора КА: КА «Монитор-Э» - 860 км (макс.); КА «Метеор-3М № 1» - 1280 км (макс.). Считалось, что размеры объекта наблюдения много меньше полосы обзора.

6) Команда на съемку района может поступить любому КА, если он находится в зоне радиовидимости (ЗРВ) Центра управления полетами (ЦУП). В модели принято допущение, что полетное задание (ПЗ) закладывается на борт КА при нахождении его в ЗРВ ЦУПа не менее 3-х минут. Координаты ЦУПа – г.Королев Московской области, Российская Федерация, угол видимости - $\geq 7^\circ$.

7) Объект считается снятым, если он попадает в полосу обзора любого из КА и при этом наклонная дальность съемки минимальна (поле зрения аппаратуры наблюдения направлено поперек плоскости орбиты).

8) Информация считается переданной на ППИ, если КА находится в зоне ППИ не менее 3-х минут. В противном случае КА уходит на следующий виток.

9) Время съемки района - не более 30 с.

С учетом изложенного, время $t_{оп}$ в каждой реализации модели определялось суммой времен:

$$t_{оп} = t_{задЦУП} + t_{ПЗ} + t_{задНР} + t_c + t_{задППИ} + t_{пер} \quad (19)$$

где $t_{задЦУП}$ - время задержки на подлет КА к ЗРВ ЦУП; $t_{ПЗ}$ - время передачи ПЗ в зоне радиовидимости ЦУП (считается, что ПЗ передается в течение пролета всей ЗРВ); $t_{задНР}$ - время задержки на подлет к наблюдаемому району; t_c - время съемки района; $t_{задППИ}$ - время задержки на подлет к ЗРВ ППИ; $t_{пер}$ - время передачи ЦИ на ППИ (полагается, что информация передается в течение пролета всей ЗРВ ППИ).

Время обработки целевой информации на ППИ и передачи ее потребителю в модели не учитывается. Общее количество реализаций модели для каждого расчетного случая составило 200.

Результаты моделирования для рассматриваемого варианта орбитальной группировки системы ДЗЗ приведены на рис.3, 4.

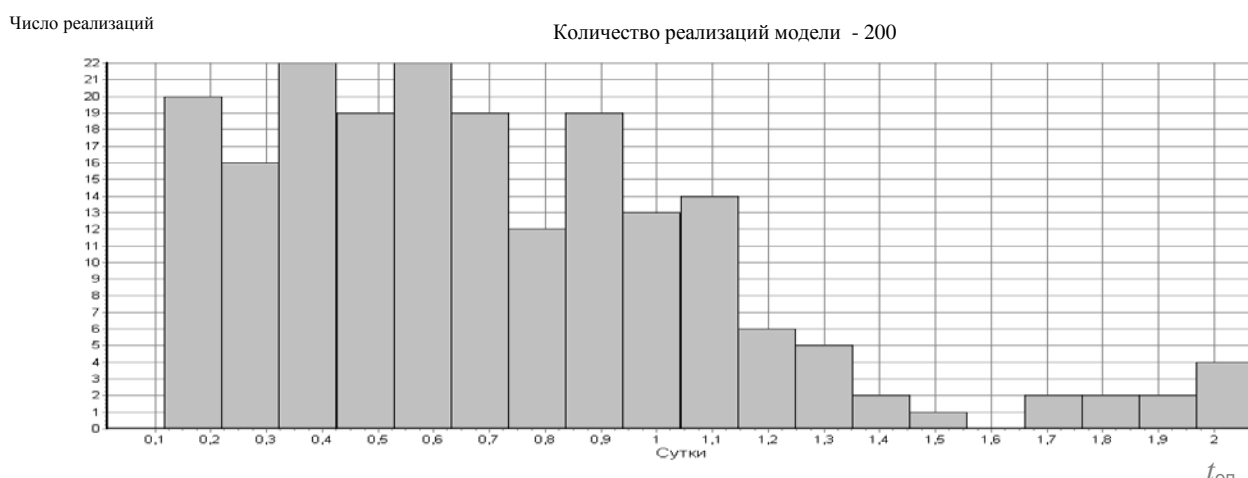


Рис.3. Гистограмма плотности распределения $t_{он}$ для системы ДЗЗ с КА «Метеор-3М № 1» и «Монитор-Э»

Здесь показаны гистограмма $\varphi(t_{оп})$ распределения $t_{оп}$ и функция вероятности $P_{оп}(t_{оп})$, построенная по данной гистограмме. Как видно из рис.4 с вероятностью $P_{оп} = 0,9$ оперативность наблюдения системой ДЗЗ заданного района $t_{оп}$ не превысит $T^* = 1,2$ суток, а с вероятностью $P_{оп} = 0,95$ не превысит $T^* = 1,5$ суток. Общая эффективность выполнения задачи оперативного наблюдения с учетом указанной выше надежности КА составит $P_{\Sigma} = 0,85$ для $t_{оп} \leq T^* = 1,2$ суток, $P_{\Sigma} = 0,9$ для $t_{оп} \leq T^* = 1,5$ суток.

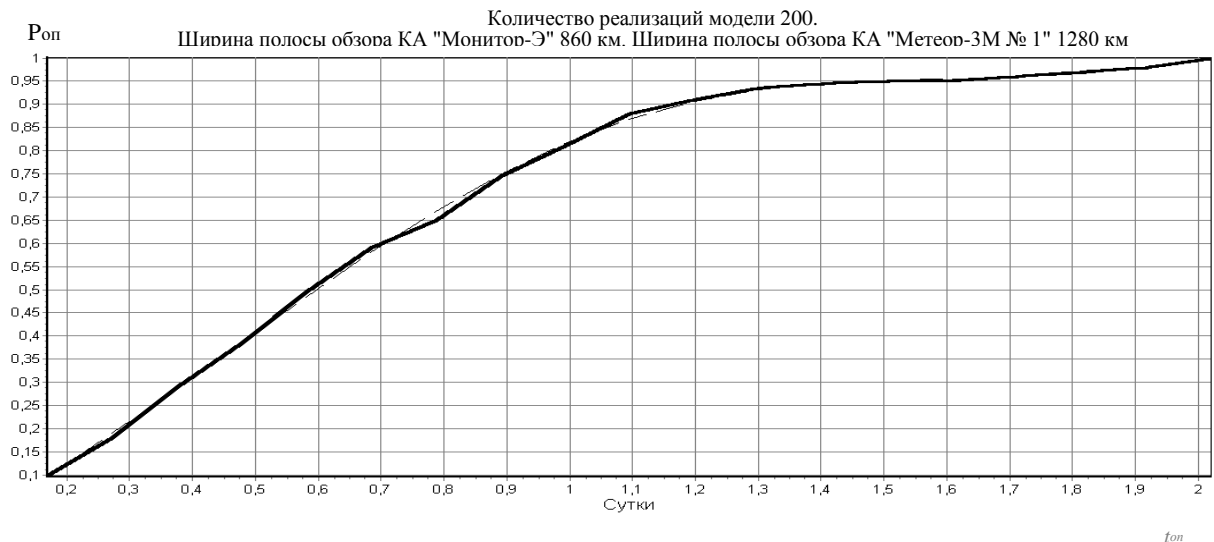


Рис.4. Функция вероятности распределения $t_{оп}$ для системы ДЗЗ с КА «Метеор-3М № 1» и «Монитор-Э»

Для сравнения были проведены также расчеты показателя оперативности наблюдения только в составе одного КА «Метеор-3М № 1» либо одного КА «Монитор-Э». Итоговые результаты расчетов сведены в таблицу 1.

Таблица 1. Сравнительные результаты моделирования по оперативности наблюдения

КА	T*, сут		
	«Метеор-3М № 1» + «Монитор-Э»	«Метеор-3М №1»	«Монитор-Э»
0,85	1,2	1,75	5,7
0,9	1,5	1,9	6,3

Как видно из таблицы 1, группировка КА в составе «Метеор-3М № 1» и «Монитор-Э» обеспечивает (при той же вероятности выполнения целевой задачи) оперативность наблюдения почти в 1,5 раза выше по сравнению с оперативностью наблюдения только КА «Метеор-3М № 1» и почти в 5 раз выше по сравнению с оперативностью наблюдения только КА «Монитор-Э».

Одновременно с расчетом оперативности были проведены оценки производительности и периодичности наблюдения системой ДЗЗ. Под производительностью системы понималось время t_n , в течение которого заданный район на Земле покрывается полностью полосой захвата аппаратуры КА «Метеор-3М № 1» или «Монитор-Э» хотя бы один раз. В качестве примера был выбран Ханты-Мансийский автономный округ Российской Федерации, границы которого по широте и долготе составляют $\varphi_1 = 58,56^\circ$ с.ш.; $\varphi_2 = 5,68^\circ$ с.ш.; $\lambda_1 = 59,2^\circ$ в.д.; $\lambda_2 = 85,2^\circ$ в.д. Результаты статистического моделирования для состава группировки «Метеор-3М № 1» + «Монитор-Э»; «Метеор-3М № 1»; «Монитор-Э» приведены на рис.5, 6. В качестве полосы захвата аппаратуры КА «Монитор-Э»

была принята полоса захвата, равная ~ 160 км. В данном расчете предполагалось, что съемка – плановая, и производится в надир. При необходимости, может быть рассчитан и обобщенный показатель эффективности (12) с учетом надежности функционирования КА системы ДЗЗ.

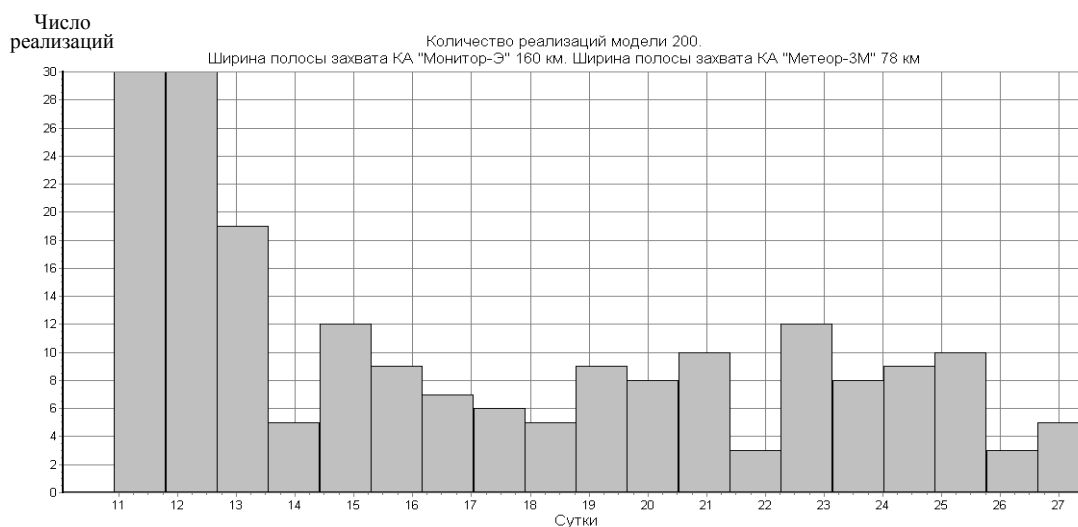


Рис.5. Гистограмма плотности распределения t_n для системы ДЗЗ с КА «Метеор-3М № 1» и «Монитор-Э»

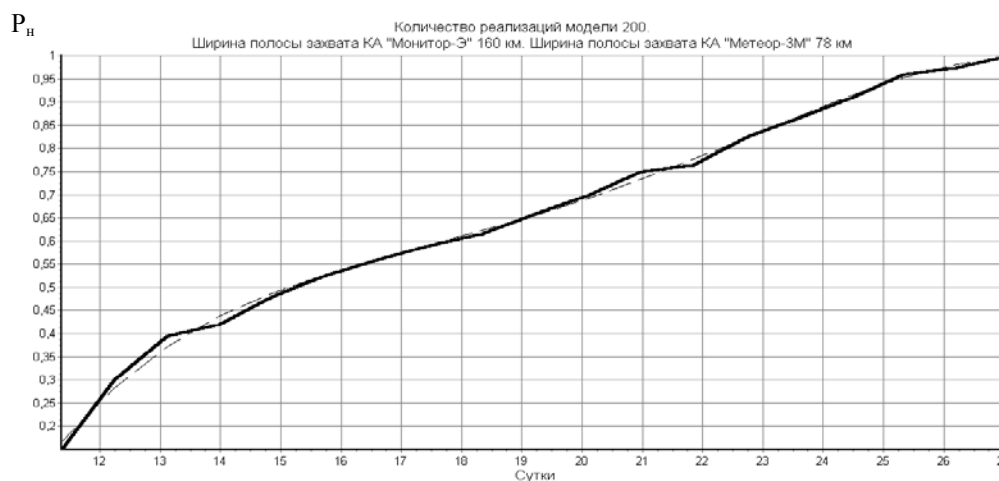


Рис.6. Функция вероятности распределения t_n для системы ДЗЗ с КА «Метеор-3М № 1» и «Монитор-Э»

Оценка эффективности системы ДЗЗ по показателю периодичности наблюдения была проведена для случая наблюдения того же района, что и при оценке оперативности наблюдения. Оценка производилась для случая объектовой съемки, т.е. с возможностью перенацеливания полосы захвата в полосе обзора (при этом учитывалось, что при плановой съемке и узкой полосе захвата периодичность наблюдения близка к периоду изомаршрутности) методом имитационного моделирования с соответствующим осреднением на временном интервале результатов, представленных на рис.3, 4 и таблице 1. Результаты расчетов по периодичности наблюдения даны в таблице 2.

Как видно из таблицы 2, при наличии в составе системы ДЗЗ из КА «Метеор-3М №1» и «Монитор-Э» периодичность наблюдения уменьшается почти в

1,7 раза по сравнению с одним КА «Метеор-3М № 1» и почти в 2,3 раза по сравнению с одним КА «Монитор-Э».

Таблица 2. Сравнительные результаты моделирования по периодичности наблюдения

Состав системы ДЗЗ	Среднее значение $t_{обл}$, сут
«Метеор-3М № 1» + «Монитор-Э»	0,74
«Метеор-3М № 1»	1,25
«Монитор-Э»	1,745

Проектный вариант системы 2.

Рассматривается система ДЗЗ на базе 5 МКА. Высота орбит КА - 607 км, наклонение орбит – 97,7924 градусов. Наблюдению (мониторингу) подлежат территории Тверской, Калужской и Архангельской областей Российской Федерации. В данном случае рассматривается задача в детерминированной постановке, т.е. параметры орбитальной группировки КА предполагаются заданными, неслучайными, что является частным случаем по отношению к выше рассмотренной задаче. Поэтому проводится моделирование с одной реализацией процесса целевого функционирования системы ДЗЗ.

В одном из случаев орбитальное построение системы – 5 солнечно-синхронных орбит, отстоящих на 5 градусов по долготе восходящего узла. Результаты моделирования на временном интервале 2 суток представлены на рис.7,8.

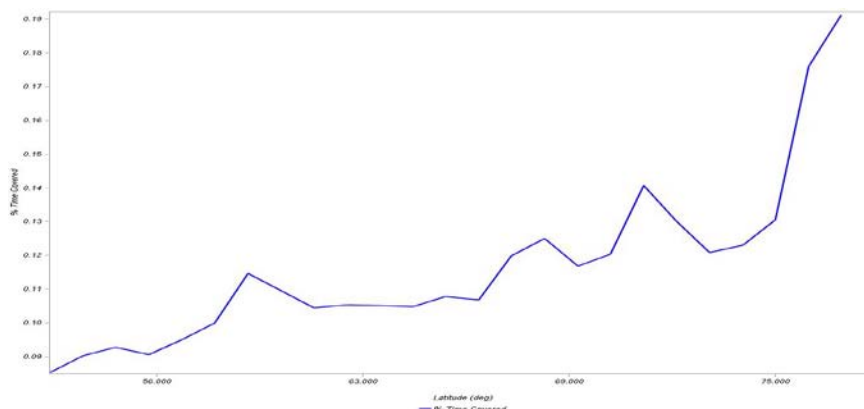


Рис.7. Зависимость доли времени наблюдения географической широты (в %) от суммарного времени наблюдения заданной территории (в диапазоне от 53 до 77 градусов северной широты)

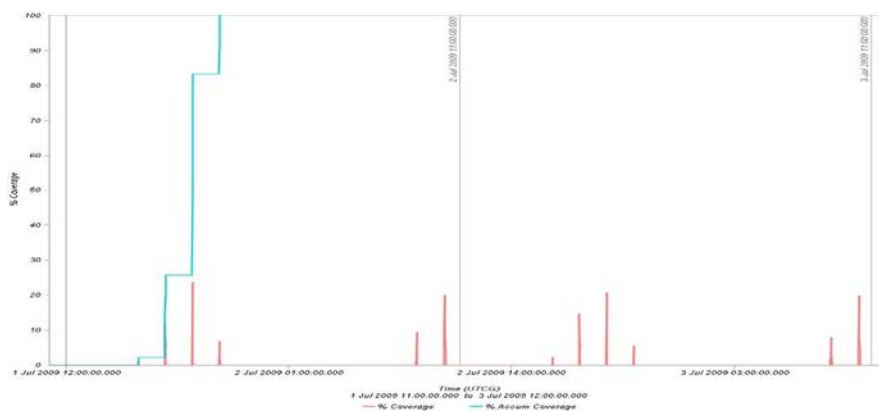


Рис.8. Зависимость доли площади наблюдаемой территории (в % от общей площади заданной территории) от продолжительности временного интервала моделирования (красная линия – непосредственно доля наблюдаемой площади в моменты времени, голубая линия – площадь отснятой территории в % от общей площади)

Анализ зависимостей на рис.7,8 показывает, что рассматриваемая система ДЗЗ способна снять любую точку из трех наблюдаемых районов через 12 часов с момента начала съемки.

В работе также рассмотрены и иные варианты построения орбитальных группировок системы ДЗЗ, дан сравнительный анализ их целевого функционирования по показателям, указанным на рис.7,8. Результаты представлены в таблице 3, которая позволяет видеть, что наиболее предпочтительным является Вариант 2 орбитального построения системы, близким к нему – Вариант 4.

Таблица 3. Сравнительные результаты моделирования

Варианты орбитального построения системы ДЗЗ	Показатели эффективности		
	Минимально необходимое время для полного покрытия заданной территории	Периодичность наблюдения	Время наблюдения заданной территории
<u>Вариант 1.</u> 5 орбит	12 часов	26 часов	Мин. – 8% Макс. – 19 %
<u>Вариант 2.</u> 1 орбита	7 часов	24 часа	Мин. – 8% Макс. – 29 %
<u>Вариант 3.</u> 2 плоскости (3 и 2 орбиты)	48 часов	48 часов	Мин. – 6,5% Макс. – 27 %
<u>Вариант 4.</u> 2 орбиты (3 и 2 спутника)	24 часа	26 часов	Мин. – 7,4% Макс. – 28 %
<u>Вариант 5.</u> 2 орбиты (3 и 2 спутника)	24 часа	28 часов	Мин. – 6,3% Макс. – 23,5 %

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В результате проведенных в работе исследований решена актуальная научно-техническая задача разработки комплексной методики анализа эффективности систем ДЗЗ на базе МКА. Получены следующие основные научные и практические результаты, прошедшие апробацию на реальных проектах ДЗЗ на базе МКА:

1. Разработана комплексная методика анализа эффективности систем ДЗЗ по различным показателям (оперативности наблюдения; периодичности наблюдения; производительности; времени наблюдения заданной территории), включая расчет стоимости проектирования и затрат на изготовление МКА ДЗЗ.

2. Разработано программно-методическое обеспечение для проведения имитационного моделирования процесса целевого функционирования систем ДЗЗ с различными вариантами построения орбитальных группировок.

3. Проведен сравнительный анализ некоторых орбитальных группировок ДЗЗ и даны рекомендации по созданию соответствующих систем ДЗЗ:

- КА «Метеор-3М №1» и «Монитор-Э» в различных комплектациях;
- проектируемых микроспутников, предназначенных для мониторинга территории Российской Федерации.

4. Проведен анализ состояния и определены основные тенденции развития отечественных и зарубежных космических средств ДЗЗ на базе МКА.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Панфилов А.С., Глазкова И.А. Оценка точности предполетной радиометрической калибровки оптико-электронной съемочной аппаратуры видимого и ближнего ИК-диапазонов спектра // Исследование Земли из космоса. – 2003, № 5. - С.43-50.
2. Глазкова И.А., Юрченко Б.А., Седельников В.П., Лукашевич Е.Л. Использование детальной цифровой космической информации в интересах Роскартографии. (первый отечественный опыт – космический аппарат «Монитор») // Геодезия и картография. – 2006, № 4. – С.42-48.
3. Малышев В.В., Глазкова И.А., Дарнопых В.В. Оценка эффективности функционирования перспективной системы микроспутников ДЗЗ методом имитационного моделирования // Вестник МАИ. – т.16, № 6, 2009. – С.125-134.
4. Глазкова И.А. Анализ опыта создания космических систем дистанционного зондирования Земли на базе малых космических аппаратов и тенденции развития российской космической промышленности в этой области // Космонавтика и ракетостроение. – 2010, № 2 (в печати).
5. Глазкова И.А. Программа дистанционного зондирования Земли «Монитор» // Тез. докл. V-ого Международного симпозиума по малым космическим аппаратам. Франция, Ля Боль: изд-во Французского космического агентства. - 2000.
6. Глазкова И.А., Юрченко Б.А. Система дистанционного зондирования Земли ГКНПЦ им. М.В.Хруничева» // Тез. докл. III-его Международного симпозиума Международной академии астронавтики (IAA). - Германия, Берлин. - 2001.
7. Глазкова И.А. Космическая система ДЗЗ «Монитор», участие в Глобальной системе мониторинга окружающей среды и безопасности – GMES // Сб.тр. Симпозиума «Космическая промышленность России и Украины в XXI веке». Франция, Париж. - 2001.
8. Глазкова И.А. Космическая система дистанционного зондирования Земли ГКНПЦ им. М.В.Хруничева на базе малых космических аппаратов // Тез. докл. II-ой Международной конференции «Малые спутники. Новые технологии, миниатюризация. Области эффективного применения в XXI веке». Московская область, Королев: ГОНТИ ЦНИИМаш. - 2002.
9. Глазкова И.А. Система дистанционного зондирования Земли «Монитор» // Тез. докл. Всероссийской конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов». Москва - 2003.
10. Глазкова И.А., Шкарин В.Е., Стефанский М.А. Развитие программы дистанционного зондирования Земли ГКНПЦ им. М.В.Хруничева // Тез. докл. I-ой Международной конференции «Земля из космоса – наиболее эффективные решения». Москва. - 2003.
11. Глазкова И.А., Михеев О.В., Панфилов А.С. и др. Малый космический аппарат ДЗЗ «Монитор-Э» и дальнейшее развитие аппаратов этого типа // Тез. докл. IV-ой Международной конференции «Малые спутники. Новые технологии, миниатюризация. Области эффективного применения в XXI веке». Московская область, Королев: ГОНТИ ЦНИИМаш. - 2004.
12. Глазкова И.А., Михеев О.В., Панфилов А.С. и др. Малый космический аппарат дистанционного зондирования Земли «Монитор-Э» разработки ГКНПЦ им. М.В.Хруничева и создание орбитальной группировки на его основе // Тез. докл. 9-й Междун. конф. «Системный анализ и управление космическими комплексами». М.: МАИ, 2004. С.76-77.
13. Глазкова И.А. Новый российский космический аппарат дистанционного зондирования Земли «Монитор-Э // Тез. докл. II-ой Международной конференции «Земля из космоса – наиболее эффективные решения». Москва. – 2005.
14. Глазкова И.А., Михайлов Е.В., Горохова М.А. Основные направления использования космической информации, получаемой с космического аппарата «Монитор-Э» // Сб. тр. 31-ого Международного симпозиума по дистанционному зондированию Земли. Санкт-Петербург. - 2005.
15. Глазкова И.А., Артамонов А.А. Опыт целевого применения КА «Монитор-Э» и перспективные разработки МКА ДЗЗ ГКНПЦ им. М.В.Хруничева // Тез. докл. IV-ой Международной конференции «Аэрокосмические методы и геоинформационные технологии в лесоведении и лесном хозяйстве. Москва. - 2007.